



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ESTUDIO COMPARATIVO DE LA SOLDABILIDAD DEL HIERRO
FUNDIDO NODULAR, SOLDADO CON MATERIAL DE APORTE
PARA ACERO INOXIDABLE AWS E 312-16 Y PARA HIERRO
NODULAR AWS E NiFe-CI, MEDIANTE EL PROCESO SMAW**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

LOACHAMIN ANASI LUIS FERNANDO

luis.loachamin@epn.edu.ec

PÉREZ GÓMEZ WASHINGTON GERMÁN

washington.perez@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. DÍAZ CAMPOVERDE CARLOS WIME, M.Sc.

carlos.diaz@epn.edu.ec

COLABORADOR: ING. VELASTEGUÍ GABRIEL, M.Sc.

gabriel.velastegui@epn.edu.ec

Quito, octubre de 2018

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **LUIS FERNANDO LOACHAMIN ANASI & WASHINGTON GERMÁN PÉREZ GÓMEZ**, bajo mi supervisión.

Ing. Carlos Díaz

DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, **Luis Fernando Loachamin Anasi & Washington Germán Pérez Gómez**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Luis Fernando Loachamin Anasi

Washington Germán Pérez Gómez

DEDICATORIA

Después de un largo proceso de lucha, constancia y dedicación en la Poli, estoy llegando a culminar una meta planteada varios años atrás, este logro que está por llegar va dedicado para una persona muy especial para mí y que lamentablemente no le alcanzo el tiempo para compartir junto a toda la familia esta etapa de mi vida, esto es para ti **“Papá”**.

Me hubiese dado mucha felicidad tenerte aun entre nosotros, pero Dios tenía preparado otros planes, desde donde te encuentres gracias por cuidarnos hasta el último momento, te quiere con todo su corazón, tu hijo **Fercho**.

PDTA: Yo cuidare de la familia como usted hubiese querido que lo haga, hasta pronto Papá Manuel.

Luis Fernando Loachamin

DEDICATORIA

A la persona más importante en mi vida, mi madre Beatriz, quien supo guiarme y brindarme todo su apoyo a lo largo de mi carrera estudiantil.

A mi querido abuelo Alipio Pérez y a Milton Pérez que, a pesar de que ya no se encuentran físicamente a mi lado, fueron un pilar muy importante en mi vida y por siempre los llevaré en mi corazón.

Washington Germán Pérez

AGRADECIMIENTO

A Dios, porque gracias a su bendición y voluntad pude llegar hasta donde estoy.
A mi abuelita Virginia, mi madre Rosita, mis herman@s, Blanca, Soledad, Miguel, y
Carmen, por el apoyo que cada uno me ha brindado.

A mis cuñad@s Edwin y Sandra que forman parte de la familia y de este proceso.
A los profes, Víctor Guerrero y Nelly Rosas, por brindarme su apoyo emocional en
una etapa crucial en mi vida.

Al Ing. Carlos Díaz, por guiarnos en este proyecto.

Al Ing. Gabriel Velastegui por apoyarnos en el tema propuesto.

Al amigo “Big Welder” Jorge Guzmán, por el apoyo en los trabajos prácticos de
soldadura.

A mis amig@s que fui encontrando a lo largo de este trayecto, *Cristian S., Mario R., Jonathan H., Belén L., Marju T., Monse, Nathy, Mery, Jessy y Amy*, gracias por brindarme su amistad y sobre todo por compartir lo más valioso que una persona puede entregar, su tiempo.

A mi compañero tesista Germán, por ayudarme a trabajar en este proyecto.

En fin, agradezco a todas las personas que forman parte de mi vida.

Luis Fernando Loachamin

AGRADECIMIENTO

A Dios y a la Santísima Virgen del Cisne, por darme la sabiduría y las fuerzas necesarias para superar todas las etapas difíciles que se han presentado a lo largo de mi carrera y de mi vida.

A mi madre Beatriz, por ser mi principal motivación y por ayudarme a nunca darme por vencido ante las distintas adversidades, muchas gracias por estar siempre a mi lado dándome ánimos en los duros momentos que nos tocó pasar.

A mi tío Wilian, gracias por estar siempre presente con tu apoyo y ayuda en las diferentes etapas de mi vida.

A mis hermanos, Diego y Alipio Jr., gracias por su incondicional apoyo.

Al Ing. Carlos Díaz, un especial agradecimiento por su excelente labor como tutor del presente trabajo de titulación, gracias por compartir sus valiosos conocimientos durante todo el desarrollo de la investigación.

Al Ing. Gabriel Velastegui, gracias por ser parte fundamental en el planteamiento, desarrollo y culminación de este trabajo.

A Jorge Guzmán, gracias por su buena predisposición para colaborar en la parte técnica de la soldadura.

A mi compañero de tesis Luis Loachamin, con quién se logró formar un excelente equipo de trabajo logrando siempre buscar las mejores soluciones y alternativas para el buen desarrollo del trabajo de titulación.

A mi gran amigo Luis Orquera, que, si bien, no logramos culminar esta meta como lo planificamos, sé que estás siguiendo tus propios sueños, buscando como siempre la felicidad, muchas gracias hermanito por tu amistad y por tus consejos.

A todos mis amigos, en especial a Daniel S., César A., Gabriel T., David V., gracias por su valiosa amistad.

Washington Germán Pérez

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN.....	i
DECLARACIÓN.....	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	v
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT	xvi
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos.....	3
1. MARCO TEÓRICO	4
1.1. Hierro fundido.....	4
1.1.1. Características principales	4
1.1.2. Diagrama hierro - grafito	4
1.1.3. Clasificación.....	5
1.1.3.1. Hierro fundido gris	5
1.1.3.2. Hierro fundido blanco	6
1.1.3.3. Hierro fundido maleable	7
1.1.3.4. Hierro fundido nodular	7
1.1.4. Microconstituyentes del hierro fundido	8
1.1.4.1. Ferrita.....	8
1.1.4.2. Cementita.....	9
1.1.4.3. Perlita	9
1.1.4.4. Grafito	9
1.1.4.5. Steadita.....	9
1.1.4.6. Sorbita.....	9
1.1.4.7. Ledeburita	10
1.1.5. Principales usos en el ámbito nacional	10
1.2. Soldabilidad del hierro fundido nodular	10
1.2.1. Clasificación de la soldabilidad	10
1.2.1.1. Soldabilidad metalúrgica	10
1.2.1.2. Soldabilidad operativa	11
1.2.1.3. Soldabilidad constructiva.....	11
1.2.2. Problemas en la soldabilidad de las fundiciones	11
1.2.2.1. Problemas principales en la soldabilidad de las fundiciones.....	11
1.2.2.2. Problemas secundarios en la soldabilidad de las fundiciones.....	12

1.2.3.	Métodos para controlar los problemas de soldabilidad según la AWS	12
1.2.3.1.	Ensayo de soldabilidad.....	12
1.2.3.1.1.	Primera serie	13
1.2.3.1.2.	Segunda serie.....	14
1.2.3.1.3.	Tercera serie	14
1.2.3.1.4.	Procedimiento de prueba.....	14
1.2.3.2.	Cálculo del carbono equivalente.....	15
1.3.	Soldadura por arco de metal protegido (SMAW)	17
1.3.1.	Definición.....	17
1.3.2.	Variables principales.....	18
1.3.2.1.	Corriente de soldadura.....	18
1.3.2.2.	Voltaje generado en el arco.....	18
1.3.2.3.	Velocidad de soldadura.....	19
1.3.3.	Capacidades y limitaciones del proceso	20
1.3.3.1.	Ventajas	20
1.3.3.2.	Limitaciones	21
1.3.4.	Tipos de electrodos.....	21
1.3.4.1.	Electrodos de acero resistente a la corrosión	22
1.3.4.2.	Electrodos de hierro colado.....	22
1.3.5.	Aplicaciones del proceso SMAW	24
2.	METODOLOGÍA.....	25
2.1.	Caracterización del material base.....	25
2.1.1.	Composición química.....	25
2.1.1.1.	Probeta utilizada.....	25
2.1.1.2.	Características del equipo utilizado	26
2.1.1.3.	Procedimiento	26
2.1.2.	Metalografías del material base previo a la soldadura	26
2.1.2.1.	Probetas utilizadas en el ensayo	27
2.1.2.2.	Equipos utilizados en el ensayo	27
2.1.2.3.	Procedimiento del ensayo	28
2.1.3.	Dureza del material base	30
2.1.3.1.	Probetas utilizadas en el ensayo	30
2.1.3.2.	Equipos utilizados en el ensayo	30
2.1.3.3.	Procedimiento del ensayo	31
2.2.	Determinación de la temperatura de precalentamiento.....	31
2.2.1.	Probetas utilizadas.....	31
2.2.2.	Características de los equipos utilizados	32

2.2.3.	Procedimiento.....	34
2.2.3.1.	Proceso de maquinado.....	34
2.2.3.2.	Proceso de soldadura de las barras	35
2.3.	Soldadura de placas.....	37
2.3.1.	Placas utilizadas	37
2.3.2.	Electrodos utilizados	37
2.3.3.	Equipo de soldadura para el proceso SMAW.....	39
2.3.4.	Procedimiento para realizar la soldadura de las placas	39
2.4.	Ensayos realizados	40
2.4.1.	Ensayos no destructivos	40
2.4.1.1.	Inspección visual	41
2.4.1.1.1.	Probetas utilizadas	41
2.4.1.1.2.	Herramienta utilizada.....	41
2.4.1.2.	Tintas penetrantes.....	42
2.4.1.2.1.	Probetas utilizadas	42
2.4.1.2.2.	Material utilizado.....	42
2.4.1.2.3.	Procedimiento.....	42
2.4.1.3.	Radiografía industrial	44
2.4.1.3.1.	Probetas utilizadas	44
2.4.1.3.2.	Equipos utilizados.....	44
2.4.2.	Ensayos destructivos	44
2.4.2.1.	Metalografías	45
2.4.2.1.1.	Micrografías.....	45
2.4.2.1.1.1.	Probetas utilizadas	45
2.4.2.1.1.2.	Equipos utilizados en el ensayo	46
2.4.2.1.1.3.	Procedimiento	46
2.4.2.1.2.	Macrografías.....	47
2.4.2.2.	Dureza	47
2.4.2.3.	Tracción	47
2.4.2.3.1.	Probetas utilizadas	47
2.4.2.3.2.	Equipos utilizados.....	48
2.4.2.3.3.	Procedimiento.....	49
2.4.2.4.	Doblado.....	50
2.4.2.4.1.	Probetas utilizadas	50
2.4.2.4.2.	Equipos utilizados	51
2.4.2.4.3.	Procedimiento.....	51
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	53

3.1.	Resultados para la caracterización del material base	53
3.1.1.	Composición química.....	53
3.1.2.	Metalografías del material base	54
3.1.3.	Dureza del material base	55
3.1.4.	Tracción del material base	56
3.2.	Resultados del ensayo de soldabilidad para determinar la temperatura de precalentamiento	57
3.3.	Resultados de la soldadura de las placas.....	62
3.4.	Resultados de los ensayos realizados en las placas soldadas	62
3.4.1.	Resultados de los ensayos no destructivos	63
3.4.2.	Resultados de los ensayos destructivos de las juntas soldadas.....	65
3.4.2.1.	Macrografías	65
3.4.2.2.	Resultados de micrografías para la junta soldada con M.A. AWS E 312-16	67
3.4.2.3.	Resultados de micrografías para la junta soldada con M.A. AWS E NiFe-Cl	70
3.4.2.4.	Macro durezas	71
3.4.2.5.	Micro dureza	73
3.4.2.6.	Tracción	74
3.4.2.7.	Doblado.....	77
3.5.	Discusión de la caracterización del material base	80
3.5.1.	Comportamiento mecánico del material base	80
3.5.2.	Comportamiento químico – metalúrgico del material base	80
3.6.	Discusión de la temperatura de precalentamiento	83
3.7.	Discusión de la soldadura de las placas	85
3.8.	Discusión de los ensayos realizados en las placas	86
3.8.1.	Discusión de los ensayos no destructivos de la junta soldada	86
3.8.2.	Discusión de los ensayos destructivos de la junta soldada	86
3.8.2.1.	Comportamiento metalúrgico.....	86
3.8.2.2.	Comportamiento mecánico.....	90
3.9.	Discusión de la fisura generada en la junta soldada con material de aporte para acero inoxidable AWS E312-16	94
3.10.	Discusión de la soldabilidad del hierro fundido nodular al ser soldado con los dos tipos de electrodos (AWS E 312-16 y AWS E NiFe-Cl)	98
4.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	101
4.1.	Conclusiones.....	101
4.2.	Trabajos futuros	102
	Referencias Bibliográficas	104
	Anexos	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Diagrama Hierro – Grafito.....	5
Figura 1.2. Hierro fundido gris con aumento 100x.....	6
Figura 1.3. Hierro fundido blanco.....	6
Figura 1.4. Hierro fundido maleable con aumento de 100x.....	7
Figura 1.5. Hierro fundido nodular con matriz ferrítica, aumento 100x.....	8
Figura 1.6. Bloque de prueba para hierro gris y dúctil.....	13
Figura 1.7. Relación entre el CE Vs temperatura sin grietas para fundiciones de hierro de varios grados.....	16
Figura 1.8. Elementos típicos de un circuito del proceso SMAW.....	17
Figura 1.9. Efectos del amperaje, la longitud y la velocidad de recorrido al soldar.....	20
Figura 2.1. Lupa utilizada para la inspección visual.....	41
Figura 2.2. Kit Met-L-Check para el ensayo de tintas penetrantes.....	42
Figura 2.3. Máquina de corte con hilo de tungsteno.....	46
Figura 3.1. Probeta del material base (MBT1) utilizada en el ensayo de tracción.....	56
Figura 3.2. Probeta del material base (MBT1) utilizada en el ensayo de tracción.....	57
Figura 3.3. Macrografía de la fisura transversal en el cordón de respaldo de la junta soldada con M.A. AWS E 312-16 (Magnificación 1,6X).....	65
Figura 3.4. Macrografía de la junta soldada con M.A. AWS E 312-16 (Magnificación 0,4X).....	66
Figura 3.5. Macrografía de la junta soldada con M.A. AWS E NiFe-Cl (Magnificación 0,4X).....	66
Figura 3.6. Microdureza de la probeta con fisura de la junta soldada con M.A. AWS E 312-16.....	73
Figura 3.7. Microdureza de la probeta sin fisura de la junta soldada con M.A. AWS E 312-16.....	74
Figura 3.8. Probeta normalizada para tracción (T1-AI) soldada con M.A. AWS E 312-16.....	75
Figura 3.9. Probeta normalizada para tracción (T2-AI) soldada con M.A. AWS E 312-16.....	75
Figura 3.10. Probeta normalizada para tracción (T1-NI) soldada con M.A. AWS E NiFe-Cl.....	76
Figura 3.11. Probeta normalizada para tracción (T2-NI) soldada con M.A. AWS E NiFe-Cl.....	76
Figura 3.12. Doblado de cara de la probeta soldada con M.A. AWS E 312-16.....	78
Figura 3.13. Doblado de raíz de la probeta soldada con M.A. AWS E 312-16.....	78
Figura 3.14. Doblado de cara de la probeta soldada con M.A. AWS E NiFe - Cl.....	79
Figura 3.15. Doblado de raíz de la probeta soldada con M.A. AWS E NiFe - Cl.....	79
Figura 3.16. Micrografía del material base con magnificación 100X.....	81
Figura 3.17. Relación entre el carbono equivalente Vs temperatura sin grietas.....	84
Figura 3.18. Comparación de los cordones de soldadura soldados con electrodos diferentes.....	85
Figura 3.19. Barrido de dureza en la cara de la soldadura.....	93
Figura 3.20. Barrido de dureza en la raíz de la soldadura.....	93
Figura 3.21. Microdureza de las probetas soldadas con M.A. AWS E312-16.....	94

Figura 3.22. Distribución de tensiones residuales longitudinales y transversales de la soldadura.	96
Figura 3.23. Representación esquemática de los cambios de temperatura y esfuerzos durante la soldadura.	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Especificación de la AWS para electrodos recubiertos.	21
Tabla 2.1. Dimensiones de la probeta para el ensayo de espectrometría.	25
Tabla 2.2. Equipo para el ensayo de espectrometría.	26
Tabla 2.3. Dimensiones de las probetas para el ensayo metalográfico.	27
Tabla 2.4. Desbastadora de disco para pulido grueso.	27
Tabla 2.5. Equipo semiautomático para desbaste fino y pulido.	28
Tabla 2.6. Microscopio OLYMPUS para micrografía.	28
Tabla 2.7. Procedimiento a seguir para el ensayo metalográfico.	29
Tabla 2.8. Durómetro utilizado para el ensayo de dureza.	30
Tabla 2.9. Dimensiones de probetas para ensayo de soldabilidad.	32
Tabla 2.10. Características técnicas de la mufla Vulcan.	32
Tabla 2.11. Características técnicas del pirómetro.	33
Tabla 2.12. Características técnicas del equipo para la soldadura SMAW.	33
Tabla 2.13. Maquinado de probetas.	35
Tabla 2.14. Proceso de soldadura en barras.	36
Tabla 2.15. Dimensiones del material base.	37
Tabla 2.16. Características técnicas del electrodo usado para soldar acero inoxidable.	38
Tabla 2.17. Características técnicas del electrodo Ni 55 usado para soldar hierro fundido.	38
Tabla 2.18. Proceso de soldadura de las placas.	40
Tabla 2.19. Placas soldadas.	41
Tabla 2.20. Proceso del ensayo de tintas penetrantes.	43
Tabla 2.21. Desbastadora de disco para pulido grueso.	44
Tabla 2.22. Dimensiones de las probetas para micrografías transversales.	45
Tabla 2.23. Dimensiones de las probetas con fisura para micrografía longitudinal.	46
Tabla 2.24. Probetas para el ensayo de tracción del material base.	48
Tabla 2.25. Probetas para ensayo de tracción de las juntas soldadas.	48
Tabla 2.26. Máquina universal para ensayo de tensión.	48
Tabla 2.27. Ensayo de tracción.	49
Tabla 2.28. Probetas para ensayo de doblado.	50
Tabla 2.29. Unidad hidráulica para ensayo de doblado.	51
Tabla 2.30. Proceso del ensayo de doblado.	52
Tabla 3.1. Composición química del material base.	53
Tabla 3.2. Micrografías de la probeta N°1 del material base.	54
Tabla 3.3. Micrografías de la probeta N°2 del material base.	55
Tabla 3.4. Dureza del material base.	56
Tabla 3.5. Resultados del ensayo de tracción del material base.	56
Tabla 3.6. Resultados de la primera serie de soldadura con electrodo para acero inoxidable.	57
Tabla 3.7. Resultados de la primera serie de soldadura con electrodo para hierro fundido.	58
Tabla 3.8. Resultados de la segunda serie de soldadura con electrodo para acero inoxidable.	59

Tabla 3.9. Resultados de la segunda serie de soldadura con electrodo para hierro fundido.....	60
Tabla 3.10. Resultados de la tercera serie de soldadura con electrodo para acero inoxidable.....	60
Tabla 3.11. Resultados de la tercera serie soldadas con material de aporte para hierro fundido.....	61
Tabla 3.12. Resultados de las placas soldadas.	62
Tabla 3.13. Resultados de los END de la junta soldada con M.A. AWS E 312-16.	63
Tabla 3.14. Resultados de los END de la junta soldada con M.A. AWS E NiFe-CI.	64
Tabla 3.15. Micrografías de la junta soldada con M.A. AWS E 312-16.....	67
Tabla 3.16. Micrografías de la junta soldada con M.A. AWS E 312-16.....	68
Tabla 3.17. Propagación de la fisura transversal en la junta soldada con M.A. AWS E 312-16.	68
Tabla 3.18. Comparación del tamaño de las dendritas en las probetas con y sin fisura.	69
Tabla 3.19. Micrografías de la junta soldada con M.A. AWS E NiFe-CI.....	70
Tabla 3.20. Micrografías de la junta soldada con M.A. AWS E NiFe-CI.....	70
Tabla 3.21. Resultados de dureza de la junta soldada con M.A. AWS E 312-16.....	71
Tabla 3.22. Resultados de dureza de la junta soldada con M.A. AWS E 312-16 con fisura.....	72
Tabla 3.23. Resultados de dureza de la junta soldada con M.A. AWS E NiFe-CI.....	72
Tabla 3.24. Resultados de microdureza de la junta soldada con M.A. AWS E 312-16 con fisura.	73
Tabla 3.25. Resultados de microdureza de la junta soldada con M.A. AWS E 312-16 sin fisura.....	74
Tabla 3.26. Resultados del ensayo de tracción de las probetas soldadas.	74
Tabla 3.27. Resultados del ensayo de doblado.	77
Tabla 3.28. Comparación de las propiedades mecánicas del material base.	80
Tabla 3.29. Comparación de la composición química del material base.	81
Tabla 3.30. Cálculo del diámetro promedio del grafito.....	82
Tabla 3.31. Caracterización del material base.	82
Tabla 3.32. Comparación de la temperatura de precalentamiento.	85
Tabla 3.33. Comparación de áreas entre los dos tipos de material de aporte.....	87
Tabla 3.34. Comparación microestructural de la zona del material base de la junta soldada.....	88
Tabla 3.35. Comparación de microestructura presente en la ZAC.	89
Tabla 3.36. Comparación de la microestructura presente en el material de aporte.....	90
Tabla 3.37. Porcentajes de resistencia a la tracción en comparación con el material base.....	91
Tabla 3.38. Comparación de fallas en el ensayo de doblado.	92
Tabla 3.39. Tamaño de las dendritas en la junta sin fisura (AWS E 312-16 SF).....	95
Tabla 3.40. Tamaño de las dendritas en la junta con fisura (AWS E 312-16 CF).	95
Tabla 3.41. Criterios de aceptación.....	99
Tabla 3.42. Comparación de la soldabilidad con los dos tipos de electrodos.	100

RESUMEN

El presente trabajo de titulación tiene por objetivo realizar el estudio comparativo de la soldabilidad del hierro fundido nodular soldado con dos tipos de electrodos, AWS E 312-16 y AWS E NiFe-CI los cuales se utilizan para soldar acero inoxidable y hierro fundido respectivamente, con el propósito de encontrar un material de aporte más económico y con excelentes características físicas, metalúrgicas y mecánicas, en comparación con los electrodos típicos fabricados con núcleo de níquel y empleados para este proceso, cuyo costo es elevado debido a los problemas de soldabilidad que presenta el hierro fundido. Para el presente estudio se utiliza la norma AWS D11.2 que ayuda a determinar la temperatura de precalentamiento a la cual la soldadura no presenta agrietamiento, para posteriormente soldar las placas aplicando las condiciones de precalentamiento ya encontradas, finalmente, se realiza ensayos no destructivos y destructivos con la finalidad de analizar y comparar las propiedades mecánicas y metalúrgicas de las juntas soldadas. En base a los resultados de los ensayos no destructivos se determina que la probeta soldada con electrodo AWS E 312-16 presenta una fisura transversal en la raíz del cordón de soldadura, mientras que la junta unida con electrodo AWS E NiFe-CI no presenta defecto alguno. El análisis metalográfico revela la presencia de fases no deseadas en la junta soldada con material de aporte para acero inoxidable, como la fase sigma presente en la zona de la soldadura y fundición blanca de manera parcial en la ZAC, por otra parte, los resultados obtenidos de la resistencia a la tracción son aceptables para la soldadura con los dos tipos de electrodo, sin embargo, debido a la presencia de defectos lineales en la junta AWS E 312-16 y de acuerdo a la normativa aplicada se tiene que este electrodo no es una buena alternativa para soldar hierro fundido nodular.

Palabras clave: Acero inoxidable, hierro fundido nodular, níquel, precalentamiento, soldabilidad.

ABSTRACT

The objective of this project is to carry out a comparative study of weldability of welded nodular cast iron with two types of electrodes, AWS E 312-16 and AWS E NiFe-CI which are used to weld stainless steel and cast iron respectively, with the purpose of finding an electrode more economical and with excellent physical, metallurgical and mechanical characteristics in comparison with the typical electrodes manufactured with nickel core and used for this process, whose cost is high due to the problems of weldability that presents the cast iron. For the present study the AWS D11.2 standard is used, which helps to determine the preheating temperature at which the weld does not show cracking, to later weld the plates applying the preheating conditions already found, finally, non-destructive tests are carried out and destructive in order to analyze and compare the mechanical and metallurgical properties of welded joints. Based on the results of the non-destructive tests it is determined that the specimen welded with electrode AWS E 312-16 presents a transverse crack in the root of the weld bead, while the joint joined with electrode AWS E NiFe-CI is not defective any. Metallographic analysis reveals the presence of unwanted phases in the joint welded with filler material for stainless steel, such as the sigma phase present in the area of the solder and white cast partially in the HAZ, on the other hand, the results obtained of the tensile strength are acceptable for welding with the two types of electrode, however, due to the presence of linear defects in the AWS E 312-16 welded union and according to the normative applied it is necessary that this electrode is not a good alternative for welding nodular cast iron

Keywords: Stainless steel, nodular cast iron, nickel, preheating, weldability.

ESTUDIO COMPARATIVO DE LA SOLDABILIDAD DEL HIERRO FUNDIDO NODULAR, SOLDADO CON MATERIAL DE APORTE PARA ACERO INOXIDABLE AWS E 312-16 Y PARA HIERRO NODULAR AWS E NiFe-CI, MEDIANTE EL PROCESO SMAW

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se ha empleado en gran medida el hierro fundido nodular para la fabricación de piezas mecánicas, como por ejemplo: cigüeñales, árbol de levas, discos de embrague, bancadas de máquinas herramientas, platos de torno, piezas de maquinaria agrícola, etc., también se ha usado en el sector de la energía, en particular para la fabricación de bujes de aerogeneradores, en sí, se ha empezado a utilizar este tipo de material debido a que presenta buenas propiedades mecánicas tales como: tenacidad, alta resistencia a la tensión, resistencia a la corrosión, resistencia al desgaste, buen grado de pulido, y sobre todo, son resistentes al calor y al choque térmico, estas propiedades son muy similares a las del acero estructural por lo cual es fácilmente sustituible en estos campos. (Enríquez, 2012)

Por otra parte, al tener gran variedad de elementos fabricados de este tipo de material, surge la necesidad de realizar mantenimientos y en algunos casos reparaciones por soldadura, es ahí donde radica el problema, ya que estos procesos implican un alto costo de inversión debido a que se debe utilizar un material de aporte constituido a base de níquel por los problemas de soldabilidad que presenta el hierro fundido durante y después del proceso de soldadura. Estos problemas se generan por los esfuerzos residuales inherentes del proceso, por la formación de carburos, fundición blanca, y debido al ciclo térmico propio de la soldadura ocasionando una excesiva dureza y fragilidad. (Silgado & Tabares, 2004)

Una propuesta para reducir los costos que implican la soldadura en el hierro fundido nodular, es encontrar un material de aporte cuyas características mecánicas, físicas y químicas del cordón de soldadura sean aceptables o superen a las propiedades que brindan los electrodos a base de níquel. Es por este motivo que se plantea realizar el estudio comparativo de la soldabilidad del hierro fundido nodular soldado con material de aporte para acero inoxidable AWS E 312-16, este electrodo representa un bajo costo económico y según las características presentadas por las diferentes casas de comercialización ofrecen similares propiedades y aplicaciones en relación con el electrodo a base de níquel AWS E NiFe-CI, comúnmente utilizado en este tipo de procesos.

La relación con respecto a los costos de ambos electrodos representa una inversión que supera el 50%, es decir, si los resultados de las diferentes pruebas a ser realizadas en las juntas soldadas son favorables para el electrodo de acero inoxidable, se tendría un ahorro económico de la mitad de la inversión en comparación al trabajo realizado con los electrodos a base de níquel, obteniendo propiedades aceptables establecidas por las normas y códigos para estos procesos.

Con el desarrollo del presente trabajo de titulación, en primer lugar, se busca abaratar los costos implicados en reparaciones de diferentes elementos fabricados con hierro fundido nodular, también se busca contribuir de forma teórica al caracterizar estos dos procesos de soldadura para con ello determinar mediante el ensayo metalográfico las diferentes fases presentes en las juntas, así como también las diferentes propiedades mecánicas y metalúrgicas que aportan estos electrodos.

Objetivo general

Comparar la soldabilidad del hierro fundido nodular, al ser soldado con material de aporte para acero inoxidable AWS E 312-16 y para hierro nodular AWS E NiFe-CI, mediante el proceso SMAW.

Objetivos específicos

- Determinar las propiedades mecánicas, químicas y metalúrgicas del material base, mediante ensayos mecánicos y metalúrgicos para validar el metal usado en la soldadura como hierro fundido nodular.
- Establecer la temperatura de precalentamiento del hierro fundido nodular, mediante el ensayo de soldabilidad basados en la norma ANSI/AWS D11.2-89.
- Realizar la soldadura de placas de hierro nodular tanto con el electrodo de acero inoxidable como para hierro fundido, mediante el proceso de soldadura SMAW, para realizar los respectivos ensayos.
- Desarrollar un estudio minucioso de las juntas soldadas con los dos tipos de material de aporte AWS E 312-16 Y AWS E NiFe-CI, mediante los ensayos no destructivos y destructivos para analizar y comparar el comportamiento mecánico y metalúrgico de la soldadura.
- Comprobar la factibilidad de usar los electrodos AWS E 312-16 y AWS E NiFe-CI en la soldadura del hierro fundido nodular, mediante el análisis de soldabilidad, para realizar trabajos de reparaciones en la industria.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Hierro fundido

Los hierros fundidos son aleaciones de hierro, carbono y silicio, contienen más cantidad de carbono que la necesaria para saturar la austenita a temperatura eutéctica. Contiene entre 2,1 y 6,67% de carbono y de 0,5 a 3% de silicio. (Avner, 1988)

1.1.1. Características principales

Según Shackelford (2005), el hierro fundido presenta las siguientes propiedades.

- Debido al alto contenido de carbono, este material es muy frágil, por esta razón, la mayor parte de hierro fundido que se comercializa presentan entre 2,5 a 4% de carbono.
- La ductilidad del hierro fundido es baja, por tanto, no se lo puede laminar, estirar ni trabajar a temperatura ambiente.
- Son excelentes para ser moldeadas debido a que las temperaturas de fusión y viscosidad de la fase líquida son relativamente bajas debido a que presentan una contracción moderada en la solidificación y el enfriamiento, esto permite obtener piezas con formas complejas.
- De manera general las propiedades mecánicas del hierro fundido son inferiores en comparación con los aceros, y su costo es relativamente económico.
- Si se controla de forma adecuada la fundición y se aplica un tratamiento térmico adecuado, las propiedades del hierro fundido pueden mejorarse de forma satisfactoria.

1.1.2. Diagrama hierro - grafito

En la Figura 1.1. se muestra el diagrama de equilibrio de fases hierro - grafito, el cual es usado para determinar la composición de los elementos del hierro fundido en función de la temperatura, el extremo derecho del diagrama representa el 100% de carbono (grafito puro). La temperatura eutéctica es alrededor de 1154 °C, por lo que estas fundiciones son totalmente líquidas a temperaturas menores que las requeridas para los aceros líquidos. Por tanto, el hierro con un alto contenido de carbono se puede fundir a temperaturas menores que la de los aceros. (Kalpakjian & Schmind, 2008)

La característica más importante de este diagrama estable es que su principal constituyente es el grafito, a diferencia del diagrama metaestable hierro – carbono que presenta cementita. (Barreiro, 2009)

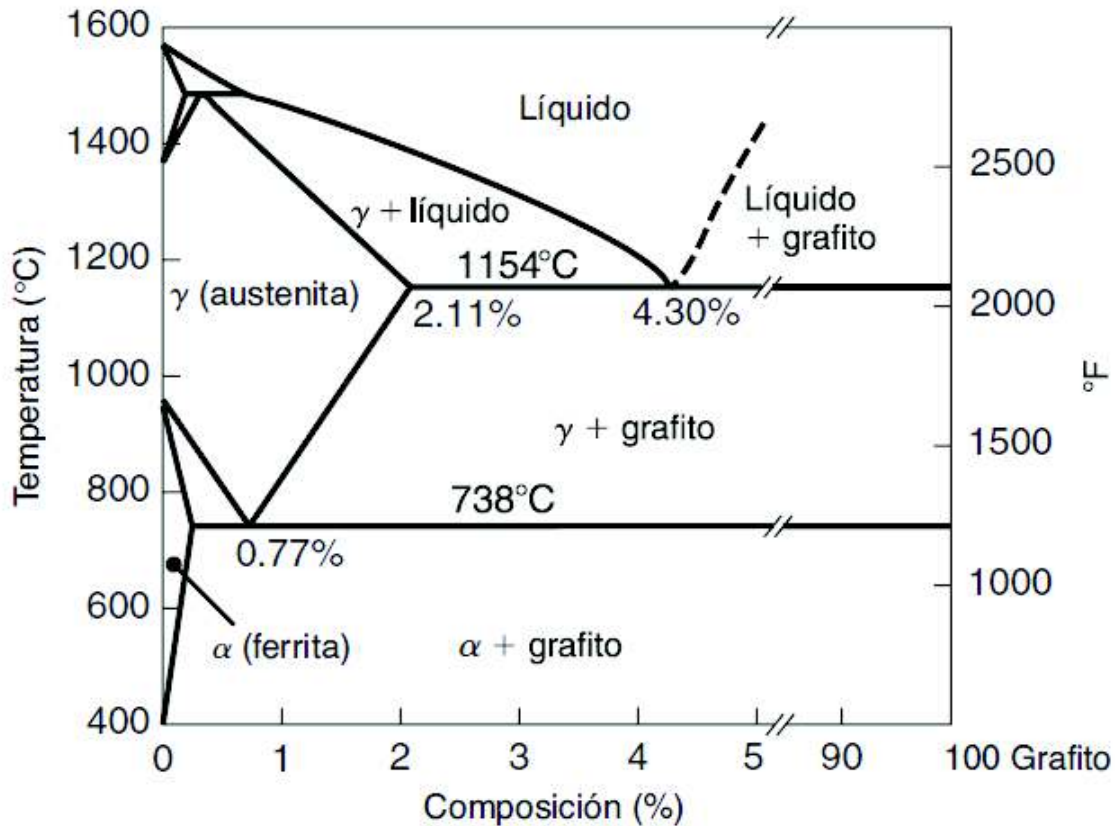


Figura 1.1. Diagrama Hierro – Grafito.
(Fuente: Kalpakjian & Schmind, 2008)

1.1.3. Clasificación

1.1.3.1. Hierro fundido gris

En el hierro fundido gris, el grafito se presenta en forma de hojuelas. Cuando esta fundición se rompe, la trayectoria de la fractura se da a lo largo de las hojuelas de grafito, la superficie de fractura presenta una apariencia color gris. Estas fundiciones tienen una ductilidad despreciable, es de baja resistencia a la tensión, alta resistencia a la compresión y alta resistencia al desgaste. La presencia de las hojuelas de grafito confiere a este material la capacidad para amortiguar vibraciones y por tanto la capacidad para disipar energía. Esta capacidad hace que el hierro fundido gris sea un material adecuado para la construcción de bases para máquinas herramientas y estructuras para maquinaria. (Kalpakjian & Schmind, 2008)

Los contenidos de carbono varían entre 2,5 y 4%, mientras que el silicio se encuentra entre 1 y 3%. (Callister, 2005)

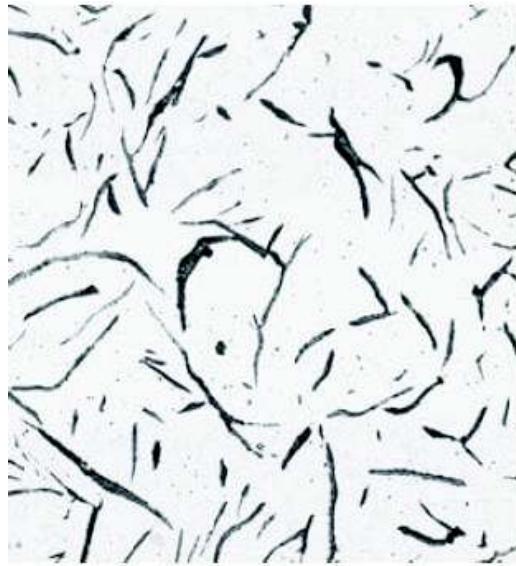


Figura 1.2. Hierro fundido gris con aumento 100x.
(Fuente: Kalpakjian & Schmind, 2008)

1.1.3.2. Hierro fundido blanco

Son fundiciones bajas en carbono y silicio, generalmente este último contiene menos del 1%, la mayor parte del carbono se encuentra como cementita en lugar de grafito. La superficie de la fractura de esta aleación tiene una tonalidad cristalina blanca. Estas fundiciones, debido a la presencia de grandes cantidades de cementita poseen gran dureza, son extremadamente frágiles, difíciles de maquinar, tienen alta resistencia al desgaste y ductilidad nula. (Callister, 2005)

Según Kalpakjian & Schmind (2008), el hierro fundido blanco se obtiene mediante el enfriamiento rápido de hierro gris o a su vez ajustando la composición al mantener bajo el contenido de carbono y silicio.

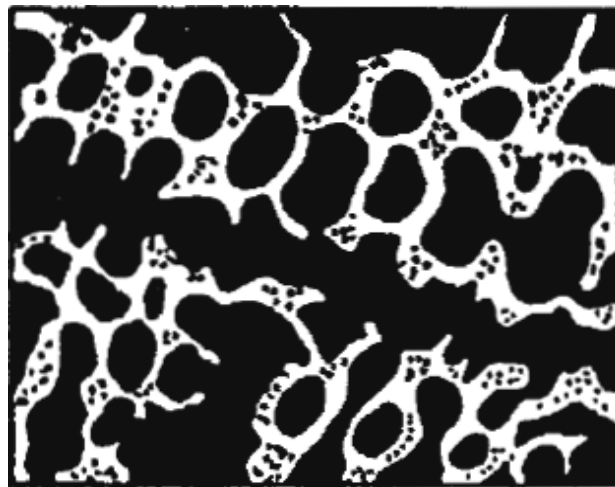


Figura 1.3. Hierro fundido blanco.
(Fuente: Askeland, 2004)

1.1.3.3. Hierro fundido maleable

El hierro fundido maleable, se obtiene a partir de un tratamiento térmico de recocido del hierro fundido blanco en una atmósfera de monóxido y dióxido de carbono, entre 800 °C y 900 °C, por varias horas dependiendo el tamaño de la parte. Durante este proceso, la cementita se descompone en hierro y grafito. El grafito se presenta como racimos o rosetas en una matriz ferrítica o perlítica, por lo que su estructura es similar al hierro nodular, esta estructura promueve la ductilidad, y resistencia al impacto, de ahí se deriva el término maleable. (Kalpakjian & Schmind, 2008)

Los productos comunes hechos de hierro fundido maleable, incluyen ajustes y bisagras para tubos, ciertos componentes de máquina y piezas de equipo ferroviario. (Groover, 2007)

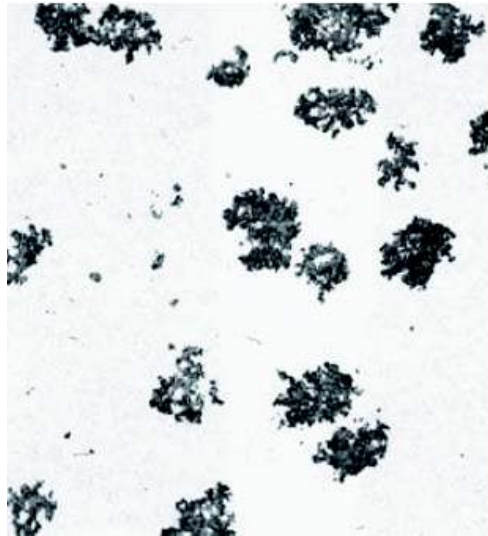


Figura 1.4. Hierro fundido maleable con aumento de 100x.
(Fuente: Kalpakjian & Schmind, 2008)

1.1.3.4. Hierro fundido nodular

El hierro fundido nodular se obtiene agregando pequeñas cantidades de magnesio y/o cerio a la fundición gris en estado líquido produciendo diferentes microestructuras, en las que el grafito en lugar de escamas forma esferoides o formas nodulares. La fundición nodular tiene propiedades mecánicas parecidas a las del acero. Por ejemplo, la fundición dúctil ferrítica tiene una resistencia a la tracción comprendida entre 380 y 480 MPa y una ductilidad del 10 al 20%. (Callister, 2005)

Las esferoides compactas interrumpen la continuidad de la matriz mucho menos que las hojuelas de grafito, lo cual da como resultado mayor resistencia y tenacidad si se compara con el hierro fundido gris. El hierro fundido nodular difiere del maleable en que generalmente se obtiene como resultado de la solidificación y no requiere de tratamiento

térmico. El contenido de carbono del hierro nodular es el mismo que del hierro fundido gris, es decir, entre 2,5 y 4%. (Avner, 1988)

Según Avner (1988), los hierros nodulares con una matriz de hasta un 10% de perlita se denomina como hierro ferrítico. Esta estructura proporciona máxima ductilidad, tenacidad y maquinabilidad. Una matriz cuya estructura sea grandemente perlítica puede producirse por fundido o mediante normalización llevada a cabo por enfriamiento en aire, los hierros perlíticos dúctiles o nodulares son más fuertes pero menos dúctiles que los de ferrita. Una matriz martensítica puede obtenerse templado en aceite o en agua desde 872 °C hasta 927 °C , mientras que los hierros austeníticos dúctiles son tipos altamente aleados que retienen su estructura austenítica hasta por lo menos 25 °C, esta fundición se hace especial debido a su alta resistencia a la corrosión y buena fluencia a elevadas temperaturas.

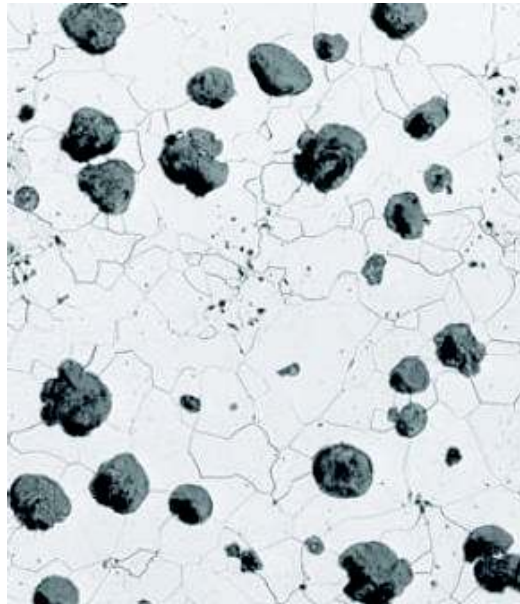


Figura 1.5. Hierro fundido nodular con matriz ferrítica, aumento 100x.
(Fuente: Kalpakjian & Schmind, 2008)

1.1.4. Microconstituyentes del hierro fundido

Según Barreiro (2009), los principales constituyentes que se presentan en la microestructura del hierro fundido son la ferrita, la cementita, la perlita, el grafito y la steadita. Suele presentarse también la sorbita y en ocasiones aunque menos frecuentes, también aparecen la bainita y la martensita, a continuación se describen las fundamentales.

1.1.4.1. Ferrita

La ferrita es hierro alfa, dicho de otra manera, es hierro casi puro, que puede contener en solución pequeñas cantidades de silicio, fósforo y otras impurezas, es el más blando de todos los constituyentes, muy dúctil, magnética y de pequeña fuerza coercitiva. La ferrita

de los aceros se diferencia de las fundiciones en que ésta suele contener en disolución cantidades muy importantes de silicio que elevan su dureza y resistencia.

1.1.4.2. Cementita

La cementita es carburo de hierro (Fe_3C), contiene 6,67% de carbono y 93,33% de hierro, es el constituyente más duro y frágil de baja resistencia tensil, pero de alta resistencia compresiva, su estructura cristalina es ortorrómbica.

1.1.4.3. Perlita

Es un constituyente eutectoide formado por capas alternadas de ferrita y cementita, es decir, es una mezcla muy fina en donde ambos elementos que la componen aparecen formando láminas paralelas y alternadas. Debido a la presencia de silicio, el contenido en carbono de la perlita de las fundiciones es inferior a la de los aceros.

1.1.4.4. Grafito

El grafito es una forma elemental del carbono, es blando, untuoso, y de color gris oscuro. Se presenta en estado libre en algunas clases de fundiciones, ejerciendo una influencia muy importante en sus propiedades y características, que dependen principalmente de la forma del grafito, de su tamaño, cantidad y de su distribución. El grafito mejora la resistencia al desgaste y a la corrosión, pero a la vez reduce la dureza, la resistencia y el módulo de elasticidad.

1.1.4.5. Steadita

Es un compuesto de naturaleza eutéctica, duro, frágil y de bajo punto de fusión que aparece en las fundiciones de alto contenido en fósforo. La steadita tiene un 10% de fósforo y su peso específico es próximo al del hierro, como casi todo el fósforo que contienen las fundiciones se halla formando parte de la steadita, se tendrá entonces en una fundición con 1% de fósforo, por ejemplo, tiene aproximadamente en su microestructura 10% de steadita.

1.1.4.6. Sorbita

Es un agregado fino de cementita y ferrita. Se obtiene por enfriamiento de la austenita a velocidad inferior a la crítica de temple. Con pocos aumentos aparece mal definida en forma de manchas difusas, pero con mayores amplificaciones se ve en forma de pequeños gusanillos y a veces como granos blancos muy finos sobre un fondo oscuro.

1.1.4.7. Ledeburita

Es el constituyente eutéctico que se forma en el enfriamiento de las fundiciones, en el momento en que termina la solidificación. Esta formada por 52% de cementita y 48% de austenita saturada. Este constituyente no existe a temperatura ambiente en las fundiciones, debido a que en el enfriamiento se transforma en cementita y perlita. Sin embargo, en las fundiciones se pueden conocer las zonas donde existió la ledeburita, por el aspecto eutéctico con que quedan esas agrupaciones de perlita y cementita.

1.1.5. Principales usos en el ámbito nacional

A nivel nacional el hierro fundido es usado para la fabricación de varios elementos, entre los principales tenemos:

- Tapas de alcantarillado requeridas por la empresa pública metropolitana de agua potable y saneamiento de Quito.
- Válvulas de aire y válvulas de compuerta.
- Hidrantes que son colocados en puntos estratégicos de la ciudad.
- Diferentes tipos de rejillas para sumideros.
- Piezas para tractores y herramientas agrícolas.
- Blocks de motores, cigüeñales, pistones y cabezas de cilindros para automóviles.

1.2. Soldabilidad del hierro fundido nodular

La soldabilidad se define según Rodríguez (2013), como la capacidad que tiene los materiales para ser unidos permanentemente, manteniendo sus propiedades físico-químicas y estructurales, de materiales disimiles o de las mismas características.

1.2.1. Clasificación de la soldabilidad

En la práctica de la soldadura se distinguen varios tipos de soldabilidad como son:

- Soldabilidad metalúrgica
- Soldabilidad operativa
- Soldabilidad constructiva

1.2.1.1. Soldabilidad metalúrgica

La soldabilidad metalúrgica está relacionada con las transformaciones químicas que sufre el metal o aleación durante el proceso de soldadura, es decir, al momento de la soldadura puede ocurrir un cambio en la estructura del material soldado lo cual puede provocar cambios en las propiedades mecánicas tales como dureza, resistencia etc. (Zurita, 2012)

1.2.1.2. Soldabilidad operativa

La soldabilidad operativa es indispensable, debido a que especifica si un material puede o no ser soldable, por ejemplo: la madera, la piedra y el papel no presentan una soldabilidad operativa, ya que estos materiales no son soldables, en definitiva este tipo de soldabilidad está relacionada con el enlace de los átomos, las moléculas, o los iones que conforman un material, por otro lado la soldabilidad operativa determina las posibilidades de utilización de un procedimiento de soldadura (fusión, presión, etc.), para lograr la unión permanente de las juntas. (Morela, 2009)

1.2.1.3. Soldabilidad constructiva

La soldabilidad constructiva afecta de manera general a las propiedades físicas del metal base, tales como la dilatación y la contracción, las cuales pueden generar agrietamiento en la unión soldada, este caso se presenta con gran frecuencia en los hierros fundidos, debido a que este tipo de material presenta muy poca plasticidad, por lo tanto, no es capaz de absorber deformaciones, razón por la cual se realiza un pre y post - calentamiento con la finalidad de evitar esta soldabilidad limitada. (Guzmán, 2014)

En definitiva, una soldadura con buena soldabilidad es aquella que cumple con los tres aspectos antes mencionados.

1.2.2. Problemas en la soldabilidad de las fundiciones

A excepción de los hierros fundidos blancos los cuales no son soldables. Según Rodríguez (2013), en el resto de los hierros fundidos como por ejemplo el hierro fundido nodular presentan problemas principales y secundarios en la ejecución de la soldadura los cuales afectan su soldabilidad.

1.2.2.1. Problemas principales en la soldabilidad de las fundiciones

Los problemas principales siempre están presentes al momento de soldar el hierro fundido nodular, estos son los siguientes:

- a) Agrietamiento, es uno de los problemas que se genera por las propiedades físico-químicas (plasticidad casi nula) que presenta el hierro fundido nodular.
- b) Formación más o menos localizada de cementita Fe_3C o también conocida como fundición blanca, es un problema que se presenta tanto en las zonas fundidas como en las zonas de influencia térmica, mediante este problema se obtiene un material muy duro, y a la vez muy frágil lo cual dificulta la maquinabilidad.

1.2.2.2. Problemas secundarios en la soldabilidad de las fundiciones

Los problemas secundarios pueden o no aparecer en la soldadura de fundiciones, estos se detallan a continuación:

- a) Formación de monóxido y dióxido de carbono, se generan debido a que el hierro fundido tiene un alto contenido de carbono, estos óxidos pueden crear porosidades en la zona fundida por no tener el tiempo suficiente para escapar del baño fundido o por el rápido enfriamiento.
- b) Formación de una película refractaria de óxidos de silicio y manganeso al momento de la soldadura, estos tienen un alto punto de fusión con respecto al material base.
- c) Alta fluidez, es favorable desde el punto de vista de la fabricación de los hierros fundidos, pero al momento de realizar soldaduras en posiciones inclinadas, verticales y sobrecabeza se convierte en un factor adverso.

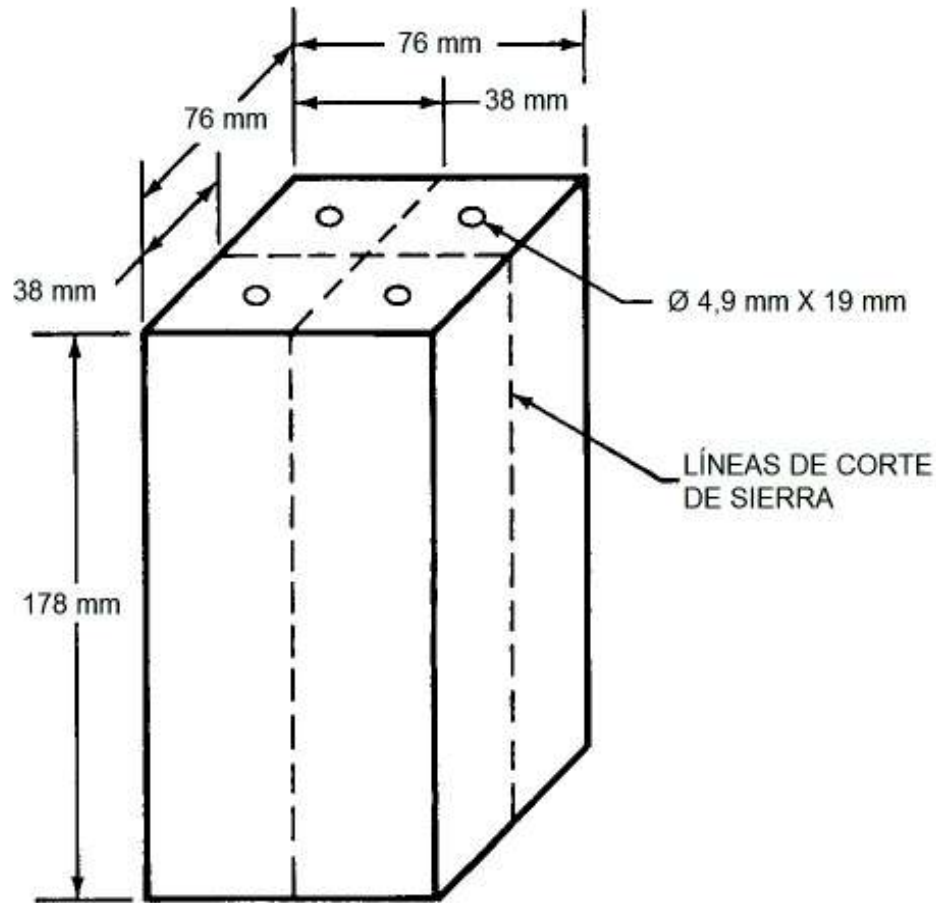
Existen otros factores que afectan la soldabilidad, aparte de los mencionados anteriormente cuando se desea reparar por medio de la soldadura elementos de hierro fundido, éstos dependen de las condiciones de trabajo a las que fueron sometidos los elementos a reparar.

1.2.3. Métodos para controlar los problemas de soldabilidad según la AWS

Los métodos para controlar la soldabilidad son muy necesarios dentro del análisis de una soldadura, debido a que mediante estos ensayos se logra evaluar las características tanto de la unión soldada como del material base, por lo tanto, para el estudio comparativo de la soldabilidad del hierro fundido nodular soldado con material de aporte AWS E312-16 y AWS ENiFe-CI, se procederá a realizar los dos métodos que recomienda la norma ANSI/AWS D11.2-89, que son; el ensayo de soldabilidad y el cálculo del carbono equivalente, ambos procesos tienen por objetivo determinar la temperatura de precalentamiento, un factor muy importante a tomar en cuenta al momento de realizar la soldadura, debido a que el hierro fundido nodular presenta puntos de fusión más elevados que los materiales de aporte, además, mediante el precalentamiento se consigue controlar la microestructura en la zona de soldadura.

1.2.3.1. Ensayo de soldabilidad

El ensayo de soldabilidad según la norma ANSI/AWS D11.2-89, se realiza en barras rectangulares de hierro fundido, para lo cual se requiere como mínimo 8 y como máximo 12 muestras como se aprecia en la Figura 1.6., con el fin de determinar la temperatura de precalentamiento a la cual ya no existe agrietamiento y en base a ello aplicar estas condiciones en la soldadura de las placas.



1. Cortar con una sierra por las líneas entrecortadas para tener cuatro barras de prueba.
2. Pulir las superficies de corte a 0,003 mm, para la prueba de soldadura.
3. Taladrar en el extremo de cada barra.

Figura 1.6. Bloque de prueba para hierro gris y dúctil.
(Fuente: Propia, basado en la norma ANSI/AWS D11.2-89)

Las pruebas se realizan en tres series con una separación de 24 horas entre cada serie.

1.2.3.1.1. Primera serie

Para la primera serie se requiere de cinco muestras, el cordón de soldadura se debe realizar en una cara de cada muestra a las siguientes temperaturas: Temperatura ambiente, 121°C, 260°C, 400°C, y 540°C, después de 24 horas se debe evaluar los puntos del 11 al 14 (ensayos de líquidos penetrantes) y finalmente determinar la temperatura más alta en la cual todavía se presenta el agrietamiento. Esa temperatura será denominada "X".

1.2.3.1.2. Segunda serie

Para la segunda serie se requiere de cuatro muestras, estas pueden incluir las de la primera serie que dispongan de una temperatura superior a la de "X", estas muestras pueden ser usadas para ser soldadas en la segunda superficie, y el resto se deben usar muestras no soldadas. Las temperaturas de prueba son: "X" + 28°C, "X" + 56°C, "X" + 83°C, y "X" + 111°C, después de 24 horas nuevamente se debe evaluar los puntos del 11 al 14 y determinar la temperatura más alta en la que aún se presenta el agrietamiento. Esa temperatura será denominada "Y".

1.2.3.1.3. Tercera serie

Para la tercera serie se requiere de cuatro muestras, estas pueden incluir las de la segunda serie que dispongan de una temperatura superior a la de "Y", estas muestras pueden ser usadas para ser soldadas en la segunda superficie, y el resto se deben usar muestras no soldadas. Las temperaturas de prueba son: "Y" + 6°C, "Y" + 11°C, "Y" + 17°C, y "Y" + 22°C.

De esta serie se determina la temperatura más baja en la cual ya no se genera el agrietamiento, esta temperatura se define como la temperatura sin grietas.

Nota: En ningún momento se debe usar la segunda superficie de soldadura de una muestra, si ésta implica un precalentamiento superior a la temperatura de la primera superficie de soldadura.

1.2.3.1.4. Procedimiento de prueba

1. Preparar la probeta como se detalla en la Figura 1.6., esta puede ser maquinada en una fresadora.
2. Realizar un agujero en el centro de una cara al extremo de cada probeta con las siguientes dimensiones: diámetro 4,9 mm, profundidad 19 mm.
3. Colocar la probeta dentro de un dispositivo de calentamiento, calentarla a una temperatura superior a la deseada (20% más aproximadamente), y colocar la termocupla en el agujero de la probeta para medir la temperatura.
4. Mientras la probeta es calentada verificar las condiciones de soldadura.
5. Cuando la probeta haya alcanzado la temperatura de ensayo más el 20%, se debe retirar de la fuente y colocar sobre una mesa con la termocupla aun conectada.

6. Ubicar el electrodo a una distancia de 25 mm aproximadamente, desde el final de la probeta en donde se encuentra la termocupla, para comenzar la soldadura. La ruta de soldadura esta sobre la línea central de los 178 mm de la cara maquinada.
7. Controlar cuidadosamente la temperatura a medida que se va enfriando la muestra e iniciar el arco de soldadura tan pronto ésta alcance la temperatura de prueba.
8. Tan pronto como se establezca el arco, iniciar el recorrido de los cordones de soldadura de 114 mm de longitud.
9. Detener el arco y el recorrido de manera simultánea. No es requerido un control en el relleno del bisel o el decaimiento del arco.
10. Retirar la termocupla y dejar enfriar la probeta a temperatura ambiente por al menos 24 horas.
11. Después de 24 horas, pulir la superficie del cordón de soldadura con una lija 240 hasta que ésta se encuentre brillante lo suficientemente lisa para que pueda ser usada en el ensayo de líquidos penetrantes.
12. Aplicar el líquido penetrante y dejar reposar por un tiempo mínimo de 15 minutos.

Nota: Si se desean tomar fotografías del proceso, se debe tener lista una cámara antes de continuar con los siguientes pasos. Si los procedimientos son seguidos se debe fotografiar 30 segundos después de haber aplicado el revelador, es decir cuando se encuentre seco, para obtener mejores resultados.

13. Limpiar el exceso de líquido penetrante de la superficie de acuerdo a la recomendación del fabricante y seguido a ello aplicar el revelador.
14. Registrar cualquier indicación transversal o central en la soldadura, a excepción de las indicaciones de la línea de fusión y cualquier indicación en el primer pase de 12,7 mm de inicio o último 12,7 mm del cordón de soldadura. Permitir a que el revelador realice su trabajo por al menos 20 minutos.

1.2.3.2. Cálculo del carbono equivalente

La norma ANSI/AWS D11.2-89, detalla que al intentar encontrar los valores de temperaturas sin grietas en función del carbono equivalente, se encontraron con la novedad de que la fórmula del carbono equivalente convencional de los aceros no es

aplicable para los hierros fundidos, razón por la cual se modificó, dando como resultado una fórmula particular de carbono equivalente (CE) para los hierros fundidos, pero ésta es aplicable solo para fundiciones de hierro cuya suma total de sus componentes cobre, níquel, cromo y molibdeno, presenten un valor máximo de 1,5%.

Las pruebas que se desarrollaron en la norma ANSI /AWS D11.2-89, no fueron con el fin de encontrar temperaturas de precalentamiento de los metales base por lo que no se debería usar para ese fin, sin embargo, este método de carbono equivalente se usará solo como un método de comprobación en el presente trabajo de titulación.

$$CE = C + 0,31Si + 0,33P + 0.45S - 0,028Mn + Mo + Cr - 0,02Ni - 0,01Cu$$

Ecuación 1. Cálculo del carbono equivalente para fundiciones de hierro de varios grados.
(Fuente: ANSI/AWS D11.2-89)

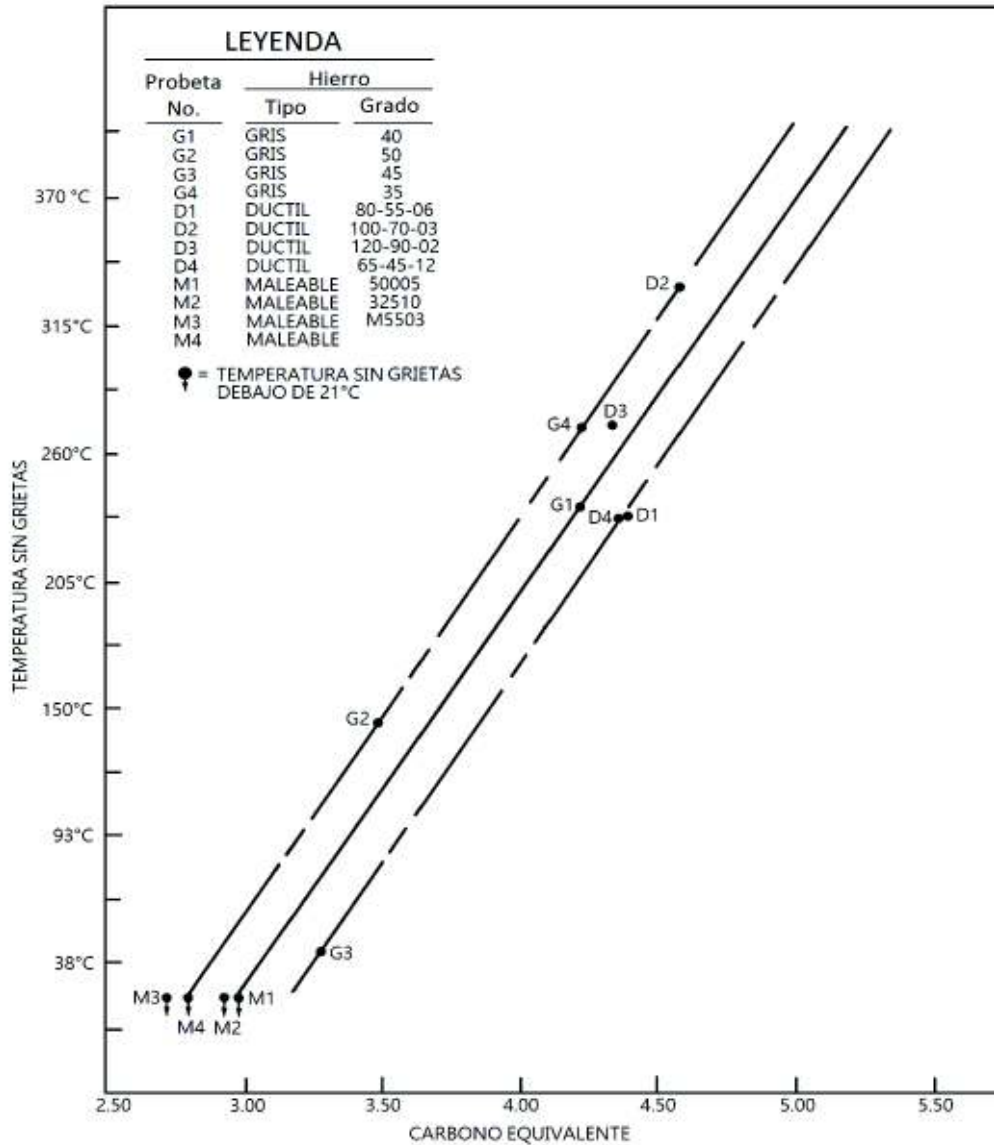


Figura 1.7. Relación entre el CE Vs temperatura sin grietas para fundiciones de hierro de varios grados.

(Fuente: Propia, basado en ANSI/AWS D11.2-89)

1.3. Soldadura por arco de metal protegido (SMAW)

El proceso de soldadura SMAW (Shielded Metal Arc Welding), es uno de los procesos utilizado con mayor frecuencia dentro de la soldadura por arco eléctrico, este método aprovecha el calor generado por el arco eléctrico para fundir tanto el metal base como la punta del electrodo revestido. (ANSI/AWS D11.2-89, R2006)

El circuito de este proceso está conformado por los siguientes elementos como se muestra en la Figura 1.8.

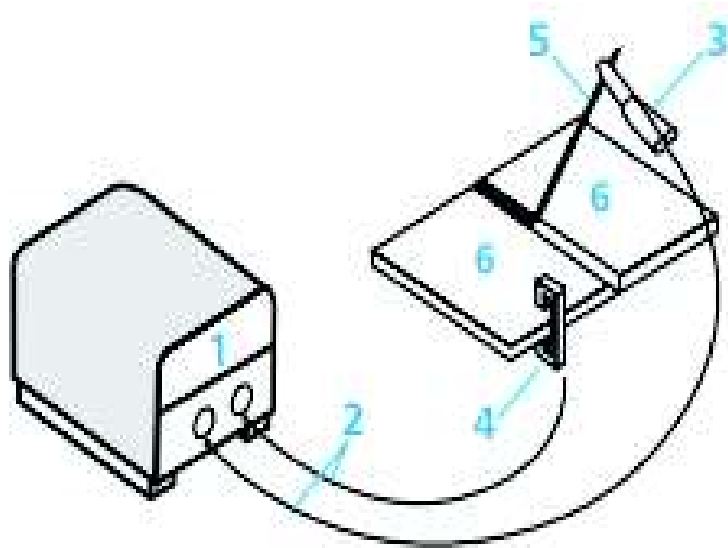


Figura 1.8. Elementos típicos de un circuito del proceso SMAW.
(Fuente: Soldexa)

Donde:

1. Fuente de poder
2. Cables de soldadura
3. Porta electrodos
4. Masa o tierra
5. Material de aporte (electrodo)
6. Metal base

1.3.1. Definición

La soldadura por arco de metal protegido también denominado SMAW por sus siglas en inglés (Shielded Metal Arc Welding), es un proceso de soldadura en la cual la unión de los metales se produce por el calor que genera un arco eléctrico, es decir, las piezas metálicas son unidas por la fusión de los metales debido al calor generado por el arco eléctrico entre la pieza a soldar y la varilla metálica conocida como electrodo, este proceso se desarrolla con o sin presión. (Soldexa)

1.3.2. Variables principales

En el proceso de soldadura SMAW las variables principales son:

- Corriente de soldadura (I)
- Voltaje generado en el arco (V)
- Velocidad de soldadura (S)

Estas variables deben ser controladas de manera óptima debido a que las características (penetración, geometría, y otras de naturaleza metalúrgica) de los cordones de soldadura dependen de estas variables. (Folleto de tecnología de soldadura EPN, 2013)

1.3.2.1. Corriente de soldadura

El proceso SMAW puede ser ejecutado utilizando la corriente continua o alterna, con la finalidad de mejorar la estabilidad en el arco de soldadura, para cualquier tipo de corriente que se seleccione es muy importante controlar el amperaje debido a que, de este factor depende tener una excelente fusión y penetración.

Dependiendo del tamaño y la clasificación de los electrodos éstos pueden trabajar a diferentes amperajes dentro de un rango de manera óptima.

El amperaje recomendado, de manera particular para un tipo de electrodo, depende de algunos factores como, por ejemplo: la posición de soldadura y el tipo de unión.

Se debe tener en cuenta que la rapidez de aportación del material es directamente proporcional al amperaje, y que no es conveniente trabajar con amperajes que sobrepasen el rango recomendado, debido a que puede causar un sobrecalentamiento en el electrodo, esto desata problemas en la soldadura como: el exceso de salpicadura, golpe del arco, socavamiento, y sobre todo agrietamiento en el metal soldado. (Folleto de tecnología de soldadura EPN, 2013)

1.3.2.2. Voltaje generado en el arco

El voltaje tiene una relación directa con la longitud del arco (distancia entre el núcleo de la punta del electrodo y la superficie del charco de soldadura).

Para tener una soldadura de buena calidad es importante utilizar una longitud de arco apropiada, como regla general se conoce que esta longitud no debe exceder el diámetro del núcleo del electrodo.

Al tener una longitud de arco muy corta genera un cortocircuito al momento de la transferencia del metal fundido, por otro lado, si se tiene una longitud de arco demasiado largo, también genera problemas ya que el metal fundido que se transfiere desde el electrodo hacia la soldadura tiende a dispersarse, por lo tanto, existe mayor salpicadura, lo cual disminuye la eficiencia del depósito. (Folleto de tecnología de soldadura EPN, 2013)

1.3.2.3. Velocidad de soldadura

La velocidad de soldadura o de trabajo es el avance del electrodo a lo largo de la junta.

Para establecer una velocidad de soldadura correcta se debe tener en cuenta que ésta se encuentra influenciada por:

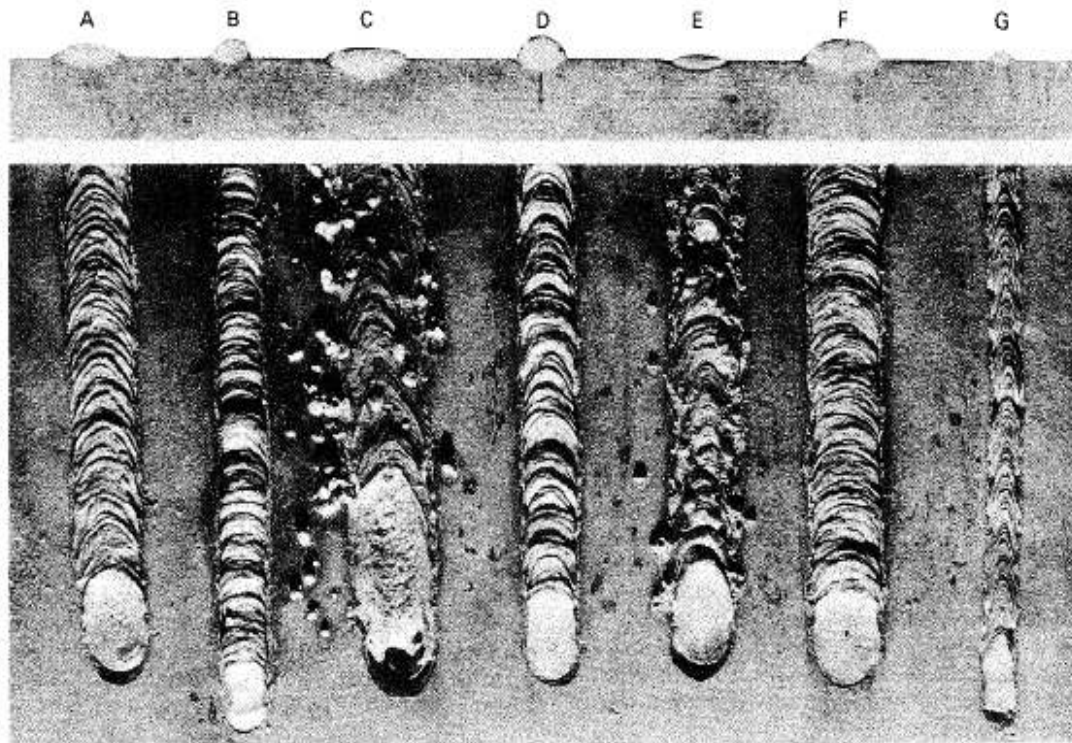
- Tipo de corriente, amperaje y polaridad.
- Posición de soldadura.
- Velocidad de fusión del electrodo.
- Espesor del material base.
- Condición superficial del material base.
- Tipo de junta.
- Manipulación del electrodo.

Al inicio de la soldadura, el electrodo interactúa con el metal base, la velocidad de recorrido es alta, por lo cual se reduce la franja de soldadura y aumenta la penetración, posterior al arranque de soldadura el electrodo interactúa con el metal fundido.

Si se trabaja con una velocidad de recorrido baja, se tiene como resultado una franja de soldadura ancha y convexa con escasa penetración, esta última característica es debido a que el arco no se adelanta al charco de soldadura por lo tanto no puede concentrarse en el metal base.

La velocidad de soldadura tiene incidencia directa con el aporte de calor, es decir, que si se tiene una baja velocidad de soldadura se incrementa la zona afectada por el calor (ZAC) en el metal soldado, esto afecta a la estructura metalúrgica y reduce la rapidez de enfriamiento. (Folleto de tecnología de soldadura EPN, 2013)

En la Figura 1.9. se puede apreciar la calidad de soldadura y la influencia de las variables principales.



Efectos del amperaje, la longitud del arco y la velocidad de recorrido al soldar; (A) amperaje, longitud de arco y velocidad de recorrido correctos; (B) amperaje demasiado bajo; (C) amperaje demasiado alto; (D) arco demasiado corto; (E) arco demasiado largo; (F) velocidad de recorrido demasiado lenta; (G) velocidad de recorrido excesiva

Figura 1.9. Efectos del amperaje, la longitud y la velocidad de recorrido al soldar.
(Fuente: American Welding Society, 1996)

1.3.3. Capacidades y limitaciones del proceso

Según Quesada (2015), el proceso SMAW es uno de los procesos más usados desde la antigüedad, debido a que presenta varias ventajas como las siguientes:

1.3.3.1. Ventajas

- Los equipos que se utilizan para este proceso son bastantes simples, económicos y presentan la facilidad de transporte.
- Los electrodos utilizados en este proceso son los encargados de suministrar el metal de aporte y la protección del arco.
- Para trabajar con este proceso no se requiere de gases de protección adicional.
- Este tipo de proceso no presenta tanta sensibilidad a las corrientes de aire como se presenta en el caso de los procesos que utilizan gas de protección.
- Se puede usar en áreas que tienen un acceso bastante restringidos.
- Es un proceso bastante amigable con la mayoría de los metales y aleaciones.

1.3.3.2. Limitaciones

- No es un proceso adecuado para metales o aleaciones que presenten un punto de fusión muy bajo como es el caso del plomo, y el estaño.
- Presenta limitación al soldar metales reactivos como el titanio, zirconio, tantalio, y columbio.
- Este proceso es muy dependiente de la habilidad que presente el soldador para obtener una buena soldadura.
- Existe un gran desperdicio en el caso de los electrodos ya que no se pueden consumir en su totalidad.
- El rendimiento es bajo, así como también su velocidad de deposición.

1.3.4. Tipos de electrodos

De acuerdo al Manual de Soldadura, Tomo I, (American Welding Society, 1996), existe una gran variedad de electrodos que se utiliza en el proceso SMAW dependiendo del material base a soldar, de acuerdo a ello tenemos electrodos para soldar aceros al carbono, y de baja aleación, aceros inoxidable, hierro colado (dúctiles y grises), cobre, níquel y sus aleaciones, y para algunas aplicaciones de aluminio.

En la Tabla 1.1. se especifica la clasificación de los electrodos recubiertos según la AWS.

Tabla 1.1. Especificación de la AWS para electrodos recubiertos.

Tipo de Electrodo	Especificación de la AWS
Acero al carbono	A5.1
Acero de baja aleación	A5.5
Acero resistente a la corrosión	A5.4
Hierro colado	A5.15
Aluminio y aleaciones de aluminio	A5.3
Cobre y aleaciones de cobre	A5.6
Níquel y aleaciones de níquel	A5.11
Recubrimiento	A5.13 A5.21

(Fuente: American Welding Society, 1996)

Para nuestro caso de estudio se especifica los electrodos de hierro colado según la AWS A5.15 y los electrodos de acero resistente a la corrosión (acero inoxidable) según la AWS A5.4.

1.3.4.1. Electrodo de acero resistente a la corrosión

Según la norma ANSI/AWS A5.4 (Especificación para electrodos de acero al cromo y al cromo-níquel, resistentes a la corrosión, cubiertos, para soldadura), clasifica a los electrodos de acuerdo a su composición química del metal de soldadura sin diluir, la posición de soldadura, y el tipo de corriente con la que se va a usar los electrodos; es bastante similar a la clasificación de los electrodos de acero al carbono.

La nomenclatura de este tipo de electrodos es E 312-16 (caso particular), en donde, el prefijo E indica un electrodo, los tres primeros dígitos representa el tipo de aleación (composición química), y los dos últimos dígitos hace referencia a la posición de soldadura y el tipo de corriente para los que son apropiados este tipo de electrodos, (1 significa que se puede usar en todas las posiciones y el 6 que se puede soldar con polaridad directa).

Los aceros inoxidable pueden dividirse en tres tipos básicos: austeníticos, martensíticos, y ferríticos, pero los más usuales son los del grupo austenítico por lo cual se elaboran los electrodos de acero inoxidable basado en la composición del metal de soldadura y se designa de la siguiente manera: 2XX Y 3XX.

El acero inoxidable es una aleación de hierro (Fe), carbono (C) y cromo (Cr), en donde su elemento fundamental es el hierro, y para que sea denominado inoxidable debe contener por lo menos un 11,5% de Cr, además se añaden otros elementos como: Ni, Mo, V, Ti, Nb, con la finalidad de mejorar las propiedades mecánicas como: la ductilidad, resistencia al impacto, resistencia a la corrosión, resistencia al creep, al calor etc.

El acero inoxidable contiene varios de los elementos que conforman el hierro fundido nodular por lo cual se podría usar el electrodo de acero inoxidable para soldar el hierro fundido nodular con resultados favorable en la soldabilidad. (Indura)

1.3.4.2. Electrodo de hierro colado

Según la norma ANSI/AWS A5.15 (Especificación para electrodos y varillas para soldar hierro colado), clasifica a los electrodos de la siguiente manera: de níquel, níquel-hierro, aleaciones de níquel-cobre y una aleación de acero.

Los electrodos a base de níquel se usan con gran frecuencia para reparar piezas de hierro fundido por soldadura mediante el proceso SMAW, pueden trabajar incluso sin precalentar el material base, y a su vez, ser maquinables a excepción de las zonas afectadas por el calor.

La dureza que presente el material soldado será dependiente de la dilución que presente el material base, y de ello dependerá su maquinabilidad.

La norma ANSI/AWS A5.15, recomienda precalentar las piezas de hierro colado a soldar solo cuando se desee prevenir esfuerzos excesivos en partes de la fundición donde no fue realizada la soldadura.

Por otra parte, se pone en consideración la influencia del níquel en la soldabilidad del hierro fundido debido a que los electrodos a base de níquel contienen un porcentaje significativo de este componente, el cual evita la formación de carburos y, en estado sólido, tiene una baja solubilidad con el carbono, es decir, a medida que el metal de soldadura se solidifica y se enfría, el carbono se elimina de la solución y se convierte en grafito. Esta reacción aumenta el volumen del metal de soldadura, reduciendo así las tensiones por contracción y disminuyendo la probabilidad de que se generen grietas en la zona del metal de soldadura y en la zona afectada por el calor. (ANSI/AWS D11.2-89, R2006)

Además, según Agüera (2008), estableció algunas características similares entre el Fe y el Ni, estas se describen a continuación:

- Los electrodos de Ni-55 AWS E NiFe-CI que serán usados para la soldadura, presentan una aleación bastante similar a la aleación Fe – Ni, la cual está constituida de 50% de níquel e igual porcentaje en peso de hierro, por encima de los 1446°C se encuentra en estado líquido y forman una solución homogénea, la solución líquida solidifica en una solución sólida gamma, al encontrarse debajo de la línea de liquidus, en donde presenta una estructura FCC desordenada.
- Estos dos elementos presentan radios atómicos similares, es decir, el hierro presenta 0,124 nm y el níquel 0,125 nm, esto significa que se tiene una diferencia de 4% aproximadamente,
- Los radios iónicos que presentan estos elementos son; Fe^{+2} de 0,077 nm y el Ni de 0,069 nm, para este caso el de mayor radio es el hierro el cual es mayor en 11%.
- La electronegatividad que presenta el Ni es 1,8 y el Fe es 1,7 y ambos elementos presentan una estructura FCC, para el caso del hierro esta estructura la obtiene cuando se encuentra entre 912°C y 1395°C.
- Los estados de oxidación del Ni y el Fe son 2 y 3 respectivamente.
- Las densidades también son bastantes similares con Ni 8902 kg/m^3 y el Fe 7874 kg/m^3 .
- El punto de fusión de estos metales es; Fe 1538°C y Ni de 1455°C, lo cual generan una diferencia de 38°C.

Por estas características, es muy común el uso del electrodo de níquel para la soldadura del hierro fundido ya que este elemento permite una excelente soldabilidad.

1.3.5. Aplicaciones del proceso SMAW

Según la American Welding Society (1996), el proceso SMAW es bastante utilizado en la soldadura de metales y aleaciones comunes, entre ellos están los aceros de bajo contenido de carbono y baja aleación, aceros inoxidable, hierros colados, cobre, níquel, aluminio y sus aleaciones; además es capaz de unir una gran variedad de materiales químicamente diferentes.

Por medio de este proceso se puede soldar materiales de diferentes espesores dentro de ciertos límites prácticos y económicos, en gran medida trabaja con metales de espesores entre 3 y 38 mm.

2. METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos planteados en el presente trabajo de titulación, se realizaron una serie de trabajos previos a la soldadura de las placas, tales como; la preparación de 12 bloques de hierro fundido nodular, los cuales pasaron por varios procesos como: fundición, maquinado, soldadura, y ensayos de tintas penetrantes, con la finalidad de determinar una temperatura de precalentamiento sin grietas, posteriormente se precalentaron las placas de hierro fundido (previamente caracterizadas) a la temperatura encontrada y se soldaron con los diferentes electrodos propuestos (AWS E 312-16 y AWS E NiFe-CI), finalmente se llevaron a cabo ensayos no destructivos de inspección visual, tintas penetrantes, y radiografía industrial de todo el cordón de soldadura, así como también ensayos mecánicos, y sobre todo metalográficos para poder evaluar las propiedades y características microestructurales de los materiales soldados.

2.1. Caracterización del material base

Para caracterizar el material base (MB), se determina la composición química, se realiza ensayos metalográficos, y ensayos mecánicos, para ser evaluados y comparados con referencias bibliográficas que avalen su veracidad.

2.1.1. Composición química

La composición química del material base, se determinó mediante el ensayo de espectrometría de chispa, el cual fue de mucha utilidad para verificar si el material obtenido mediante la fundición está dentro del rango del hierro fundido nodular, y de esta manera poder continuar con los respectivos procesos.

2.1.1.1. Probeta utilizada

Para llevar a cabo el ensayo de espectrometría de chispa se utilizó una probeta con las dimensiones detalladas en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Dimensiones de la probeta para el ensayo de espectrometría.

Probeta de Ensayo	
Cantidad	1
Longitud [mm]	60
Ancho [mm]	25
Espesor [mm]	8




(Fuente: Propia)

2.1.1.2. Características del equipo utilizado

El ensayo de espectrometría se ejecutó en el Laboratorio de Fundición, en donde se cuenta con un equipo denominado espectrómetro de chispa el cual es usado para estos trabajos, la ficha técnica de este equipo se presenta en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Equipo para el ensayo de espectrometría.

Características	Especificación técnica	Descripción gráfica
Modelo	Q2 ION	
Marca	BRUKER	
Cobertura del espectro	170 - 411 [nm] (685 [nm])	
Chispa y arco	10 [μs] a 2 [ms]	
Compensación de ambiente activo	10 [°C] y 45 [°C]	
Voltaje	100-240 [V]	
Frecuencia	50/60 [Hz]	
Dimensiones (AL X AN X L)	530 x 390 x 440 [mm]	
Peso neto	28 [kg]	

(Fuente: Propia)

2.1.1.3. Procedimiento

Este equipo presenta una facilidad de uso, por lo que solo se debe seguir los siguientes pasos para desarrollar el ensayo de espectrometría.

- Colocar la muestra en la cámara de chispeo.
- Pulsar el botón de inicio.
- Esperar un aproximado de 30 segundos para obtener la composición elemental completo del metal ensayado.

2.1.2. Metalografías del material base previo a la soldadura

Dentro de las metalografías se llevó a cabo el ensayo de micrografía como parte de la caracterización del material base, el cual revela la microestructura interna de un material metálico con la ayuda de un microscopio, este trabajo es muy útil ya que permite comparar con microestructuras estandarizadas detalladas en los textos.

2.1.2.1. Probetas utilizadas en el ensayo

Las probetas que se usaron para este ensayo fueron extraídas del material base a soldar, estas se encuentran detalladas en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Dimensiones de las probetas para el ensayo metalográfico.

Probetas para Micrografías	
Cantidad	2
Longitud [mm]	40
Ancho [mm]	20
Espesor [mm]	8



(Fuente: Propia)

2.1.2.2. Equipos utilizados en el ensayo


Debido, a que este ensayo se realizó en el Laboratorio de Metalografía de la Escuela Politécnica Nacional, se utilizó tres de sus equipos principales: la desbastadora de disco (Tabla 2.4.) para el desbaste grueso, pulidora semiautomática (Tabla 2.5.) para el desbaste fino y pulido, y el microscopio (Tabla 2.6.) para la observación micrográfica.

Tabla 2.4. Desbastadora de disco para pulido grueso.

Características	Especificación técnica	Descripción gráfica
Modelo	Metallurgical Apparatus	
Marca	BUEHLER LTD	
Voltaje	220 [V]	
Amperaje	8.2 [A]	
HP	3	
Frecuencia	60 [Hz]	
RPM	1720	
Dimensiones (AL X AN X L)	95 x 67 x 71 [cm]	
Peso neto	75 [kg]	


(Fuente: Propia)

Tabla 2.5. Equipo semiautomático para desbaste fino y pulido.

Características	Especificación técnica	Descripción gráfica
Modelo	FORCIMAT-FORCIPOL 2V	
Marca	Metkon	
Capacidad	6 probetas	
Voltaje	230 [V]	
Potencia	150 [W]/600 [W]	
Frecuencia	50/60 [Hz]	
RPM	50-600	
Dimensiones (AL X AN X L)	95 x 69 x 70 [cm]	
Peso neto	27kg-75 [kg]	

(Fuente: Propia)

Tabla 2.6. Microscopio OLYMPUS para micrografía.

Características	Especificación técnica	Descripción gráfica
Modelo	GX41	
Marca	OLYMPUS	
Sensor de imágenes	CMOS color	
Tamaño del sensor	13 [mm].	
Resolución (máx.)	2048 x 1532 [píxeles]	
Tamaño del píxel	3,2 x 3,2 [μm]	
Convertor A/D	10 [bits]	
Tiempos de exposición	60 [μs] - 1,75 [s]	
Control de PC	32 [bit] y 64 [bit]	



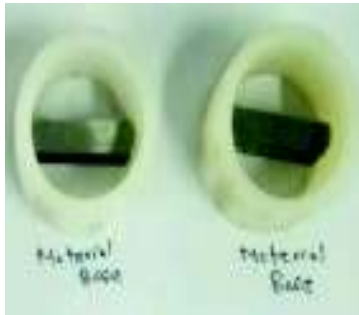
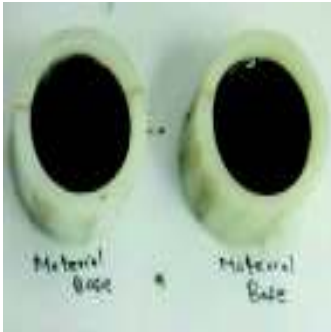


(Fuente: Propia)

2.1.2.3. Procedimiento del ensayo

Para observar la microestructura del material base en el microscopio, previamente se debió realizar algunos trabajos, estos se muestran en la Tabla 2.7., y se detalla a continuación:

- Cortar las probetas a las medidas especificadas en la Tabla 2.3.
- Seguidamente, desbastar las caras de las probetas en la zona de desbaste grueso para dejarle planas y paralelas.
- Posterior a aquello montar las probetas en moldes de duralón con resina poliéster.
- Esperar el tiempo necesario hasta que la resina poliéster se encuentre seca.
- Desmontar el elemento sólido de los moldes y pasar nuevamente por la zona de desbaste grueso en donde se vuelve a dejar planas y paralelas las caras de las probetas para luego ser trabajada en la zona de desbaste fino.
- Para el desbaste fino se utilizó la pulidora semiautomática FORCIMAT-FORCIPOL, con las lijas de agua No. 240, 600 y 1200.
- Después del desbaste fino, en el mismo equipo semiautomático, pulir las probetas añadiendo la suspensión de diamante de 1 micra.
- Finalmente, realizar el ataque químico con el reactivo Nital al 10%, y de esta manera dejar listas para ser observadas en el microscopio OLYMPUS.

Tabla 2.7. Procedimiento a seguir para el ensayo metalográfico.

Ensayo metalográfico		
Corte	Desbaste grueso	Montaje de probetas
		
Secado de la resina	Desbaste fino y pulido	Observación microscópica
		

(Fuente: Propia)

2.1.3. Dureza del material base

La dureza de un material es conocido como la resistencia que opone un material a la deformación plástica permanente superficial, ya sea esta por rayado o penetración (Ensayos de Dureza en los Materiales, 2018); para medir la dureza existen cuatros ensayos que son usados con mayor frecuencia estos son: Rockwell; mide la profundidad de penetración dejado por un indentador, Vickers, Knoop y Brinell; miden el tamaño dejado por un penetrador (Ensayos de dureza - Conocimientos. Struers.com, 2018), para el caso de nuestro estudio se trabajó con el ensayo de dureza Rockwell (HR), con la finalidad de determinar la homogeneidad del material base y además tener una referencia de la resistencia a la tracción que debe soportar el material.


2.1.3.1. Probetas utilizadas en el ensayo

Para la ejecución del ensayo de dureza se utilizó una de las probetas que fue usada previamente en las metalografías aparte de ello se usó otra probeta extra del material base la misma que fue usada en el ensayo de espectrometría por chispa, estas se detallan en las Tablas 2.1. y 2.3.

2.1.3.2. Equipos utilizados en el ensayo

La medición de dureza del MB se llevó a cabo en el Laboratorio de Metalografía de la Escuela Politécnica Nacional, para lo cual se hizo uso del durómetro HARDROCKER, las especificaciones técnicas de este equipo se observan en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Durómetro utilizado para el ensayo de dureza.

Características	Especificación técnica	Descripción gráfica
Modelo	HR-150A	
Marca	HARDROCKER	
Escalas de dureza	HRB, HRC	
Rango de medición	0-100 [HRB], 0-100 [HRC]	
Dimensiones (AL X AN X L)	700 x 240 x 520 [mm]	
Tipo	Manual	
Color	Blanco	
Peso neto	77 [kg]	

(Fuente: Propia)

2.1.3.3. Procedimiento del ensayo

Para medir la dureza en las escalas Rockwell B (HRB) y Rockwell C (HRC) con el durómetro HARDROCKER se debe seguir los siguientes pasos:

- Seleccionar la escala de dureza, de preferencia empezar por la escala HRB, y de acuerdo a ello colocar su respectivo indentador.
- Colocar las probetas previamente desbastadas, de manera que estén planas y paralelas, en el soporte debajo del indentador.
- Llevar a tope la probeta hasta que haga contacto con la punta del indentador, por medio de la perilla horizontal girando en sentido horario.
- Encerar el equipo debido a que la aguja grande del marcador suele moverse.
- Girar nuevamente la perilla horizontal en sentido horario, hasta que la aguja grande del marcador haya dado tres vueltas, o a su vez la aguja pequeña se haya desplazado desde la marca negra a la marca roja.
- Girar la manilla lateral derecha para cargar la muestra y esperar hasta que la aguja del marcador se estabilice.
- Regresar la manilla lateral derecha lentamente a su posición original, para descargar la muestra.
- Finalmente, tomar la lectura en la escala seleccionada.

2.2. Determinación de la temperatura de precalentamiento

Como proceso previo para proceder a la soldadura de las placas, es necesario determinar la temperatura a la cual serán precalentadas, con el fin de evitar posibles defectos en la soldadura por las características propias del material, ya que el hierro fundido presenta un alto contenido de carbono que implica dureza y fragilidad, para ello se procede a realizar el ensayo de soldabilidad basado en la norma ANSI/AWS D11.2-89, descrita en el capítulo 1 apartado 1.2.3.1.

2.2.1. Probetas utilizadas

Para realizar el ensayo de soldabilidad se utilizaron un total de 12 probetas previamente maquinadas, cuyas dimensiones se especifican en la Tabla 2.9., las mismas que fueron soldadas en las dos caras opuestas, cada una de estas se soldó con un tipo de electrodo diferente (AWS E 312-16 y AWS E NiFe-CI).

Tabla 2.9. Dimensiones de probetas para ensayo de soldabilidad.

Barras	
Cantidad	12
Longitud [mm]	178
Ancho [mm]	38
Espesor [mm]	38



(Fuente: Propia)

2.2.2. Características de los equipos utilizados


En todas las series de pruebas las barras fueron precalentadas en una mufla marca Vulcan modelo 3-550 (Tabla 2.10.), para el proceso de control de temperatura se utilizó un pirómetro Fluke (Tabla 2.11.), mientras que para realizar el proceso de soldadura el equipo utilizado fue de la marca Lincoln Electric modelo Invertec V350-Pro (Tabla 2.12.).

Tabla 2.10. Características técnicas de la mufla Vulcan.

Características	Especificación técnica	Descripción gráfica
Marca	Vulcan	
Modelo	3-550	
Rango de temperatura	50 – 1100 [°C]	
Rango de tiempo de mantenimiento	0 – 99,99 [h]	
Rango de velocidad de calentamiento	0 – 400 [°C/min]	
Precisión de temperatura	± 5 [°C]	
Potencia	1470 [W] a 100 [V] 1920 [W] a 120 [V] 2400 [W] a 240 [V]	
Dimensiones internas (AL X AN X L)	230 x 230 x 180 [mm]	
Peso neto	11 [kg]	

(Fuente: Propia)

Tabla 2.11. Características técnicas del pirómetro.

Características	Especificación técnica	Descripción gráfica
Marca	Fluke	
Modelo	68	
Rango de temperatura	-32 – 760 [°C]	
Rangos de precisión:		
Superior a 510 [°C]	± 1 [°C]	
23 a 210 [°C]	± 1 [°C]	
-18 a 23 [°C]	± 2 [°C]	
-26 a -18 [°C]	± 2,5 [°C]	
-32 a -26 [°C]	± 3 [°C]	
Tiempo de respuesta	500 [ms]	
Dimensiones	200 x 160 x 55 [mm]	
Peso neto	320 [g]	

(Fuente: Propia)

Tabla 2.12. Características técnicas del equipo para la soldadura SMAW.

Características	Especificación técnica	Descripción gráfica
Marca	Lincoln Electric	
Modelo	Invertec V350-Pro	
Potencia de entrada	200/220/380/415/440/1/3/50-60	
Salida nominal	350 [A] /34 [V]@ 60% 300 [A]/32 [V]@ 100%	
Corriente de entrada	32 [A]	
Rango de salida	5 - 425 [A]	
Dimensiones (AL X AN X L)	376 x 338 x 709 [mm]	
Peso neto	37,50 [kg]	

(Fuente: Propia)

2.2.3. Procedimiento






Debido a que las probetas se fabricaron mediante el proceso de fundición se procedió a realizar el maquinado de las mismas con el objetivo de eliminar defectos superficiales y con esto lograr cumplir los requerimientos de la norma ANSI/AWS D11.2-89, para posteriormente proceder con el ensayo de soldabilidad.

2.2.3.1. Proceso de maquinado

Para el maquinado de las placas y las barras se realizaron varios procesos, partiendo por la elaboración de los planos de taller, detallados en el Anexo I, y posterior a ellos se realizó procesos como el limado, fresado, torneado, taladrado y rectificado como se indica en la Tabla 2.13. con las máquinas herramientas del Laboratorio de Virutaje de la Escuela Politécnica Nacional.

- **Limado:** es un proceso elemental para el desbaste superficial de las barras de hierro fundido nodular, debido a que ésta es demasiada dura, para ello se hizo uso de una limadora de avance horizontal, la cual trabaja con una cuchilla de acero rápido o HSS (High Speed Steel).
- **Fresado:** se utilizó una fresadora FEXAC la cual trabaja en conjunto con un cabezal compuesto de cuatro cuchillas WIDIA de 12 mm “A”, quien se encarga de emitir un movimiento rotacional, y con una mesa de sujeción la cual presenta movimientos longitudinales, transversales y verticales.
- **Torneado:** se efectuó este proceso para refrentar la parte longitudinal de las 12 barras, para ello se utilizó un torno de avance horizontal el cual trabaja en conjunto con un cabezal quien entrega un movimiento rotacional y con una torreta portaherramientas en donde se coloca la cuchilla de acero rápido o HSS.
- **Taladrado:** se llevó a cabo este trabajo para realizar un agujero de 19 mm de profundidad en una cara axial de cada una las barras, con la finalidad de medir la temperatura de precalentamiento en ese sitio antes de realizar la soldadura, para lo cual se utilizó el mismo torno y con la ayuda de una broca de 5 mm de diámetro que fue colocada en el contrapunto del cabezal móvil.
- **Rectificado:** se aplicó este proceso solo en las placas, debido a que éstas son de un espesor muy pequeño, por lo tanto, no es muy factible aplicar otros procesos de maquinado, por esta razón, y debido a que la fundición estaba presentando varios defectos, la empresa FUNDIEC nos facilitó con el trabajo de maquinado de estas placas.

Tabla 2.13. Maquinado de probetas.

Proceso de maquinado		
Limado	Fresado	Torneado
		
Taladrado	Rectificado	
		

(Fuente: Propia)

2.2.3.2. Proceso de soldadura de las barras

El procedimiento aplicado para el ensayo de soldabilidad para las tres series de prueba se basa en la norma ANSI/AWS D11.2-89, detallada en el capítulo 1 apartado 1.2.3.1., la cual se puede observar en la Tabla 2.14.

- Se procede a calentar en la mufla las probetas correspondientes a cada serie de prueba.
- Con la ayuda del pirómetro se controla la temperatura disparando el láser en el centro del agujero de cada probeta con el fin de asegurarse que la temperatura sea uniforme y no solamente superficial.

- Se procede a realizar el cordón de soldadura en la primera cara con el electrodo AWS E 312-16.
- Una vez finalizado el primer cordón se procede a medir la temperatura para verificar que sea la adecuada según la norma, para posteriormente realizar la segunda soldadura en la otra cara opuesta de la probeta con el electrodo AWS E NiFe-CI.
- Se deja enfriar las probetas por lo menos 24 horas en arena sílice con el fin de evitar cambios en la microestructura del material o defectos en el cordón de soldadura debido a cambios bruscos de temperatura.
- Se examina cada una de las probetas mediante el ensayo de líquidos penetrantes con el objetivo de escoger la máxima temperatura a la cual se sigue presentando el agrietamiento.

Tabla 2.14. Proceso de soldadura en barras.

Ensayo de soldabilidad	
Calentamiento de probetas	Control de temperatura
	
Soldadura	Enfriamiento
	

(Fuente: Propia)

2.3. Soldadura de placas

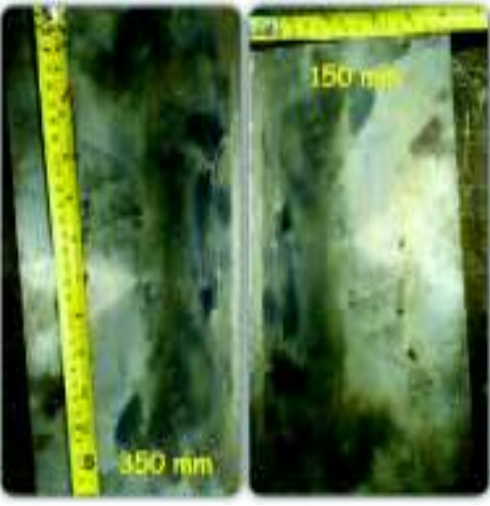
Mediante la soldadura de las placas con los respectivos electrodos propuestos en este Trabajo de Titulación, se lograron obtener probetas para la ejecución de los ensayos no destructivos (tintas penetrantes, radiografía industrial), y destructivos (tracción, dureza y metalografías), los cuales se evaluaron bajo el criterio de la norma ANSI/AWS D11.2-89, con lo cual se obtuvo los WPS para cada electrodo, éstos encuentran detallados en el Anexo II.

2.3.1. Placas utilizadas

Se utilizaron cuatro placas de hierro fundido nodular las cuales fueron fundidas y maquinadas por la empresa FUNDIEC, las características técnicas se detallan en el apartado 2.1. y las dimensiones se muestran en la Tabla 2.15.

Tabla 2.15. Dimensiones del material base.

Material base	
Cantidad	4
Longitud [mm]	350
Ancho [mm]	150
Espesor [mm]	8



(Fuente: Propia)

2.3.2. Electrodo utilizados

El material de aporte que fue seleccionado para realizar el proceso de soldeo de las placas de hierro fundido nodular fueron los siguientes; el AWS E 312-16 y el AWS E NiFe-CI, los cuales son usados para soldar acero inoxidable y hierro fundido respectivamente, las características técnicas de cada uno de ellos se detallan en las Tablas 2.16. y 2.17.

Tabla 2.16. Características técnicas del electrodo usado para soldar acero inoxidable.

Electrodo AWS E 312-16	
Diámetro del Electrodo [mm]	3
Posición de soldadura	Todas
Tipo de corriente	CA y DC+
Amperaje recomendado [A]	90 -120
Resistencia a la tracción min. [MPa]	800
Límite a la fluencia min. [MPa]	600
Elongación en 50 mm min. [%]	25
Dureza [BH]	205



(Fuente: Propia)

Tabla 2.17. Características técnicas del electrodo Ni 55 usado para soldar hierro fundido.

Electrodo AWS E NiFe-CI	
Diámetro del Electrodo [mm]	3
Posición de soldadura	Todas
Tipo de corriente	CA y DC+
Amperaje recomendado [A]	70 -100
Resistencia a la tracción min. [MPa]	470
Elongación en 50 mm min. [%]	20
Dureza [BH]	220



(Fuente: Propia)

2.3.3. Equipo de soldadura para el proceso SMAW

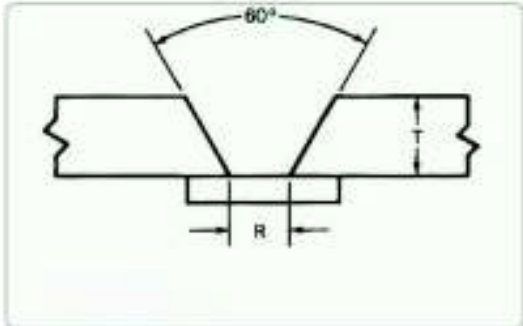
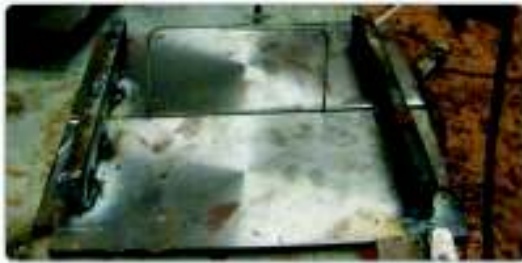
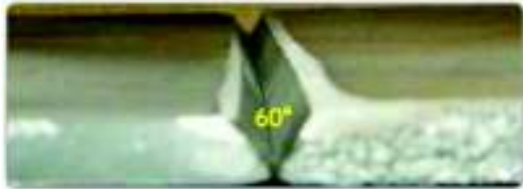

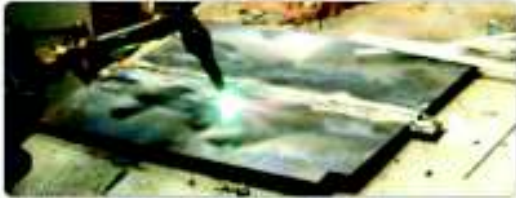


El proceso de soldadura SMAW fue realizado en el Laboratorio de Soldadura de la Escuela Politécnica Nacional, para lo cual se utilizó el equipo INVERTEC V350-PRO, este equipo está diseñado para trabajar con varios procesos tales como GMAW, FCAW, SMAW, y GTAW para una gran variedad de metales, las especificaciones técnicas se encuentran especificadas en la Tabla 2.12. del apartado 2.2.2.

2.3.4. Procedimiento para realizar la soldadura de las placas

Para llevar a cabo la soldadura de las placas de hierro fundido nodular mediante el proceso SMAW, utilizando los dos tipos de electrodos propuestos, fue necesario realizar algunos trabajos previos y post - soldadura, los cuales se observan en la Tabla 2.18. y se detallan a continuación.

- **Diseño de la junta:** se realizó una junta en V para lo cual se ejecutó un bisel a 30° en cada una de las placas con la ayuda de una amoladora, este diseño fue seleccionado en base a la norma ANSI/AWS D11.2-89, mediante la cual se toma en consideración algunos aspectos tales como; el espesor, el tipo de material base, el material de aporte y la accesibilidad, debido a que estas características pueden influir de manera directa en las propiedades de la soldadura.
- **Colocación de puentes:** se soldó dos barras pequeñas como puentes, en la parte posterior de las placas biseladas, dejando una separación de 3 mm y dos platinas al inicio y al final del conjunto soldado previamente, con el fin de evitar defectos de deformación en el cordón de soldadura y mantener firmes las placas.
- **Desarrollo de la soldadura:** se realizó un precalentamiento del conjunto a soldar y seguidamente se realizó los diferentes pases de soldadura controlando siempre la temperatura con un pirómetro, mayores detalles del proceso se encuentran en el WPS (Anexo II).
- **Enfriamiento post – soldadura:** las placas soldadas fueron introducidas en la arena sílice en cuanto se culminó con el proceso de soldadura, debido a que un cambio brusco de temperatura en podría ocasionar cambios microestructurales, y provocar defectos en la soldadura, por lo tanto, se debe tener un enfriamiento lento y homogéneo en las placas.

Tabla 2.18. Proceso de soldadura de las placas.

Proceso de soldadura de las placas	
Diseño de la junta	Colocación de puentes
	
	
Pre calentamiento y cordón de soldadura	Enfriamiento post - soldadura
	
	

(Fuente: Propia)

2.4. Ensayos realizados

Los ensayos realizados en general fueron no destructivos y destructivos, debido a que estas pruebas nos permiten detectar y evaluar los defectos presentes en los materiales soldados, así como también conocer algunas propiedades de ellos respectivamente.

2.4.1. Ensayos no destructivos

Dentro de estos ensayos se ejecutaron algunos de ellos que son bastante accesibles económicamente como son: inspección visual, tintas penetrantes, y radiografía industrial,

para evaluar cada uno de ellos se tomó como referencias la norma ANSI/AWS D11.2-89.

2.4.1.1. Inspección visual

Este ensayo se efectuó como un método primario de control de calidad de la soldadura, el cual permite identificar discontinuidades e imperfecciones de la soldadura de manera superficial.

2.4.1.1.1. Probetas utilizadas

La inspección visual se llevó a cabo en los cordones de soldadura realizadas en las barras (Tabla 2.9.) y sobre todo en los cordones de soldadura desarrollada en las placas (Tabla 2.19.).

Tabla 2.19. Placas soldadas.

Características finales de las placas soldadas	
Cantidad	2
Longitud [mm]	350
Ancho [mm]	300
Espesor [mm]	8



(Fuente: Propia)

2.4.1.1.2. Herramienta utilizada

Para la inspección visual de los cordones de soldadura se utilizó como herramienta principal una lupa, ver Figura 2.1.



Figura 2.1. Lupa utilizada para la inspección visual.
(Fuente: Propia)

2.4.1.2. Tintas penetrantes

Este tipo de ensayo permite detectar imperfecciones superficiales en materiales metálicos y no metálicos, de manera general el ensayo consiste en aplicar un líquido con gran poder de humectación sobre el cordón de soldadura o sobre el área del material a ensayar, el cual penetrara en las discontinuidades por efecto de la capilaridad, el resto se retira con una limpieza apropiada y se aplica un revelador el cual es el encargado de extraer el líquido atrapado en las discontinuidades y de esta manera se aprecia las imperfecciones.

2.4.1.2.1. Probetas utilizadas

El ensayo de tintas penetrantes se ejecutó en los cordones de soldadura tanto de las barras (Tabla 2.9.) como de las placas soldadas (Tabla 2.19.).

2.4.1.2.2. Material utilizado

Para el desarrollo de este ensayo se usó franelas, thinner, y el kit de tintas penetrantes compuesto por el líquido penetrante (Met-L-Check VP-31A) y el revelador (Met-L-Check D-70). mostrados en la Figura 2.2.



Figura 2.2. Kit Met-L-Check para el ensayo de tintas penetrantes.
(Fuente: Propia)

2.4.1.2.3. Procedimiento

Este ensayo se desarrolló en el Laboratorio de soldadura bajo la supervisión del Ing. Gabriel Velasteguí, para realizar el ensayo se debe ejecutar los siguientes trabajos detallados a continuación y mostrados en la Tabla 2.20.

- Limpiar la superficie de los cordones de soldadura retirando la escoria y las salpicaduras.

- Emplear un paño humedecido con thinner sobre la superficie a ensayar, para dejar seca y libre de impurezas (polvo, grasas, etc.).
- Aplicar el líquido penetrante (Penetrant – color rojo), y dejar reposar por 10 min.
- Usar un paño seco para retirar el exceso del líquido penetrante dejando la superficie limpia.
- Aplicar el revelador (Developer – color blanco), dejar actuar por 10 minutos.
- Finalmente observar las imperfecciones si es el caso, las cuales se muestran con un color rojizo sobre una superficie blanca.

Tabla 2.20. Proceso del ensayo de tintas penetrantes.

Ensayo de tintas penetrantes	
Limpieza	Aplicación del líquido penetrante
	
Aplicación del revelador	Observación final
	

(Fuente: Propia)

2.4.1.3. Radiografía industrial

Por medio de este tipo de ensayo se logra apreciar discontinuidades que no son posibles observar mediante los líquidos penetrantes, esta técnica consiste en atravesar el material a ensayar con un haz de radiación electromagnética ionizante (rayos X o rayos gamma), la cual será absorbida por las discontinuidades, llegando al lado opuesto de la cara, con intensidades de radiación diferentes, con lo cual al revelar la película radiográfica muestra la localización de las discontinuidades. (SCI, 2018)


2.4.1.3.1. Probetas utilizadas

El ensayo de radiografía industrial se aplicó en las placas soldadas (Tabla 2.19.), debido a que éstas fueron objeto de estudios.

2.4.1.3.2. Equipos utilizados

Este ensayo fue realizado en el Laboratorio de Ensayos no destructivos de la escuela Politécnica Nacional, para lo cual han hecho uso del equipo radiográfico detallado en la Tabla 2.21.

Tabla 2.21. Desbastadora de disco para pulido grueso.

Características	Especificación técnica	Descripción gráfica
Modelo	BALTOGRAPHE 200	
Marca	BALTEAU	
Fuente	3,2 x 3,2 [mm]	
Ángulo de haz	360° X 40°	
Ángulo objetivo	22°	
Máximo voltaje alto	200 [kV]	
Potencia nominal	600 [W]	
Corriente máxima	10 [Ma]	
Peso neto	13 [kg]	

(Fuente: Propia)

2.4.2. Ensayos destructivos

Se realizaron varios ensayos destructivos a las placas con el fin de determinar las propiedades mecánicas, y caracterizar la microestructura de las juntas soldadas, a continuación, se detallan las pruebas realizadas.

2.4.2.1. Metalografías

Para el análisis metalográfico se realizaron macrografías y micrografías, debido a que estos ensayos permiten determinar las zonas presentes en la soldadura como son: material de aporte, zona afectada por el calor (ZAC) y material base, así como también la microestructura de cada una de ellas, y en base a ello comparar los resultados con metalografías ya establecidas en diferentes fuentes de investigación.

Como un caso particular se decidió realizar cortes transversales y longitudinales en las probetas soldadas con el material de aporte para acero inoxidable (AWS E 312-16), debido a que se presentó una fisura transversal en el cordón de soldadura, y con ello realizar micrografías y macrografías, con el objetivo de determinar la causa de dicha fisura.

2.4.2.1.1. Micrografías

Las micrografías nos permiten observar la microestructura interna del material, así como también varias zonas que pueden presentarse al momento de unir las placas mediante la soldadura.

2.4.2.1.1.1. Probetas utilizadas

Para las micrografías transversales se utilizaron 4 probetas que se detallan en la Tabla 2.22. (2 por cada tipo de material de aporte), después de realizar estos ensayos, se cortaron nuevamente las probetas soldadas con el electrodo para acero inoxidable AWS E 312-16 pero esta vez en dirección longitudinal al cordón de soldadura, con el fin de estudiar la fisura que se presentó en esta junta soldada (Tabla 2.23).

Tabla 2.22. Dimensiones de las probetas para micrografías transversales.

Especificaciones	
Cantidad	4
Longitud [mm]	40
Ancho [mm]	20
Espesor [mm]	8



(Fuente: Propia)

Tabla 2.23. Dimensiones de las probetas con fisura para micrografía longitudinal.

Especificaciones	
Cantidad	2
Longitud [mm]	20
Ancho [mm]	20
Espesor [mm]	8



(Fuente: Propia)

2.4.2.1.1.2. Equipos utilizados en el ensayo

Los ensayos de micrografía tanto trasversal y longitudinal al cordón de soldadura se realizaron en el Laboratorio de Metalografía de la Escuela Politécnica Nacional, los equipos utilizados son los que se detallan en el apartado 2.1.2.2.

2.4.2.1.1.3. Procedimiento

El procedimiento a seguir es el mismo que se detalló en el apartado 2.1.2.3., con la diferencia de que se utilizó marble y agua regia como reactivos para el ataque químico de la sección del cordón de soldadura tanto para la soldadura formado con el material de aporte para acero inoxidable (AWS E 312-16) y para hierro fundido (AWS E NiFe-CI) respectivamente, mientras que para el resto de la probeta se usó Nital al 10%, todo esto en base a la norma ASTM E407-07.

Para realizar los cortes de las probetas soldadas con material de aporte para acero inoxidable se intentó en primera instancia cortar de forma manual utilizando una sierra de arco pero este trabajo resultó complicado debido a la elevada dureza del material de aporte, por lo tanto, se acudió a la Mecánica Don Bosco en donde disponen del equipo de corte con hilo de tungsteno (Figura 2.3.), un equipo que no permite que la pieza se caliente al momento del corte ya que utiliza líquido refrigerante con lo cual no se generan alteraciones en la microestructura del material. Este equipo permite seccionar cualquier tipo de material por más duro que sea sin alterar su composición siempre y cuando sea conductor eléctrico.



Figura 2.3. Máquina de corte con hilo de tungsteno.
(Fuente: Propia)

2.4.2.1.2. Macrografías

La macrografía es un ensayo que permite observar discontinuidades o defectos en probetas previamente preparadas, con la ayuda de un microscopio a una baja amplificación, es muy útil para evaluar la calidad en las soldaduras y también para observar superficies de fractura para correlacionar características de superficie con mecanismos de falla. (CYTI , 2017)

El procedimiento a seguir es el mismo que se detalla en el apartado 2.1.2.3. Se utilizaron las probetas cuyas especificaciones se encuentran en las Tablas 2.22. y 2.23., los equipos utilizados para realizar el ensayo son los mismos que se presentan en la sección 2.1.2.2., a diferencia del microscopio, ya que este es de un modelo SZX7 diferente al otro.

2.4.2.2. Dureza

Según la norma ANSI/AWS B4.0, el ensayo de dureza proporciona datos cuantitativos, que se pueden comparar, analizar y usar en el diseño y análisis de procedimientos de soldadura, también este ensayo es muy útil para poder analizar fallas de soldadura principalmente en la formación de grietas, así como también para determinar cómo se vio afectado el material base por el calor generado en el proceso de soldadura. Las probetas que se utilizaron fueron las mismas usadas para las metalografías (Tabla 2.22.) y el equipo utilizado es el durómetro Hardrocker (Tabla 2.8.).

2.4.2.3. Tracción

De acuerdo con la norma ANSI/AWS B4.0, el ensayo de Tracción proporciona información sobre la capacidad de carga, el diseño de la junta y la ductilidad de las uniones soldadas. También ayuda a proporcionar datos cuantitativos que pueden ser analizadas y comparadas para el diseño y análisis de juntas unidas, la superficie de fractura puede ayudar a detectar discontinuidades tales como fusión incompleta, falta de penetración, porosidades, inclusiones y agrietamiento.

2.4.2.3.1. Probetas utilizadas

Para el material base se prepararon dos probetas de acuerdo con las especificaciones de la norma ASTM E8 (Tabla 2.24.), mientras que para evaluar las propiedades de las juntas soldadas fueron preparadas 4 probetas (2 para tipo de material de aporte) de acuerdo con la norma ANSI/AWS D11.2-89 (Tabla 2.25.), los planos tanto para el material base como para las uniones soldadas se encuentran en el Anexo III.

Tabla 2.24. Probetas para el ensayo de tracción del material base.

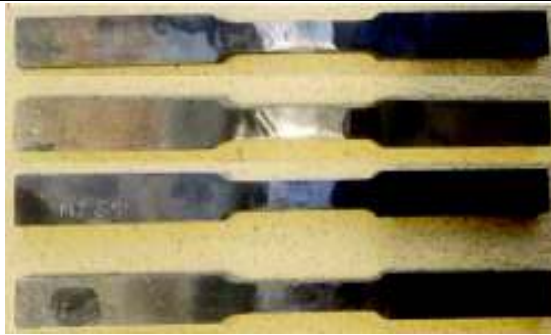
Especificaciones	
Cantidad	2
Longitud	
Total [mm]	240
Sección reducida [mm]	57
Ancho	
Total [mm]	20
Sección reducida [mm]	12,5
Espesor [mm]	8



(Fuente: Propia)

Tabla 2.25. Probetas para ensayo de tracción de las juntas soldadas.

Especificaciones	
Cantidad	4
Longitud	
Total [mm]	240
Sección reducida [mm]	57
Ancho	
Total [mm]	20
Sección reducida [mm]	12,5
Espesor [mm]	8



(Fuente: Propia)

2.4.2.3.2. Equipos utilizados

El ensayo de Tracción se lo realizó en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV) de la Escuela Politécnica Nacional, se utilizó la máquina universal de ensayos cuyas características se especifican en la Tabla 2.26.

Tabla 2.26. Máquina universal para ensayo de tensión.

Características	Especificación técnica	Descripción gráfica
Marca	Tinius Olsen	
Modelo	L	
Velocidad de ensayo	0 – 76 [mm/min]	
Carga máxima	3000 [Kn]	

(Fuente: Propia)

2.4.2.3.3. Procedimiento

Para llevar a cabo el ensayo de tensión tanto en el material base como en las juntas soldadas se llevó a cabo el siguiente procedimiento cuyas ilustraciones gráficas se pueden observar en la Tabla 2.27.

- Preparar las probetas de acuerdo con las normas específicas para el material base y las juntas soldadas, verificar las dimensiones tanto de largo como de ancho.
- Se debe marcar en las probetas los puntos de referencia que servirán para determinar la elongación del espécimen ensayado.
- Verificar que la máquina se encuentre en su posición inicial y colocar la probeta en la máquina universal de ensayos, sujetándola con las mordazas tipo cuña.
- Establecer la velocidad de carga para realizar el ensayo de acuerdo con los requerimientos de cada norma.
- Encender la máquina, encerar y finalmente realizar el ensayo.
- Desmontar las probetas, medir las marcas colocadas al inicio y comparar los resultados obtenidos con las normas de los materiales ensayados.

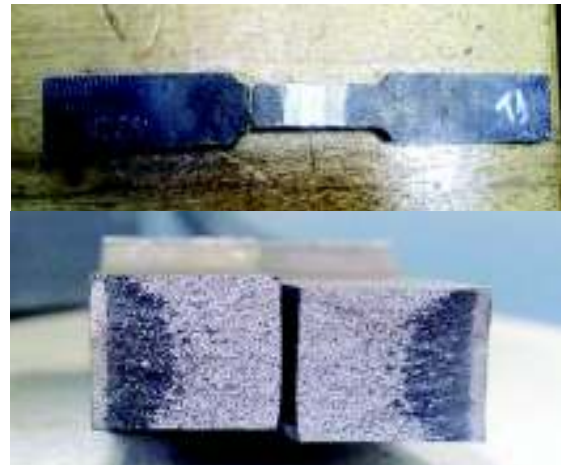
Tabla 2.27. Ensayo de tracción.

Prueba de tracción	
Preparación de probetas	Marcas en las probetas y montaje
	

Configuración de parámetros



Aplicación de la carga y observación final



(Fuente: Propia)

2.4.2.4. Doblado

Según la norma ANSI/AWS B4.0, el ensayo de doblado ayuda a determinar la ductilidad de una junta soldada en función de la resistencia a la fractura y a la presencia de discontinuidades en la superficie de doblado tales como fusión incompleta, deslaminación y el efecto de la configuración del cordón de soldadura.

Debido a la baja ductilidad de las fundiciones, el ensayo de doblado no es necesario para poder evaluar la calidad de la soldadura, en el presente trabajo de titulación se decidió realizar esta prueba únicamente con fines informativos y comparativos entre los dos tipos de material de aporte utilizados.

2.4.2.4.1. Probetas utilizadas

Por cada material de aporte (AWS E 312-16 y AWS E NiFe-CI) se realizó un doblado de cara y uno de raíz, teniéndose un total de 4 probetas (Tabla 2.28) que fueron preparadas de acuerdo con la norma ASTM E190-14.

Tabla 2.28. Probetas para ensayo de doblado.

Especificaciones	
Cantidad	4
Longitud [mm]	280
Ancho [mm]	30
Espesor [mm]	8

(Fuente: Propia)

2.4.2.4.2. Equipos utilizados

El ensayo de doblado se realizó en el Laboratorio de Soldadura de la Escuela Politécnica Nacional, y se utilizó la unidad hidráulica disponible en el mismo cuyas características se especifican en la Tabla 2.29.

Tabla 2.29. Unidad hidráulica para ensayo de doblado.

Características	Especificación técnica	Descripción gráfica
Modelo	Tesis unidad hidráulica	
Código EPN	17578.00001	
Datos del motor:		
Modelo	Siemens	
Potencia	2 [HP]	
Velocidad de giro	1720 [rpm]	





(Fuente: Propia)

2.4.2.4.3. Procedimiento

Para realiza el ensayo de doblado tanto de cara como de raíz se llevó a cabo el siguiente procedimiento cuyas ilustraciones gráficas se pueden observar en la Tabla 2.30.

- Preparar las cuatro probetas de acuerdo con las especificaciones de la norma ASTM E190-14, y pulir las superficies a ser examinadas.
- Colocar la probeta en la unidad hidráulica, centrando la superficie de la soldadura con respecto al émbolo en forma de U, dependiendo del tipo de doblado se debe colocar el espécimen con la superficie de la cara o la raíz hacia arriba.
- Encender el equipo, aplicar una carga lenta y constante hasta obtener las probetas en forma de U, para el caso particular de este estudio, se debe aplicar una carga hasta observar que el espécimen empiece a fracturarse, debido a que el material base presenta alta fragilidad.
- Retirar la probeta de la dobladora hidráulica y analizar las superficies de fractura.

Tabla 2.30. Proceso del ensayo de doblado.

Prueba de doblado	
Preparación de probetas	Colocación de la probeta en la dobladora
	
Aplicación de la fuerza	Observación final
	

(Fuente: Propia)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se puntualiza de manera explícita los resultados obtenidos de los diferentes trabajos detallados en la metodología como son: caracterización del material base, determinación de la temperatura de precalentamiento, soldadura de las placas y ensayos no destructivos y destructivos, los cuales serán analizados y discutidos basados en la norma ANSI/AWS D11.2-89, con la finalidad de dar a conocer el comportamiento químico, mecánico, y metalúrgico de las muestras analizadas y con ello saber si es factible la utilización de los electrodos propuestos (AWS E 312-16 y AWS E NiFe-CI) para soldar hierro fundido nodular.

3.1. Resultados para la caracterización del material base

Previo a la caracterización del material base se presentan los resultados obtenidos de ensayos químicos, metalográficos y mecánicos, mediante los cuales se podrá dar a conocer el tipo de hierro fundido.

3.1.1. Composición química

El resultado de composición química del material base obtenido mediante el ensayo de espectrometría se detalla en el Anexo IV, y se muestra de manera resumida en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Composición química del material base.

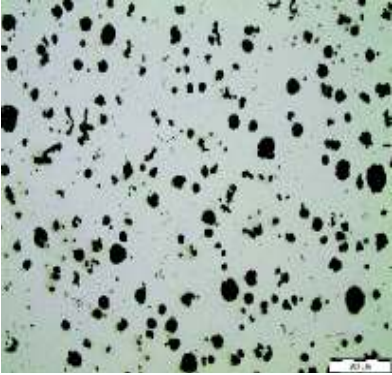
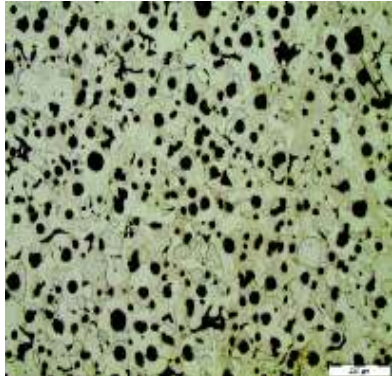
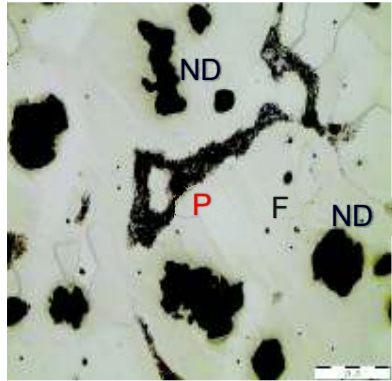
Composición M.B.	Porcentaje [%]
Carbono (C)	3,857
Silicio (Si)	3,729
Manganeso (Mn)	0,241
Fósforo (P)	0,021
Azufre (S)	<0,003
Cromo (Cr)	0,074
Molibdeno (Mo)	<0,005
Níquel (Ni)	0,036
Cobre (Cu)	<0,005
Aluminio (Al)	0,007
Magnesio (Mg)	0,052
Estaño (Sn)	<0,002
Hierro (Fe)	91,970

(Fuente: Laboratorio de Fundición, 2018)

3.1.2. Metalografías del material base

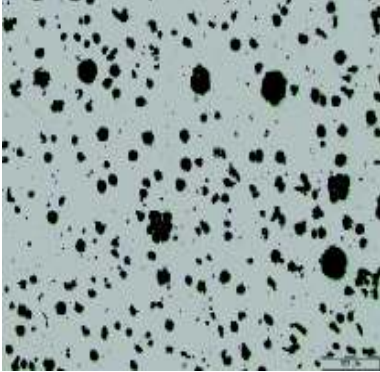
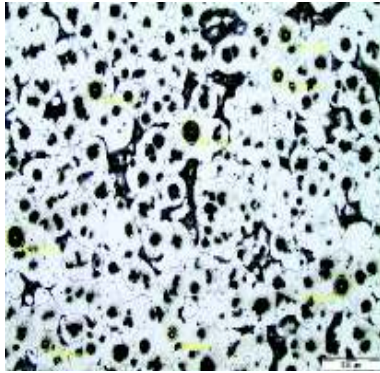
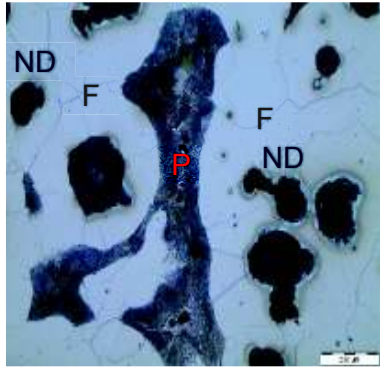
Tanto la Tabla 3.2. como la Tabla 3.3. muestran los resultados de las micrografías realizadas al material base, en donde se presentan fotografías con magnificación 100X y 500X de probetas sin ataque y con ataque químico (Nital al 10%).

Tabla 3.2. Micrografías de la probeta N°1 del material base.

Material Base			
Identificación Probeta N°1	Aumento	Imagen	Observaciones
Sin ataque	100X		Existe la presencia de grafito en forma de nódulos (puntos negros), pero no son totalmente uniformes.
Con ataque	100X		Existe la presencia de grafito nodular, ferrita y pequeñas fracciones de perlita.
Con ataque	500X		Se observa los nódulos de grafito rodeados de ferrita (parte blanca) con presencia de perlita. ND: nódulo de grafito P: perlita F: ferrita

(Fuente: LMDF, 2018)

Tabla 3.3. Micrografías de la probeta N°2 del material base.

Material Base			
Identificación Probeta N°2	Aumento	Imagen	Observaciones
Sin ataque	100X		No existe homogeneidad de los nódulos de grafito en el material (puntos negros de diferente forma y tamaño).
Con ataque	100X		Se observa la presencia de ferrita alrededor del grafito nodular (parte blanca), y en menor proporción aparece la perlita de forma alargada.
Con ataque	500X		Se observa la presencia de ferrita en gran cantidad y una proporción mínima de perlita. ND: nódulo de grafito P: perlita F: ferrita

(Fuente: LMDF, 2018)

3.1.3. Dureza del material base

La Tabla 3.4. muestra los resultados de los ensayos de dureza realizados al material base, en donde se toman 3 medidas de una probeta sin pulir y 12 medidas de una probeta pulida en 2 barridos de 6, y a su vez se presenta el promedio de cada una.

Tabla 3.4. Dureza del material base.

Identificación Probeta		Medidas de dureza en HRB						Promedio
		1	2	3	4	5	6	
Sin pulir	Un solo Barrido	87	86	86	----	----	----	86
	1er. Barrido	85	87	85	86	86	84	86
Pulida	2do. Barrido	86	84	84	85	81	82	84

(Fuente: Propia)

3.1.4. Tracción del material base

La Tabla 3.5., presenta los resultados del ensayo de tracción de manera resumida, el informe completo otorgado por el LAEV se detalla en el Anexo V.

Tabla 3.5. Resultados del ensayo de tracción del material base.

Id.	Carga máxima registrada		Límite de fluencia		Resistencia a la tracción		% Elongación en 50 mm
	lbf	N	ksi	Mpa	ksi	Mpa	
MBT1	11731	52182	54,8	378,2	71,8	494,8	15,3
MBT2	10341	45999	55,6	383,4	66,1	455,5	10,8
PROMEDIO	11036	49090	55,2	380,8	68,9	475,1	13,1

(Fuente: LAEV,2018)

Las probetas del material base utilizadas en el ensayo de tracción presentan fractura frágil, con un color gris oscuro en el inicio de la fractura y un color brillante en la zona de fractura por clivaje, esto se observa tanto en la Figura 3.1. como en la Figura 3.2.

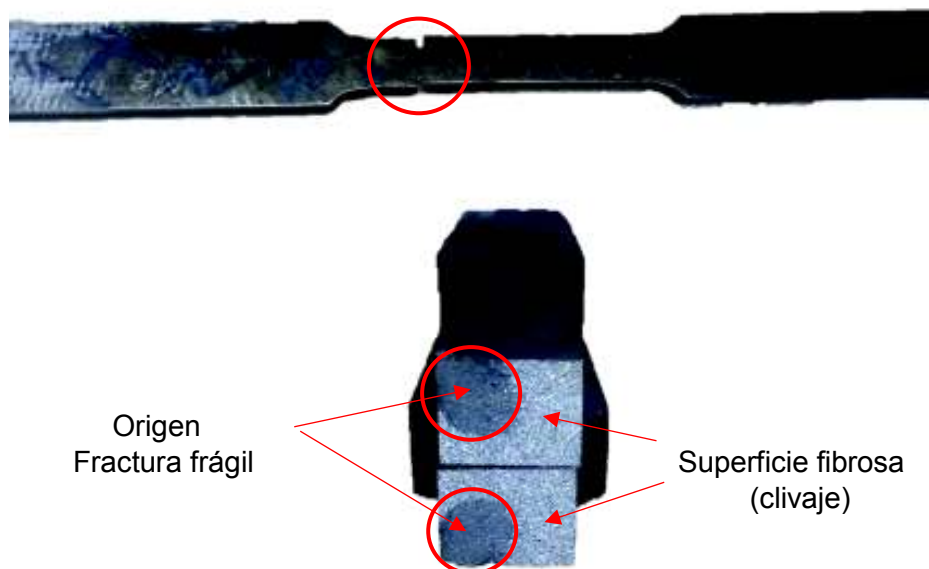
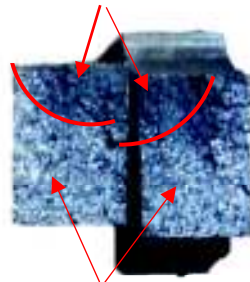


Figura 3.1. Probeta del material base (MBT1) utilizada en el ensayo de tracción.
(Fuente: Propia)



Fractura frágil - Origen





Superficie fibrosa (clivaje)




Figura 3.2. Pobreta del material base (MBT1) utilizada en el ensayo de tracción.
(Fuente: Propia)

3.2. Resultados del ensayo de soldabilidad para determinar la temperatura de precalentamiento

La temperatura de precalentamiento fue determinada mediante el ensayo de soldabilidad de 12 barras rectangulares de hierro fundido nodular, basados en la norma ANSI/AWS D11.2-89, para lo cual se llevó a cabo tres series de soldaduras, evaluada cada una de estas mediante el ensayo de tintas penetrantes después de 24 horas entre cada serie, los resultados obtenidos de la primera serie tanto del electrodo de acero inoxidable (AWS E 312-16) como el de hierro fundido (AWS E NiFe-CI) se detallan en la Tabla 3.6. y Tabla 3.7. respectivamente.





Tabla 3.6. Resultados de la primera serie de soldadura con electrodo para acero inoxidable.

Probetas soldadas con electrodo AWS E312-16		
Temperatura [°C]	Imagen	Observaciones
Temperatura ambiente 24		Se presentan dos fisuras, una al final del cordón y la segunda es de tipo transversal en la mitad del mismo, también existe presencia de salpicaduras y porosidades.
121		Presencia de escoria al final del cordón, escasa porosidad, salpicaduras y agrietamiento debido a la presencia de rechupes en el material base.

*260		Presencia de fisuras transversales al inicio del cordón, además del exceso de escoria y porosidades.
400		Se aprecia porosidades de manera excesiva al final del cordón y salpicaduras a lo largo de la soldadura, pero no existe la presencia de agrietamiento.
540		Se observa excesivas porosidades a lo largo del cordón de soldadura, así como también la presencia de salpicaduras, pero no existe agrietamiento.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.7. Resultados de la primera serie de soldadura con electrodo para hierro fundido.




Probetas soldadas con electrodo AWS E NiFe-CI		
Temperatura [°C]	Imagen	Observaciones
Temperatura ambiente 24		Se presenta una pequeña fisura al final del cordón de soldadura, y escasa salpicaduras, no se observan porosidades.
121		Existe la presencia de agrietamiento al final del cordón, concentración de salpicaduras y escoria en el extremo superior de la soldadura.
*260		Aparece una fisura al final del cordón, falta de fusión en el costado inferior de la soldadura, pero no se presenta porosidades y salpicaduras en exceso.
400		No se presenta agrietamiento, pero se observa una gran cantidad de poros concentrados al final del cordón de soldadura, y escasa salpicadura.

540		No se aprecia agrietamiento alguno, solo existe la presencia de poros al terminar el cordón de soldadura.
-----	--	---

(Fuente: Propia)

En base a los resultados presentados en la Tabla 3.6. y Tabla 3.7. correspondientes a la primera serie de soldadura de las barras tanto con el electrodo para acero inoxidable como para hierro fundido respectivamente, se determina la temperatura máxima a la cual sigue ocurriendo el agrietamiento, esta temperatura llego a ser coincidente para la soldadura con los dos tipos de electrodos y corresponde a 260°C, por lo tanto, de acuerdo con la norma ANSI/AWS D11.2-89, el valor de la temperatura “X” detallado en el apartado 1.2.3.1.1. será de 260°C, a esta temperatura se le adicionan 28°C, 56°C, 83°C y 111°C respectivamente y de esta manera se obtienen las temperaturas para la segunda serie de soldadura, estos resultados se presentan en la Tabla 3.8. (M.A. AWS E 312-16) y en la Tabla 3.9. (M.A. AWS E NiFe-CI).

Tabla 3.8. Resultados de la segunda serie de soldadura con electrodo para acero inoxidable.

Probetas soldadas con electrodo AWS E 312-16		
Temperatura [°C]	Imagen	Observaciones
288		Al inicio del cordón existen porosidades y salpicaduras y una fisura al final, además se aprecia incrustaciones de escoria.
316		Presencia de fisuras al final del cordón de soldadura, y excesiva concentración de poros y salpicaduras a lo largo de todo el cordón.
*343		Fisura al inicio del cordón, y concentración de poros al final del mismo, excesiva presencia de poros y salpicaduras.
371		No se evidencian fisuras, sin embargo, se presentan a lo largo de todo el cordón mucha porosidad y salpicaduras, en el extremo superior se evidencia la falta de fusión.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.9. Resultados de la segunda serie de soldadura con electrodo para hierro fundido.




Probetas soldadas con electrodo AWS E NiFe-CI		
Temperatura [°C]	Imagen	Observaciones
288		Presencia de fisura en el costado inferior del cordón, escoria al finalizar la soldadura, mínima cantidad de poros y salpicaduras.
316		Se evidencia una fisura al iniciar el cordón, agrupación de poros al finalizar la soldadura, mínima presencia de poros y salpicaduras en exceso.
*343		Fisura al final del cordón, mínima presencia de poros y salpicaduras a lo largo de la soldadura.
371		No se evidencias fisuras, se presentan poros agrupados al final del cordón y mínima cantidad de salpicaduras.

(Fuente: Propia)

Al igual que en el caso anterior se determina la temperatura máxima a la cual se sigue evidenciando el agrietamiento, basados en los resultados de la Tabla 3.8. y Tabla 3.9. correspondientes a la segunda serie de soldadura de las barras con los electrodos para acero inoxidable y para hierro fundido respectivamente, esta temperatura corresponde a 343°C para los dos tipos de electrodos, por lo tanto, el valor de la temperatura “Y” detallado en el apartado 1.2.3.1.2. será de 343°C, a esta temperatura nuevamente se le adicionan 6°C, 11°C, 17°C, y 22°C, respectivamente para obtener las temperaturas para la tercera y última serie de soldadura, estos resultados se muestran en la Tabla 3.10. (M.A. AWS E 312-16) y en la Tabla 3.11. (M.A. AWS E NiFe-CI).





Tabla 3.10. Resultados de la tercera serie de soldadura con electrodo para acero inoxidable.

Probetas soldadas con electrodo AWS E 312-16		
Temperatura [°C]	Imagen	Observaciones
349		Concentración de porosidades y salpicaduras al inicio del cordón y al final se evidencia una fisura.

*354		No se evidencia agrietamiento, se observa excesiva presencia de poros y salpicaduras a lo largo de la soldadura.
360		No se presentan fisuras, se observa una gran cantidad de salpicaduras, poros agrupados al final de cordón y falta de penetración en el costado inferior.
365		No hay evidencia de fisuras, al final del cordón se encuentran poros agrupados, falta de fusión en el costado superior de la soldadura, mínima presencia de salpicaduras.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.11. Resultados de la tercera serie soldadas con material de aporte para hierro fundido.

Probetas soldadas con electrodo AWS E NiFe-CI		
Temperatura [°C]	Imagen	Observaciones
349		Agrietamiento al final del cordón, presencia de escoria en el costado inferior de la soldadura, no se evidencian salpicaduras.
*354		No se presentan fisuras, se puede observar gran cantidad de escoria y poros agrupados al final del cordón de soldadura.
360		No existe agrietamiento, mínima cantidad de salpicaduras, al final del cordón se presentan porosidades.
365		No existe evidencia de fisuras, mínima cantidad de salpicaduras, no se presentan porosidades, al final del cordón se observa escoria.

(Fuente: Propia)

En base a los resultados de la tercera serie de soldadura que se presentan en la Tabla 3.10 y en la Tabla 3.11. tanto para el electrodo de acero inoxidable como para hierro fundido respectivamente, y tomando como referencia la norma ANSI/AWS D11.2-89, se determina la temperatura mínima a la cual ya no existe agrietamiento, esta corresponde a **354 °C** para la soldadura con los dos tipos de electrodos, este valor es denominado temperatura sin grietas (apartado 1.2.3.1.3.), la cual es requerida para realizar el precalentamiento previo a la soldadura de las placas.

3.3. Resultados de la soldadura de las placas

La Tabla 3.12. presenta los resultados de las placas soldadas con los dos tipos de electrodos (AWS E312-16 y AWS E NiFe-CI) en donde se describe de manera general los aspectos físicos que se observan de éstas.

Tabla 3.12. Resultados de las placas soldadas.

Soldadura de las placas con los dos tipos de electrodos	
Id.	Observación
Placa soldada con M.A. AWS E 312-16	 <p>Esta placa soldada presenta deformación angular de aproximadamente 4°, por contracción del material base en la parte superior.</p>
Placa soldada con M.A. AWS E NiFe-CI	 <p>Esta placa soldada no presenta deformación en su aspecto visual, la soldadura efectuado en esta junta es de excelente calidad.</p>

(Fuente: Propia)





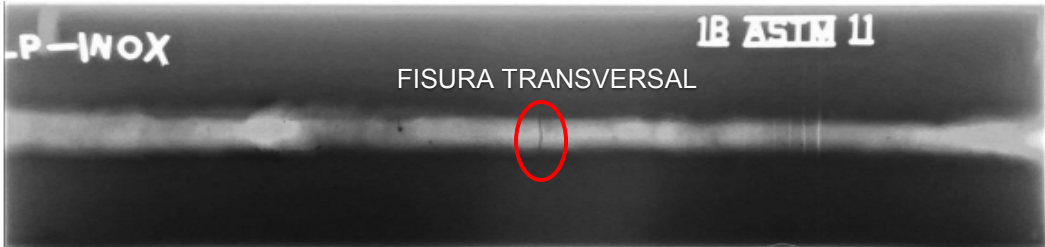
3.4. Resultados de los ensayos realizados en las placas soldadas

En este apartado se presentan los resultados de los ensayos no destructivos y destructivos realizados a las placas que fueron soldadas con los dos tipos de electrodos propuestos (AWS E 312-16 y AWS E NiFe-CI).

3.4.1. Resultados de los ensayos no destructivos

La Tabla 3.13. describe los resultados obtenidos de la inspección visual, tintas penetrantes, y radiografía industrial realizadas al cordón (cara y raíz) de la junta soldada con material de aporte para acero inoxidable.






Tabla 3.13. Resultados de los END de la junta soldada con M.A. AWS E 312-16.

Ensayos no destructivos de la junta soldada con M.A. AWS E 312-16	
Id.	Observación
Cara	 <p>FALTA DE CONTINUIDAD</p>
Raíz	 <p>FISURA TRANSVERSAL</p> <p>POROSIDADES</p>
Cara	 <p>POROSIDADES</p>
Raíz	 <p>FISURA TRANSVERSAL</p> <p>POROSIDADES</p> <p>POROSIDADES</p>
Raíz	 <p>P-INOX</p> <p>1B ASTM 11</p> <p>FISURA TRANSVERSAL</p>

(Fuente: Propia)

Al igual que en el caso anterior se presenta los resultados obtenidos de la inspección visual, tintas penetrantes, y radiografía industrial realizadas al cordón (cara y raíz) pero esta vez de la junta soldada con material de aporte para hierro fundido (Tabla 3.14.).

Tabla 3.14. Resultados de los END de la junta soldada con M.A. AWS E NiFe-CI.

Ensayos no destructivos de la junta soldada con M.A. AWS E NiFe-CI	
Id.	Observación
Cara	
Raíz	
Cara	
Raíz	
Cara	

(Fuente: Propia)

3.4.2. Resultados de los ensayos destructivos de las juntas soldadas.

De los ensayos destructivos realizadas a las juntas soldadas con los dos tipos de material de aporte (AWS E 312-16 y AWS E NiFe-CI), se presentan los resultados obtenidos de metalografías (macrografías y micrografías), dureza (macrodurezas y microdureza), tracción y doblado.

3.4.2.1. Macrografías

La Figura 3.3., muestra la fisura transversal generada en la raíz del cordón de soldadura de la junta soldada con electrodo para acero inoxidable (AWS E 312-16).

Por otro lado, tanto la Figura 3.4. como la Figura 3.5., corresponden a las macrografías realizadas a las juntas soldadas con los dos tipos de electrodos (AWS E 312-16 y AWS E NiFe-CI), respectivamente, en donde se detallan las diferentes zonas formadas en la unión soldada como son: material base (MB), zona afectada por el calor (ZAC), y zona del material de aporte (MA), , además se presentan las áreas de estas dos últimas zonas con la finalidad de evaluar cuál de las dos juntas soldadas presenta mayor afectación por el calor así como también el consumo del material de aporte.

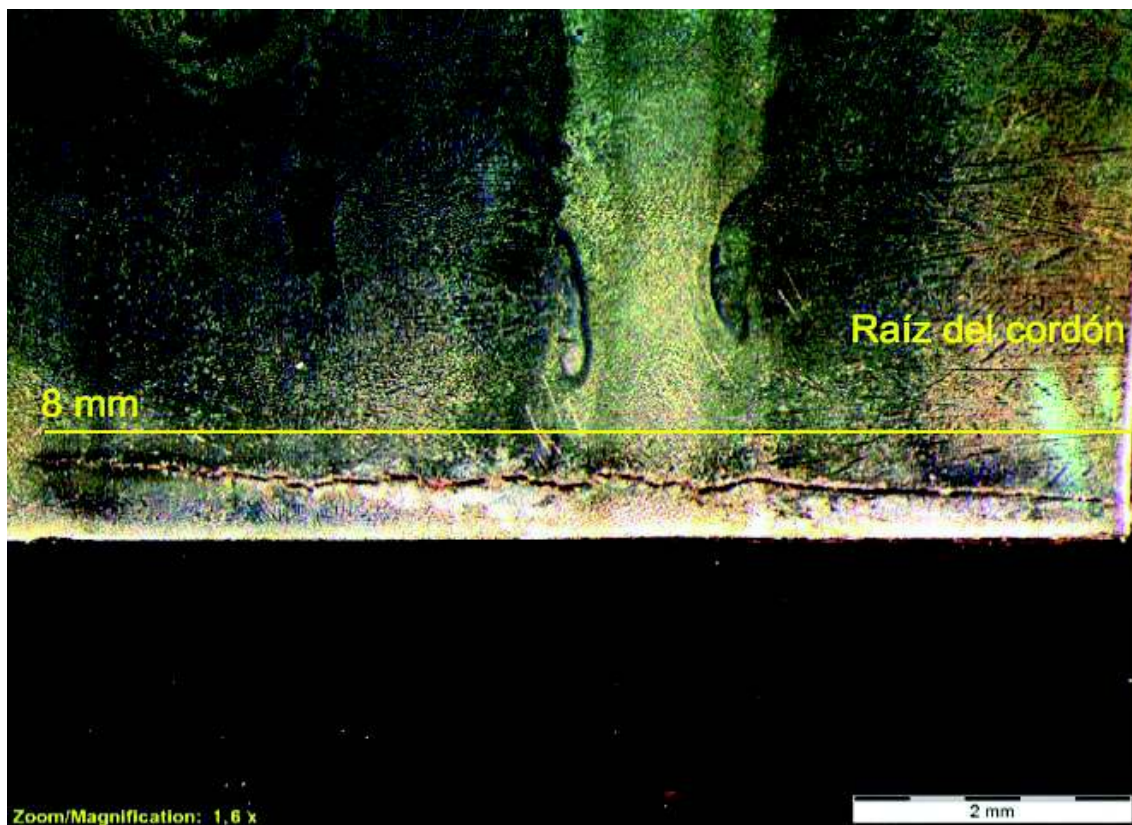


Figura 3.3. Macrografía de la fisura transversal en el cordón de respaldo de la junta soldada con M.A. AWS E 312-16 (Magnificación 1,6X).
(Fuente: LMDF, 2018)

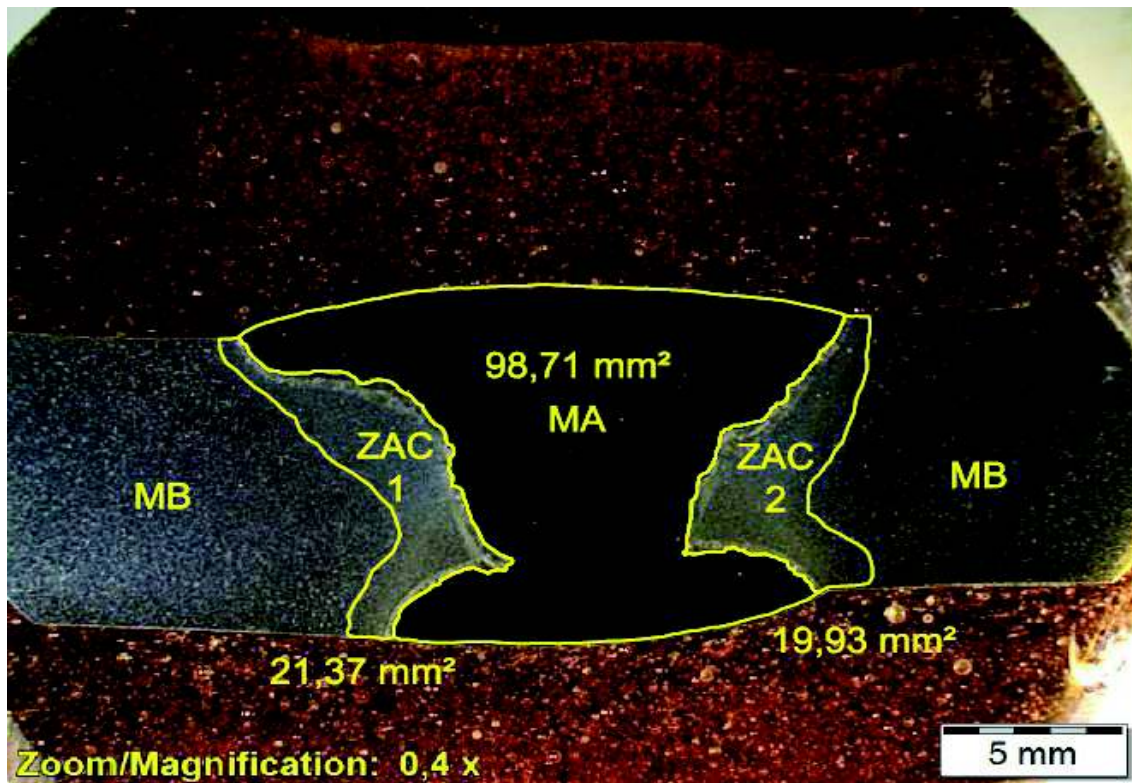


Figura 3.4. Macrografía de la junta soldada con M.A. AWS E 312-16 (Magnificación 0,4X).
(Fuente: LMDF, 2018)

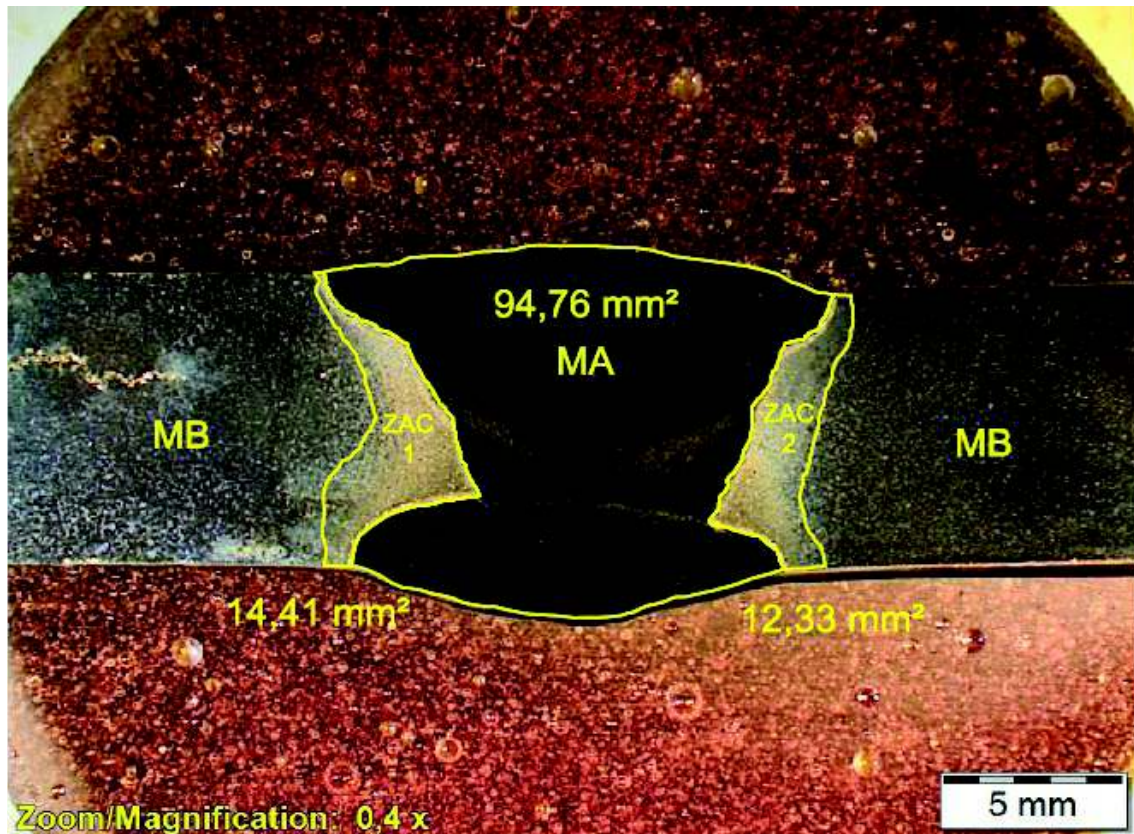


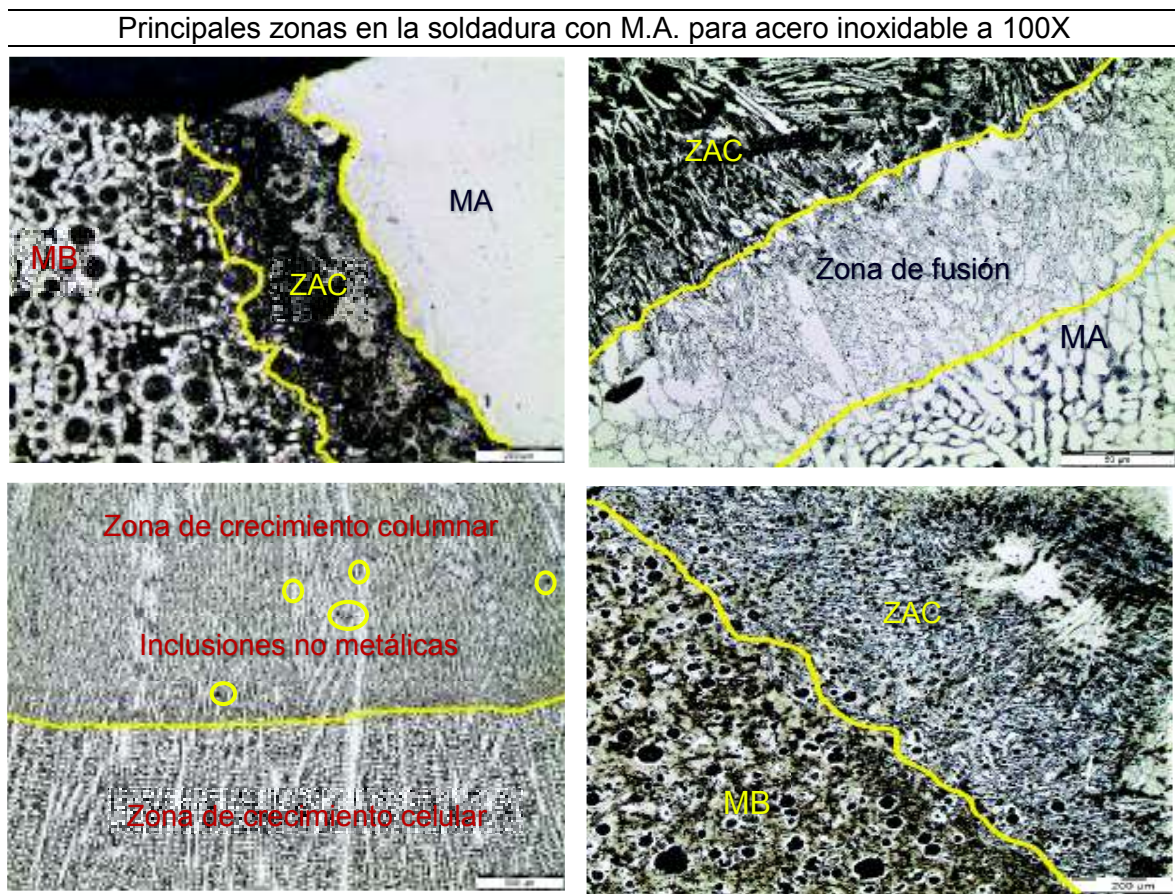
Figura 3.5. Macrografía de la junta soldada con M.A. AWS E NiFe-CI (Magnificación 0,4X).
(Fuente: LMDF, 2018)

3.4.2.2. Resultados de micrografías para la junta soldada con M.A. AWS E 312-16

Los resultados de las micrografías correspondientes a las probetas de la junta soldada con material de aporte para acero inoxidable AWS E 312-16, con magnificación 100X y 500X se presentan en la Tabla 3.15. y Tabla 3.16, respectivamente, en donde se identifican varias zonas que aparecen en la junta soldada tal como: material base (MB), zona afectada por el calor (ZAC), material de aporte (MA), crecimiento columnar (ZCO), crecimiento celular (ZCC), zona de fusión (ZF), y ciertos defectos encontrados.

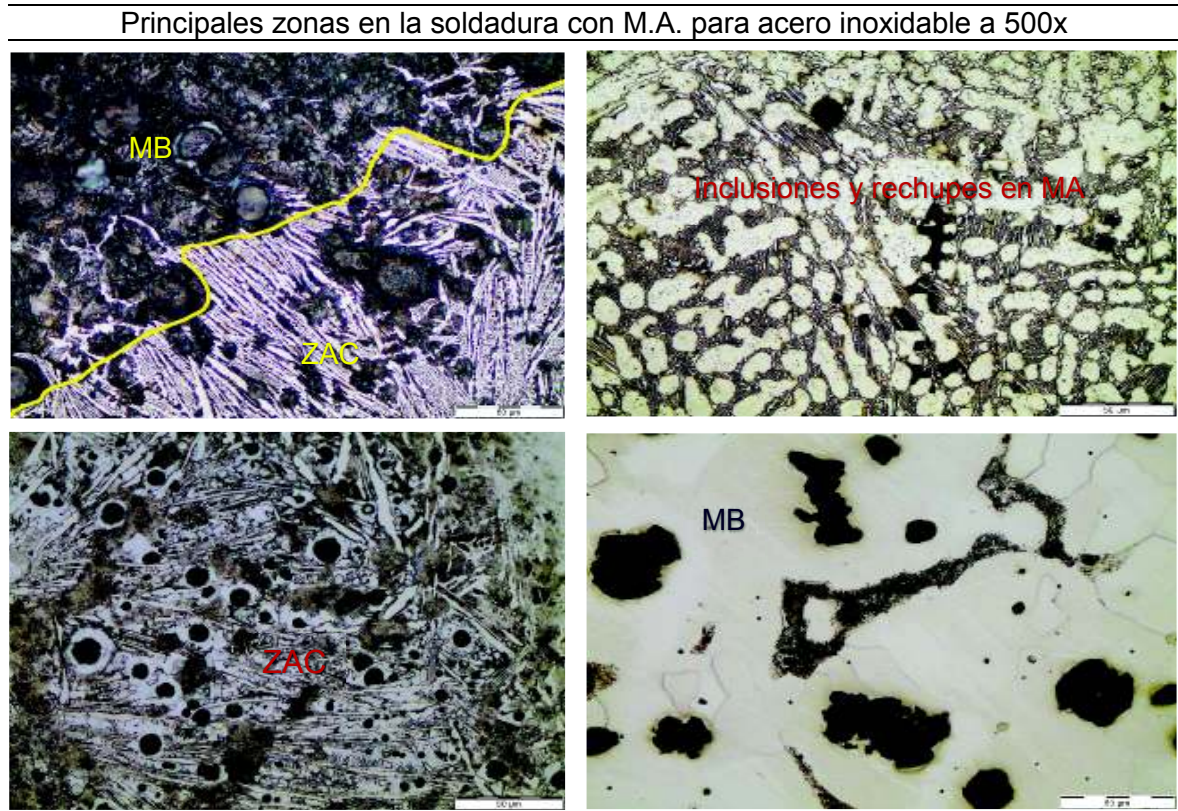
Además, debido a que en esta junta soldada se presentó una fisura transversal en la raíz del cordón de soldadura, se llevó a cabo micrografías tanto de la parte fisurada como de la parte sin fisura, con la finalidad de comparar de manera cuantitativa (mediante la medición del tamaño de las dendritas cerca de la zona de fractura), los resultados arrojados, estos a su vez se presentan en la Tabla 3.17. y en la Tabla 3.18. en donde se especifica la propagación de la fisura transversal y la comparación del tamaño de las dendritas en las diferentes secciones de los pases de soldadura de manera respectiva.

Tabla 3.15. Micrografías de la junta soldada con M.A. AWS E 312-16.



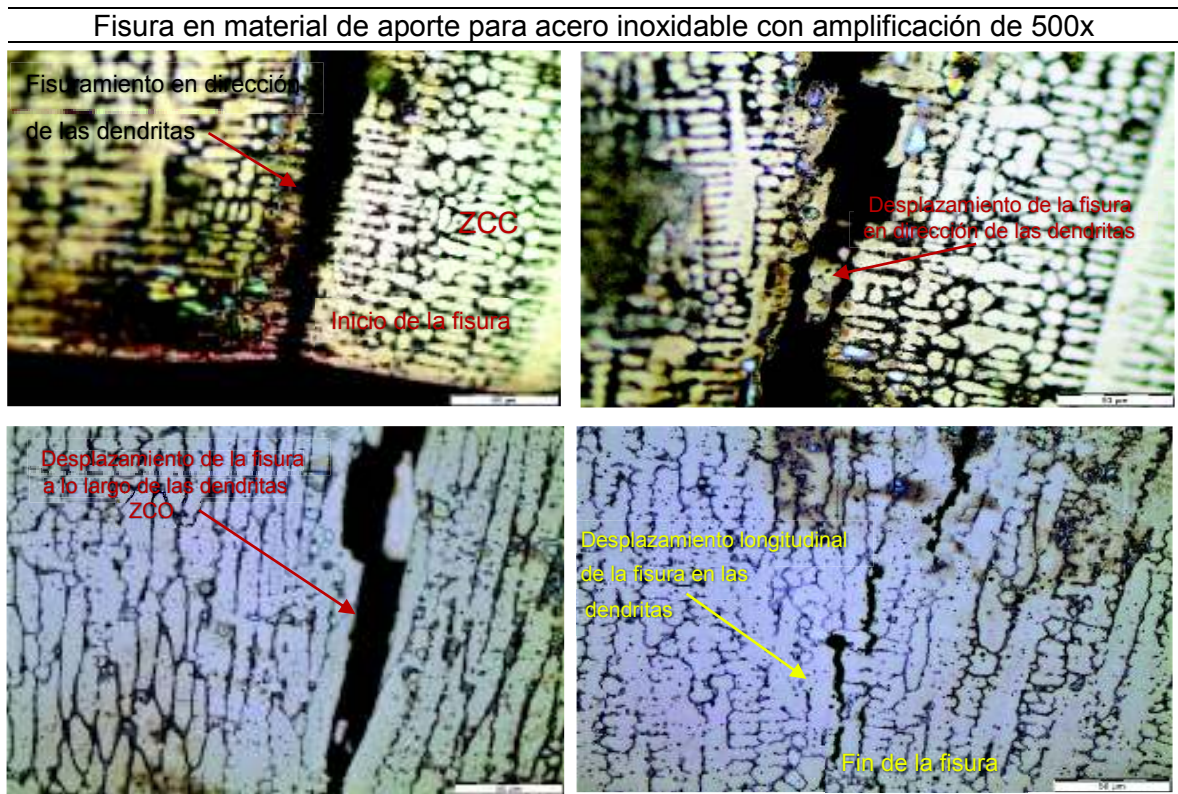
(Fuente: LMDF, 2018)

Tabla 3.16. Micrografías de la junta soldada con M.A. AWS E 312-16.



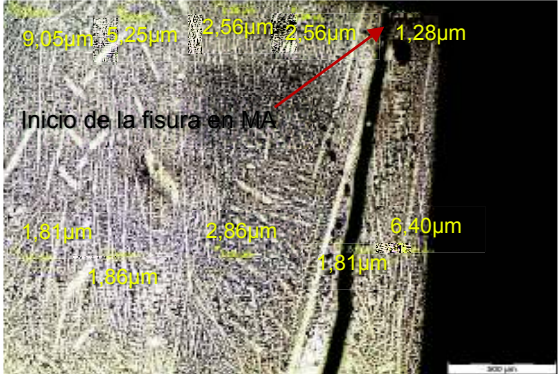
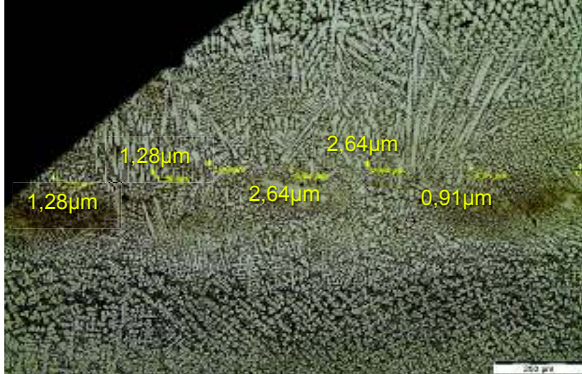
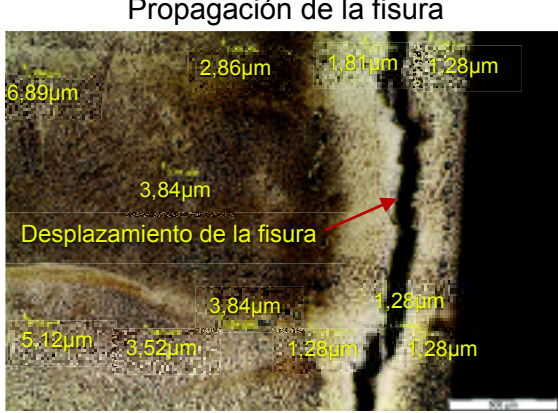
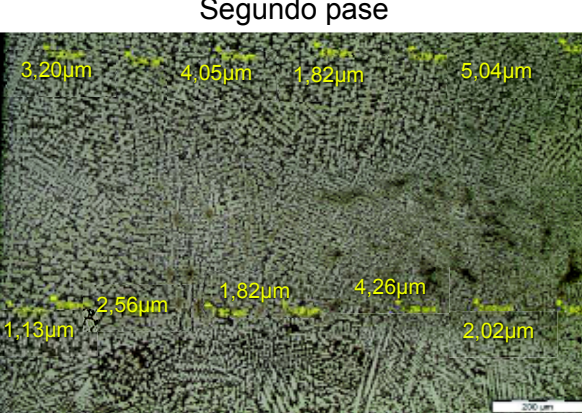

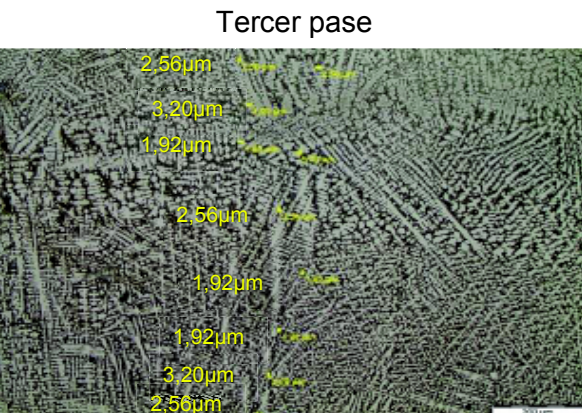

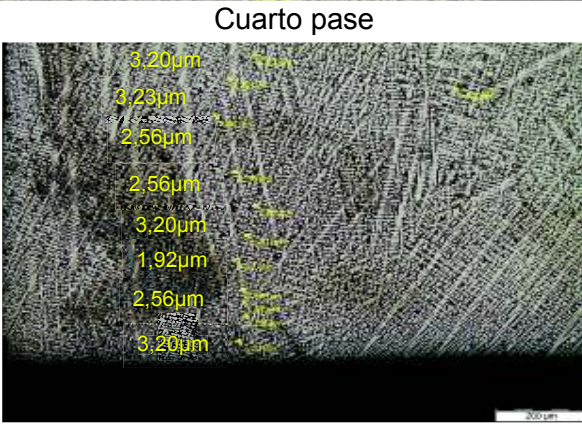
(Fuente: LMDF, 2018)

Tabla 3.17. Propagación de la fisura transversal en la junta soldada con M.A. AWS E 312-16.



(Fuente: LMDF, 2018)

Tabla 3.18. Comparación del tamaño de las dendritas en las probetas con y sin fisura.

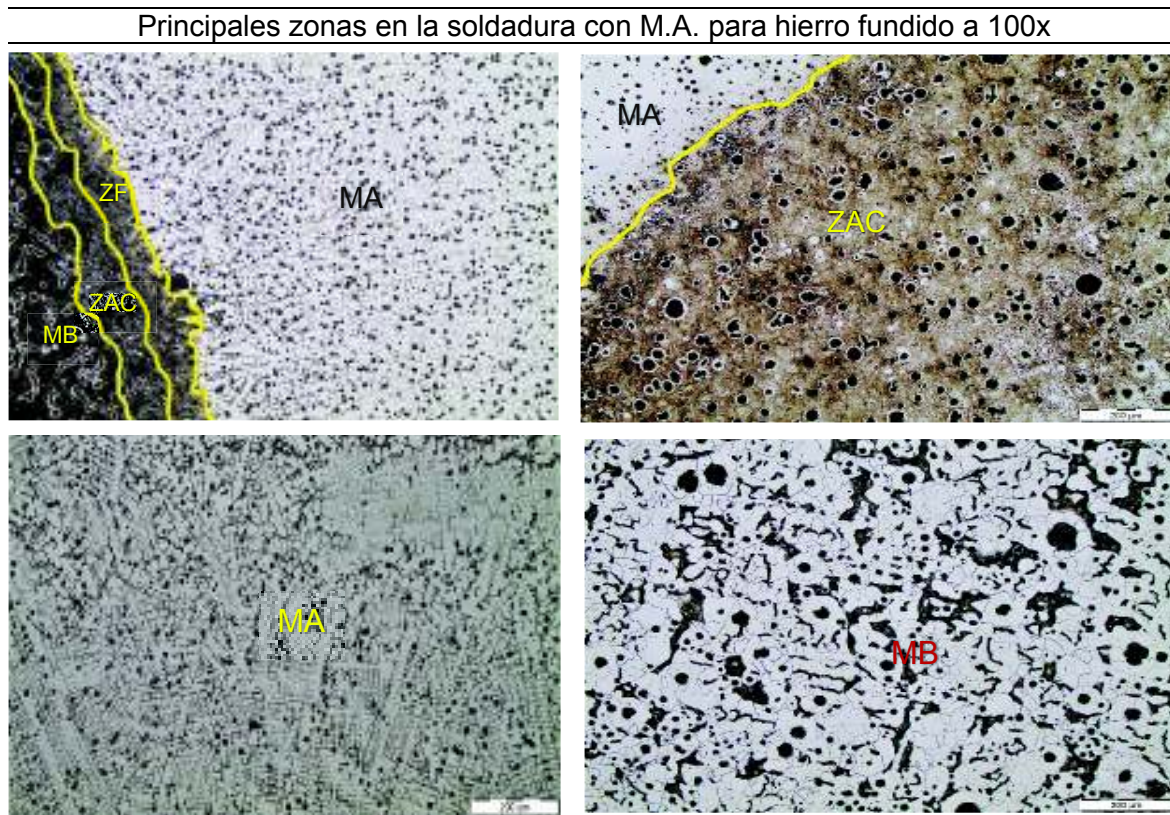
Probeta con fisura – Magnificación 50X Principio de la fisura	Probeta sin fisura – Magnificación 100X Pase de raíz
	
	
	
	

(Fuente: LMDF, 2018)

3.4.2.3. Resultados de micrografías para la junta soldada con M.A. AWS E NiFe-CI

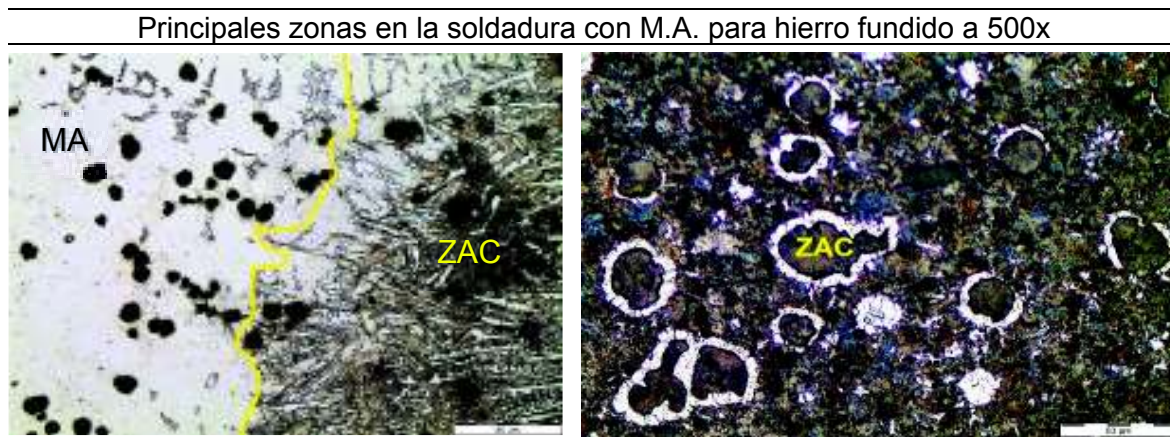
Al igual que el caso anterior, se presenta los resultados de las micrografías correspondientes a las probetas de la junta soldada pero esta vez con material de aporte para hierro fundido AWS E NiFe-CI, en donde se detallan varias zonas de la soldadura (MB, ZAC, MA, y ZF), tanto en las micrografías con magnificación 100X (Tabla 3.19.), como en las micrografías con magnificación 500X (Tabla 3.20.).

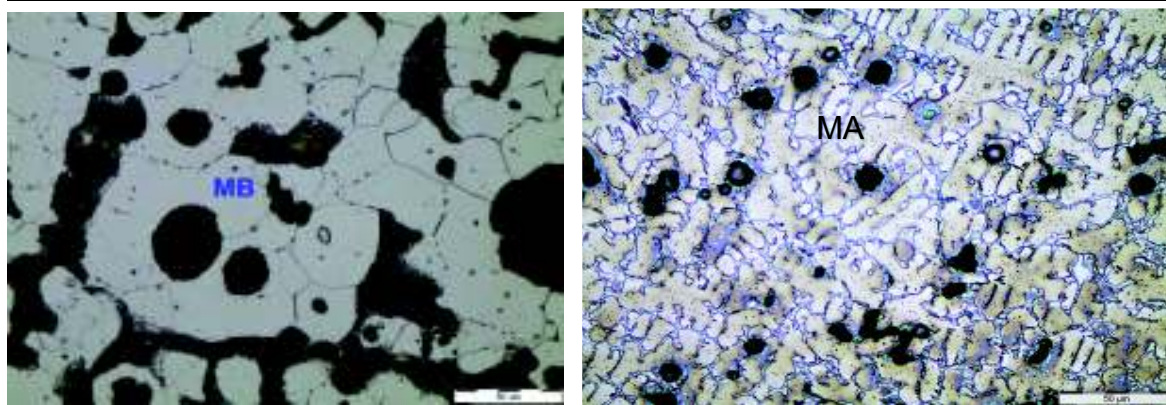
Tabla 3.19. Micrografías de la junta soldada con M.A. AWS E NiFe-CI.



(Fuente: LMDF, 2018)

Tabla 3.20. Micrografías de la junta soldada con M.A. AWS E NiFe-CI.





(Fuente: LMDF, 2018)

3.4.2.4. Macro durezas

Tanto la Tabla 3.21 como la Tabla 3.22. muestran los resultados del ensayo de dureza realizadas a las probetas de la junta soldada con material de aporte para acero inoxidable AWS E 312-16, la primera tabla corresponde a la probeta sin fisura, mientras que la otra, a la probeta con fisura, en las cuales se detallan el tipo de escala (HRB o HRC) y los barridos realizados en las diferentes zonas de las probetas con una separación de 3 [mm] entre cada indentación, de la misma manera la Tabla 3.23. muestra los resultados de dureza, pero esta vez para la probeta de la junta soldada con material de aporte para hierro fundido AWS E NiFe-CI.

Tabla 3.21. Resultados de dureza de la junta soldada con M.A. AWS E 312-16.

Identificación de zonas	Junta sin fisura				Gráfica
	1er. Barrido Cara		2do. Barrido Raíz		
	Dureza HRB	Dureza HRC	Dureza HRB	Dureza HRC	
	87		83		
MB - IZQ.	85		86		
	90		86		
ZAC - IZQ.	----	42	----	32	
SOLDADURA	----	21	----	45	
	----	24	----	42	
ZAC - DER.	----	34	----	45	
	82		87		
MB - DER.	83		82		
	85		85		

(Fuente: LMDF, 2018)

Tabla 3.22. Resultados de dureza de la junta soldada con M.A. AWS E 312-16 con fisura.

Junta con fisura					
Identificación de zonas	1er. Barrido Cara		2do. Barrido Raíz		Gráfica
	Dureza HRB	Dureza HRC	Dureza HRB	Dureza HRC	
	83		82		
MB - IZQ.	82		84		
	83		83		
ZAC - IZQ.	97	18	97		
SOLDADURA	---	23	97		
	97	---	93		
ZAC - DER.	---	31	---	26	
	85		84		
MB - DER.	86		87		
	85		87		

(Fuente: LMDf, 2018)

Tabla 3.23. Resultados de dureza de la junta soldada con M.A. AWS E NiFe-CI.

Junta soldada con electrodo AWS E NiFe-CI					
Identificación de zonas	1er. Barrido Cara		2do. Barrido Raíz		Gráfica
	Dureza HRB	Dureza HRC	Dureza HRB	Dureza HRC	
	84	---	75		
MB - IZQ.	87	---	85		
	88	---	89		
ZAC - IZQ.	91	---	---	25	
SOLDADURA	87	---	95		
	88	---	99		
ZAC - DER.	100	---	---	16	
	84	---	85		
MB - DER.	84	---	84		
	85	---	84		

(Fuente: LMDf, 2018)

3.4.2.5. Microdureza

Las siguientes figuras, muestran las indentaciones realizadas a las probetas de la junta soldada con el material de aporte AWS E312-16 (sección longitudinal del cordón de soldadura), una con fisura (Figura 3.6.) y otra sin fisura (Figura 3.7.), y debajo de cada una de ellas se presentan las tablas (Tabla 3.24. y Tabla 3.25.), en donde se especifican las medidas de microdureza del cordón de soldadura, medidas desde la raíz hacia la cara (O1→O8), de cada una de estas probetas respectivamente, un resultado más detallado se presenta en el Anexo VI.

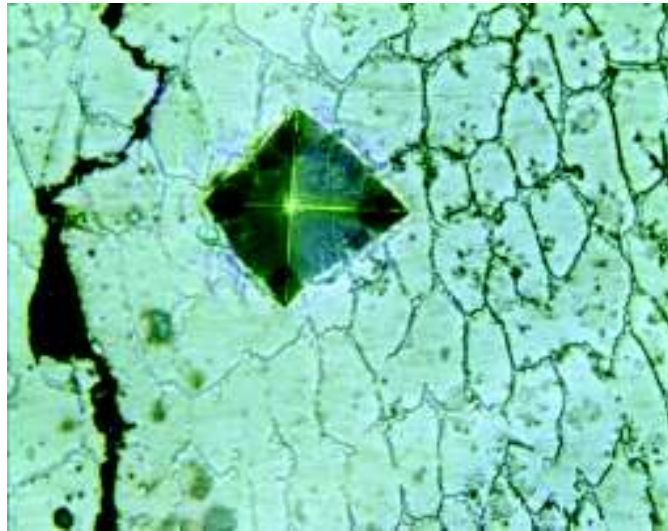


Figura 3.6. Microdureza de la probeta con fisura de la junta soldada con M.A. AWS E 312-16.
(Fuente: LMDF, 2018)

Tabla 3.24. Resultados de microdureza de la junta soldada con M.A. AWS E 312-16 con fisura.

Id.	HRC	HV	D1 (µm)	D2 (µm)	Diagonal media
O1	30	299,46	42,44	43,75	43,10
O2	31	303,03	43,91	41,77	42,84
O3	40	386,29	36,35	39,54	37,95
O4	42	406,39	36,24	37,75	37,00
O5	45	437,94	35,74	35,53	35,64
O6	48	481,94	33,66	34,29	33,97
O7	42	404,47	35,73	38,44	37,08
O8	47	469,85	33,20	35,61	34,41

(Fuente: LMDF, 2018)

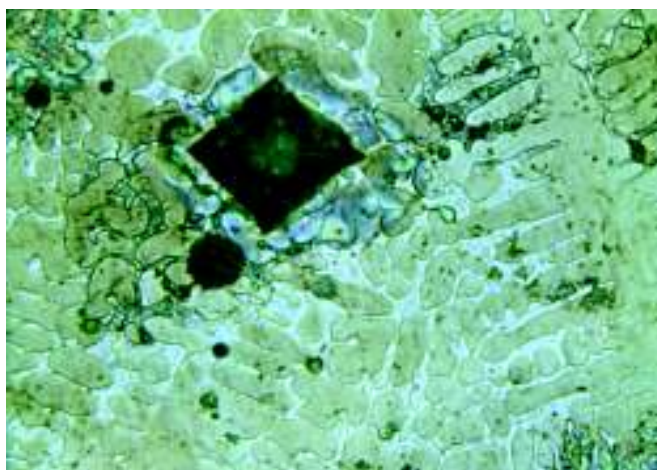


Figura 3.7. Microdureza de la probeta sin fisura de la junta soldada con M.A. AWS E 312-16.
(Fuente: LMDF, 2018)

Tabla 3.25. Resultados de microdureza de la junta soldada con M.A. AWS E 312-16 sin fisura.

Id.	HRC	HV	D1 (μm)	D2 (μm)	Diagonal media
O1	38	368,72	39,15	38,53	38,84
O2	35	336,34	41,02	40,31	40,67
O3	39	378,37	38,09	38,59	38,34

(Fuente: LMDF, 2018)

3.4.2.6. Tracción

La Tabla 3.26., presenta los resultados obtenidos del ensayo de tracción realizadas a las probetas normalizadas extraídas de las placas soldadas con los dos tipos de electrodos (AWS E 312-16 y AWS E NiFe-CI), en donde se especifica de manera resumida la carga y resistencia máxima soportadas de cada probeta y la parte de falla, además, se presentan las respectivas figuras (Figura 3.8., Figura 3.9., Figura 3.10., y Figura 3.11.,) de cada probeta ensayada.

Tabla 3.26. Resultados del ensayo de tracción de las probetas soldadas.

Id.	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		Obs.
	lbf	N	ksi	Mpa	
T1-AWS E312-16	10320	45906	60,8	419,3	FMB ¹
T2- AWS E312-16	8421	37460	49,2	339,5	FJS ²
T1-AWS ENiFe-CI	8777	39042	55,5	382,2	FMB ¹
T2- AWS ENiFe-CI	8987	39975	54,5	376,1	FJS ²

(Fuente: LAEV,2018)

¹ FMB: Falla en el material base

² FJS: Falla en la junta soldada

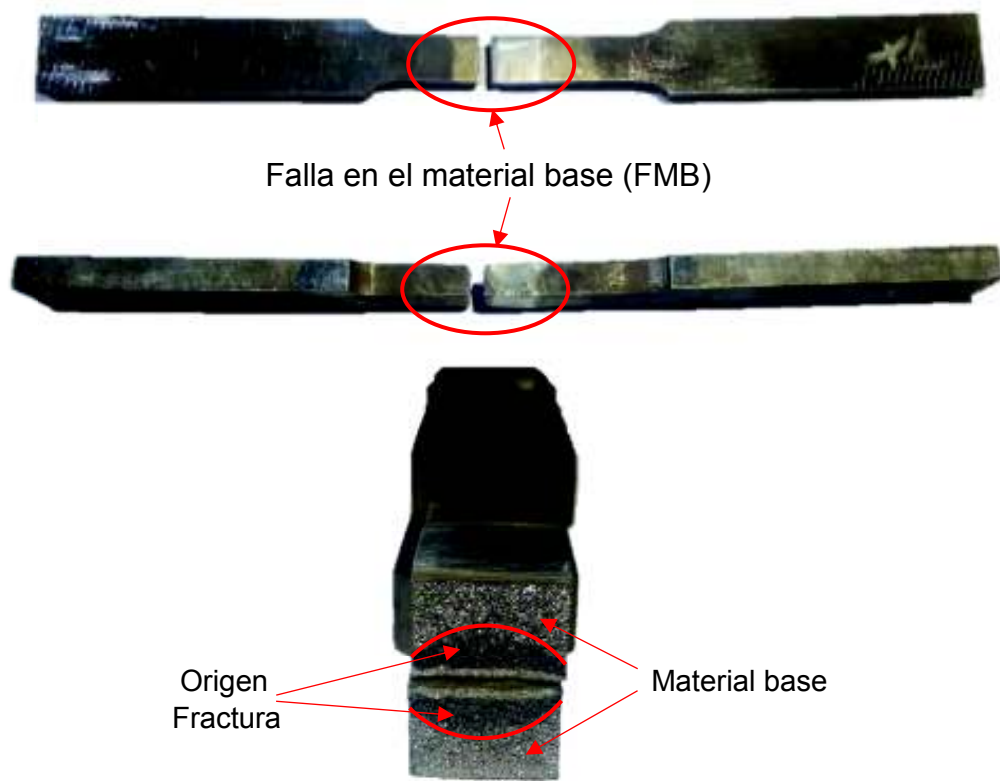
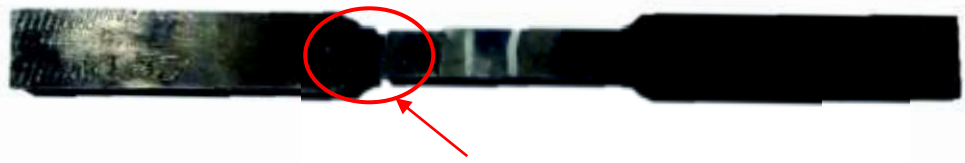


Figura 3.8. Pobreta normalizada para tracción (T1-AI) soldada con M.A. AWS E 312-16.
(Fuente: Propia)



Figura 3.9. Pobreta normalizada para tracción (T2-AI) soldada con M.A. AWS E 312-16.
(Fuente: Propia)

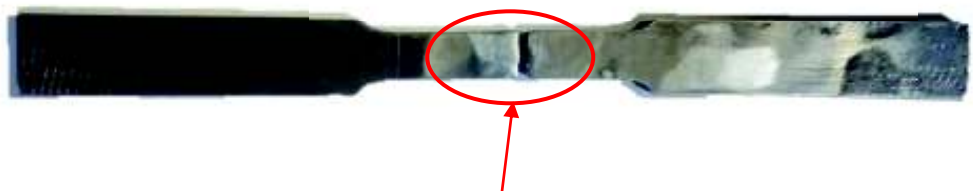


Falla en el material base (FMB)



Material base

Figura 3.10. Pobreta normalizada para tracción (T1-NI) soldada con M.A. AWS E NiFe-CI.
(Fuente: Propia)



Falla en la junta soldada (FJS)



Material base

Material de aporte

Figura 3.11. Pobreta normalizada para tracción (T2-NI) soldada con M.A. AWS E NiFe-CI.
(Fuente: Propia)

3.4.2.7. Doblado

La Tabla 3.27. describe las observaciones de cada una de las probetas utilizadas en el ensayo de doblado, a su vez se presentan figuras de las probetas ensayadas con el doblado de cara y raíz de las juntas soldadas con los dos tipos de electrodos.

Tabla 3.27. Resultados del ensayo de doblado.

Ensayo de doblado			
Identificación probeta soldada	Tipo de doblado	Referencia	Observación
Con M.A. AWS E 312-16	Cara	Figura 3.12.	Presenta una fractura frágil que empieza en la cara y finaliza al extremo de la raíz del cordón de soldadura. En la fractura se observa una zona más oscura lo cual es parte del material base. El ángulo de deformación es 1° aprox. con respecto a la cara del cordón de soldadura.
Con M.A. AWS E 312-16	Raíz	Figura 3.13.	Presenta una fractura frágil que empieza en la zona de transición, y termina en el pie del cordón de soldadura (cara). Se observan dos colores debido a que la fractura se da entre el material base y el material de aporte. El ángulo de deformación es 6° aprox.
Con M.A. AWS E NiFe-CI	Cara	Figura 3.14.	Presenta una fractura frágil en el material base. La zona delimitada de color rojo es una leve desviación de la fractura por el material de aporte. El ángulo de deformación es 5° aprox. con respecto a la raíz del cordón de soldadura.
Con M.A. AWS E NiFe-CI	Raíz	Figura 3.15.	Presenta una fractura frágil que se genera al borde de la raíz y termina en parte de la cara del cordón de soldadura. Se observa una incrustación no metálica señalada con un círculo y dos colores distribuidos de manera no uniforme debido a que en la fractura se lleva parte del material base y material de aporte. El ángulo de deformación es 4° aprox.

(Fuente: Propia)



Figura 3.12. Doblado de cara de la probeta soldada con M.A. AWS E 312-16.
(Fuente: Propia)

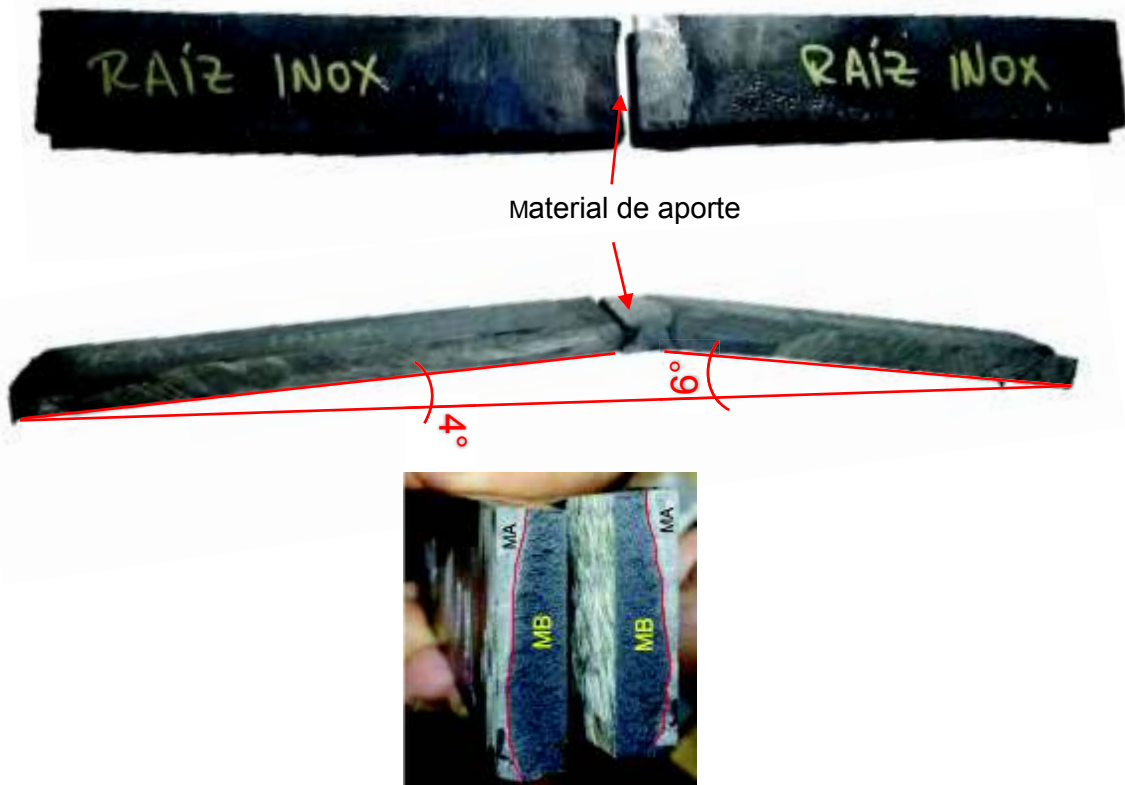


Figura 3.13. Doblado de raíz de la probeta soldada con M.A. AWS E 312-16.
(Fuente: Propia)

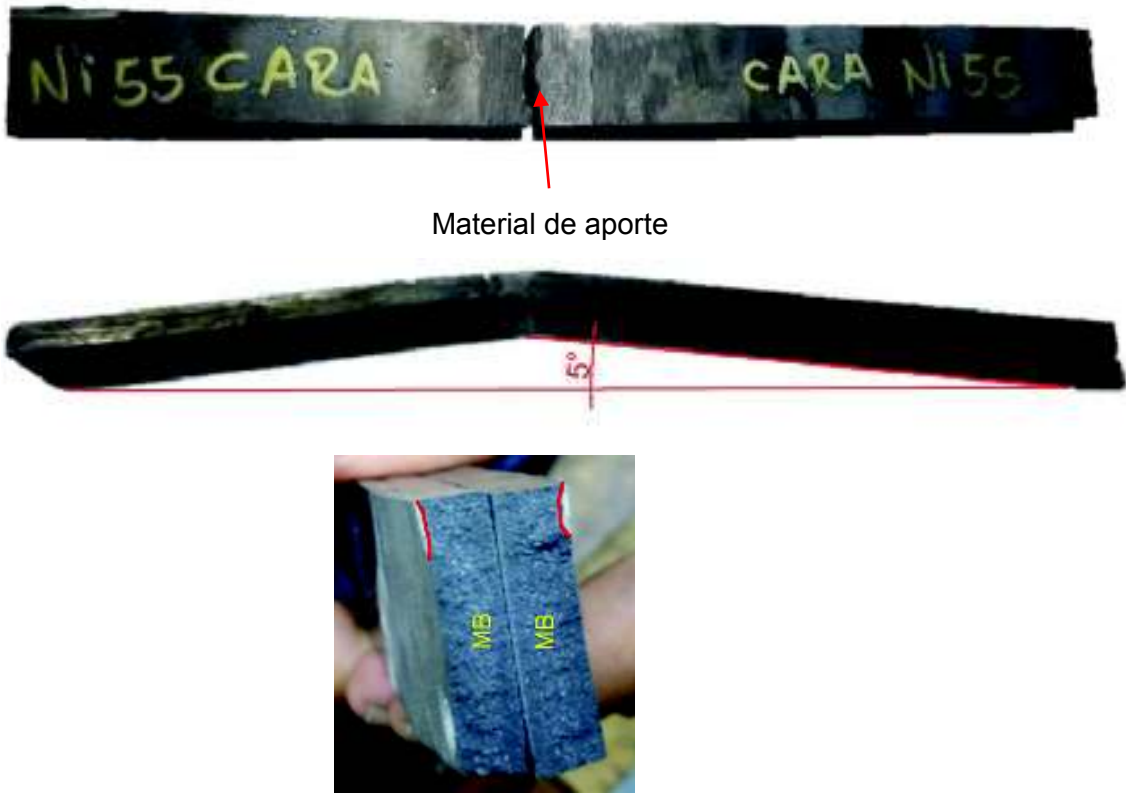


Figura 3.14. Doblado de cara de la probeta soldada con M.A. AWS E NiFe - Cl.
(Fuente: Propia)

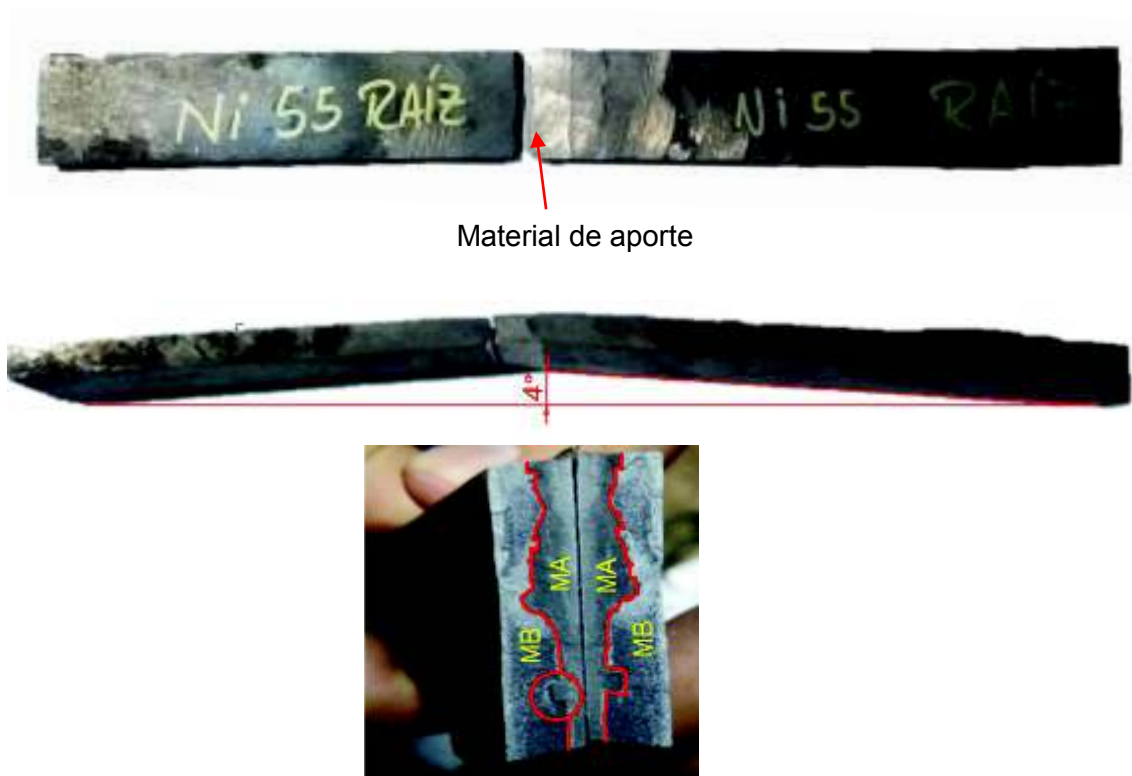


Figura 3.15. Doblado de raíz de la probeta soldada con M.A. AWS E NiFe - Cl.
(Fuente: Propia)

3.5. Discusión de la caracterización del material base

Dentro de este apartado se evalúa de manera general los resultados obtenidos para el material base, en donde se analiza el comportamiento mecánico, químico y metalúrgico, que debe cumplir este material para que sea validado como hierro fundido nodular.

3.5.1. Comportamiento mecánico del material base

Como inicio a la validación del material base, fue primordial determinar de manera cuantitativa las características mecánicas para conocer el grado de hierro fundido nodular (hierro dúctil), los resultados obtenidos de los ensayos mecánicos se comparan con los valores requeridos por la norma ASTM A536 – 84 (Standar Specification for Ductile Iron Castings), lo cual podemos observar de manera específica en la Tabla 3.28., con ello se puede afirmar que el hierro fundido presentado como material base es de grado **65-45-12**, debido a que excede en aproximadamente 10% el promedio de los valores mínimos requeridos por este tipo de hierro fundido.

Tabla 3.28. Comparación de las propiedades mecánicas del material base.

Id.	Propiedades Mecánicas					
	Dureza	Límite de fluencia		Resistencia a la tracción		% Elongación en 50 mm
	BHN	Ksi	Mpa	ksi	Mpa	
ASTM A536 - 84	179,0	45,0	310,0	65,0	448,0	12,0
Material base (Promedio)	163,0	55,2	380,8	69,0	475,2	13,1

(Fuente: Propia)

3.5.2. Comportamiento químico – metalúrgico del material base

Como complemento a la validación del material base se compara los resultados obtenidos de composición química, con los valores del hierro dúctil de grado **65-45-12** requeridos por la norma ANSI/AWS D11.2-89, estos valores se muestran de manera resumida en la Tabla 3.29., en donde se aprecia que el porcentaje de C y Mn, obtenidos mediante el ensayo, se encuentran dentro de los rangos de composición química requeridos por la norma³ para el hierro fundido nodular, a excepción del silicio debido a que excede el requerimiento del 2,8%, esto no resulta ser un factor adverso ya que favorece en la fluidez

³ Norma ANSI/AWS D11.2: Rangos de composición química requeridas para el hierro fundido nodular: C (3 - 4 %), Si (1,8 - 2,8 %), y Mn (0,7 % máx.)

y colabilidad del hierro fundido, por lo tanto, se afirma que cumple con los requerimientos de composición química.

Tabla 3.29. Comparación de la composición química del material base.

Composición química									
Id.	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Cu
ANSI/AWS D11.2-89 (R2006)	3,510	0,430	0,030	0,014	2,370	0,880	0,100	0,030	0,100
Probeta del material base	3,857	0,241	0,021	0,003	3,729	0,036	0,074	0,005	0,005

(Fuente: Propia)

Por otra parte, de las micrografías obtenidas se determina que el material base presenta una matriz ferrítica con escasa presencia de perlita (Figura 3.16.), el diámetro promedio del grafito estimado es de 46 μm o 0,046 mm (Tabla 3.30.), cuyo valor es calculado a partir de las áreas de los nódulos de grafito (círculos rojos en la Figura 3.16.).

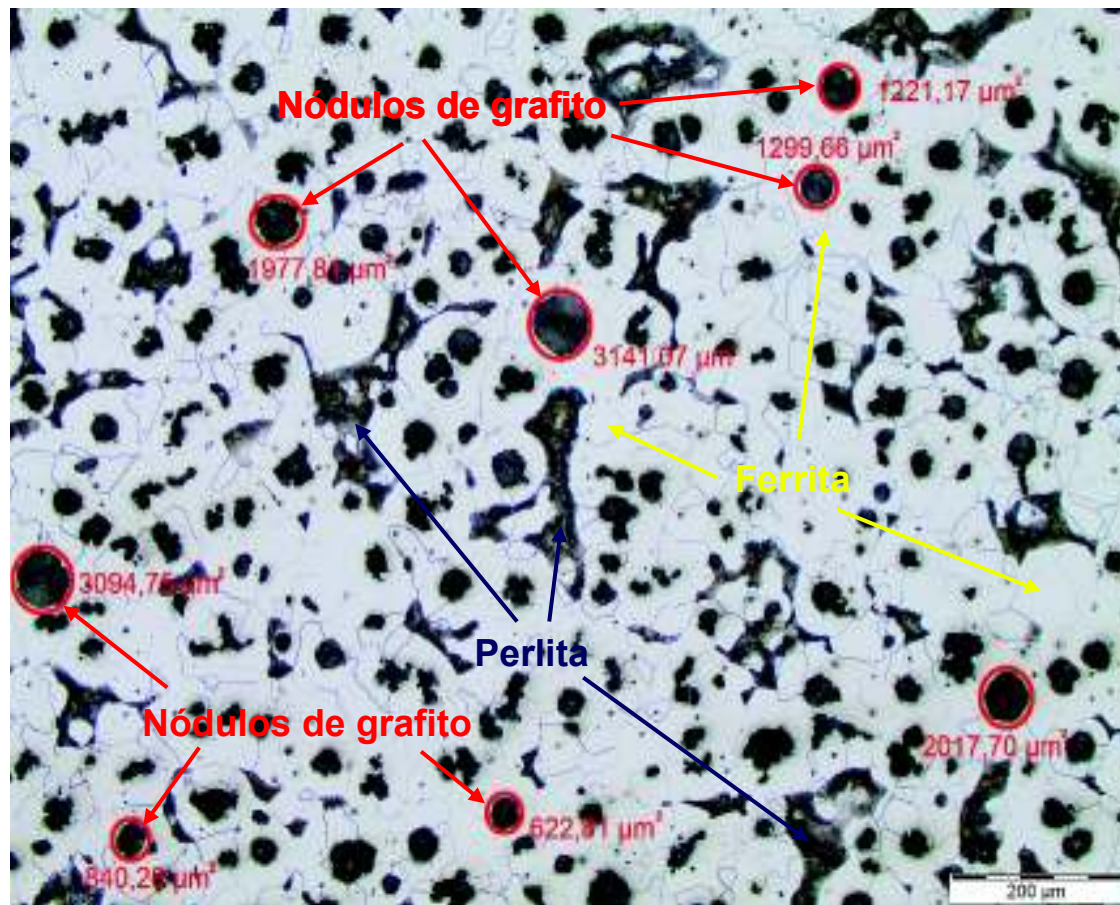


Figura 3.16. Micrografía del material base con magnificación 100X.
(Fuente: LMDf, 2018)

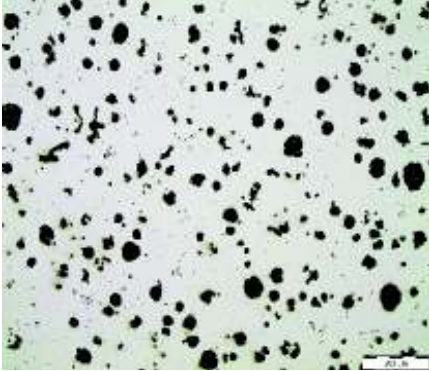
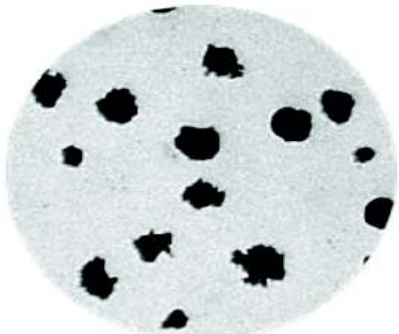
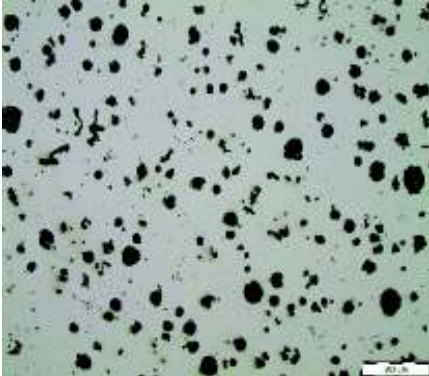
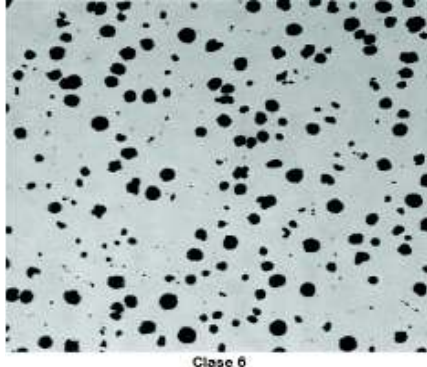
Tabla 3.30. Cálculo del diámetro promedio del grafito.

Áreas (μm^2)	Diámetros (μm)
1221,17	39,43
1299,66	40,68
3141,07	63,24
2017,70	50,69
622,81	28,16
840,28	32,71
3094,75	62,77
1977,81	50,18
Diámetro Promedio	45,98

(Fuente: Propia)

Finalmente, al comparar las micrografías obtenidas con las micrografías que se detallan en la norma ASTM A247-17⁴ (Tabla 3.31.), se determina que el hierro fundido analizado presenta grafito de tipo II⁵, tamaño de clase 6, porcentaje de nodulación⁶ de 80% y, recuento de nódulos de 150 nódulos/ mm^2

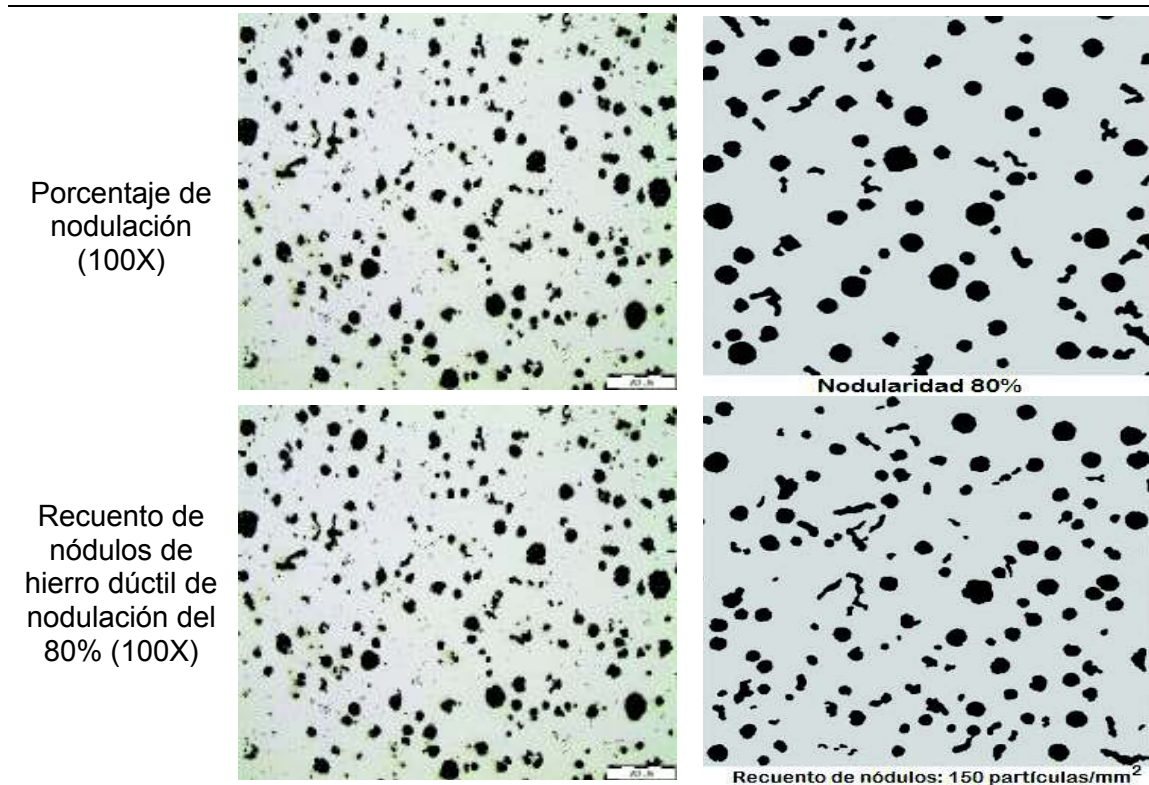
Tabla 3.31. Caracterización del material base.

Características	Resultados obtenidos M.B.	Referencia ASTM A247-17
Tipo de grafito		 Grafito Tipo II
Tamaño del grafito nodular (100X)		 Clase 6

⁴ ASTM A247-17: Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings.

⁵ El grafito tipo II consiste en nódulos ligeramente irregulares y tiene poco o ningún efecto adverso sobre las propiedades del hierro dúctil.

⁶ El porcentaje de nodulación para el hierro dúctil debe estar entre el 80 y 100%.



(Fuente: Propia)

3.6. Discusión de la temperatura de precalentamiento

Como parte de la validación de la temperatura de precalentamiento hallada mediante el ensayo de soldabilidad de las barras de hierro fundido (354°C), se calcula otra temperatura en base al carbono equivalente del material a soldar, este cálculo se realiza con los valores de la composición química del material base presentada en la Tabla 3.1. y utilizando la ecuación establecida en la norma ANSI/AWS D11.2-89 (Ecuación 1).

$$CE = 3,857 + 0,31(3,729) + 0,33(0,021) + 0,45(0,003) - 0,028(0,241) + 0,005 + 0,074 - 0,02(0,036) - 0,01(0,005)$$

Ecuación 2. Cálculo de carbono equivalente para el material base – hierro fundido nodular.

(Fuente: Propia)

$$CE = 5,09 \sim 5$$

Ecuación 3. Carbono equivalente para el material base – hierro fundido nodular.

(Fuente: Propia)

Encontrado el valor del carbono equivalente (CE⁷) se usa la Figura 1.7. del apartado 1.2.3.2., establecida en la norma ANSI/AWS D11.2-89, para trazar dos rectas entre el CE

⁷ Carbono equivalente (CE): el CE es directamente proporcional a la temperatura de precalentamiento, y a su vez es dependiente en gran medida del Carbono, Silicio, Fosforo, y Azufre.

y el tipo de hierro fundido, dando como resultado una temperatura sin grietas correspondiente a **342°C**, cómo se observa en la Figura 3.17.

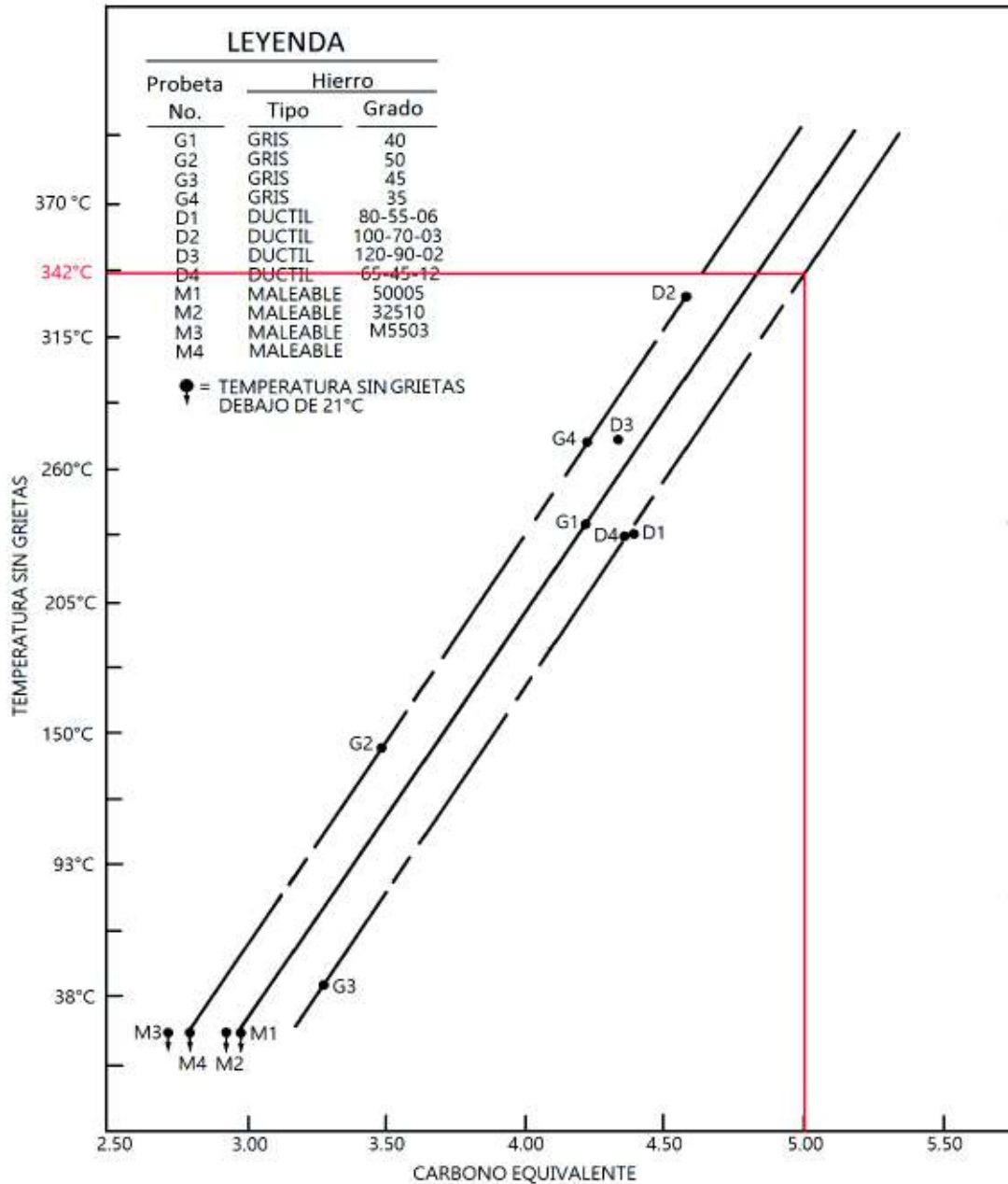


Figura 3.17. Relación entre el carbono equivalente Vs temperatura sin grietas.
(Fuente: Propia, basado en la norma ANSI/AWS D11.2-89)

La temperatura de precalentamiento seleccionada para realizar la soldadura de las placas de hierro fundido fue de **354 °C**, debido a que las temperaturas obtenidas mediante el ensayo de soldabilidad de las barras y mediante el cálculo de carbono equivalente dieron como resultados valores muy similares como se observa en la Tabla 3.32., tan solo con una diferencia de aproximadamente 3%, diferencia que se presenta por la composición química del material base, además en el apéndice A de la norma ANSI/AWS D11.2-89,

especifica que la soldadura del hierro fundido nodular a ésta temperatura no tiene estudio alguno, por estas razones se decidió establecer como la temperatura de precalentamiento la obtenida mediante el ensayo de soldabilidad.

Tabla 3.32. Comparación de la temperatura de precalentamiento.

Temperatura de precalentamiento		
Descripción	Temperatura (°C)	%
Mediante el ensayo de soldabilidad	354	100,00
Mediante el cálculo del carbono equivalente	342	96,61
Diferencia	12	3,39

(Fuente: Propia)

3.7. Discusión de la soldadura de las placas

La placa soldada con el material de aporte para acero inoxidable (AWS E 312-16), presentó una deformación angular considerable de aproximadamente 4° como se puede apreciar en la gráfica de la Tabla 3.12. del apartado 3.3., este factor desfavorable pudo haberse generado por el exceso de temperatura en la unión soldada, y a su vez, pudo haber sido causante para la formación de la fisura transversal presentada en la raíz del cordón de soldadura.

Por otra parte, la placa soldada con material de aporte de Ni 55 (AWS E NiFe-CI) arrojó buenas características físicas post soldadura, es decir, no presenta deformación angular, no existe la presencia de fusión incompleta, además el cordón de soldadura con este tipo de electrodo presenta mayor penetración, pero a su vez el ancho de la cara es menor en aproximadamente 17% en comparación con el cordón de soldadura realizado con electrodo para acero inoxidable como se observa en la Figura 3.18.

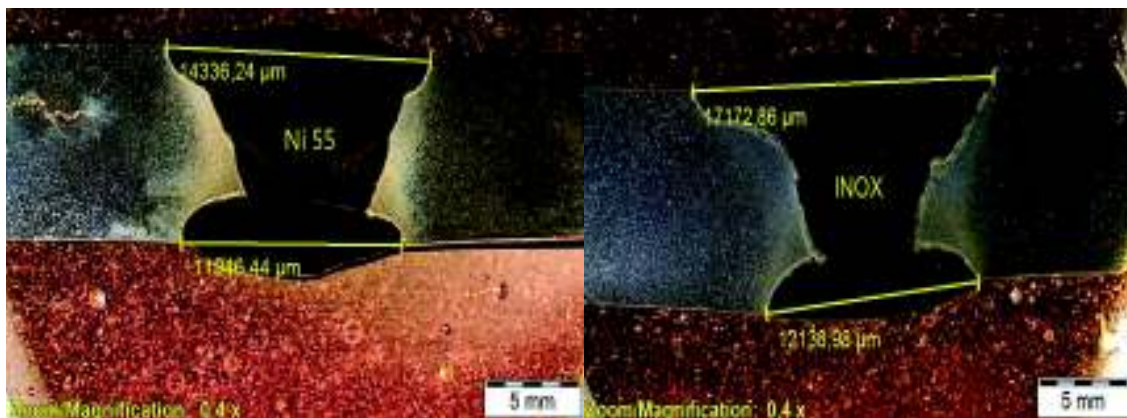


Figura 3.18. Comparación de los cordones de soldadura soldados con electrodos diferentes. (Fuente: LMDF, 2018)

3.8. Discusión de los ensayos realizados en las placas

Dentro de este apartado se analiza y se compara con fuentes referenciadas, los resultados obtenidos de ensayos no destructivos (END), y destructivos realizadas a las placas soldadas con los dos tipos de electrodos.

3.8.1. Discusión de los ensayos no destructivos de la junta soldada

Mediante las tablas (Tabla 3.13. y Tabla 3.14.) del apartado 3.4.1., y el reporte de líquidos penetrantes e inspección radiográfica detallados en el Anexo VII, se determina que la junta soldada con material de aporte AWS E 312-16, presenta porosidades con dimensiones de 1 y 2 mm, fusión incompleta de 20 mm, y sobre todo presenta una fisura transversal en la mitad del cordón de soldadura de 10 mm de dimensión lineal, estas características presentadas en esta junta soldada no son aceptadas por la norma ANSI/AWS D11.2-89, ya que en el capítulo 9 (Calidad y control) sección 9.3 (Criterios de aceptación) de esta norma especifica que las soldaduras en áreas críticas deben estar libres de defectos lineales (grietas, fusión incompleta, etc.), por ende las dimensiones lineales no deben exceder más de tres veces la medida del ancho del defecto, esta dimension principal no debe ser mayor a 1,6 mm.

Por el contrario, la placa soldada con material de aporte AWS E NiFe-CI, presentó buenas características físicas como se detallan en los reportes de los END.

3.8.2. Discusión de los ensayos destructivos de la junta soldada

Dentro de este apartado se analiza y se evalúa el comportamiento metalúrgico, y mecánico de las juntas soldadas con los diferentes electrodos propuestos (AWS E 312-16 y AWS E NiFe-CI), es decir, se toma en consideración para el análisis varias zonas formadas en las juntas post - soldadura, tales como; zona del material base (ZMB), zona afectada por el calor (ZAC), y zona del material de aporte (ZMA), así como también las propiedades mecánicas de tracción y dureza.

3.8.2.1. Comportamiento metalúrgico

Para evaluar el comportamiento metalúrgico de las juntas soldadas con los dos tipos de electrodos, es necesario analizar los resultados metalográficos, esto implica el análisis de macrografías y micrografías obtenidas de las probetas soldadas con los electrodos AWS E 312-16 y AWS E NiFe-CI.

En base a las macrografías detalladas en la sección de resultados (Figuras 3.4. y 3.5.) se obtienen los valores de las áreas, tanto de la ZAC como de la ZMA, detallados en la Tabla

3.33., en donde también se presenta los porcentajes de la diferencia entre ambos electrodos.

Tabla 3.33. Comparación de áreas entre los dos tipos de material de aporte.

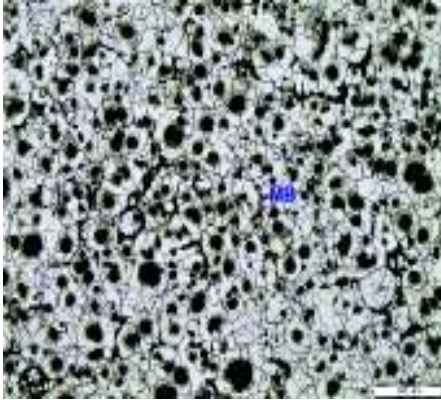
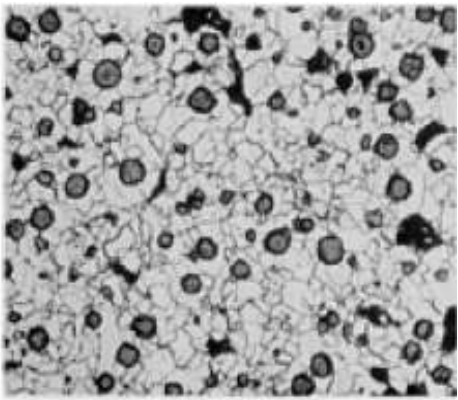
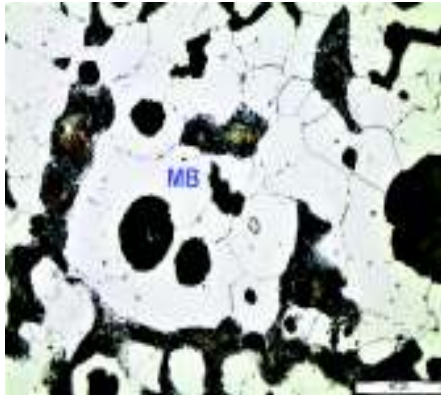
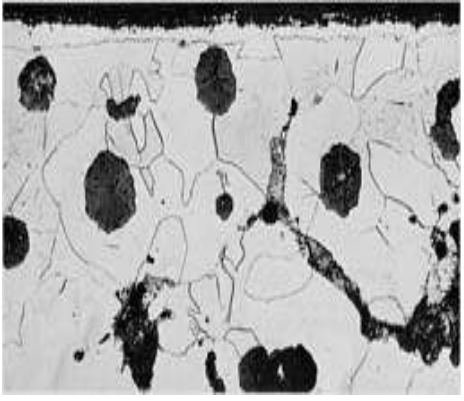
Tipo de MA	Área ZAC (mm²)	Área ZMA (mm²)
AWS E312-16	41,30	98,71
AWS ENiFe-Cl	26,74	94,76
Diferencia (%)	35,25	4,00

(Fuente: Propia)

Al comparar los valores de la Tabla 3.33., se observa que tanto el área de la ZAC como el área de la zona de material de aporte de la junta soldada con el electrodo AWS E 312-16 presentan valores mayores que las áreas de la junta soldada con el material de aporte AWS E NiFe-Cl, con un 35,25% y 4%, respectivamente, con esta observación se determina que existe un mayor consumo de material de aporte en la junta soldada con electrodo de acero inoxidable (AWS E 312-16), ya que los parámetros de soldadura fueron los mismos para ambos tipos de electrodos como se detallan en los respectivos WPS (Anexo II). Por otra parte, la entrada de calor no es un factor directo para la formación de mayor área en la ZAC, debido a que fue la misma para ambos tipos de electrodos, por lo tanto, la razón por la cual se tiene mayor ZAC en la soldadura con electrodo AWS E 312-16 es debido a la conductividad térmica que tienen los materiales unidos, ya que según Incropera & DeWitt (1999), corresponden 52 W/mK para la fundición y 15 W/mK para el acero inoxidable, por ende los metales que tienen menor conductividad térmica presentarían una ZAC de mayor tamaño, ya que retienen el calor durante un tiempo más prolongado y la conducción de calor es más lenta, estos factores afectan en gran medida al material base y por lo cual aumenta el área afectada por el calor. (Rodríguez O. , 2013)

Dentro de la discusión de micrografías se analiza como primer punto la zona del material base de las juntas soldadas con los electrodos de acero inoxidable y Ni 55, con el objetivo de determinar si presentó algún cambio microestructural al efectuarse la soldadura, en la Tabla 3.34. se observa que la microestructura de la zona del material base no presenta cambios para ningún tipo de material de aporte, en ambas ocasiones se presenta nódulos de grafito en una matriz ferrítica con presencia de perlita, las imágenes de referencia para la gran mayoría de estas comparaciones fueron tomadas del ASM Handbook volumen 9: metalografías y micrografías, el resto es referenciado en su parte respectiva.

Tabla 3.34. Comparación microestructural de la zona del material base de la junta soldada.


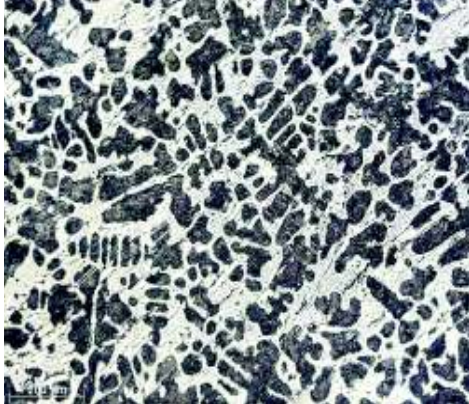
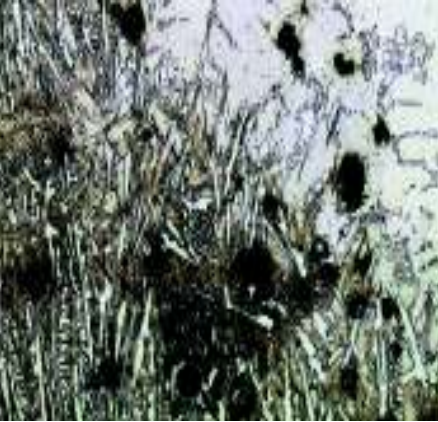
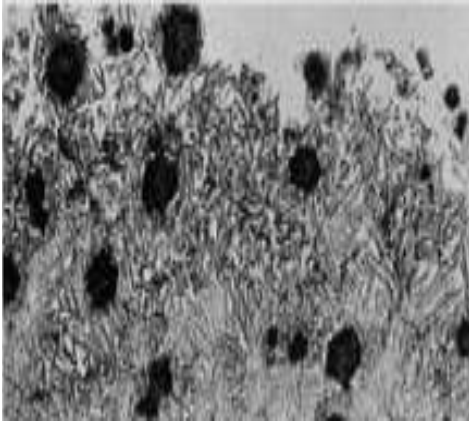
Probeta	Imagen	Referencia
AWS E 312-16 100x		
AWS E NiFe-CI 500x		

(Fuente: Propia)

Ahora bien, para el análisis de la ZAC se presenta la Tabla 3.35., en la cual se puede observar que en la junta soldada con material de aporte para acero inoxidable AWS E 312-16, aparece la presencia de fundición blanca debido al enfriamiento post - soldadura, pese a que se tuvo un enfriamiento lento en arena sílice se pueden observar dendritas primarias de austenita transformada en perlita. El microconstituyente en forma de panal de abeja, se lo conoce de forma habitual como ledeburita transformada (Universidad Complutense de Madrid, 2017), también se puede observar la presencia de agujas de cementita.

Del mismo modo en la junta soldada con material de aporte para hierro fundido AWS E NiFe-CI se puede observar una microestructura típica de este tipo de soldaduras como son los nódulos de grafito en una matriz de martensita y algo de austenita retenida, la presencia de los nódulos de grafito se debe a la acción grafitizante del níquel como componente principal del material de aporte, cuya acción es reagrupar los nódulos de grafito que están libremente esparcidos. La imagen de referencia para la comparación del electrodo para acero inoxidable fue tomada del Proyecto de Innovación Atlas Metalográfico de la Universidad Complutense de Madrid.

Tabla 3.35. Comparación de microestructura presente en la ZAC.

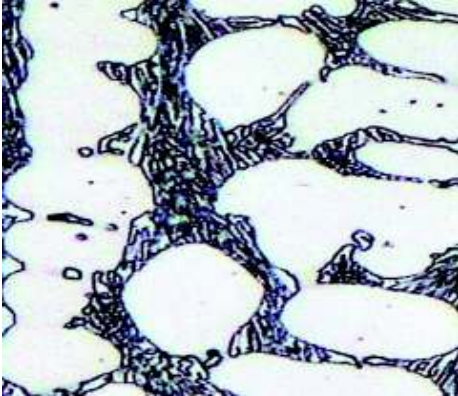
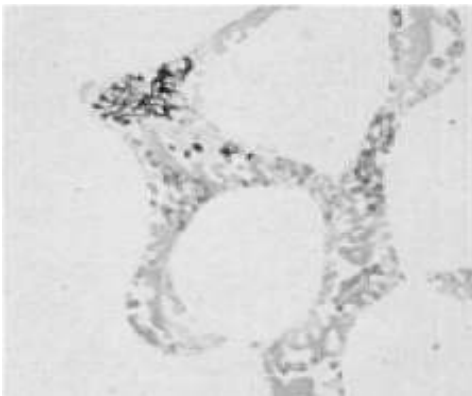

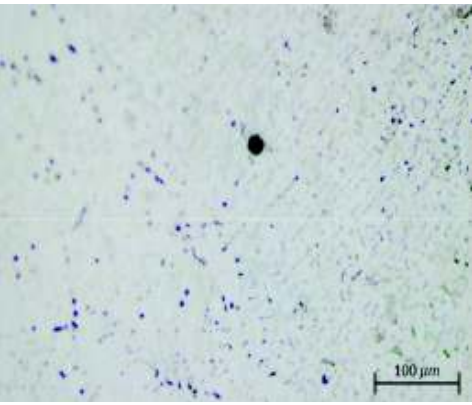
Probeta	Imagen	Referencia
<p>AWS E312-16 500x</p>		
<p>AWS ENiFe-CI 500x</p>		

(Fuente: Propia)

Finalmente, para el análisis microestructural de la zona del material de aporte de los respectivos electrodos se presenta la Tabla 3.36., en donde se aprecia que el material de aporte AWS E312-16 presenta una microestructura típica del acero inoxidable con matriz de austenita y a su vez existe la presencia de la fase sigma (σ) en la austenita. Esta fase σ es un microconstituyente intermetálico Fe-Cr, que se forma cuando se somete al acero a temperaturas entre 500 y 900°C, se trata de un microconstituyente muy duro y frágil (Universidad de Valladolid, 2015), por lo tanto, esta fase se pudo presentar debido a la presencia de cromo del electrodo y también al precalentamiento de las juntas a soldar y al calor propio del proceso de soldadura.

En cambio, la microestructura que presenta la soldadura con el material de aporte AWS ENiFe-CI, es una matriz ferrítica con rastros de austenita retenida en tamaños y proporciones menores, a más de presentar nódulos de grafito por la acción del níquel. (Cárcel, Pérez, Guillamón, & Martínez, 2016)

Tabla 3.36. Comparación de la microestructura presente en el material de aporte.

Probeta	Imagen	Referencia
AWS E312-16 500x		
AWS ENiFe-CI 100x		

(Fuente: Propia)

3.8.2.2. Comportamiento mecánico

Con el fin de estudiar el comportamiento mecánico de las juntas soldadas con los dos tipos de material de aporte, se analiza los resultados obtenidos en las pruebas de tracción, doblado y durezas, en esta última se involucran macrodurezas y microdureza.

Según la norma ANSI/AWS D11.2-89, la resistencia a la tracción de las juntas soldadas debe ser igual o mayor al 80% de la resistencia del metal base, este valor del esfuerzo ultimo a la tracción para la fundición nodular de grado 65-45-12 se encuentra especificado en la norma AWS A536-84 el cual corresponde a 448 Mpa, para el análisis de este caso particular se presenta en la Tabla 3.37., en donde se detalla los porcentajes obtenidos de la resistencia a la tracción de las probetas soldadas en función a la resistencia del material base.

Tabla 3.37. Porcentajes de resistencia a la tracción en comparación con el material base.

Identificación	Porcentaje de resistencia
T1- AWS E 312-16 ⁸	93,59%
T2- AWS E 312-16	75,78%
T1- AWS E NiFe-CI ⁹	85,37%
T2- AWS E NiFe-CI	83,95%

(Fuente: Propia)

Con respecto a los valores mostrados en la Tabla 3.37., se puede corroborar que tan solo la probeta identificada como T2 - AWS E 312-16 no cumple con los requerimientos establecido por la norma, el resto de probetas poseen un valor mayor a las especificaciones, el motivo por el cual dicha probeta no soportó el mínimo esfuerzo establecido, pudo ser por las porosidades propias de la fundición que se encontraron en la superficie de fractura del espécimen.

Referente al lugar donde fallaron las juntas soldadas se tiene que en las probetas T1-AWS E 312-16 y T1-AWS E NiFe-CI la fractura se dio en el material base, lo que indica una buena soldadura, sin embargo, esto no sucedió en las probetas T2-AWS E 312-16 y T2-AWS E NiFe-CI las cuales fallaron en la junta soldada específicamente en la zona de fusión. En el espécimen T2- AWS E 312-16 la razón por la cual falló en la junta soldada se debió a la fusión incompleta determinado en el ensayo de radiografía, esta falta de fusión entre los dos materiales da lugar a una línea de separación que influye en la baja resistencia de las partes soldadas. (Cembrero & Pascual, 2000). Mientras que en la junta T2- AWS E NiFe-CI el motivo de falla fue debido a la presencia de un concentrador de esfuerzos presente en la soldadura producto del maquinado en la fabricación de las probetas a ser ensayadas.

El tipo de fractura que se presenta en todas las probetas sometidas al ensayo de tracción es del tipo frágil debido a las zonas brillosas y la superficie plana que se pueden apreciar en las Figuras 3.8., 3.9., 3.10., y 3.11.

Por otra parte, como se explicó anteriormente, el ensayo de doblado no es un requerimiento para evaluar la calidad de la soldadura en este tipo de material base, debido a su baja ductilidad. Este ensayo ayuda a conocer el comportamiento mecánico de las juntas soldadas en función de su ductilidad, se toma entonces el ángulo de deformación como una medida de esta propiedad, por tanto, como se puede evidenciar en la Tabla 3.38., las

⁸ T1 AWS E312-16: Probeta soldada con material de aporte para acero inoxidable

⁹ T2 AWS E NiFe-CI: Probeta soldada con Ni 55

probetas que mayor ductilidad presentaron fueron aquellas soldadas con el material de aporte para hierro fundido AWS E NiFe-CI, ya que su doblado de cara y de raíz presentaron un ángulo de deformación de 5° y 4°, respectivamente. Esto fue debido a que el material de aporte ayuda a la nodulización del grafito con lo cual mejora la ductilidad de las juntas soldadas, no así con el electrodo de acero inoxidable ya que el ángulo que se deforma debido al ensayo de doblado es de 2° aproximadamente.

En cuanto a la zona de fractura se tiene que los especímenes soldados con material de aporte para acero inoxidable AWS E 312-16 fallan en la ZAC, debido a que en esta junta soldada se formó parcialmente fundición blanca explicado en el apartado anterior, mientras que para las otras probetas se tiene la falla en el material base y en la zona de fusión las cuales se pueden considerar normales en este tipo de juntas soldadas.

Tabla 3.38. Comparación de fallas en el ensayo de doblado.

Identificación	Zona de fractura	Ángulo de deformación
DC ¹⁰ AWS E312-16	ZAC	1°
DR ¹¹ AWS E312-16	ZAC	6°
DC AWS ENiFe-CI	MB	5°
DR AWS ENiFe-CI	ZF ¹²	4°

(Fuente: Propia)

Por último, como se detalló en el apartado de los resultados de macrodurezas, se realizaron dos barridos, uno en la cara de la soldadura y otro en la raíz, los resultados del primer barrido se pueden observar en la Figura 3.19., en donde se detalla las macro durezas de la probeta soldada con material de aporte para acero inoxidable AWS E312-16 tanto de la muestra sin fisura (SF) como de la muestra que presenta fisura (CF), así como también de la junta soldada con material de aporte para hierro fundido AWS NiFe-CI, de color amarillo, la dureza mínima aceptable de acuerdo a la norma ANSI/AWS D11.2-89 es de 182 HV para el grado de hierro dúctil del presente estudio.

De las tres muestras, la que presenta mayor dureza es la probeta AWS E 312-16, SF especialmente en la ZAC, esto confirma la presencia parcial de fundición blanca cuya dureza aproximada es de 400 HV y que ya se explicó a detalle en el apartado de metalografías, un comportamiento similar se presenta para las dos probetas restantes, es decir, mayor dureza en la ZAC, el espécimen soldado con material de aporte AWS E NiFe-

¹⁰ DC: Doblado de cara

¹¹ DR: Doblado de raíz

¹² ZF: zona de fusión

CI presenta un comportamiento uniforme de dureza. El material base no presenta cambios con respecto a la dureza (Apartado 3.4.2.4.), pero no cumple con los requerimientos mínimos que se especifica en la norma ANSI/AWS D11.2-89.

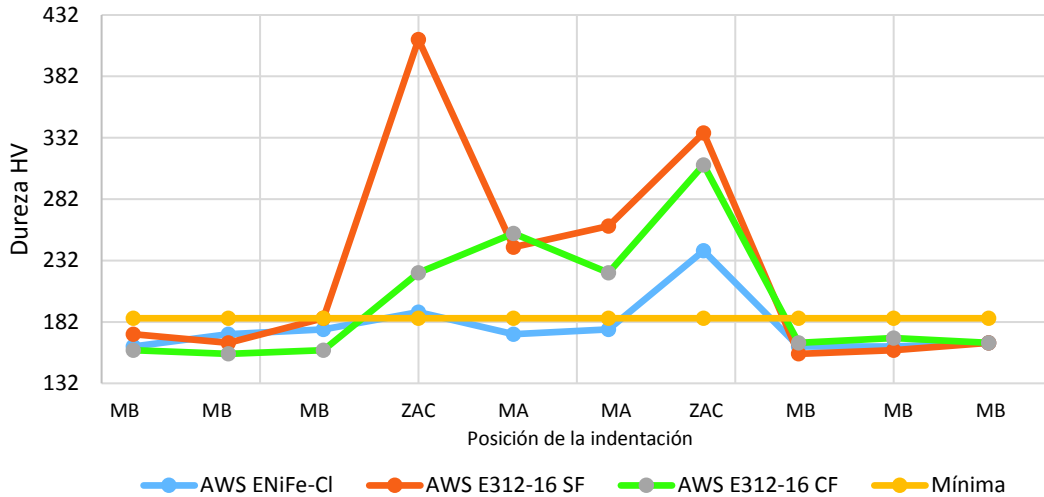


Figura 3.19. Barrido de dureza en la cara de la soldadura.
(Fuente: Propia)

La Figura 3.20. indica el barrido de dureza correspondiente a la raíz del cordón de soldadura, los resultados en el material base son similares a los del barrido de cara, pero son mayores en el material de aporte y en la ZAC esto se debe a que para el pase de raíz se tuvo que calentar el material base desde la temperatura ambiente hasta los 354 °C, posterior a esto la raíz estuvo entre el calor generado en el segundo pase y el pase de respaldo, generando de esta manera cambios bruscos de temperatura y a la vez mayor variación en las durezas.

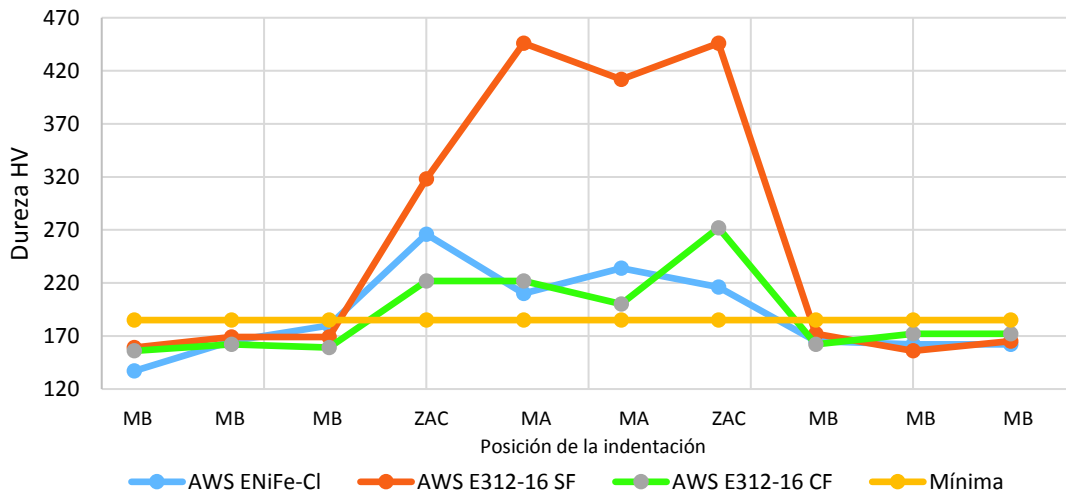


Figura 3.20. Barrido de dureza en la raíz de la soldadura.
(Fuente: Propia)

3.9. Discusión de la fisura generada en la junta soldada con material de aporte para acero inoxidable AWS E312-16

En primera instancia se planteó una hipótesis, en donde se creía que la fisura fue generada debido a mayores durezas en la zona del pase de raíz y por tanto mayor fragilidad, por consiguiente, se extrajeron dos probetas de la misma junta soldada, con el objetivo de diagnosticar y comparar cambios entre cada una de éstas y con ello tratar de determinar las posibles causas de dicha fisura, la primera probeta fue extraída de la zona fisurada, mientras que la segunda fue extraída de una zona sin defecto alguno. De acuerdo a los resultados presentados en la Tabla 3.21. y Tabla 3.22., se concluye que la hipótesis planteada es errónea debido a que los valores obtenidos de dureza son mayores en la probeta sin fisura, además, la probeta fisurada presenta mayor dureza en la cara del cordón de soldadura (hacia donde se desplaza la fisura), por lo tanto, se decidió realizar el ensayo de microdureza con la finalidad de medir y comparar los resultados obtenidos con las medidas de macrodurezas de la zona del material de aporte, las mediciones de microdureza se realizaron a lo largo de la fisura, es decir, desde la raíz hacia la cara del cordón de soldadura, pero previo a ello las probetas fueron cortadas en forma longitudinal respecto al cordón de soldadura, los resultados arrojados de este ensayo se presentan en la Tabla 3.24. y Tabla 3.25., del apartado 3.4.2.5., con lo cual se ratifica nuevamente que la menor dureza se encuentra en la parte inicial de la fisura (raíz del cordón), por lo cual se corrobora que los resultados de macrodurezas son los correctos. En la Figura 3.21., se puede apreciar los resultados de microdureza tanto para la probeta con fisura como para la probeta sin fisura, cabe destacar que en la probeta sin fisura se realizaron solo tres mediciones, debido a que la misma no presentó una variación significativa.

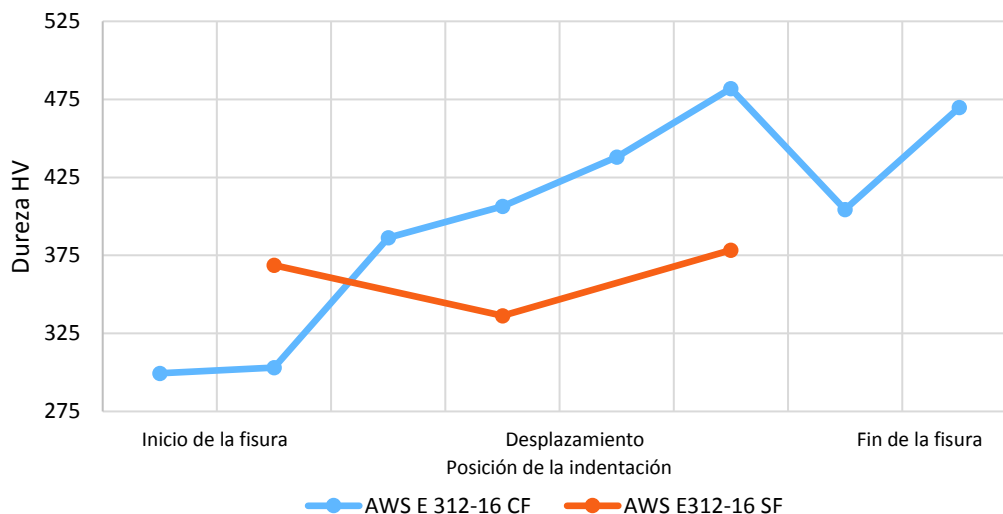


Figura 3.21. Microdureza de las probetas soldadas con M.A. AWS E312-16.
(Fuente: Propia)

Como se evidencia en la gráfica de la Figura 3.21. la dureza aumenta mientras avanza la fisura, por tanto, se descarta por completo la hipótesis planteada de fisuramiento del cordón de soldadura debido a la fragilidad.

Como segunda hipótesis se manejó la posibilidad de que el tamaño de las dendritas en la zona de fisura fuera menor en comparación con la probeta sin fisura, por lo cual se esperaría una fractura, la medición del tamaño de las dendritas se realizó en un software del laboratorio de LMDF, cuyos resultados tanto para la probeta sin fisura como para la probeta con fisura se presentan en la Tabla 3.39. y Tabla 3.40. respectivamente.

En base a estos resultados se comprueba que el tamaño de las dendritas es ligeramente mayor en la probeta sin fisura con una diferencia del 4,15% por lo que se puede asumir que el tamaño de las dendritas no varía de forma significativa, por tanto, esta hipótesis tampoco es válida para justificar el motivo de la fisura.

Tabla 3.39. Tamaño de las dendritas en la junta sin fisura (AWS E 312-16 SF).

Pase de raíz (μm)	Segundo pase (μm)		Tercer pase (μm)	Cuarto pase (μm)	
Un barrido	Dos barridos		Un barrido	Un barrido	
2,64	4,87	1,92	2,56	3,20	
1,28	4,62	2,02	3,20	2,56	
1,28	4,05	1,92	2,56	3,20	
1,28	3,84	2,56	3,20	2,56	
Promedio por pase					
1,62	4,34	2,10	2,88	2,88	
Promedio total del tamaño de las dendritas					
2,77					

(Fuente: Propia)

Tabla 3.40. Tamaño de las dendritas en la junta con fisura (AWS E 312-16 CF).

Pase de raíz (μm)		Segundo pase (μm)	Tercer pase (μm)	Cuarto pase (μm)	
Dos barridos		Un barrido	Un barrido	Dos barridos	
1,28	1,81	1,28	1,28	1,28	1,28
2,56	2,86	1,81	1,28	1,81	2,56
2,56	2,86	2,86	3,84	4,05	2,56
5,28	1,81	6,89	5,12	6,40	4,05
Promedio por pase					
2,92	2,33	3,21	2,88	3,38	2,61
Promedio total del tamaño de las dendritas					
2,89					

(Fuente: Propia)

Como último punto para evaluar la causa de la fisura se decide realizar el estudio de los esfuerzos residuales que se generan en el proceso de soldadura.

Según Ospina (1996), explica que los esfuerzos generados en la soldadura durante y después del proceso son dos: esfuerzos residuales longitudinal y transversal como se observa en la Figura 3.22.

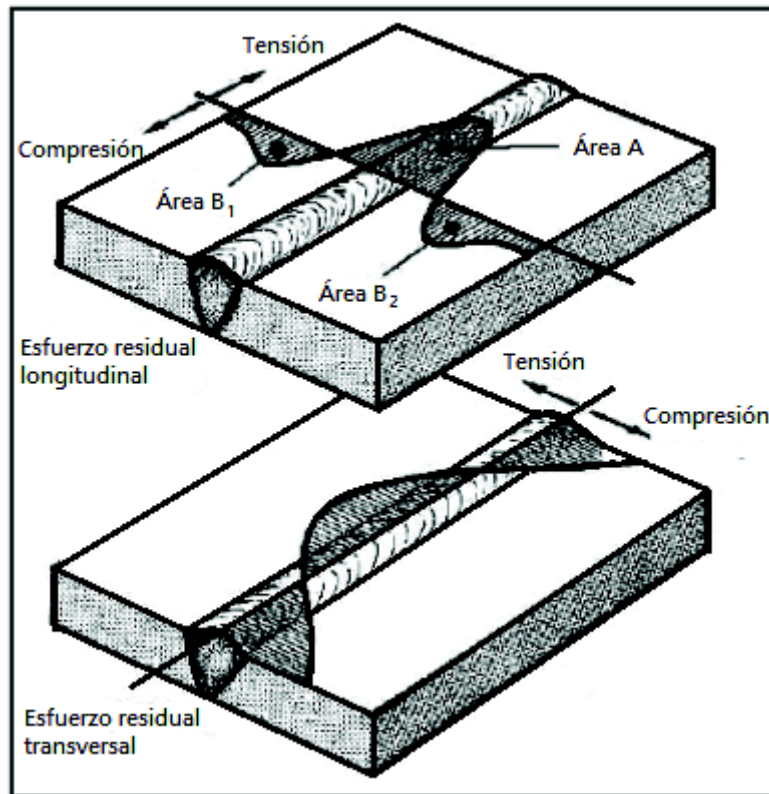
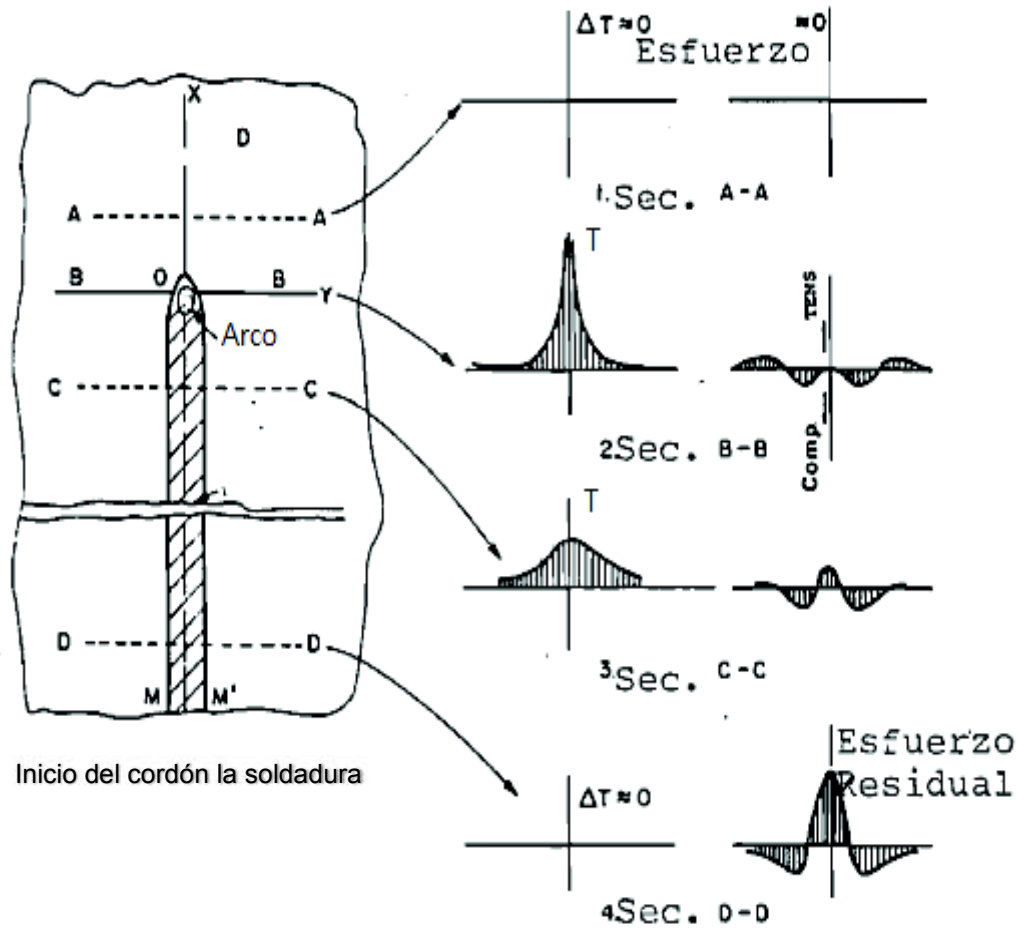


Figura 3.22. Distribución de tensiones residuales longitudinales y transversales de la soldadura.
(Fuente: Bello & Marchena, 2008)

Por otro lado, Saavedra (2012), especifica que una de las causas para que se generen fisuras transversales en el cordón de soldadura es por la generación de esfuerzos residuales longitudinales, por lo que se realizó una investigación de cómo se producen estos esfuerzos térmicos durante la soldadura.

Según Masubushi K. explica la generación de estos esfuerzos mediante la Figura 3.23., en donde especifica que el cordón de soldadura avanza en el eje X desde el punto M' a O y se tiene cuatro secciones en Y:



(a) Soldadura

(b) Cambio de temperatura

(c) Esfuerzo

Figura 3.23. Representación esquemática de los cambios de temperatura y esfuerzos durante la soldadura.

(Fuente: Ospina, 1996)

En la sección A-A, no se presentan esfuerzos térmicos debido a que en teoría se tiene un $\Delta T \cong 0$ ya que se encuentra delante del arco de soldadura.

En la sección B-B, se encuentra el arco de soldadura, por lo tanto, el cambio de temperatura es extremadamente rápido, esto provoca una distribución de temperatura irregular, por otro lado los esfuerzos en la parte inferior al arco tienden a cero ya que el metal fundido no soporta cargas, en las zonas cercanas al arco de soldadura el esfuerzo que se presenta es de compresión debido a que el material base circundante limita una expansión en esa zona por sus temperaturas más bajas, estos esfuerzos de compresión son compensadas con el esfuerzo de tracción de las zonas lejanas a la soldadura.

En la sección C-C, se tiene una distribución de temperatura como se observa en la Figura 3.23. (b)-3, debido a que el arco de soldadura ya pasó por esta zona y el metal base ya se ha enfriado, esto a su vez genera contracción y provocan esfuerzos residuales de tracción en zonas cercanas a la soldadura, a medida que se aleja de la soldadura los esfuerzos cambian de manera que primero cambian a compresión y posterior a tracción.

En la sección D-D, aparentemente el ΔT tiende nuevamente a 0 ya que se encuentra alejado del arco de soldadura, por lo que se generan esfuerzos de tracción en zonas cercanas a la soldadura y esfuerzos de compresión en zonas lejanas a la soldadura, ésta es la distribución de esfuerzos más común con la que permanecen después de la soldadura.

Finalmente, al analizar estos esfuerzos y la manera como se generan en la soldadura, se determina que la tensión residual longitudinal es factor preponderante para que se generen fisuras transversales, debido a que el cordón de soldadura tiende a encogerse longitudinalmente durante el proceso de soldadura lo cual genera esfuerzos de tracción que se espera sean compensados con los esfuerzos de compresión, pero debido a que el material base no logra soportar las cargas para entrar en compresión, los esfuerzos longitudinales de tracción que se generan en el cordón de soldadura comienzan a desarrollarse de manera que el material soldado se expande facilitando de esta manera la formación de la fisura transversal.

3.10. Discusión de la soldabilidad del hierro fundido nodular al ser soldado con los dos tipos de electrodos (AWS E 312-16 y AWS E NiFe-CI)

De manera general y resumida después de realizar los análisis pertinentes se presenta la Tabla 3.41., en donde se especifica la validación del material base y las juntas soldadas utilizadas en este trabajo de titulación, verificando el cumplimiento de las características químicas, metalúrgicas y mecánicas.

De la misma manera con respecto a la soldadura de las placas soldada con los dos tipos de electrodos (AWS E 312-16 y AWS E NiFe-CI) se detalla la validación de los ensayos realizados, basados en los criterios de aceptación de la norma AWS D11.2-89, mediante la cual se determina que la placa soldada con material de aporte AWS E 312-16 no cumple con estos criterios de aceptación de los END, mientras que la placa soldada con el material de aporte AWS E NiFe-CI, cumple con todos los criterios de aceptación.

Tabla 3.41. Criterios de aceptación

Id.	Tipo de ensayo	Normas					
		ASTM A536		AWS D11.2-89		ASTM A247-17	
		A ¹³	R ¹⁴	A	R	A	R
M.B.	Composición química	-	-	X	-	-	-
	Metalografías	-	-	-	-	X	-
	Resistencia a la tracción	X	-	-	-	-	-
	Dureza	-	X	-	-	-	-
AWS E312-16	VT ¹⁵	-	-	-	X	-	-
	PT ¹⁶	-	-	-	X	-	-
	RT ¹⁷	-	-	-	X	-	-
	Resistencia a la tracción	-	-	X	-	-	-
	Dureza	-	-	X	-	-	-
AWS ENiFe-CI	VT	-	-	X	-	-	-
	PT	-	-	X	-	-	-
	RT	-	-	X	-	-	-
	Resistencia a la tracción	-	-	X	-	-	-
	Dureza	-	-	X	-	-	-

(Fuente: Propia)

Por otra parte, la temperatura de precalentamiento de 354°C escogida fue convincente debido a que se encuentra un valor similar mediante el cálculo del carbono equivalente con tan solo una diferencia de 3% aproximadamente.

Finalmente se presenta la Tabla 3.42., en donde se detalla si las placas soldadas con los distintos electrodos (AWS E 312-16 y AWS E NiFe-CI) cumplen con los criterios de soldabilidad metalúrgica, operativa y constructiva.

¹³ A: Aceptado

¹⁴ R. Rechazado

¹⁵ VT: Inspección visual

¹⁶ PT: Tintas penetrantes

¹⁷ RT: Radiografía industrial

Tabla 3.42. Comparación de la soldabilidad con los dos tipos de electrodos.

Identificación	Tipo de soldabilidad					
	Metalúrgica		Operativa		Constructiva	
	Cumple	No Cumple	Cumple	No cumple	Cumple	No cumple
AWS E 312-16	-	X	X	-	-	X
AWS E NiFe-Cl	X	-	X	-	X	-

(Fuente: Propia)

Basándose en la Tabla 3.44., se puede verificar que el material de aporte para hierro fundido AWS E NiFe-Cl cumple con los tres tipos de soldabilidad, caso contrario ocurre con el electrodo para acero inoxidable AWS E 312-16, ya que solamente cumple con la soldabilidad operativa. A continuación, se presenta un análisis más detallado con cada tipo de soldabilidad.

- **Soldabilidad metalúrgica.** De forma general este tipo de soldabilidad se refiere a las transformaciones en la microestructura del material base, y de acuerdo a las metalografías presentadas en el apartado 1.2.1.1. se tienen cambios en la estructura de las dos juntas (AWS E 312-16 y AWS E NiFe-Cl) teniéndose mayor ZAC en la probeta soldada con electrodo AWS E 312-16 con presencia de fundición blanca. La ZAC de la probeta soldada con material de aporte AWS E NiFe-Cl presenta menor área y en su microestructura se tiene una matriz de martensita que de acuerdo al ASM Handbook volumen 9 en este tipo de procesos se lo puede considerar normal y aceptable.
- **Soldabilidad operativa.** Se refiere a las condiciones propias del material base, tales como el enlace de átomos, moléculas, entre otras. Debido a que el hierro fundido es un material difícil de soldar por su alto contenido de carbono se analiza a la soldabilidad operativa como la posibilidad de realizar un determinado proceso de soldadura. En el presente estudio se utilizaron los mismos procedimientos para ambos tipos de electrodos y se pudo evidenciar que se tuvo buena estabilidad del arco y no se presentó inconveniente alguno al momento de soldar, por tanto, la soldabilidad operativa se cumple en las dos juntas soldadas.
- **Soldabilidad constructiva.** Se basa en las propiedades del conjunto y la tendencia al agrietamiento, por lo que la junta soldada con el material de aporte para hierro fundido AWS E NiFe-Cl, cumple con la soldabilidad operativa ya que no presentó defecto alguno, no así la junta soldada con material de aporte AWS E 312-16, ya que ésta presentó una fisura en la raíz del cordón de soldadura por lo cual se concluye que no cumple con este tipo de soldabilidad.

4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

4.1. Conclusiones

- Los objetivos planteados al principio del presente trabajo de titulación se cumplieron de forma satisfactoria ya que se logró determinar las propiedades mecánicas, metalúrgicas y químicas de las juntas soldadas con los dos tipos de electrodos propuestos, basados en los resultados obtenidos de los respectivos ensayos realizados.
- Mediante el análisis de los resultados obtenidos de los ensayos mecánicos, químicos y metalúrgicos del material base y tomando como referencias las normas ANSI/AWS D11.2-89 y ASTM A 247, se determinó que el material usado en la soldadura, corresponde al hierro fundido nodular de grado 65-45-12, el cual presenta un porcentaje de nodulación del 80%, tamaño del grafito nodular de clase 6, y grafito de tipo II.
- Mediante el desarrollo del ensayo de soldabilidad efectuado en 12 barras rectangulares de hierro fundido y basados en la norma ANSI/AWS D11.2-89, se estableció que la temperatura de precalentamiento previo a la soldadura de las placas corresponde a 354°C.
- A través de los ensayos no destructivos se pudo evidenciar que la junta soldada con material de aporte para hierro fundido AWS E NiFe-CI presenta excelentes características físicas y sobre todo cumple con los requerimientos de la norma ANSI/AWS D11.2-89, no obstante, la junta soldada con electrodo para acero inoxidable AWS E 12-16 presentó varios defectos tal como deformación angular, cuyo ángulo con respecto a la horizontal es de 4° aproximadamente, falta de fusión, porosidades y una fisura transversal en la raíz del cordón de soldadura.
- Por medio del análisis metalográfico se determinó que las juntas soldadas con los dos tipos de electrodos presentan cambios de fases, sin embargo, la junta que resulto más afectada en el proceso de soldadura fue la junta soldada con material de aporte AWS E 312-16, ya que presentó mayor zona afectada por el calor con una diferencia del 35% con respecto a la junta soldada con electrodo AWS E NiFe-CI, además de formarse la fase sigma (σ) en la zona del cordón de soldadura, lo cual implica fragilidad y por ende tendencia a la formación de fisuras.
- La fisura transversal generada en la probeta soldada con material de aporte para acero inoxidable AWS E 312-16 se originó por dos razones, la primera fue debido a la presencia de esfuerzos residuales en el cordón de soldadura teniendo mayor preponderancia los esfuerzos longitudinales de tracción que no se lograron

compensar con los esfuerzos de compresión, logrando de esta manera la expansión del material soldado y por ende la formación de la fisura. La segunda razón, fue debido a la formación de la fase sigma (σ) en la zona del cordón de soldadura, ocasionando mayor fragilidad y tendencia al agrietamiento, ambos motivos son ocasionados por cambios bruscos de temperatura que a pesar de realizar un precalentamiento y un enfriamiento lento en arena sílice no se lograron controlar dichos aspectos. Una forma adecuada para lograr tener mayor control sobre los cambios de temperatura sería realizar un tratamiento térmico post soldadura para evitar la presencia de la fase frágil en el cordón de soldadura y también lograr compensar los esfuerzos residuales tanto de tracción como de compresión.

- Si bien las juntas soldadas con los dos tipos de electrodos AWS E 312-16 y AWS E NiFe-CI presentaron buena resistencia mecánica conforme a los resultados de tracción y dureza, cabe destacar que la junta soldada con electrodo para acero inoxidable AWS E 312-16 no cumple con las especificaciones requeridas por la norma ANSI/AWS D11.2, debido a la presencia de defectos lineales como son la falta de fusión y fisura transversal, por lo tanto, no es factible utilizar este tipo de electrodo para soldar el hierro fundido nodular en los trabajos de reparación en la industria.

4.2. Trabajos futuros

- Se debería complementar este trabajo de titulación realizando un estudio cuantitativo de los esfuerzos residuales generados durante y después del proceso de soldadura, en particular para el material de aporte de acero inoxidable, con la finalidad de tratar de controlar este efecto o por lo menos reducir o compensarlos para evitar la generación de fisuras, o a su vez buscar alguna alternativa para sustituir el electrodo de níquel en la soldadura de fundiciones ya que su costo es demasiado elevado.
- Se debería usar el electrodo AWS E NiFe-CI, para soldar fundiciones ya que presenta gran resistencia mecánica y buena ductilidad, pero a su vez se debe usar solo para reparación de piezas fundidas que no serán maquinadas post - soldadura ya que presenta un alto grado de dureza impidiendo una buena maquinabilidad, en sí se debería usar para reparaciones de blocks de motores, carcazas, partes de bombas, entre otras.
- No se debería utilizar el material de aporte AWS E 312-16 para soldar elementos de hierro fundido nodular que estén expuestos a esfuerzos de fatiga, debido a que este electrodo presenta un alto contenido de Cromo, un factor indeseable en este

tipo de fundición, ya que este elemento es un agente estabilizador de carburos los cuales son muy difíciles de descomponer, por lo cual, el material soldado se vuelve demasiado duro y muy frágil.

Referencias Bibliográficas

- Agüera, F. (2008). *Análisis de soldadura de fundiciones "ADI", con electrodos de Fe - Ni*. Argentina.
- American Welding Society. (1996). *Manual de soldadura* (8va ed., Vol. Tomo I). (R. L. O'Brien, Ed., & I. R. Garcia, Trad.) México: Pearson Educación. Recuperado el 03 de 05 de 2018
- ANSI/AWS A5.15. (s.f.). Especificación para los electrodos y varillas para soldar hierro colado.
- ANSI/AWS A5.4. (s.f.). Especificación para electrodos de acero al cromo y al cromo-níquel, resistentes a la corrosión, cubiertos, para soldadura.
- ANSI/AWS B4.0 . (1997). Standard methods for mechanical testing of weld.
- ANSI/AWS D11.2-89. (R2006). Guide for welding Iron Castings.
- ASM Handbook. (s.f.). Metalografías y micrografías. 9.
- ASTM A 247. (2017). Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings.
- ASTM A 536. (1984). Standar Specification for Ductile Iron Castings.
- ASTM E 190. (2014). Standard Test Method for Guided Bend Test for Ductility of Welds.
- ASTM E8. (2016). Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.
- Avner, S. (1988). *Introducción a la metalurgia física* . Mexico: McGraw-Hill.
- Barreiro, J. (2009). *Fundiciones*. Madrid: Dossat.
- Bello, E., & Marchena, M. (Octubre de 2008). Determinación de los esfuerzos residuales en uniones soldadas a tope a través de la teoría de Masubushi. 109. Recuperado el 16 de Agosto de 2018, de <http://mriuc.bc.uc.edu.ve/bitstream/handle/123456789/7164/ebello.pdf?sequence=3>
- Callister, W. (2005). *introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Barcelona: Reverté.
- Cárcel, F., Pérez, M., Guillamón, M., & Martínez, R. (18 de Noviembre de 2016). *Metals*. Obtenido de www.mdpi.com/journal/metals
- Cembrero, J., & Pascual, M. (2000). *Revista de Metalurgia*. Obtenido de Soldabilidad de las fundiciones de grafito esferoidal : <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia>
- CYTI . (2017). *Calidad y técnica industrial, S.A. DE C.V.* Obtenido de <http://www.cyti.com.mx/macrografia.asp>
- Enríquez, J. (2012). *Fabricación de fundición nodular*. Universidad Politécnica de Madrid, Ingeniería de Materiales. Recuperado el 31 de 08 de 2018, de <http://oa.upm.es/14450/>

- Ensayos de dureza - Conocimientos. Struers.com.* (2018). Obtenido de Struers.com:
<https://www.struers.com/es-ES/Knowledge/Hardness-testing#>
- Ensayos de Dureza en los Materiales.* (2018). Obtenido de Ingemecanica.com:
<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn218.html>
- Folleto de tecnología de soldadura EPN.* (2013). Quito, Ecuador.
- FUNDIEC. (s.f.). *Ensayo de tracción de probetas de hierro nodular xx-xx-xx.*
- Groover, M. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna.* Mexico : McGraw-Hill.
- Guzmán, R. (2014). *Soldabilidad de los Materiales.* Recuperado el 16 de 05 de 2018, de
<https://es.scribd.com/doc/215613920/4-Soldabilidad-de-Los-Materiales>
- INDURA. (s.f.). Guía de soldaduras.
- Indura. (s.f.). *Manual de sistemas y materiales de soldadura.*
- Kalpakjian, S., & Schmind, S. (2008). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología.* Mexico: Pearson Educación .
- Morela, P. (2009). *Soldadura industrial.* (Marcombo, Ed.) Recuperado el 16 de 05 de 2018, de <https://books.google.com.ec/books?isbn=8426708757>
- Ospina, A. (1996). Esfuerzos residuales en estructuras soldadas. 387. Recuperado el 16 de Agosto de 2018, de
<http://bdigital.unal.edu.co/46999/1/alvaroleonospinamontoya.1996.pdf>
- Quesada, H. (2015). *Universidad Nacional de Córdoba.* Recuperado el 12 de 04 de 2018, de Soldadura manual por arco con electrodo revestido (SMAW):
<https://edoc.site/recomendaciones-soldadura-por-arco-electrico-smaw-pdf-free.html>
- Rodríguez, O. (2013). *Metalurgia de la soldadura* . La Habana : Editorial Universitaria .
- Saavedra, I. A. (Febrero de 2012). *Construcciones soldadas.* Obtenido de
<http://www.alexandersaavedra.com/2012/02/agrietamiento-en-soldaduras.html>
- SCI. (2018). *Scisa.es.* Recuperado el 11 de 07 de 2018, de <https://scisa.es/ensayos-no-destructivos-y-laboratorio-metalurgico/ensayos-no-destructivos/radiografia-industrial/>
- Silgado, J., & Tabares, E. (2004). *Soldabilidad de fundiciones grises con materiales de aporte tipo RbCuZn-A, ErCuAl-A2 y ErNiFe-CIA.* Paper, Universidad Nacional de Colombia, Medellín. Recuperado el 31 de 08 de 2018, de
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49614109>
- Soldexa. (s.f.). *Manual de soldadura & Catálogo de productos (7° ed.).* Oerlikon. Recuperado el 09 de 04 de 2018, de
<http://www.edu.xunta.gal/centros/cifpcoroso/gl/system/files/manual-soldadura.pdf>
- Universidad Complutense de Madrid. (2017). *Proyecto de Innovación Atlas Metalográfico* . Obtenido de <https://www.ucm.es/atlasmetalografico>
- Universidad de Valladolid. (2015). *Escuela de Ingenierías Industriales* . Obtenido de Metalografía Práctica : <https://www.eii.uva.es/metalo/Ayuda/sigma.htm>

Zurita, E. (2012). *Análisis comparativo de la soldabilidad de planchas de acero*. Quito.
Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4761/1/CD-4372.pdf>

Anexos

ANEXO I.
PLANOS DE TALLER DE LAS PLACAS Y BARRAS A MAQUINAR

ANEXO II.
WPS y PQR PARA LOS DOS TIPOS DE ELECTRODOS

ANEXO III.
PLANO DE LA PROBETA PARA EL ENSAYO DE TRACCIÓN

ANEXO IV.
INFORME DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL BASE

ANEXO V.
INFORME DEL ENSAYO DE TRACCIÓN

ANEXO VI.
INFORME DE MICRODUREZA

ANEXO VII.
INFORME DE LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS