

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**EVALUACIÓN DE LA SOLDABILIDAD DEL HIERRO FUNDIDO
NODULAR CON PROCESO DE SOLDADURA GTAW**

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

MOYA LÓPEZ ALEXANDER VLADIMIR

alexander.moyalopez@hotmail.com

VACA GUATO MEDARDO JOSÉ

medardojosevaca@hotmail.com

DIRECTORA: ING. VERÓNICA SOTOMAYOR

veronica.sotomayor@epn.edu.ec

COLABORADOR: ING. GABRIEL VELASTEGUÍ

gabriel.velastegui@epn.edu.ec

Quito, Septiembre 2016

DECLARACIÓN

Nosotros, Alexander Vladimir Moya López y, Medardo José Vaca Guato, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado por ningún grado o calificación personal; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, de acuerdo a lo establecido por la ley de propiedad intelectual, por su Reglamento y por la Normativa Institucional vigente.

Alexander Vladimir Moya López

Medardo José Vaca Guato

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por los señores Alexander Vladimir Moya López, y Medardo José Vaca Guato, bajo nuestra supervisión.

ING. VERÓNICA SOTOMAYOR
DIRECTORA DEL PROYECTO

ING. GABRIEL VELASTEGUÍ
COLABORADOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Escuela Politécnica Nacional por acogerme en sus aulas y enseñarme lo que sé ahora, a todos los profesores que durante mi carrera universitaria supieron guiarme y hacer de mí una mejor persona y un excelente profesional.

Agradezco a mi familia por su apoyo incondicional durante esta etapa académica. A mis padres, Luis y Narciza, por sus sabios consejos y su amor infinito, por darme ese ejemplo de lucha y esfuerzo diario para ser siempre mejor. A mis hermanas Paola y Katherine por ser mis amigas incondicionales dentro y fuera del hogar.

Agradezco a nuestra directora: Ing. Verónica Sotomayor, por su buena predisposición y su ayuda incondicional para sacar adelante este proyecto. A nuestro colaborador: Ing. Gabriel Velasteguí, por la paciencia y su excelente labor para culminar con éxito éste trabajo.

A mi enamorada Laurita Chang, mi mejor amiga y mi ángel de la guarda, gracias por ese amor infinito y por nunca dejarme solo.

A mis amigos: Juan Carlos Solis y Ricardo Bolaños, por siempre creer en mí y darme ánimos en los peores momentos. Al Ing. Freddy Bedón, por ser mi hermano mayor y cuidarme siempre. A todos mis amigos y amigas que con su desinteresada colaboración han aportado con un granito de arena para alcanzar éste objetivo.

A toda mi familia en general por sus consejos y apoyo incondicional. A todos un sincero Gracias.

Alexander Moya

"Sin decepciones no se aprecia la victoria".

Anónimo

Agradezco a Dios por su infinita bondad, que me cuida me bendice y es mi guía en el camino de la vida. A mi padre y mi madre que me dieron la vida, especialmente a mi madre que es mi motivo y razón para seguir adelante a pesar de los momentos difíciles, agradezco a toda mi familia por ser el apoyo constante durante esta etapa académica.

A todas las personas que con sus palabras, ayuda y motivación me impulsaron a llegar hasta aquí, están en mi mente y corazón. Agradezco a mis amigos y compañeros de la Facultad de Ingeniería Mecánica, con quienes compartí en las aulas de clase y cuya amistad nunca se olvidará.

Agradezco a la directora de tesis la Ingeniera Verónica Sotomayor, así como al colaborador el Ingeniero Gabriel Velasteguí, quienes con su conocimiento, experiencia y amistad han sido un pilar fundamental en la culminación del proyecto de titulación.

A los Jefes de Laboratorio y a todo el personal técnico de la Facultad de Ingeniería Mecánica que colaboraron en los laboratorios respectivos y nos guiaron al realizar la parte experimental del proyecto.

Agradezco de manera especial a la Señora Glorita Castellanos, el Ingeniero Adrián Peña y el Doctor Víctor Cárdenas por su constante impulso hacia mi persona en la mejor facultad de mundo, Ingeniería Mecánica.

Medardo José Vaca

“Ad Altiora Semper”

Hermano Miguel

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mis padres, Luis y Narciza, por el incalculable esfuerzo que realizan día a día por darnos un mejor futuro.

A mis hermanas, Paola y Katherine, por ser mí consuelo en los momentos de debilidad.

A mis abuelitas, Teresa y Aída, por ser mí segunda madre toda mi vida, por su cariño y amor puro.

A mi cómplice y mejor amiga, Laurita Chang, por ser siempre mi apoyo y por su abrazo sincero que reconforta el alma.

A todos los que hicieron esta meta posible.

Alexander Moya

“En los momentos de crisis solo la imaginación es más importante que el conocimiento”

Albert Einstein

Este proyecto lo dedico a mi padre y madre, Medardo y Charito, en especial a mi madre que ha sido mi fuerza, sin su amor y paciencia este logro no habría sido posible.

A mis tíos Inesita y Luchito, quienes me apoyaron siempre desde mi llegada a la ciudad capital, gracias por su paciencia.

A mi familia que siempre se preocupó por mi superación personal y profesional.

A todas las personas que llegaron a mi vida para impulsarme en momentos de debilidad. Dios las puso en mi camino, gracias por apoyarme.

Medardo José Vaca

“E scientia hominis salus”

Escuela Politécnica Nacional

CONTENIDO

DECLARACIÓN	i
CERTIFICACIÓN	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
DEDICATORIA.....	v
CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xvii
ÍNDICE DE FIGURAS	xviii
RESUMEN.....	xxiii
PRESENTACIÓN.....	xxiv
CAPÍTULO I ESTUDIO DEL HIERRO FUNDIDO.....	1
1.1 DEFINICIÓN.....	1
1.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA.....	2
1.3 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	2
1.4 DIAGRAMA DE EQUILIBRIO HIERRO-CARBURO DE HIERRO	3
1.5 MICROCONSTITUYENTES DEL HIERRO FUNDIDO.....	4
1.5.1. FERRITA	5
1.5.2 AUSTENITA.....	6
1.5.3 CEMENTITA.....	6
1.5.4 GRAFITO	6
1.5.5 PERLITA.....	6
1.5.6 LEDEBURITA	6
1.5.7 ESTEADITA.....	7
1.6 TIPOS DE HIERRO FUNDIDO	7
1.6.1 HIERROS FUNDIDOS BLANCOS	7

1.6.2	HIERROS FUNDIDOS MALEABLES.....	8
1.6.2.1	Fundición maleable ferrítica o estándar.....	10
1.6.2.2	Fundición maleable perlítica.....	10
1.6.3	HIERROS FUNDIDOS GRISES.....	11
1.6.4	HIERROS FUNDIDOS NODULARES	13
1.6.4.1	Hierro nodular ferrítico.....	16
1.6.4.2	Hierro nodular perlítico	16
1.6.4.3	Hierro nodular perlítico-ferrítico	16
1.6.4.4	Hierro nodular martensítico	17
1.6.4.5	Hierro nodular austenítico	17
1.6.5	HIERROS DE GRAFITO COMPACTO	19
1.6.6	HIERROS FUNDIDOS ALEADOS.....	20
CAPÍTULO 2 PROCESO DE SOLDADURA GTAW, PARÁMETROS		21
2.1	DEFINICIÓN	21
2.2	PARÁMETROS.....	22
2.2.1	TIPO DE CORRIENTE	22
2.2.1.1	Corriente directa.....	22
2.2.1.1.1	Polaridad.....	22
2.2.1.2	Corriente alterna	23
2.2.2	GAS DE PROTECCIÓN	24
2.2.3	ELECTRODO DE APORTE	26
2.2.3.1	Clasificación de electrodos.....	27
2.2.4	VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO.....	30
2.2.5	VELOCIDAD DEL ALAMBRE	30
2.2.6	ANTORCHAS DE SOLDADURA	31

2.2.6.1	Tipos de antorchas.....	33
2.2.7	METAL DE APORTE – VARILLAS	34
2.2.7.1	Clasificación del metal de aporte.....	34
2.2.8	GENERALIDADES TÉCNICAS	35
2.2.8.1	Distancia del electrodo	35
2.2.8.2	Ángulo.....	36
2.2.8.3	Caudal de gas.....	36
2.2.9	POSICIONES DE SOLDADURA	37
2.2.10	TIPOS DE BISEL	38
2.3	VENTAJAS DEL PROCESO	39
2.4	DESVENTAJAS DEL PROCESO.....	39
	CAPÍTULO 3 SOLDABILIDAD DEL HIERRO FUNDIDO NODULAR.....	40
3.1	SOLDABILIDAD.....	40
3.2	TIPOS DE SOLDABILIDAD	41
3.2.1	SOLDABILIDAD METALÚRGICA	41
3.2.2	SOLDABILIDAD OPERATIVA.....	41
3.2.3	SOLDABILIDAD CONSTRUCTIVA O GLOBAL	41
3.3	DIFICULTADES EN LA SOLDABILIDAD DE FUNDICIONES.....	42
3.3.1	EL METAL DE SOLDADURA.....	42
3.3.2	ZONA DE FUSIÓN	42
3.3.3	ESFUERZOS DE SOLDADURA.....	43
3.3.4	POROSIDAD	44
3.4	SOLDABILIDAD DEL HIERRO FUNDIDO NODULAR	44
3.4.1	PROPIEDADES DEL NÍQUEL Y SU AFINIDAD CON EL HIERRO	45
3.5	ENSAYOS DE SOLDABILIDAD	46

3.5.1	ENSAYOS DIRECTOS DE SOLDABILIDAD.....	47
3.5.1.1	Ensayo de desgarre.....	47
3.5.1.2	Ensayo Houldcroft.....	47
3.5.1.3	Ensayo Varestraint.....	48
3.5.1.4	Ensayo Tekken.....	49
3.5.1.5	Ensayo Vinkier.....	50
3.6	PROGRAMA DE ENSAYO DE SOLDABILIDAD SEGÚN AWS.....	50
3.7	DESARROLLO DEL ENSAYO DE SOLDABILIDAD SEGÚN AWS.....	51
3.8	PROGRAMA DE ENSAYO USADO POR EL COMITÉ DE SOLDADURA DE FUNDICIONES DE HIERRO.....	51
3.8.1	PRIMERA SERIE.....	51
3.8.2	SEGUNDA SERIE.....	52
3.8.3	TERCERA SERIE.....	52
3.9.	EQUIPAMIENTO REQUERIDO PARA DE ENSAYO MEDIANTE PROCESO GTAW.....	53
3.10	CONDICIONES DE SOLDADURA REQUERIDAS PARA EL ENSAYO MEDIANTE PROCESO GTAW.....	54
3.11	RESULTADOS DEL ENSAYO DE SOLDABILIDAD SEGÚN AWS.....	54
3.12	FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA SOLDABILIDAD.....	55
3.12.1	FACTORES OPERATIVOS.....	55
3.12.1.1	Diseño de la junta.....	55
3.12.1.2	Rango de aporte de calor.....	56
3.12.1.3	Presencia de contaminantes.....	57
3.12.1.4	Capacidad del operador.....	57
3.12.2	FACTORES METALÚRGICOS.....	57

3.12.2.1	Transformaciones metalúrgicas	57
3.12.3	DEFECTOS DE SOLDADURA EN FUNDICIONES	59
3.12.3.1	Contracciones de solidificación	59
3.13	ZONA AFECTADA POR EL CALOR (ZAC)	61
CAPÍTULO 4 PROCESO EXPERIMENTAL		63
4.1	INTRODUCCIÓN	63
4.2	SELECCIÓN DEL MATERIAL BASE	63
4.2.1	CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL	64
4.2.1.1	Dimensiones	64
4.2.1.2	Composición química	65
4.2.1.3	Características generales	67
4.2.1.4	Defectos del material base	67
4.3	SELECCIÓN DEL ELECTRODO	68
4.4	MAQUINADO DE PROBETAS	69
4.5	PROCESO DE SOLDADURA	73
4.5.1	RÉGIMEN DE TRABAJO PARA EL HORNO ELÉCTRICO	73
4.5.2	MEDICIÓN DE TEMPERATURA	75
4.5.3	RÉGIMEN DE TRATAMIENTO TÉRMICO EN LAS SERIES	76
4.5.3.1	Régimen de tratamiento térmico para la primera serie	76
4.5.3.1.1	Régimen de tratamiento térmico para la primera probeta	76
4.5.3.1.2	Régimen de tratamiento térmico para la segunda probeta	76
4.5.3.1.3	Régimen de tratamiento térmico para la tercera probeta	77
4.5.3.1.4	Régimen de tratamiento térmico para la cuarta probeta	77
4.5.3.1.5	Régimen de tratamiento térmico para la quinta probeta	78
4.5.3.2	Régimen de tratamiento térmico para la segunda serie	78

4.5.3.2.1	Régimen de tratamiento térmico para la primera probeta.....	78
4.5.3.2.2	Régimen de tratamiento térmico para la segunda probeta	79
4.5.3.2.3	Régimen de tratamiento térmico para la tercera probeta.....	79
4.5.3.2.4	Régimen de tratamiento térmico para la cuarta probeta	80
4.5.3.3	Régimen de tratamiento térmico para la tercera serie	81
4.5.3.3.1	Régimen de tratamiento térmico para las cuatro probetas	81
4.5.4	TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO SEGÚN CARBONO EQUIVALENTE	82
4.5.5	DISEÑO DE LA JUNTA DE SOLDADURA.....	86
4.5.6	DISEÑO DEL CUPÓN DE SOLDADURA	87
4.5.7	PROCESO DE SOLDADURA.....	88
4.5.8	ENFRIAMIENTO POST-SOLDADURA.....	90
4.6	TINTAS PENETRANTES	91
4.6.1	FUNDAMENTO DEL MÉTODO	92
4.6.2	CLASIFICACIÓN DE LOS LÍQUIDOS PENETRANTES	92
4.6.2.1	Proceso A1-B1	93
4.6.2.2	Proceso A2-B2	93
4.6.2.3	Proceso A3-B3	94
4.6.3	SELECCIÓN DE TINTAS PENETRANTES.....	94
4.6.4	APLICACIÓN DE LA PRUEBA DE TINTAS PENETRANTES	95
4.6.4.1	Preparación del material soldado	95
4.6.4.2	Limpieza del material soldado	96
4.6.4.3	Aplicación de líquido penetrante	96
4.6.4.4	Limpieza del exceso de tinta penetrante	97
4.6.4.5	Aplicación del revelador	98

4.6.4.6	Inspección visual.....	98
4.6.4.7	Limpieza final	98
4.7	ENSAYOS DESTRUCTIVOS	99
4.7.1	ENSAYO DE TRACCIÓN	100
4.7.1.1	Especificaciones para las probetas de tracción	100
4.7.1.2	Preparación de probetas T ₁ y T ₂	101
4.7.1.3	Inspección visual de las probetas T ₁ y T ₂	102
4.7.1.4	Realización del ensayo de tracción	103
4.7.2	ENSAYO DE DOBLADO.....	104
4.7.2.1	Especificaciones para las probetas de doblado.....	104
4.7.2.2	Preparación de probetas D _C y D _R	104
4.7.2.3	Inspección visual de las probetas D _C y D _R	105
4.7.2.4	Realización del ensayo de doblado	105
4.8	ANÁLISIS METALOGRAFICO	106
4.8.1	PREPARACIÓN DE LA PROBETA.....	106
4.8.1.1	Desbaste grueso	106
4.8.1.2	Desbaste fino	107
4.8.1.3	Pulido.....	108
4.8.1.4	Ataque químico	108
4.8.2	MACROGRAFÍA.....	109
4.8.3	DUREZA.....	110
4.8.4	MICROGRAFÍA	112
CAPÍTULO 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		113
5.1	RESULTADOS DEL PROCESO DE SOLDABILIDAD	113
5.1.1	RESULTADOS DE LA PRIMERA SERIE	113

5.1.1.1	Resultados a temperatura ambiente.....	113
5.1.1.2	Resultados a 121 °C	114
5.1.1.3	Resultados a 260 °C	114
5.1.1.4	Resultados a 400 °C	115
5.1.1.5	Resultados a 540 °C	116
5.1.1.6	Análisis final de resultados de la primera serie.....	116
5.1.2	RESULTADOS DE LA SEGUNDA SERIE	116
5.1.2.1	Resultados a 288 °C	117
5.1.2.2	Resultados a 316 °C	117
5.1.2.3	Resultados a 343 °C	118
5.1.2.4	Resultados a 371 °C	118
5.1.2.5	Análisis final de resultados de la segunda serie	119
5.1.3	RESULTADOS DE LA TERCERA SERIE.....	119
5.1.3.1	Resultados a 322 °C	119
5.1.3.2	Resultados a 327 °C	120
5.1.3.3	Resultados a 333 °C	121
5.1.3.4	Resultados a 338 °C	121
5.1.3.5	Análisis final de resultados de la tercera serie.....	122
5.1.4	RESULTADOS DEL CORDÓN DE SOLDADURA DE LAS PLACAS ...	122
5.2	RESULTADOS DE ENSAYOS DESTRUCTIVOS.....	123
5.2.1	ENSAYO DE TRACCIÓN	123
5.2.1.1	Probeta T ₁	124
5.2.1.2	Probeta T ₂	126
5.2.2	ENSAYO DE DOBLADO.....	128

5.2.2.1	Probeta D _C	129
5.2.2.2	Probeta D _R	130
5.3	RESULTADOS DE METALOGRAFÍA.....	132
5.3.1	MACROGRAFÍA.....	132
5.3.2	DUREZA.....	134
5.3.3	MICROGRAFÍA	137
5.3.3.1	Análisis de tamaño y tipo de grafito.....	137
5.3.3.2	Diferentes zonas presentes en la micrografía	139
5.3.3.3	Tipo de matriz presente en la micrografía	139
5.3.4	ANÁLISIS FINAL	141
CAPÍTULO 6	CONSIDERACIONES PARA LA ELABORACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA	142
6.1	PROCEDIMIENTO.....	142
6.1.1	MAQUINADO DE PROBETAS.....	142
6.1.2	PRECALENTAMIENTO DE PROBETAS	143
6.1.3	SOLDADURA DE PLACAS.....	144
6.1.4	INSPECCIÓN DE LA SOLDADURA	146
6.2	MATERIALES Y EQUIPOS	146
6.2.1	MATERIALES	146
6.2.2	EQUIPOS	148
6.3	PROBLEMAS COMÚNES DURANTE EL PROCESO DE SOLDADURA..	148
6.3.1	ERRORES EN LAS CONEXIONES DE LA MÁQUINA	148
6.3.2	ERRORES EN EL PROCEDIMIENTO TIG	148
6.4	PRECAUCIONES GENERALES.....	149
6.4.1	FUEGO.....	150

6.4.2	HUMO	150
6.4.3	EXPLOSIONES	151
6.4.4	QUEMADURAS	151
6.4.5	SHOCK ELÉCTRICO	151
6.5	TÉRMINOS GENERALES	152
CAPÍTULO 7.....		153
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		153
7.1	CONCLUSIONES	153
7.2	RECOMENDACIONES.....	155
BIBLIOGRAFÍA.....		156
ANEXOS.....		160

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Clasificación de las fundiciones grises según la norma ASTM-A48	13
Tabla 1.2 Clasificación de la fundición nodular	18
Tabla 2.1 Características de los tipos de corriente para proceso GTAW	24
Tabla 2.2 Gases inertes para proceso GTAW	25
Tabla 2.3 Rangos de corriente según el diámetro y tipo de electrodo	27
Tabla 2.4 Rangos de corriente según el diámetro y tipo de electrodo	29
Tabla 2.5 Propiedades mecánicas de las varillas.....	35
Tabla 2.6 Composición química de las varillas.....	35
Tabla 4.1 Dimensiones del material base	64
Tabla 4.2 Resultado de análisis químico.....	66
Tabla 4.3 Características mecánicas del material base	67
Tabla 4.4 Dimensiones iniciales del material base	69
Tabla 4.5 Clasificación de líquidos penetrantes	92
Tabla 5.1 Requerimientos de tensión	123
Tabla 5.2 Resultados del barrido de dureza en el metal base.....	135
Tabla 5.3 Resultados del barrido de dureza en el metal de aporte.....	136
Tabla 5.4 Resultados del barrido de dureza en la zona de fusión	136
Tabla 5.5 Resultados del barrido de dureza en la ZAC	137
Tabla 5.6 Comparación del tipo de grafito.....	138
Tabla 5.7 Comparación del tamaño de grafito.....	138
Tabla 5.8 Comparación del tipo de matriz en el material base	140
Tabla 5.9 Comparación del tipo de matriz en la zona de fusión	140

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama metaestable hierro - carburo de hierro (Fe_3C)	4
Figura 1.2 Micro constituyentes en el diagrama metaestable hierro - carburo de hierro (Fe_3C)	5
Figura 1.3 Esquema de hierro fundido blanco	8
Figura 1.4 Esquema de hierro fundido maleable	9
Figura 1.5 Cambios en microestructura en una matriz ferrítica	10
Figura 1.6 Microestructura de la fundición maleable ferrítica	11
Figura 1.7 Esquema de hojuelas de grafito en fundición gris	12
Figura 1.8 Microestructura de la fundición gris (ferrita y perlita)	12
Figura 1.9 Nódulos de grafito en un hierro nodular	14
Figura 1.10 Diagrama de tratamiento de una fundición nodular	15
Figura 1.11 Microestructura de la fundición nodular ferrítica-perlítica	17
Figura 1.12 Estructura de la fundición de grafito compacto	19
Figura 2.1 Proceso GTAW	21
Figura 2.2 Polaridad inversa	22
Figura 2.3 Polaridad directa	23
Figura 2.4 Influencia delafilado del electrodo en la soldadura	30
Figura 2.5 Partes de una antorcha para soldadura de proceso GTAW	32
Figura 2.6 Esquema del circuito de soldadura GTAW con pistola refrigerada por aire	33
Figura 2.7 Esquema de un circuito de soldadura GTAW con pistola refrigerada por agua	33
Figura 2.8 Distancia entre electrodo y pieza	36
Figura 2.9 Ángulo de inclinación respecto a la vertical entre 0° y 15°	36
Figura 2.10 Ángulo de inclinación respecto a la vertical 30°	36
Figura 2.11 Posiciones de soldadura para uniones de filete	37
Figura 2.12 Posiciones de soldadura para uniones de bisel	37
Figura 2.13 Posiciones de soldadura para uniones de tuberías	38
Figura 2.14 Tipos de bisel para juntas a tope	38

Figura 3.1 Ensayo de desgarre	47
Figura 3.2 Ensayo Houldcroft	48
Figura 3.3 Ensayo Varestraint	49
Figura 3.4 Ensayo Tekken	49
Figura 3.5 Ensayo Tekken	50
Figura 3.6 Tipos de juntas	56
Figura 3.7 Estructuras en las zonas de la soldadura de hierro fundido nodular	58
Figura 3.8 Defecto de combadura en piezas soldadas	60
Figura 3.9 Defecto de distorsión en piezas soldadas	60
Figura 3.10 Defecto de esfuerzos residuales en piezas soldadas	60
Figura 3.11 Defecto de arco desviado	61
Figura 3.12 Mal aspecto del cordón de soldadura	61
Figura 4.1 Dimensiones del bloque para ensayo de soldabilidad	64
Figura 4.2 Dimensiones de la placa para ensayo de soldabilidad	65
Figura 4.3 Defectos de fabricación en la placa	67
Figura 4.4 Defectos de fabricación en el bloque	68
Figura 4.5 Electrodo con y sin revestimiento	69
Figura 4.6 Desbaste de probetas en la limadora	70
Figura 4.7 Refrentado de las caras opuestas de los bloques	71
Figura 4.8 Taladrado de probetas	72
Figura 4.9 Rectificado de bloques de fundición nodular	72
Figura 4.10 Rectificado de placas de fundición nodular	73
Figura 4.11 Termómetro Fluke 54 II	75
Figura 4.12 Pirómetro Fluke 62 Mini	75
Figura 4.13 Precalentamiento a 121 °C	76
Figura 4.14 Precalentamiento a 327 °C	81
Figura 4.15 Diagrama de Heinbauer	83
Figura 4.16 Relación entre carbono equivalente y temperatura sin grietas	85
Figura 4.17 Dimensiones de la junta de soldadura	86
Figura 4.18 Junta de soldadura	86

Figura 4.19 Cupón de soldadura	87
Figura 4.20 Proceso de soldadura en las probetas	88
Figura 4.21 Colocación de respaldos entre las placas.....	89
Figura 4.22 Colocación de platinas	89
Figura 4.23 Realización del cordón de soldadura entre placas.....	90
Figura 4.24 Enfriamiento post-soldadura de las placas	91
Figura 4.25 Fundamento de acción de líquido penetrante	92
Figura 4.26 Proceso de aplicación A1 y B1	93
Figura 4.27 Proceso de aplicación A2 y B2	93
Figura 4.28 Proceso de aplicación A3 y B3	94
Figura 4.29 Líquido penetrante aplicable al proceso.	95
Figura 4.30 Selección de las probetas ensayadas	96
Figura 4.31 Limpieza de cada probeta	96
Figura 4.32 Aplicación del líquido penetrante en las probetas	97
Figura 4.33 Limpieza del exceso de penetrante de cada probeta.....	97
Figura 4.34 Aplicación del revelador sobre cada probeta	98
Figura 4.35 Maquina universal de ensayos TINIUS OLSEN	99
Figura 4.36 Requerimientos para el ensayo de tracción	100
Figura 4.37 Corte y limado del espécimen	101
Figura 4.38 Marca de calibre en la probeta de tracción	101
Figura 4.39 Defectos en la probeta T ₁	102
Figura 4.40 Defectos en la probeta T ₂	103
Figura 4.41 Realización del ensayo de tracción para la probeta T ₁ y T ₂	103
Figura 4.42 Preparación de la probeta D _R	104
Figura 4.43 Probeta de doblado de cara (D _C) y probeta de doblado de raíz (D _R) ...	105
Figura 4.44 Realización del ensayo de doblado en la probeta D _C y D _R	105
Figura 4.45 Recubrimiento con resina de las probetas	106
Figura 4.46 Desbaste grueso de las probetas M ₁ y M ₂	107
Figura 4.47 Desbaste fino de las probetas M ₁ y M ₂	107
Figura 4.48 Pulido fino de la probeta M ₂	108
Figura 4.49 Inmersión de la probeta M ₁ y M ₂ en el reactivo	109

Figura 4.50	Visualización de la zona afectada por el calor en la probeta M ₁	109
Figura 4.51	Proceso de macrografía con el microscopio estereoscópico.	110
Figura 4.52	Durómetro HR-150 A.....	110
Figura 4.53	Barrido de dureza para la probeta M ₁	111
Figura 4.54	Microscopio metalográfico invertido.....	112
Figura 5.1	Resultados de ensayo de soldabilidad a T _{amb}	113
Figura 5.2	Resultados de ensayo de soldabilidad a 121°C.....	114
Figura 5.3	Resultados de ensayo de soldabilidad a 260°C.....	115
Figura 5.4	Resultados de ensayo de soldabilidad a 400°C.....	115
Figura 5.5	Resultados de ensayo de soldabilidad a 540°C.....	116
Figura 5.6	Resultados de ensayo de soldabilidad a 288°C.....	117
Figura 5.7	Resultados de ensayo de soldabilidad a 316°C.....	117
Figura 5.8	Ampliación del defecto	118
Figura 5.9	Resultados de ensayo de soldabilidad a 343°C.....	118
Figura 5.10	Resultados de ensayo de soldabilidad a 371°C.....	119
Figura 5.11	Resultados de ensayo de soldabilidad a 322°C.....	120
Figura 5.12	Resultados de ensayo de soldabilidad a 327°C.....	120
Figura 5.13	Resultados de ensayo de soldabilidad a 323°C.....	121
Figura 5.14	Resultados de ensayo de soldabilidad a 338°C.....	121
Figura 5.15	Resultados del cordón de soldadura en las placas.....	122
Figura 5.16	Ampliación de los defectos del cordón de soldadura en las placas.....	123
Figura 5.17	Rotura de probeta T ₁	124
Figura 5.18	Medidas en la rotura de la probeta T ₁	125
Figura 5.19	Fractura de la probeta T ₁	125
Figura 5.20	Zona 1, parte derecha del cordón, parte inferior afectada en la raíz....	126
Figura 5.21	Rotura de la probeta T ₂	126
Figura 5.22	Rotura de la probeta T ₂	127
Figura 5.23	Fractura de la probeta T ₂	127
Figura 5.24	Superficies de rotura de la probeta T ₂	128
Figura 5.25	Inicio de fisura en la probeta.....	128

Figura 5.26 Ángulo de doblado de probeta D _c	129
Figura 5.27 Fisura propagada a lo largo de la zona de fusión en la probeta D _c	130
Figura 5.28 Ángulo de doblado de probeta D _R	131
Figura 5.29 Fisura en la raíz del cordón de soldadura en la probeta D _R	132
Figura 5.30 Zonas en la ZAC	133
Figura 5.31 Pases de soldadura.....	133
Figura 5.32 Área del cordón de soldadura.....	134
Figura 5.33 Área de la ZAC en cada región del cordón de soldadura.....	134
Figura 5.34 Micrografía del material base a 100x.....	138
Figura 5.35 Tipo de grafito	138
Figura 5.36 Micrografía del material base a 100x.....	138
Figura 5.37 Tamaño de grafito.....	138
Figura 5.38 Diferentes zonas del material base a 100x.....	139
Figura 5.39 Micrografía del material base a 100x.....	140
Figura 5.40 Tipo de matriz.....	140
Figura 5.41 Micrografía de la zona de fusión a 100x.....	140
Figura 5.42 Matriz de fundición blanca	140
Figura 6.1 Maquinado de material base	142
Figura 6.2 Cordón de soldadura en una de las caras del tocho.....	143
Figura 6.3 Aplicación de tinta penetrante y revelador.....	143
Figura 6.4 Colocación de respaldo y platinas	144
Figura 6.5 Calentamiento de la placa con soplete a gas	145
Figura 6.6 Limpieza del cordón de soldadura con moladora.....	145
Figura 6.7 Remoción del exceso de tinta penetrante.....	146
Figura 6.8 Riesgo de incendio al soldar.....	150
Figura 6.9 Uso de extractores de vapor al soldar	151
Figura 6.10 Riesgo de shock eléctrico.....	152

RESUMEN

El presente proyecto es desarrollado con el objetivo de evaluar la soldabilidad del hierro fundido nodular con proceso de soldadura GTAW, éste material es usado en rejillas y tapas de alcantarilla por la EMAAP-Q; el mantenimiento de reparación por soldadura se considera como una de las aplicaciones principales del proceso. En el mercado nacional la fundición nodular es usada en una gran variedad de aplicaciones, por ejemplo, tapas y rejillas de alcantarillado, tomas de agua potable. Debido a la composición de carbono no son materiales dúctiles, son poco soldables pero sí son maquinables, son materiales relativamente duros, absorben las vibraciones mecánicas y actúan como auto-lubricantes, son resistentes al choque térmico, resistentes a la corrosión y al desgaste. Al tratarse de materiales poco soldables es importante analizar la influencia que tiene el proceso GTAW sobre el material base de hierro fundido nodular; con el fin de determinar la temperatura de soldabilidad óptima de la fundición nodular conforme lo dicta el procedimiento según la Norma ANSI/AWS D11.2 (R2006). La factibilidad del proceso se determina al realizar los ensayos pertinentes tanto destructivos como no destructivos para determinar si la soldabilidad aplicada a la fundición nodular es aceptable o no. El proyecto también permite determinar los parámetros de soldadura que garanticen una buena calidad en la junta soldada. Finalmente se especifica las consideraciones para la elaboración del procedimiento, los cuales se tomaron en cuenta durante el desarrollo del proyecto y los factores de seguridad a los cuales se debe regir para evitar accidentes.

PRESENTACIÓN

En el primer capítulo se realiza un estudio del hierro fundido, empezando por su composición química, características principales, tipos de hierro fundido que existen en la actualidad, haciendo énfasis en el hierro nodular, que es el objetivo de este proyecto. El segundo capítulo corresponde al proceso de soldadura GTAW y los parámetros que lo rigen, tipo de corriente, gas de protección, electrodo de aporte, metal de aporte; se hace una breve referencia a las posiciones de soldadura, tipos de bisel, generalidades técnicas, ventajas y desventajas del proceso. En el tercer capítulo se realiza un estudio acerca de la soldabilidad del hierro fundido nodular según las recomendaciones de la American Welding Society (AWS D11.2 89-2006), se analizan los tipos de soldabilidad, los factores que influyen en la soldabilidad, se detalla el programa de ensayos de soldabilidad y el equipamiento necesario. El cuarto capítulo corresponde al proceso experimental realizado para determinar la soldabilidad del hierro nodular; se realiza la selección del material base y del electrodo, se especifica el maquinado de las probetas y el diseño de la junta, se escogen los ensayos no destructivos y ensayos destructivos. En el quinto capítulo se analizan los resultados obtenidos de los procesos de precalentamiento de probetas; con los resultados de los ensayos de tracción y doblado se realiza una comparación con respecto a las propiedades iniciales del material base, también se analiza la microestructura y la zona afectada por el calor. El sexto capítulo corresponde a las consideraciones generales para la elaboración del procedimiento de soldadura, se detalla los materiales y equipos necesarios, los problemas más comunes durante el proceso de soldadura y las precauciones generales. En el séptimo capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones del presente proyecto.

CAPÍTULO I

1 ESTUDIO DEL HIERRO FUNDIDO¹

Las fundiciones o también llamados hierros fundidos constituyen un sistema férreo tradicional importante. Estos materiales son aleaciones de hierro-carbono-silicio en composiciones elevadas de carbono. Al tratarse de un material frágil y con ductilidad baja no se puede laminar o trabajar a temperatura ambiente.

La característica principal de estos materiales es que presentan reacción eutéctica durante su solidificación y difieren principalmente en la geometría del grafito.

En comparación con el acero es un material más barato. Al combinar las propiedades mediante la aleación requerida en el proceso controlado de fundición y con un tratamiento térmico adecuado se convierte en un material utilizado en un amplio campo de acción en la industria.

1.1 DEFINICIÓN²

Al igual que los aceros, los hierros fundidos son aleaciones de hierro y carbono, tomando como referencia el diagrama de hierro-carburo de hierro, estos materiales contienen mayor cantidad de carbono que la necesaria para producir saturación de austenita a la temperatura eutéctica (2.1% en peso de carbono).

¹ Castro, G. (s/f). Fundiciones. Departamento de Ingeniería Mecánica. 2.

² Avner, S. (1988). Introducción a la metalurgia física. 2da Edición. México: McGraw Hill. 421.

1.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA³

Debido al inconveniente de tratarse de materiales frágiles y con el fin de mejorar sus propiedades, el hierro fundido manufacturado tiene una composición entre 2% hasta 6,67% de carbono y entre 0,5% hasta 3% en peso de silicio para controlar la cinética de formación de carburos, lo que permite que el sistema evolucione según el diagrama de equilibrio estable, formándose grafito en lugar de cementita durante la solidificación.

Debido a que el alto contenido de carbono tiende a hacer muy frágil al hierro fundido, la mayor parte de los hierros manufacturados comercialmente están en el intervalo de 2,5 a 4% de carbono.

También poseen manganeso hasta el 1.5%, fósforo hasta el 1.8% (que proporciona a la aleación una colabilidad excelente) y hasta un 0.25 % de azufre. Además de estas fundiciones ordinarias, existen fundiciones aleadas, que contienen cantidades sensibles de otros elementos de aleación (Cu, Ni, Mo, Ti, Al) para modificar sus propiedades físicas y mecánicas, incrementando por ejemplo la resistencia al desgaste, a la abrasión o a la corrosión.

1.3 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES⁴

Se caracterizan por que durante su fabricación se pueden vaciar un horno cubilote por lo que no se necesitan equipos ni hornos demasiado costosos para obtener piezas de diferente tamaño y complejidad, sin embargo no pueden ser sometidas a deformación plástica ya que no son materiales dúctiles ni maleables, son poco soldables pero sí son maquinables, relativamente duras, absorben las vibraciones mecánicas y actúan como auto-lubricantes, son resistentes al choque térmico, resistentes a la corrosión y al desgaste.

³ Shakelford, J. (2005). Introducción a la Ciencia de Materiales para Ingenieros, 6ta. Edición. México: Prentice Hall. 400.

⁴ Castro, G. (s/f). Fundiciones. Departamento de Ingeniería Mecánica. 2.

Resultan excelentes para moldeo por sus temperaturas de fusión y viscosidad de la fase líquida relativamente baja, debido a que no forman capas superficiales indeseadas durante la colada, y por experimentar una contracción con formas complejas, si bien las propiedades mecánicas serán inferiores a las de las aleaciones de forja. La resistencia de las fundiciones es variable y depende del tipo de fundición.

1.4 DIAGRAMA DE EQUILIBRIO HIERRO-CARBURO DE HIERRO⁵

También llamado Diagrama Hierro-Carbono técnicamente representa condiciones metaestables, es decir que puede considerarse como un indicador de cambios en equilibrio bajo condiciones requeridas de calentamiento y enfriamiento relativamente lentos.

El diagrama Hierro – Carbono se muestra en la Figura 1.1 en la cual se observa tres líneas horizontales que muestran reacciones isotérmicas. El hierro puro está presente en tres estados alotrópicos a medida que aumenta la temperatura.

Desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de 911°C, que es la temperatura crítica, el hierro ordinario cristaliza en el sistema cúbico de cuerpo centrado BCC y recibe el nombre de ferrita o también llamado hierro α (alfa).

Entre la temperatura de 911°C y la temperatura de 1400°C el hierro cristaliza en el sistema cúbico de caras centradas FCC y recibe el nombre de austenita o también llamado hierro γ (gamma).

Entre la temperatura de 1400°C y la temperatura de 1538°C el hierro cristaliza de nuevo en el sistema cúbico de cuerpo centrado BCC y recibe el nombre de hierro δ (delta), que consiste en el mismo hierro alfa con mayor parámetro de red por efecto de la temperatura. Superior a la temperatura de 1538°C el hierro se encuentra en estado líquido.

⁵ Avner, S. (1988). Introducción a la metalurgia física. 2da Edición. México: McGraw Hill. 234.

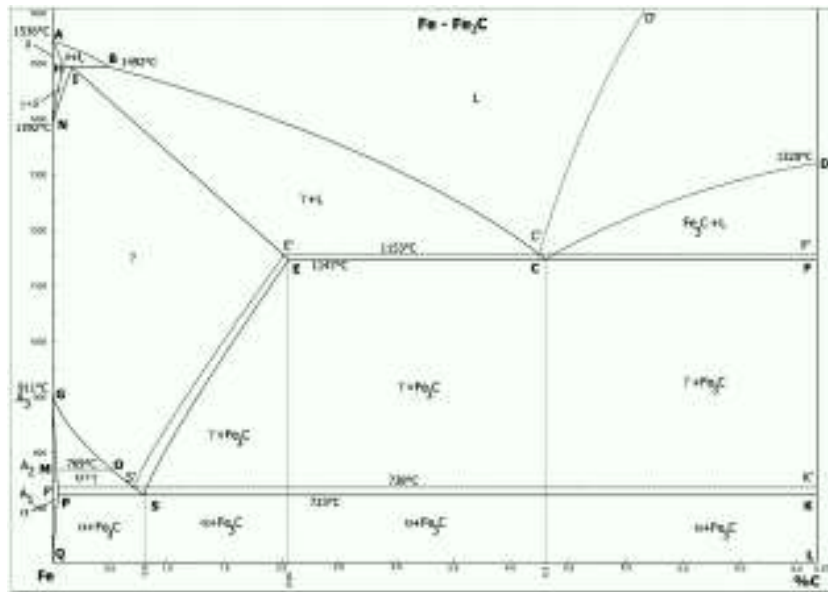


Figura 1.1 Diagrama metaestable hierro - carburo de hierro (Fe_3C)⁶

1.5 MICROCONSTITUYENTES DEL HIERRO FUNDIDO⁷

Al añadir carbono al hierro aumenta su grado de macicez y sus átomos podrían situarse simplemente en los intersticios de la red cristalina. Las fundiciones de hierro pueden presentar iguales constituyentes de los aceros, más el eutéctico: ledeburita, compuesto de austenita y cementita. El eutéctico ternario de cementita, ferrita y fósforo de hierro (esteadita). Además el carbono se puede presentar en forma de láminas, nódulos o esferas de grafito, su microestructura se basa en el diagrama hierro carbono estable.

⁶ Askeland, D. (2004). Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 4ta Edición. México: Thomson Editores. 365.

⁷ Castro, G. (s/f). Fundiciones. Departamento de Ingeniería Mecánica. 6.

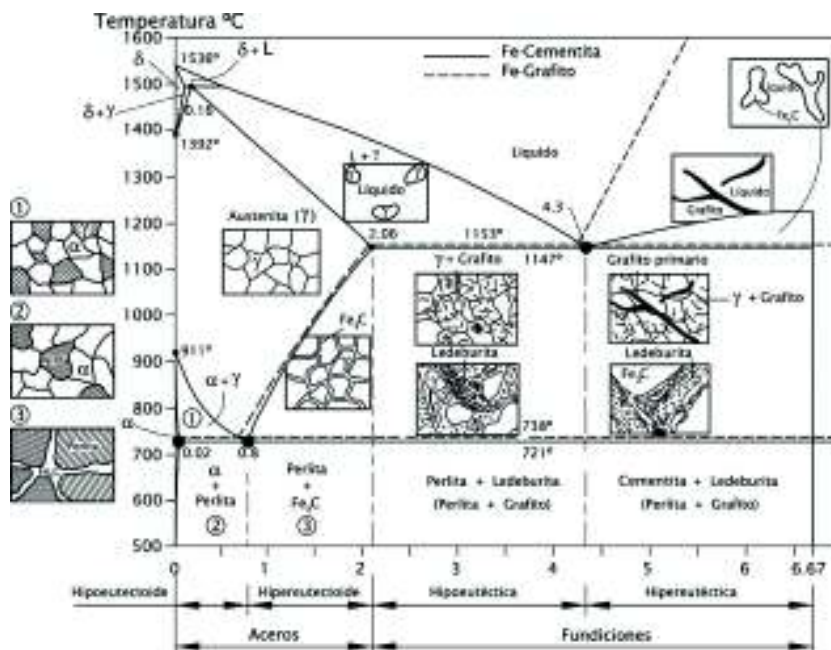


Figura 1.2 Micro constituyentes en el diagrama metaestable hierro - carburo de hierro (Fe_3C)⁸

1.5.1. FERRITA⁹

Es una solución sólida intersticial de carbono en el hierro alfa. La solubilidad máxima del carbono en la ferrita es 0,008% de carbono a 20 °C y 0,03% de carbono a 723°C. Los átomos de carbono se disponen en los intersticios de la red cristalina de hierro. La ferrita puede disolver pequeñas cantidades de carbono y tiene una dureza de 80 – 100 HB, se trata de un constituyente monofásico.

Es un material dúctil y maleable, lo que permite la forjabilidad de las aleaciones con bajo contenido en carbono. Además es ferromagnético hasta los 770°C. Superior a esta temperatura pierde la propiedad magnética y se denomina como temperatura de Curie.

⁸ Askeland, D. (2004). Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 4ta Edición. México: Thomson Editores. 365.

⁹ Avner, S. (1988). Introducción a la metalurgia física. 2da Edición. México: McGraw Hill. 237.

1.5.2 AUSTENITA¹⁰

Es una solución sólida intersticial de la red de Fe γ . La solubilidad máxima de carbono en la austenita es de 2,14% de carbono a una temperatura de 1147°C y 0,8% de carbono a una temperatura de 723°C. Dada su mayor compacidad, la austenita se deforma con mayor facilidad y es paramagnética. Tiene una dureza de 180 a 200 HB.

1.5.3 CEMENTITA¹⁰

Conocida también como carburo de hierro, es un compuesto químico intersticial de Fe en carbono. Tiene red cristalina rómbica y es bastante frágil. Tiene una dureza de 650-800 HB y una temperatura de fusión de 1600°C. La cementita no es estable ya que debido al grafito mediante una rápida transformación disminuye la resistencia.

1.5.4 GRAFITO¹⁰

Es una de las formas alotrópicas en las que se puede presentar el carbono (carbono libre) se trata de un material blando por lo que posee baja resistencia y es auto lubricante.

1.5.5 PERLITA¹⁰

Es una mezcla mecánica eutectoide similar a la eutéctica, pero está formada de solo una fase sólida de ferrita y cementita contenida a 0,8% de carbono.

1.5.6 LEDEBURITA¹⁰

Es una mezcla mecánica eutéctica bifásica de austenita y cementita presente a temperaturas superiores de 723°C. Se forma al enfriar la fundición líquida de 4.3% de carbono desde 1147°C. Está formada por 52% de cementita y 48% de austenita de 2% de carbono. En el enfriamiento por debajo de la temperatura de 723°C la austenita se transforma en perlita y su estructura pasa de ledeburita a cementita y perlita. En las fundiciones se puede conocer las zonas donde existió ledeburita por el aspecto eutéctico con que quedan las agrupaciones de perlita y cementita. Este constituyente tiene una dureza de 600-700 HB y es un material muy frágil.

¹⁰ Pantoja, F. (2015). Apuntes de Tratamientos Térmicos.

1.5.7 ESTEADITA¹¹

Es un constituyente de naturaleza eutéctica duro, se trata de un constituyente frágil que tiene dureza de 300 a 350 Vickers y punto de fusión bajo de 960°C. Éste constituyente aparece en las fundiciones de alto contenido en fósforo superior al 0.15%.

1.6 TIPOS DE HIERRO FUNDIDO

El hierro fundido se lo clasifica a nivel metalográfico, de esta forma se puede evidenciar las diferentes estructuras formadas de acuerdo a las siguientes variables que se deben considerar: el contenido de carbono, el contenido de aleación y de impurezas, la velocidad de enfriamiento durante o después del congelamiento y el tratamiento térmico si es el caso.

En los hierros fundidos, el carbono puede encontrarse en forma combinada de carburo de hierro en cementita, o también en forma libre o no combinada en forma de grafito. La forma y distribución en la estructura, de las partículas de carbono sin combinar, son las que influyen en mayor parte en las propiedades físicas del hierro fundido.

La estructura de la matriz y propiedades contenidas en los diferentes tipos de hierro fundido están determinadas por la forma en que la austenita se transforma durante la reacción eutectoide producida.

1.6.1 HIERROS FUNDIDOS BLANCOS

Son aleaciones hipoeutécticas. Se producen utilizando únicamente aleaciones de hierro-carbono. En este tipo de hierro fundido, todo el carbono se encuentra combinado con una microestructura formada de perlita y cementita o carburo de hierro (Fe_3C) que comprende una fase metaestable. Éste es un compuesto intersticial duro y frágil.

¹¹ Castro, G. (s/f). Fundiciones. Departamento de Ingeniería Mecánica. 7.

Dado que el hierro fundido blanco tiene cantidades masivas de cementita, como una red interdendrítica continua, hace que el hierro fundido blanco sea duro y resistente al desgaste; pero demasiado frágil y difícil de maquinarse.

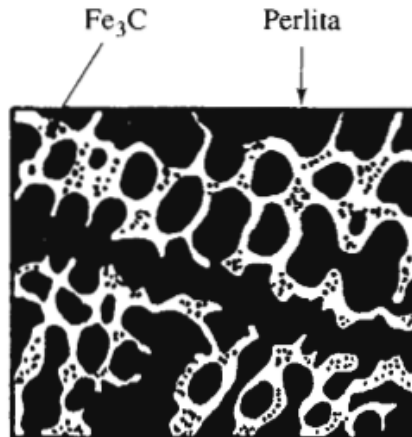


Figura 1.3 Esquema de hierro fundido blanco¹²

Debido a las características descritas, los hierros fundidos completamente blancos, no poseen muchas aplicaciones en ingeniería, salvo en casos en los que se requieren elementos resistentes al desgaste y que no requieren ductilidad.

Para ampliar la variedad de uso, a los hierros blancos se agregan elementos como el cromo, el níquel y el molibdeno, de manera que se formen carburos de aleación y martensita en un tratamiento térmico posterior.

1.6.2. HIERROS FUNDIDOS MALEABLES

Este material se obtiene mediante tratamiento térmico del hierro fundido blanco como material de inicio. El requerimiento para producir hierro fundido maleable es descomponer la cementita en hierro y carbono, es decir, deja de considerarse la cementita como una fase estable, sin embargo bajo condiciones de equilibrio, la cementita suele comportarse de acuerdo a su forma original.

¹² Askeland, D. (2004). Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 4ta Edición. México: Thomson Editores. 344

La descomposición de Fe_3C se logra por alta temperatura obtenida en el horno, impurezas sólidas no metálicas, mayores porcentajes de contenido de carbono y elementos que ayuden a la descomposición.

Ésta maleabilización permite que todo o casi todo el carbono se encuentre sin combinar en forma de partículas redondas irregulares, que permiten que se obtenga una buena combinación de resistencia y ductilidad, conocidas también como “nódulos de carbono revenido” (grafito) y ferrita.



Figura 1.4 Esquema de hierro fundido maleable¹³

La producción de fundición maleable requiere de varios pasos. Los nódulos de grafito se nuclean al calentarse lentamente la fundición blanca.

En la primera etapa de grafitización (PEG), la cementita se descompone en austenita estable y en fases grafiticas (el carbono contenido en la cementita se difunde a los núcleos de grafito).

¹³ Askeland, D. (2004). Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 4ta Edición. México: Thomson Editores. 345

1.6.2.1. Fundición maleable ferrítica o estándar

La pieza fundida se enfría lentamente a través del rango de temperatura eutectoide, para obtener una segunda etapa de grafitización (SEG).

Como característica principal, la fundición ferrítica maleable presenta buena tenacidad, debido a que su equivalente bajo de carbono, reduce la temperatura de transición por debajo de la temperatura ambiente.

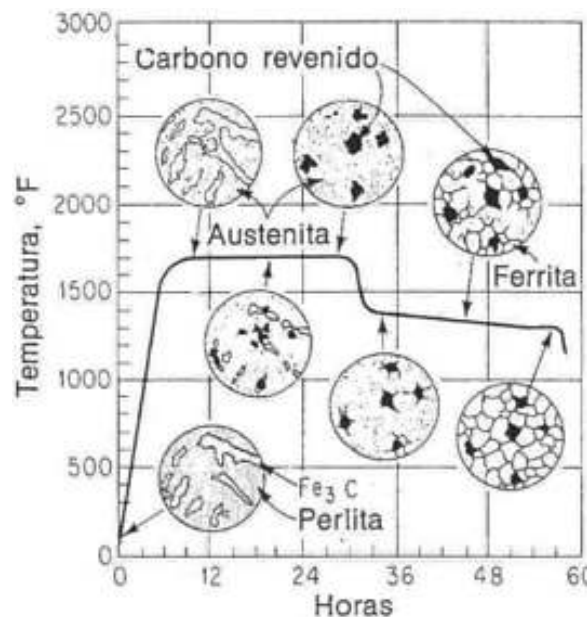


Figura 1.5 Cambios en microestructura como función del ciclo de maleabilización que origina carbono revenido en una matriz ferrítica¹⁴

1.6.2.2. Fundición maleable perlítica

Este material es obtenido al enfriar la austenita utilizando como medio el aire, o aceite, para formar perlita o martensita. Posterior, la fundición es revenida a una temperatura inferior al eutectoide, lo que provoca un revenido de la martensita o esferoidización de la perlita. Al someter el material a una temperatura de revenido superior, la propiedad de resistencia disminuye, incrementándose la tenacidad y ductilidad. La matriz de este material es frágil y dura.

¹⁴ Avner, S. (1988). Introducción a la metalurgia física. 2da Edición. México: McGraw Hill. 421.

La cantidad de perlita que se forma, depende de las condiciones de temperatura a la que se inicia el temple y la rapidez de enfriamiento. Si estas condiciones son altas, el resultado es mayor cantidad de carbono retenido o perlita. Además, si el temple en aire se produce a una temperatura que rodea el rango eutectoide, la matriz será completamente perlítica.

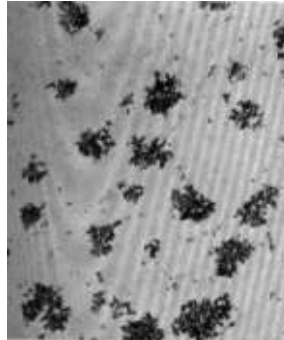


Figura 1.6 *Microestructura de la fundición maleable ferrítica*¹⁵

1.6.3. HIERROS FUNDIDOS GRISES.

En este tipo de fundiciones, toda o la mayor parte de carbono se encuentra en estado libre, sin combinaciones y en forma de escamas de grafito. Constituye una de las aleaciones de hierro más utilizadas. El proceso de grafitización es ayudado mediante el control en la composición de aleación y la rapidez de enfriamiento que favorecen la tendencia de la cementita para separarse tanto en grafito, austenita y ferrita.

La mayor cantidad de este tipo de fundiciones son aleaciones hipoeutécticas que tienen entre 2,5% y 4% de C. El grafito en este tipo de material aparece como hojuelas o placas de forma alargada y curva irregular.

¹⁵ Castro, G. (s/f). Fundiciones. Departamento de Ingeniería Mecánica. 8.

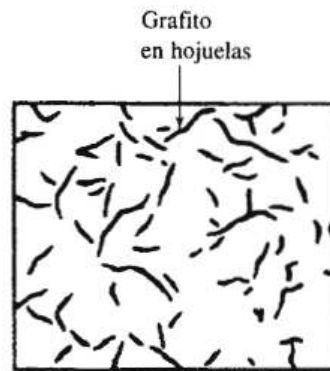


Figura 1.7 Esquema de hojuelas de grafito en fundición gris¹⁶

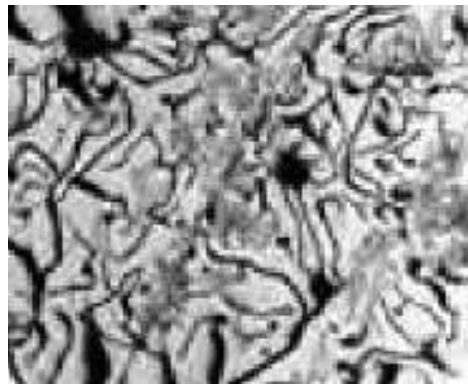


Figura 1.8 Microestructura de la fundición gris (ferrita y perlita)¹⁷

El hierro gris tiene aplicaciones como: bases, pedestales de máquinas, herramientas, bastidores para maquinaria pesada y bloques de cilindros como componentes para motores, discos de freno, herramientas agrícolas.

¹⁶ Avner, S. (1988). Introducción a la metalurgia física. 2da Edición. México: McGraw Hill. 427.

¹⁷ Castro, G. (s/f). Fundiciones. Departamento de Ingeniería Mecánica. 2.

Tabla 1.1 Clasificación de las fundiciones grises según la norma ASTM-A48¹⁸

Clase	Resistencia a la tracción [psi]	Dureza Brinell	Estructura
20	24000	130-180	F, P
30	34000	170-210	F, P, G
40	44000	210-260	P, G
50	54000	240-280	P, G
60	64000	260-300	B, G

F: ferrita; P: perlita; G: grafito; B: bainita

1.6.4. HIERROS FUNDIDOS NODULARES¹⁹

El hierro fundido nodular es conocido también como hierro dúctil, hierro de grafito esferoidal o simplemente como hierro esferulítico, debido a que las partículas de grafito contenido en su estructura tienen forma de nódulos o esferoides generados durante su solidificación.

La estructura de la matriz y las propiedades de cada hierro fundido se definen por la forma en la que la austenita se transforma durante la reacción eutectoide. Además, la formación de cada tipo de hierro fundido se controla añadiendo modificadores para promover el crecimiento eutéctico necesario.

El hierro fundido nodular se produce tratando con magnesio el hierro fundido líquido, que tiene alto contenido de carbono, esto provoca el crecimiento de grafito esferoidal durante la solidificación.

¹⁸ ASTM A48, Standard Specification for Gray Iron Castings, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

¹⁹ Askeland, D. (2004). Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 4ta Edición. México: Thomson Editores. 354.

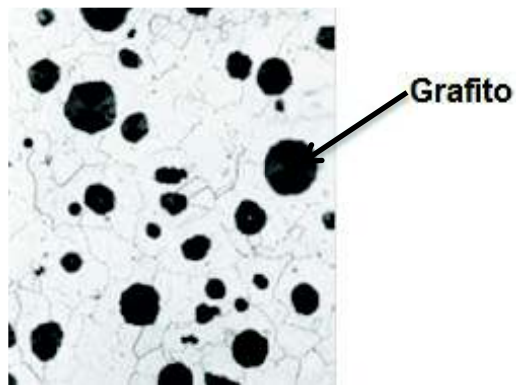


Figura 1.9 Nódulos de grafito en un hierro nodular²⁰

Para la producción de este tipo de hierro se debe seguir el siguiente procedimiento²¹:

1. *Desulfurización*.- Esto se realiza ya que el efecto del azufre es provocar el crecimiento de grafito en forma de hojuelas. Para obtener hierros con bajo contenido de azufre se suele fundir materiales con baja carga en azufre o utilizar desulfurizantes, como el carburo de calcio.
2. *Nodulación*.- Se agrega magnesio alrededor de los 1500 °C, para eliminar restos de azufre y oxígeno, produciendo un total de 0.03% Mg. Dado que el magnesio se vaporiza a menor temperatura (1150 °C) se suele usar magnesio diluido con ferro-silicio para permitir la recuperación alta de Mg. La *atenuación* o evaporación gradual del magnesio debe ser controlada con el tiempo, ya que si no se vacía el hierro en los minutos siguientes, el metal se transforma en fundición gris.
3. *Inoculación*.- El magnesio es un estabilizador de carburos, éste provoca que durante la solidificación se produzca fundición blanca. Por lo que en este proceso se debe inocular al hierro con aleaciones de FeSi.

²⁰ Callister, W. (2007). Materials Science and Engineering. 7ma Edición. USA: John Wiley & Sons. 390.

²¹ Askeland, D. (2004). Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 4ta Edición. México: Thomson Editores.

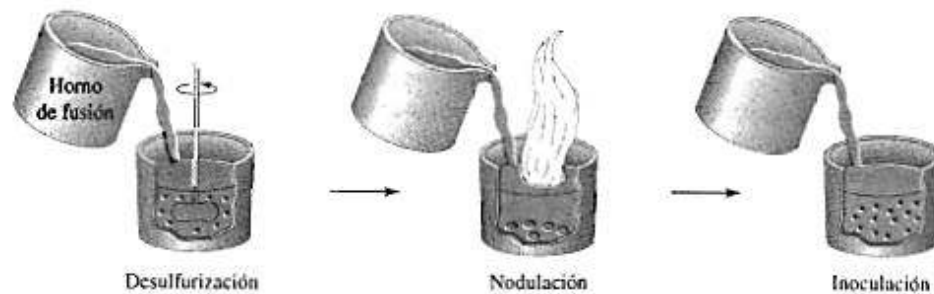


Figura 1.10 Diagrama de tratamiento de una fundición nodular²²

Este tipo de hierro difiere de la fundición maleable, en que se obtiene en el proceso de la solidificación y no requiere de un tratamiento térmico. Durante el proceso de solidificación, las esferoides interrumpen la continuidad de la matriz, mucho menos que las hojuelas de grafito, dando como resultado mayor ductilidad y resistencia mecánica que la fundición maleable. Así también, posee mayor resistencia mecánica, ductilidad y tenacidad, en comparación con el hierro gris; en cuanto a la cantidad total de carbono contenida, es la misma que la de la fundición gris. Las partículas esferoidales de grafito se forman debido a la presencia de elementos de aleación. El elemento formador de nódulos es generalmente el magnesio o cerio. Sin embargo debido al alto contenido de silicio en la fundición nodular, la tenacidad es inferior.

La cantidad de ferrita contenida en la matriz de la pieza sin aplicar un tratamiento térmico, depende de la composición y la rapidez de enfriamiento.²³

De acuerdo a la composición química, las fundiciones nodulares son similares a la fundición gris, se diferencian en las adiciones de magnesio y cerio para formar la sedimentación del carbono en forma nodular y dependiendo de la estructura cristalina existen los siguientes tipos.

²² Askeland, D. (2004). Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 4ta Edición. México: Thomson Editores.

²³ Castro, G. (s/f). Fundiciones. Departamento de Ingeniería Mecánica. 5.

1.6.4.1. Hierro nodular ferrítico

Los hierros nodulares con una matriz de 10% de perlita como máximo, en donde las esferas de grafito están incrustadas en una matriz de ferrita (estructura básicamente compuesta por hierro puro); su estructura proporcionan las siguientes propiedades:

- Máxima ductilidad, tenacidad y maquinabilidad
- Alta resistencia al impacto
- Moderada conductividad térmica
- Alta permeabilidad magnética
- Buena resistencia a la corrosión (en algunas ocasiones)

1.6.4.2. Hierro nodular perlítico

Se producen por fundido o mediante un proceso térmico de normalización, desde una temperatura de 1600 hasta 1650 °F. Se trata de los hierros nodulares con una matriz superior a 10% de perlita, (las esferas de grafito se encuentran dentro de una matriz de perlita). La perlita es un agregado fino de ferrita y cementita o carburo de hierro Fe_3C . Su estructura proporcionan las siguientes propiedades:

- Más fuertes, pero menos dúctiles que los anteriores
- Relativamente duro
- Alta resistencia
- Buena resistencia al desgaste
- Moderada resistencia al impacto
- Poca conductividad térmica
- Baja permeabilidad magnética
- Buena maquinabilidad

1.6.4.3. Hierro nodular perlítico-ferrítico

En esta aleación, las esferas de grafito están mezcladas en una matriz de ferrita y perlita. Este tipo es el más común de las aleaciones de Hierro Nodular y sus propiedades se encuentran entre las propiedades de una estructura de Hierro Nodular Ferrítico y Hierro Nodular Perlítico, además presentan:

- Buena maquinabilidad
- Menor costo de fabricación de las aleaciones de Hierro Nodular.

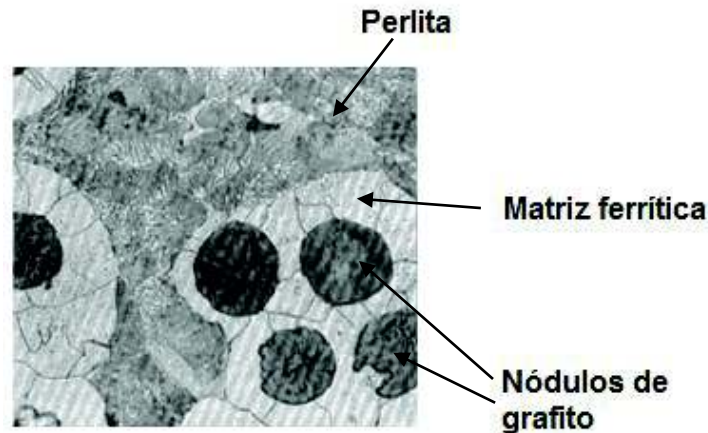


Figura 1.11 Microestructura de la fundición nodular ferrítica-perlítica²⁴

1.6.4.4. Hierro nodular martensítico

Es una aleación dura y frágil, por lo tanto, raramente utilizada. Sin embargo, después de un tratamiento térmico de templado (Martensita Templada), la aleación tiene una alta resistencia mecánica y a la corrosión, además de una alta dureza la cual puede tener un rango de 250 HB (Dureza Brinell) a 300 HB.

1.6.4.5. Hierro nodular austenítico²⁵

Son ampliamente utilizados por su buena resistencia mecánica, así como por su resistencia a la corrosión y a la oxidación; poseen además propiedades magnéticas y una alta estabilidad de la resistencia mecánica y dimensional a elevadas temperaturas.

Los *hierros austeníticos dúctiles*, son hierros nodulares altamente aleados, éstos retienen su estructura austenítica hasta los -75°F. Entre sus propiedades principales constan alta resistencia a la corrosión y buena fluencia a elevadas temperaturas.

²⁴ Castro, G. (s/f). Fundiciones. Departamento de Ingeniería Mecánica. 6.

²⁵ Avner, S. (1988). Introducción a la metalurgia física. 2da Edición. México: McGraw Hill. 446.

- Hierro nodular atruchado²⁶

La fundición atruchada posee una matriz de fundición blanca parcialmente combinada con fundición gris. El carbono en este tipo de hierro fundido, se encuentra libre y combinado, por lo que es difícilmente maquinable en sus aplicaciones.

- Hierro nodular templado

Pertencen a una clase de hierro fundido nodular en el cual, la matriz martensítica, puede obtenerse realizando un tratamiento térmico de templado en aceite o en agua, desde una temperatura de 1600 a 1700 °F. Esta clasificación generalmente es revenida posterior al proceso de temple, para lograr la resistencia y dureza deseada.

Tabla 1.2 Clasificación de la fundición nodular teniendo en cuenta sus características mecánicas de acuerdo con la norma ASTM A-536²⁷

Clase	Resistencia [psix1000]	Límite de fluencia	Dureza Brinell [HB]	Alargamiento (%)
60-40-18	42000	28000	149-187	18
65-45-12	45000	32000	170-207	12
80-55-06	56000	38000	187-255	6
100-70-03	70000	47000	217-267	3
120-70-02	84000	63000	240-300	2

El hierro nodular 60-40-18 es un grado ferrítico, esta clase no debe contener más de 5% de perlita.

El hierro nodular 65-45-12 es un grado que parcialmente contiene arriba de 60% de ferrita.

²⁶ Castro, G. (s/f). Fundiciones. Departamento de Ingeniería Mecánica. 5.

²⁷ ASTM A536-84(2014), Standard Specification for Ductile Iron Castings, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

El hierro nodular 80-55-06, es el grado perlítico, usualmente contiene aproximadamente 70% de perlita, con algo de ferrita.

El hierro nodular 100-70-03 es el grado 95% perlítico y puede ser producido con contenidos de manganeso o cobre o por proceso térmico de normalizado.²⁸

1.6.5. HIERROS DE GRAFITO COMPACTO²⁹

En este tipo de fundición, el grafito presenta una forma intermedia entre hojuelas y esferoidal, que se le denomina *grafito vermicular*. Además presenta barras redondeadas que están interconectadas con el núcleo de la celda eutéctica. El hierro de grafito compacto se forma también durante la atenuación del hierro nodular.

La forma del grafito permite obtener materiales con resistencias mecánicas y ductilidades superiores a las de la fundición gris, brindando buenas propiedades de conductividad térmica y absorción de la vibración.

El tratamiento para la obtención de la fundición de grafito compacto es similar a la del hierro nodular, pero durante el proceso de nodulación se introduce bajo contenido, aproximadamente 0,015% de magnesio.

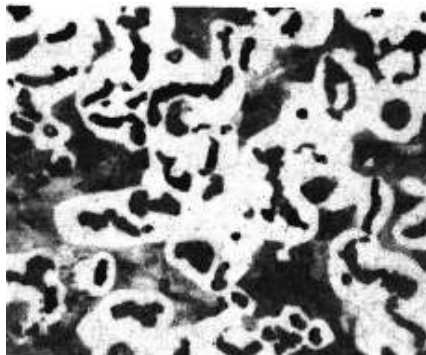


Figura 1.12 Estructura de la fundición de grafito compacto, con una matriz de ferrita (blanca) y de perlita (gris) x250²⁹

²⁸ STEELWORKER. (2009). *Hierro Nodular*. Recuperado el 02 de julio de 2016 de <http://hierronodular.blogspot.mx/>

²⁹ Askeland, D. (2004). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. 4ta Edición. México: Thomson Editores.

1.6.6. HIERROS FUNDIDOS ALEADOS³⁰

Son aquellos que contienen un elemento o elementos específicamente añadidos para la resistencia a la corrosión, el desgaste o el calor, así como, modificar y mejorar las propiedades mecánicas del material fabricado. Los elementos aleantes más comunes son el cromo, cobre, molibdeno, níquel y el vanadio.

El cromo forma carburos de hierro-cromo más estables que el carburo de hierro. Este componente incrementa la resistencia, la dureza, la profundidad de la capa de hierro blanco, la resistencia al desgaste y resistencia al calor. Por el contrario disminuye la maquinabilidad del material.

Las adiciones de cromo de menos de 1% dan como resultado una mejora de las propiedades mecánicas en general. Para obtener mayor resistencia a la corrosión o al calor, se suele combinar con otros elementos de aleación.

El contenido de *cobre* para la fabricación de máquinas en ingeniería va en un rango de 0,25 a 2,5 %. Este elemento funciona como grafitizador (hace resistente la matriz), pero es menos eficaz que el silicio.

El molibdeno se añade como elemento aleante en cantidades de 0,25 s 1,25%. Este elemento mejora las propiedades mecánicas, entre ellas, la resistencia a la fatiga, resistencia tensil, resistencia transversa, resistencia al calor y la dureza; además es un leve estabilizador de carburos.

El vanadio es un elemento formador de carburo potente, este elemento estabiliza la cementita y reduce la grafitización. Se añade en un rango de 0,10 y 0,25%, mejora las propiedades de resistencia tensil, resistencia transversa y dureza.

El níquel es un elemento grafitizador, pero menos efectivo que el silicio. Este elemento controla la estructura retardando la transformación de austenita, estabiliza la perlita y manteniendo el carbono en la cantidad eutectoide. Se añade en composición de 0,5 a 6,0%.

³⁰ Avner, S. (1988). Introducción a la metalurgia física. 2da Edición. México: McGraw Hill. 449.

CAPÍTULO 2

2 PROCESO DE SOLDADURA GTAW, PARÁMETROS

2.1. DEFINICIÓN³¹

Es un proceso de soldadura por arco eléctrico en el cual se obtiene la unión de los metales por calentamiento de los mismos, utiliza un electrodo de tungsteno no consumible para crear un arco a una pieza de trabajo. La zona de protección del electrodo y la soldadura se obtiene mediante un gas inerte, generalmente argón, helio (o una mezcla de los dos). El metal de aporte se coloca en el arco eléctrico logrando la fusión del mismo y la mezcla de este con el metal base. La pileta líquida se manipula controlando la correcta fusión de las partes; el proceso puede ser usado sin material de aporte.

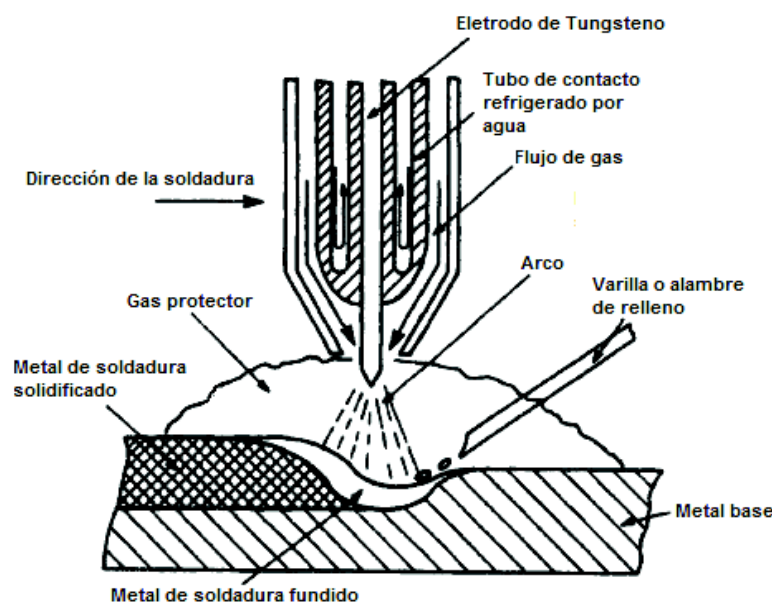


Figura 2.1 Proceso GTAW³¹

³¹ Messler, R. (2004). Principles of Welding. Singapur: John Wiley & Sons.

2.2. PARÁMETROS

A continuación se detalla los parámetros que definen de mejor manera el proceso de soldadura GTAW.

2.2.1. TIPO DE CORRIENTE

2.2.1.1. Corriente directa

Es aquella que no varía a través del tiempo, es decir, se mantiene constante durante todo el proceso. Es necesario que existan dos terminales, uno positivo y otro negativo, para que se produzca la circulación de corriente; en este caso los terminales van conectados al electrodo o pinza y a la masa o tierra.

2.2.1.1.1. Polaridad

Es la conexión del electrodo a uno de los terminales del equipo de soldadura o polos de la máquina.

- Polaridad inversa.- se produce cuando el electrodo es conectado directamente al terminal positivo (+) del equipo; en este caso la corriente eléctrica circula desde la pieza hacia el electrodo, la pieza está conectada al terminal negativo (-), la corriente “entra” al electrodo.

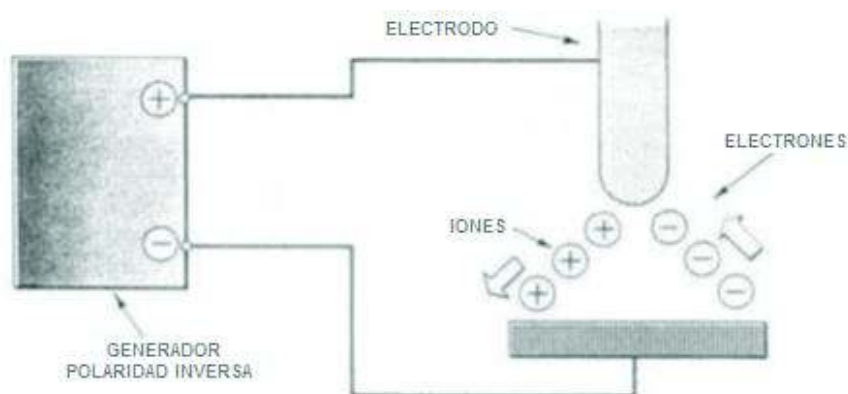


Figura 2.2 Polaridad inversa³²

³² Eyheralde, M. (2012). *Inspección en Soldadura*. Recuperado el 30 de septiembre de 2015 de <http://campusvirtual.edu.uy/archivos/mecanica-general/soldadura/08%20Proceso%20GTAW.pdf>

- Polaridad directa

Es cuando el electrodo se conecta de forma directa al terminal negativo (-) del equipo de soldadura, en este caso la circulación de la corriente eléctrica es desde el electrodo hacia la pieza, la cual está conectada al terminal positivo (+) del equipo.

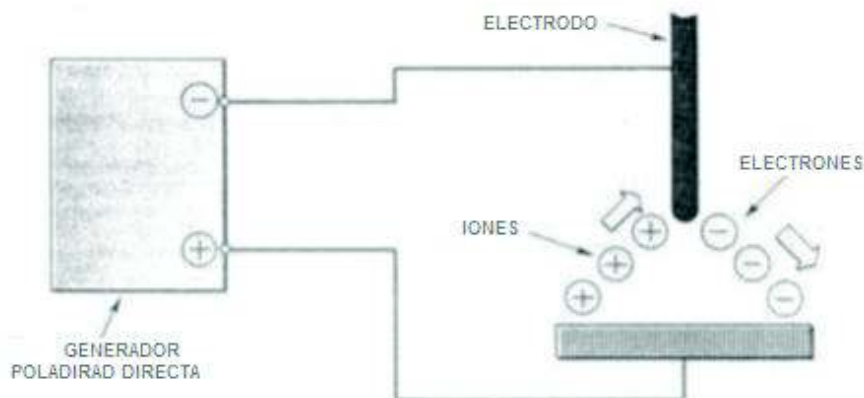


Figura 2.3 Polaridad directa³³

2.2.1.2. Corriente alterna

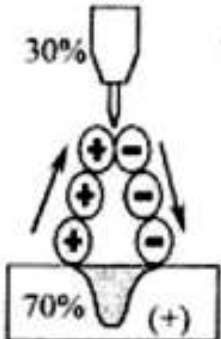
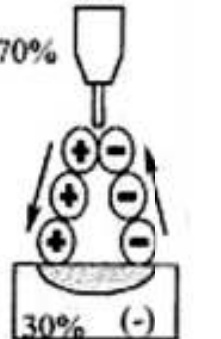
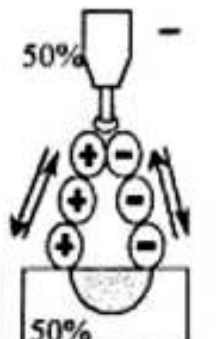

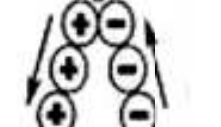

La corriente alterna varía cíclicamente, de forma constante, a lo largo del tiempo. Una corriente alterna de 60 ciclos, significa que en 1 segundo cambia 120 veces la polaridad, pasando alternadamente de la polaridad positiva a la negativa y viceversa.

En la corriente alterna no es necesario definir la polaridad, debido a que ésta cambia constantemente durante todo el proceso.

La siguiente tabla detalla las características de los tipos de corriente para soldadura por arco de tungsteno y gas.

³³ Eyheralde, M. (2012). *Inspección en Soldadura*: Recuperado el 30 de septiembre de 2015 de <http://campusvirtual.edu.uy/archivos/mecanica-general/soldadura/08%20Proceso%20GTAW.pdf>

Tabla 2.1 Características de los tipos de corriente para proceso GTAW³⁴

TIPO DE CORRIENTE	CDEN	CDEP	CA
POLARIDAD DEL ELECTRODO	NEGATIVA	POSITIVA	
CDEN. - Corriente Directa Electrodo Negativo CDEP. - Corriente Directa Electrodo Positivo CA. - Corriente Alterna	CDEN (-) 30% 	CDEP (+) 70% 	CA 50% 
FLUJO DE ELECTRONES (-) E IONES (+)			
BALANCE CALORÍFICO EN EL ARCO	70% en la pieza 30% en el electrodo	70% en el electrodo 30% en la pieza	50% en el electrodo 50% en la pieza
ACCIÓN LIMPIADORA DE ÓXIDOS	NO	SI	SI, UNA VEZ CADA MEDIO CICLO
TIPO DE PENETRACIÓN	Profunda, angosta	Poco profunda, ancha	Mediana

2.2.2. GAS DE PROTECCIÓN

La principal función del gas es generar una burbuja que proteja al cordón de soldadura, al electrodo y al metal base del aire que circula en el ambiente; también influye en la estabilidad del arco así como en el resultado final de la soldadura.

Los gases que más se emplean para el proceso GTAW son Argón y Helio, o una mezcla de los dos, los cuales deben poseer un alto grado de pureza (aprox. 99.99%).

- Argón

Con este gas se puede obtener una buena estabilidad del arco y ayuda a un fácil encendido, tiene una baja conductividad térmica que permite concentrar el calor en el centro del arco, lo cual produce una penetración muy marcada en el centro del cordón.

³⁴ Messler, R. (2004). Principles of Welding. Singapur: John Wiley & Sons. 53.

- Helio
Es muy poco utilizado, se necesita aplicar mayor tensión en el arco, lo que genera una menor penetración y cordones anchos.
- Argón-Helio
Al utilizar esta mezcla se puede conseguir características intermedias de los dos gases; el inconveniente es que sólo es aplicable para materiales de cobre.

En la tabla siguiente se especifica el gas adecuado para cada tipo de material a soldar.

Tabla 2.2 Gases inertes para proceso GTAW³⁵

Material a soldar	Tipo de Gas
Aluminio y aleaciones	Argón
Latón y aleaciones	Helio o Argón
Cobre y aleaciones (menor a 3 mm)	Argón
Cobre y aleaciones (mayor a 3mm)	Helio
Acero al carbono	Argón
Acero inoxidable	Argón
Hierro fundido	Argón

Existen dos efectos que se producen cuando se forma la atmosfera de gas protectora:

- Pre-flujo de gas.- es el gas de protección que sale antes de que se establezca el arco de soldadura.

³⁵ Eyheralde, M. (2012). *Inspección en Soldadura*: Recuperado el 30 de septiembre de 2015 de <http://campusvirtual.edu.uy/archivos/mecanica-general/soldadura/08%20Proceso%20GTAW.pdf>

- Post-flujo.- es el gas de protección que sale cuando ya se ha terminado el proceso de soldadura

Se puede regular según el tiempo en que se esté soldando:

- Dos tiempos: se pulsa y sale el gas, se crea el arco y se suelda; cuando se deja de pulsar se corta el arco pero sigue saliendo gas.
- Cuatro tiempos: se pulsa y sale el gas, se deja de pulsar y se crea el arco, se suelda, se vuelve a pulsar y se corta el arco; cuando se deje de soltar se corta el gas.

2.2.3. ELECTRODO DE APORTE³⁶

El electrodo que se usa en el proceso de soldadura GTAW tiene una gran diferencia respecto de los demás electrodos usados en otros procesos, debido a que no se funde con el calor que es generado por el arco eléctrico y por este motivo no aporta material a la soldadura. Aunque se debe recordar que al seleccionar de forma incorrecta un electrodo o usar amperajes muy altos se puede transferir partículas del electrodo hacia el arco eléctrico.

El electrodo es altamente refractario, su punto de fusión supera los 3400 °C, son fabricados desde 0.5 mm de diámetro hasta 6 mm y pueden ser hechos de tungsteno puro o con aleaciones de zirconio o torio, los más usados son de 1.6 mm y de 2.4 mm; aunque de manera general el espesor de la pieza determinará el tipo de electrodo que se debe usar.

Cuando se usa corriente continua y polaridad directa el electrodo puede soportar hasta 100 veces su diámetro, si el proceso se lo realiza con corriente continua y polaridad inversa el electrodo es capaz de aguantar 10 veces su diámetro, al usar corriente alterna el electrodo soportará entre 75 – 80 veces su diámetro.

³⁶ Mora, C. (2008). *Proceso TIG*. Recuperado el 20 de octubre de 2015 de http://carlosmora-smaw.blogspot.com/2008_03_01_archive.html

A continuación se muestra una tabla mostrando las corrientes sugeridas para usarse según el diámetro y el tipo de electrodo.

Tabla 2.3 Rangos de corriente según el diámetro y tipo de electrodo³⁷

Diámetro del electrodo		Corriente Directa				Corriente Alterna	
		Electrodo Negativo		Electrodo Positivo			
mm	in	Tungsteno Puro	Tungsteno con agregados de oxido	Tungsteno Puro	Tungsteno con agregados de oxido	Tungsteno Puro	Tungsteno con agregados de oxido
0.50	0.010	hasta 15	hasta 15	N.A	N.A	hasta 15	hasta 15
0.30	----	hasta 15	hasta 15	N.A	N.A	hasta 15	hasta 15
0.50	0.020	de 2 a 20	de 2 a 20	N.A	N.A	de 2 a 15	de 2 a 15
1.0	0.040	de 10 a 75	de 10 a 75	N.A	N.A	de 15 a 55	de 15 a 70
1.5	0.060	de 60 a 150	de 60 a 150	de 10 a 20	de 10 a 20	de 45 a 90	de 60 a 125
1.6	----	de 60 a 150	de 60 a 150	de 10 a 20	de 10 a 20	de 45 a 90	de 60 a 125
2.0	----	de 75 a 180	de 100 a 200	de 15 a 25	de 15 a 25	de 65 a 125	de 85 a 160
2.4	0.093 (3/32)	de 120 a 220	de 150 a 250	de 15 a 30	de 15 a 30	de 80 a 140	de 120 a 210
2.5	----	de 130 a 230	de 170 a 250	de 17 a 30	de 17 a 30	de 80 a 140	de 120 a 210
3.0	----	de 150 a 300	de 210 a 310	de 20 a 35	de 20 a 35	de 140 a 180	de 140 a 230
3.2	0.125 (1/8)	de 160 a 310	de 225 a 330	de 20 a 35	de 35 a 50	de 150 a 190	de 150 a 250
4.0	0.156 (5/32)	de 275 a 450	de 350 a 480	de 35 a 50	de 50 a 70	de 180 a 260	de 240 a 350
4.8	0.187 (3/16)	de 380 a 600	de 480 a 650	de 50 a 70	de 50 a 70	de 240 a 350	de 330 a 450
5.0	----	de 400 a 625	de 500 a 675	de 50 a 70	de 50 a 70	de 240 a 350	de 330 a 460
6.3	----	de 550 a 875	de 650 a 950	de 65 a 100	de 35 a 100	de 300 a 450	de 430 a 575
6.4	0.250 (1/4)	de 575 a 900	de 750 a 1000	de 70 a 125	de 70 a 125	de 325 a 450	de 450 a 600
8.0	----	----	----	----	----	----	de 650 a 830
10.0	----	----	----	----	----	----	----

Nota: estos valores se basan en el uso de argón como gas de protección. Otros valores pueden ser empleados, dependiendo del gas de protección (valores más bajos serían aplicables usando helio como gas), el tipo de equipo y la aplicación. Si no se dan valores, implica que no se recomienda su uso.

2.2.3.1. Clasificación de electrodos³⁸

La norma AWS A5.12 clasifica a los electrodos de tungsteno de la siguiente forma:

E W X X X

Donde:

E.- Electrodo

W.- Wolframio (Tungsteno)

X X X .- Composición química: P.- Tungsteno puro

³⁷ American Filler Metals. (s/f). *Tungsten Alloys*. Recuperado el 01 de octubre de 2015 de http://www.amfiller.com/assets/tungsten_alloys.pdf

³⁸ AWS Welding Handbook. (2004). *Welding Processes Part 1. (2)*, 121.











Th-1.- 0.8 – 1.2 % de Torio
Th-2.- 1.7 – 2.2 % de Torio
Th-3.- 0.35 – 0.55 % de Torio
Zr.- 0.15 – 0.4 % de Zirconio

- EWP (Electrodos de Tungsteno Puro)
Estos electrodos contienen un mínimo de 99.5% de pureza, son electrodos de bajo costo y se usan para aleaciones de Magnesio y Aluminio, es preferible usarlo con corriente alterna ya que brinda estabilidad al arco.
- EWTh (Electrodos de Tungsteno con Torio)
La aleación del tungsteno con óxidos de torio mejora la emisión termoiónica del tungsteno. Los electrodos EWTh-1 y EWTh-2 contienen 1% y 2% de torio, respectivamente.
- EWZr (Electrodos de Tungsteno con Zirconio)
Este tipo de electrodos posee 0.25% de óxido de zirconio, tienen propiedades intermedias de los electrodos anteriores. El arco es muy estable cuando se usa con corriente alterna, tienen mejor resistencia a la contaminación que los electrodos de tungsteno puro.
- Electrodos para Hierro Fundido³⁹
Depósito de Níquel-Fierro especialmente diseñado para unión y reparación de piezas de fundición con alto porcentaje de fósforo, fundición nodular. El depósito tiene una alta resistencia, libre de grietas y porosidad. Al igual que en todas las soldaduras en hierro, se recomienda cordones cortos (30 – 50 mm) con el fin de no calentar excesivamente la pieza. Las aplicaciones típicas son: reparación de válvulas, tapas de bomba, tambores, etc. Se recomienda usar preferentemente corriente continua electrodo negativo.

³⁹ INDURA, (2010), *Catálogo de Electrodos para Recubrimiento y Recuperación de Piezas*, 2.

La tabla 2.4 indica la clasificación de los colores y sus propiedades.

Tabla 2.4 Rangos de corriente según el diámetro y tipo de electrodo⁴⁰

Classification Symbol (ISO 6848 Classification)	Chemical Composition Requirement				Colour Code, RGB Colour Value & Colour Sample ^a
	Principal Oxidie	Mass Percent	Impurities, Mass Percent	Tungsten, Mass Percent	
EWP (WP)	None	N.A. ^b	0.5 max.	99.5 min.	Green #008000 
EWCe-2 (WCe 20)	CeO ₂	1.8 to 2.2	0.5 max.	Balance	Grey (formerly orange) #808080 
EWLa-1 (WLa 10)	La ₂ O ₃	0.8 to 1.2	0.5 max.	Balance	Black #000000 
EWLa-1.5 (WLa 15)	La ₂ O ₃	1.3 to 1.7	0.5 max.	Balance	Gold #FFD700 
EWLa-2 (WLa 20)	La ₂ O ₃	1.8 to 2.2	0.5 max.	Balance	Blue #0000FF 
EWTh-1 (WTh 10)	ThO ₂	0.8 to 1.2	0.5 max.	Balance	Yellow #FFFF00 
EWTh-2 (WTh 20)	ThO ₂	1.7 to 2.2	0.5 max.	Balance	Red #FF0000 
(WTh 30)	ThO ₂	2.8 to 3.2	0.5 max.	Balance	Violet #EE82EE 
EWZr-1 (WZr 3)	ZrO ₂	0.15 to 0.50	0.5 max.	Balance	Brown #A52A2A 
EWZr-8 (WZr 8)	ZrO ₂	0.7 to 0.8	0.5 max.	Balance	White #FFFFFF 
EWG	<i>The manufacturer must identify all additions.</i>	<i>The manufacturer must state the nominal quantity of each addition.</i>	0.5 max.	Balance	<i>The manufacturer may select any color not already in use.</i>

Nota: está prohibido adicionar intencionalmente “óxidos de dopaje” para electrodos particulares.

^a valores de color RGB y muestra de color.

^b N.A. = No Aplica.

⁴⁰ American Filler Metals. (s/f). *Tungsten Alloys*. Recuperado el 01 de octubre de 2015 de http://www.amfiller.com/assets/tungsten_alloys.pdf

Los electrodos no tienen forma al inicio de su vida útil y pueden tener un diámetro de 1,6; 2,4 y 3,2 mm; por ese motivo antes de ser utilizados hay que darles una forma específica usando una máquina herramienta o fundiéndola. Existen tres tipos de formas que puede tener el electrodo dependiendo del uso que se le vaya a dar: en punta, media caña y bola.

El afilado del electrodo influye en la calidad de la soldadura, como se muestra en la siguiente figura:



Figura 2.4 Influencia del afilado del electrodo en la soldadura⁴¹

2.2.4. VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO

La velocidad de desplazamiento afecta a la penetración y al ancho del cordón de la soldadura, pero los efectos son más notorios en el ancho; también afecta a los costos del proceso. Dependiendo de la aplicación, la velocidad de desplazamiento es definida como un valor constante, haciendo que las demás variables se ajusten para obtener una soldadura de calidad y uniforme.

2.2.5. VELOCIDAD DEL ALAMBRE

Cuando la soldadura es manual, la manera en que el metal de aporte es añadido al proceso de soldadura influye en el número de pasadas que se requieren y en la apariencia final de la soldadura.

⁴¹ INGEMECÁNICA. (s/f). *Técnica y Fundamentos de la Soldadura TIG*. Recuperado el 01 de octubre de 2015 de <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn52.html>,

En el caso de que el proceso sea automático, la velocidad de alimentación del alambre permite determinar la cantidad de material de aporte que se deposita por unidad de longitud de la soldadura. Cuando se reduce la velocidad de alimentación, la penetración aumenta. Mantener una velocidad de alimentación lenta puede ocasionar socavación en el cordón de la soldadura y cordones incompletos en la junta; el efecto también puede ser inverso, es decir, al aumentar la velocidad de alimentación disminuye la penetración de la soldadura y se produce un arco más convexo.

2.2.6. ANTORCHAS DE SOLDADURA

Las antorchas que se usan en la soldadura por arco de tungsteno controlan al electrodo que es el encargado de conducir la corriente al arco y permiten el transporte del gas de protección a la zona del arco.

La mayoría de las antorchas que se usan para aplicaciones manuales tienen un ángulo de cabezal (ángulo comprendido entre el electrodo y la manija) de 120°. Las antorchas también pueden tener cabezales con ángulo regulable. Las antorchas para procesos manuales por lo general tienen llaves y válvulas en las manijas para poder controlar el flujo de gas.

Las antorchas para procesos automáticos vienen ensambladas en un dispositivo que ayuda a centrar la antorcha sobre la soldadura, mueve la antorcha sobre la junta y mantiene la distancia de trabajo. La figura 2.5 detalla las principales partes de una antorcha.

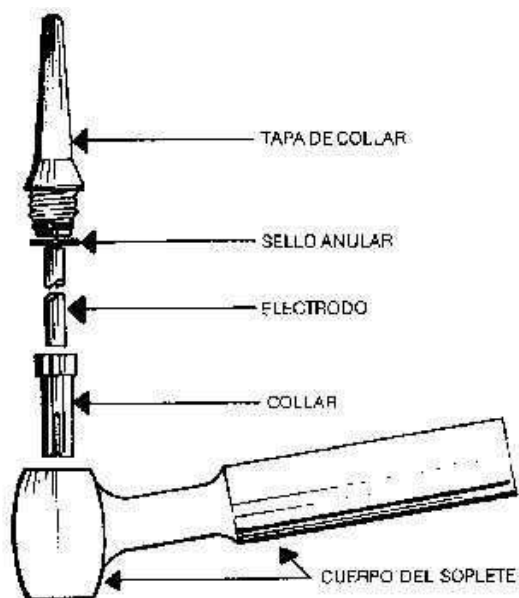


Figura 2.5 Partes de una antorcha para soldadura de proceso GTAW⁴²

- **Collar de apriete:** sirven para asegurar los electrodos de diferentes diámetros, en el soporte del electrodo, son elaborados generalmente de aleaciones de cobre. Cuando la tapa de la antorcha es ajustada en su lugar el electrodo es asegurado. Es necesario que exista un buen contacto entre el electrodo y el diámetro interior de la pinza para que se genere una buena circulación de corriente y se enfríe el electrodo.
- **Boquilla:** permite dirigir el gas de protección hacia la zona de soldadura y son ajustadas al cabezal de la antorcha. Internamente tienen incorporados los difusores o inyectores que permiten aportar el gas de protección hacia la boquilla. Las boquillas están hechos de materiales resistentes al calor con una gran variedad de formas, diámetros y longitudes.

⁴² Mora, C. (2008). *Proceso TIG*. Recuperado el 22 de octubre de 2015 de http://carlosmora-smaw.blogspot.com/2008_03_01_archive.html

2.2.6.1. Tipos de antorchas

- **Antorchas enfriadas a gas.-** son conocidas como enfriadas por aire, éste tipo de antorchas generan un enfriamiento debido al flujo de un gas de protección frío que pasa a través de la antorcha; tienen un límite de corriente de soldadura máximo de 200 amperios.

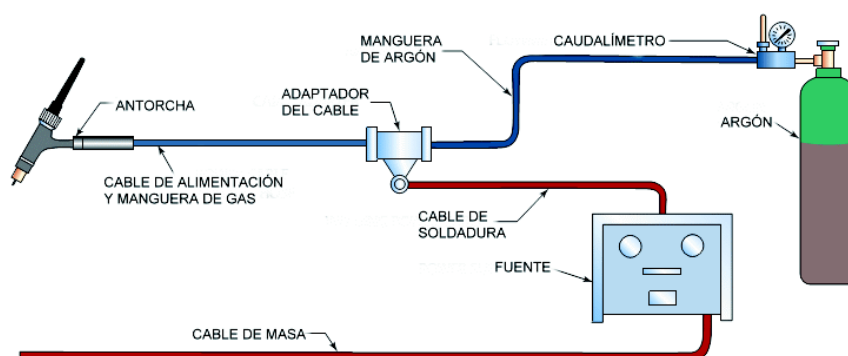


Figura 2.6 Esquema del circuito de soldadura GTAW con pistola refrigerada por aire⁴³

- **Antorchas enfriadas con agua.-** este tipo de antorchas mantiene la temperatura gracias a un flujo continuo de agua que recorren al interior de la manija.

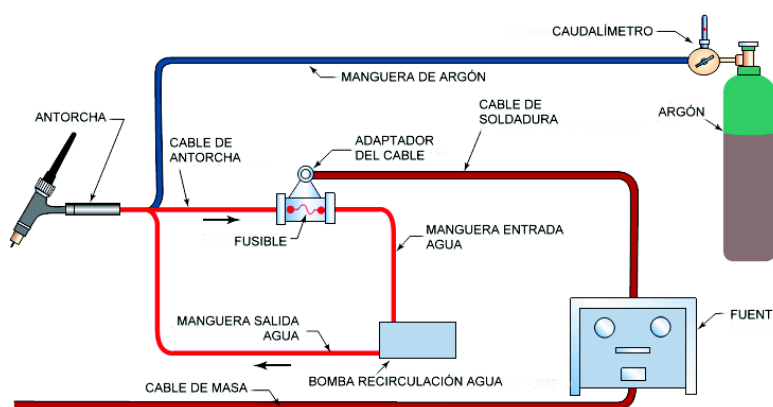


Figura 2.7 Esquema de un circuito de soldadura GTAW con pistola refrigerada por agua⁴³

⁴³ De Máquinas y Herramientas. (2014). *Sistemas de Enfriamiento*. Recuperado el 22 de octubre de 2015 de <http://www.demaquinasyherramientas.com/soldadura/seleccionar-la-antorcha-correcta-para-un-proceso-de-soldadura>

2.2.7. METAL DE APORTE – VARILLAS

El uso de material de aporte va a depender directamente del espesor de las piezas que se vayan a soldar, si es de espesores pequeños la antorcha derrite directamente el metal base y hace que se fusionen las partes. Es recomendable usar varillas que contengan la misma composición que el material a soldar, el espesor que se desea soldar influye directamente en el diámetro de las varillas. Las varillas para este proceso tienen una mayor cantidad de elementos desoxidantes.

2.2.7.1. Clasificación del metal de aporte

La norma AWS clasifica a las varillas según su aplicación, a continuación se presenta algunos grupos:

- A5.9.- varillas para soldadura de aceros inoxidable.
- A5.10.- varillas para soldadura de aluminio y sus aleaciones
- A5.14.- varillas para soldadura de níquel y sus aleaciones.
- A5.18.- varillas para soldadura de aceros al carbono de resistencia media.
- A5.28.- varillas para soldadura de aceros de baja aleación y aceros de alta resistencia.

La forma de identificación de las varillas es la siguiente:

E R - 70 S - 6

Donde:

E.- electrodo

R.- varilla

70.- resistencia a la tensión mínima (70 000 lb/pulg²)

S.- sólido

6.- composición química del depósito

Las siguientes tablas muestran las propiedades mecánicas y la composición química de las varillas.

Tabla 2.5 Propiedades mecánicas de las varillas⁴⁴

Clasificación AWS	Gas de protección	Resistencia a la tensión KSI (MPa)	Límite elástico KSI (MPa)	% Elongación mínimo en 2 Pulgs.	Resistencia al impacto mínimo en Joules a °C
ER70S-2	CO ₂	70(480)	58(400)	22	27 a - 29°C
ER70S-3	CO ₂	70(480)	58(400)	22	27 a - 18°C
ER70S-4	CO ₂	70(480)	58(400)	22	---
ER70S-5	CO ₂	70(480)	58(400)	22	---
ER70S-6	CO ₂	70(480)	58(400)	22	27 a - 29°C
ER70S-7	CO ₂	70(480)	58(400)	22	27 a - 29°C

Tabla 2.6 Composición química de las varillas⁴⁴

Clasificación AWS	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Otro
ER70S-2	0.07	0.90-1.40	0.40-0.70	0.025	0.035	---	---	---	0.50	Ti-Zr, Al
ER70S-3	0.06-0.15	0.90-1.40	0.45-0.75	0.025	0.035	---	---	---	0.50	---
ER70S-4	0.07-0.15	1.00-1.50	0.65-0.85	0.025	0.035	---	---	---	0.50	---
ER70S-5	0.07-0.19	0.90-1.40	0.30-0.60	0.025	0.035	---	---	---	0.50	Al
ER70S-6	0.06-0.15	1.40-1.85	0.80-1.15	0.025	0.035	---	---	---	0.50	---
ER70S-7	0.07-0.15	1.50-2.00	0.50-0.80	0.025	0.035	---	---	---	0.50	---

2.2.8. GENERALIDADES TÉCNICAS

2.2.8.1. Distancia del electrodo

En el proceso GTAW la distancia que separa el electrodo de la pieza es muy importante, ya que influye en el arco eléctrico; también es útil controlar la sección de electrodo que sobresale por la tobera, las distancias máximas que se recomienda es de 5 mm, como se puede observar en la figura 2.8.

⁴⁴ GLIMGLO. (2013). *Aportación para la Soldadura TIG GTAW – Varillas*. Recuperado el 23 de octubre de 2015 de <http://soldadura.org/soldadura-2/aportacion-para-la-soldadura-tig-varillas>

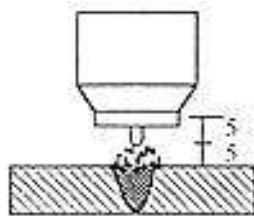


Figura 2.8 Distancia entre electrodo y pieza⁴⁵

2.2.8.2 Ángulo

Es necesario controlar la inclinación de la pinza porta-electrodos, la postura ideal es a cuando la pinza se encuentra a 90° de la pieza o totalmente perpendicular, aunque es admisible una inclinación entre 75° hasta 80° . Las siguientes figuras permiten diferenciar la posición correcta y la incorrecta.

BIEN

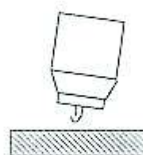


Figura 2.9 Ángulo de inclinación respecto a la vertical entre 0° y 15° ⁴⁵

MAL

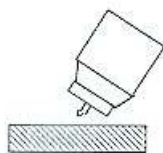


Figura 2.10 Ángulo de inclinación respecto a la vertical 30° ⁴⁵

2.2.8.3 Caudal de gas

Para que la soldadura resulte óptima el caudal de gas debe estar entre los 6 y 12 litros/min.

⁴⁵ INGEMECÁNICA. (s/f). *Técnica y Fundamentos de la Soldadura TIG*. Recuperado el 23 de octubre de 2015 de <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn52.html>,

2.2.9 POSICIONES DE SOLDADURA

El proceso GTAW permite soldar la mayoría de materiales en cualquier posición, se recomienda soldar en posición plana ya que se requiere menor habilidad por parte del soldador. Las posiciones que se detallan a continuación están contempladas en la norma ANSI/AWS A3.0:1994.

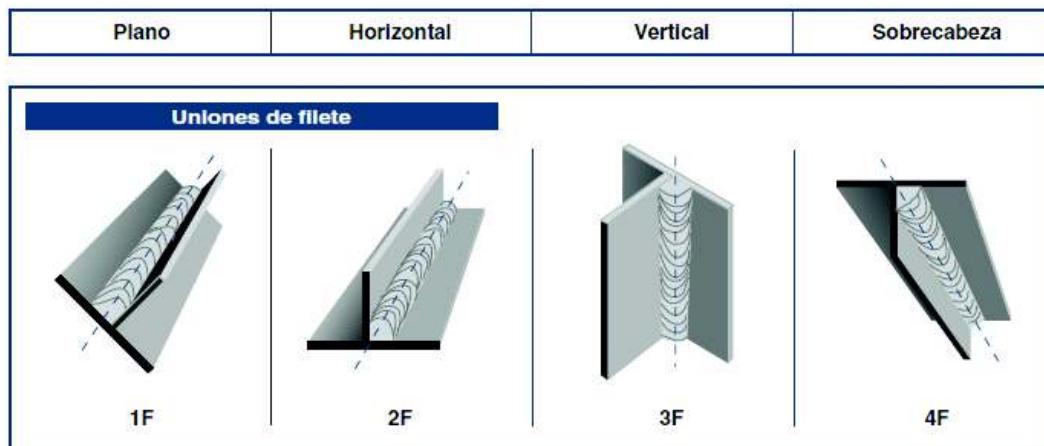


Figura 2.11 Posiciones de soldadura para uniones de filete⁴⁶

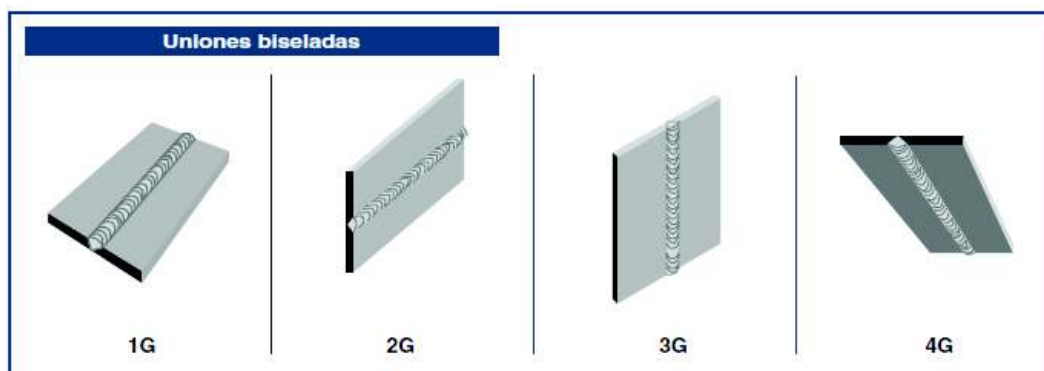


Figura 2.12 Posiciones de soldadura para uniones de bisel⁴⁶

⁴⁶ ANSI/AWS A3.0.(1994). Standard Welding Terms and Definitions. 68.

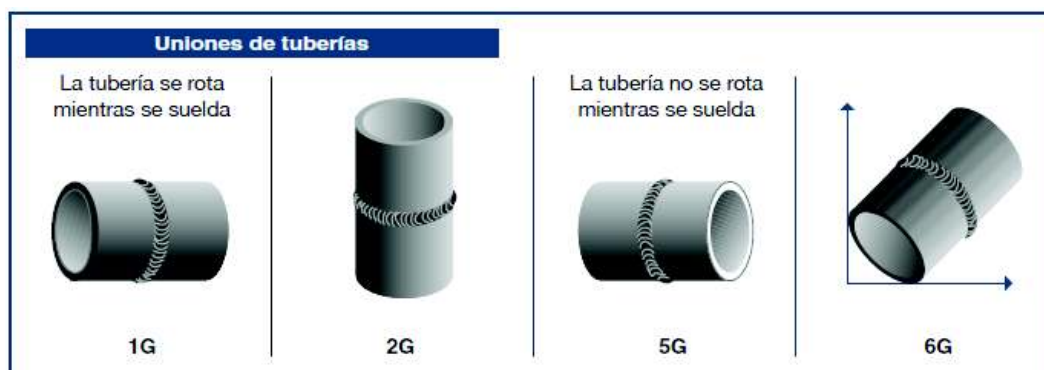


Figura 2.13 Posiciones de soldadura para uniones de tuberías⁴⁷

2.2.10 TIPOS DE BISEL

En el proceso de soldadura la preparación de los materiales base, limpieza y biselado con ángulos de inclinación adecuados, son procedimientos requeridos para la obtención de un producto de acuerdo a las normas que rigen la soldadura. Si el espesor del material supera los 3 mm se recomienda hacer un bisel en los bordes tipo en "V". La figura 2.14 detalla algunos de los biseles más comunes usados en el proceso de soldadura a tope.

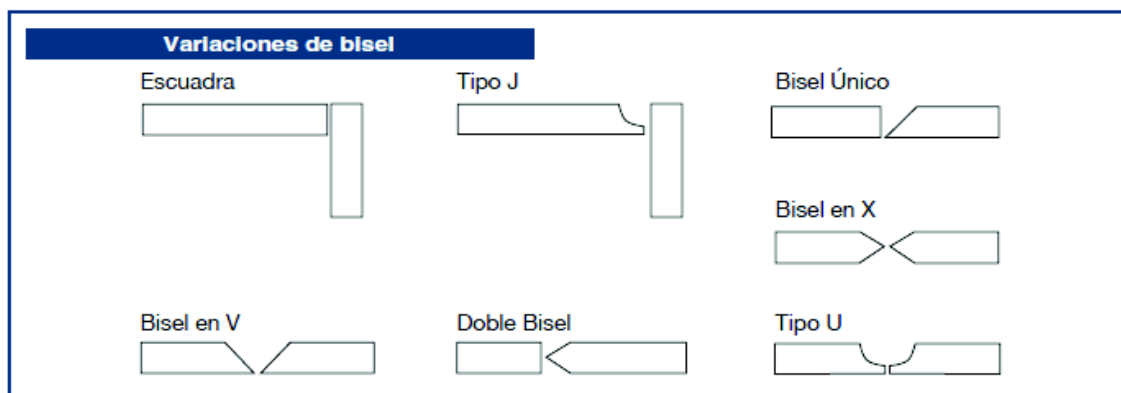


Figura 2.14 Tipos de bisel para juntas a tope⁴⁸

⁴⁷ ANSI/AWS A3.0.(1994). Standard Welding Terms and Definitions. 70.

⁴⁸ INDURA. (s/f). *Catálogo de Electrodo*, 15.

2.3 VENTAJAS DEL PROCESO

- El proceso permite unir la mayoría de los metales.
- El arco eléctrico que se produce es estable y concentrado.
- Se puede adaptar como un proceso automático para fabricaciones en serie, como tubería de pequeño espesor, fijación de tubos a intercambiadores de calor, etc.
- No produce escoria.
- La soldadura es lisa y regular.
- Dependiendo de la aplicación se puede utilizar con o sin metal de aporte.
- Se puede emplear en todo tipo de juntas y posiciones.
- La velocidad de soldadura es alta para espesores menores a 3 mm.
- La calidad de la soldadura es buena.
- Permite controlar la penetración en la pasada de raíz.
- La fuente de energía no es cara.
- No produce salpicaduras.
- La limpieza es mínima después de acabar la soldadura.

2.4 DESVENTAJAS DEL PROCESO

- La tasa de deposición es menor comparada con otros procesos de soldadura por arco.
- Se requiere de gran habilidad del soldador cuando el proceso es manual.
- El costo del proceso es elevado para espesores mayores a 10 mm.
- En presencia de corrientes de aire, la atmósfera protectora puede dejar de cumplir su función.
- El costo de los repuestos es relativamente alto.

CAPÍTULO 3

3 SOLDABILIDAD DEL HIERRO FUNDIDO NODULAR

3.1 SOLDABILIDAD⁴⁹

La soldabilidad es la capacidad de los materiales, provenientes de una misma o diferente naturaleza para ser unidos de manera permanente, mediante procesos de soldadura, sin presentar transformaciones estructurales perjudiciales, tensiones o deformaciones que puedan ocasionar fallas.

La soldabilidad constituye una propiedad de los materiales, es muy compleja y en muchas ocasiones queda condicionada a variaciones metalúrgicas y de las propiedades de los materiales que intervienen. Esto significa que un material puede tener buena soldabilidad, cuando se puede lograr una unión soldada con propiedades mecánicas y físico-químicas adecuadas, por cualquiera de los procesos de soldadura y sin necesidad de utilizar técnicas auxiliares.

La American Welding Society (AWS), define la soldabilidad, como “la capacidad de un material a ser soldado bajo las condiciones impuestas de fabricación en una específica estructura apropiada y a desempeñarse satisfactoriamente en el servicio previsto”⁵⁰. Entonces, algunos materiales base o aleaciones pueden exhibir buena soldabilidad bajo ciertas condiciones, pero mala soldabilidad bajo otras condiciones. La soldabilidad depende de los procesos, parámetros de operación (especialmente, la entrada neta de calor), procedimientos, grado de resistencia y ambiente, el factor más importante es la composición química del material base. La composición puede determinar una inherente soldabilidad, algunas aleaciones pueden ser básicamente soldables, algunas son sustancialmente difíciles de soldar y otras son insoldables entre sí, por lo cual se debe buscar un método alternativo de junta.

⁴⁹ Guzmán, R. (2014). *Soldabilidad de los Materiales*. Recuperado el 5 de enero de 2015 de <http://es.scribd.com/doc/215613920/4-Soldabilidad-de-Los-Materiales#scribd>

⁵⁰ Messler, R. (2004). *Principles of Welding*. Singapur: John Wiley & Sons. 578.

3.2. TIPOS DE SOLDABILIDAD

Existen tres tipos de soldabilidad, cada una posee un estudio, dependiente de las propiedades o cambios a ser analizados.

3.2.1. SOLDABILIDAD METALÚRGICA

Es la capacidad de los materiales de no presentar transformaciones estructurales en la unión soldada o variaciones en las propiedades físico-químicas. Abarca las transformaciones que ocurren debido a los diferentes cambios de estado de los materiales en el proceso de soldadura.

Los factores que afectan o influyen en la soldabilidad metalúrgica son:

1. Tipo del material base, espesor
2. Influencia de los elementos aleantes
3. Tipo de junta y procesos de soldadura
4. Velocidad de enfriamiento
5. Energía suministrada
6. Temperatura de precalentamiento
7. Secuencia de la soldadura

3.2.2. SOLDABILIDAD OPERATIVA

Responde a la operación de soldadura, en lo que respecta al estudio de las diferentes operaciones realizadas en cuestiones tecnológicas y de ejecución de las uniones soldadas, durante el proceso ejecutado en la soldadura.

3.2.3. SOLDABILIDAD CONSTRUCTIVA O GLOBAL⁵¹

Este tipo de soldabilidad analiza las propiedades que presentan el conjunto soldado y su tendencia a agrietarse. Analiza sus restricciones antes, durante y después de realizado el conjunto soldado. Intervienen las propiedades físicas del material base,

⁵¹ Guzmán, R. (2014). *Soldabilidad de los Materiales*. Recuperado el 19 de diciembre de 2015 de <http://es.scribd.com/doc/215613920/4-Soldabilidad-de-Los-Materiales#scribd>

como son: dilatación y contracción que provocan deformaciones y tensiones, las cuales pueden generar agrietamientos de la unión soldada, como ocurre en el caso del hierro fundido que por su poca plasticidad no tiene la capacidad de absorber deformaciones, por lo que necesariamente se debe recurrir a recursos tecnológicos de pre y post-calentamiento para evitar esta soldabilidad condicionada.

3.3. DIFICULTADES EN LA SOLDABILIDAD DE FUNDICIONES

Debido a la alta concentración de carbono y las diferentes formas que se presenta en la estructura y que está definida por la composición, las fundiciones son los metales más difíciles para soldar, por lo que hay consideraciones a tomar para mejorar la soldabilidad.

3.3.1. EL METAL DE SOLDADURA

Consiste en el metal base, el cual es derretido durante la soldadura añadiendo o no cualquier metal de aporte. Cuando el hierro fundido colado se enfría rápidamente como es el caso de la soldadura autógena, el carbono no se esparce en grafito, formando carburo de hierro duro pero frágil (quebradizo), el cual es difícil de maquinar y es susceptible a fracturarse.

3.3.2. ZONA DE FUSIÓN

Hay tres regiones distintas en la zona de fusión, la primera es el metal de soldadura, que constituye la mezcla del metal base y algún metal de aporte cuando se derriten, la segunda región es el metal base que se funde pero no se mezcla con el metal de aporte, la tercera región constituye el metal base, parcialmente derretido.

La formación de carburos puede ser un problema en las regiones en donde no hay una mezcla del metal base con el material de aporte.

3.3.3. ESFUERZOS DE SOLDADURA

Durante el proceso de soldadura, se produce expansión o contracción, lo que puede provocar distorsiones y esfuerzos residuales o internos asociados a la soldadura en cualquier material.

Los esfuerzos residuales o internos, se definen como el estado de esfuerzos presentes en el volumen de un material en ausencia de cargas externas, incluida la gravedad o un gradiente térmico que constituye una fuente de esfuerzos.

En el caso específico de procesos de soldadura, los esfuerzos residuales son consecuencia de la interacción de los siguientes procesos:

- a) Expansión impedida y contracción resultante de una distribución de temperatura no homogénea.
- b) Efectos de enfriamiento rápido (temple).
- c) Transformaciones de fase.

Consecuentemente, el tipo y cantidad de esfuerzos residuales en la pila de soldadura y zona afectada térmicamente dependen de la temperatura de transformación determinada por el diagrama tiempo-temperatura-transformación (TTT) del material y la velocidad de enfriamiento. Obviamente, la composición química local tiene un papel importante.⁵²

Pueden causar fisuras en fundiciones de hierro con baja ductilidad y en áreas de ductilidad reducida como la zona de fusión. Los esfuerzos residuales de soldadura pueden reducirse aplicando control apropiado de precalentamiento en el proceso de soldadura, granallado y algún tratamiento térmico posterior al proceso.⁵³

⁵² Mejía, I., Maldonado, C., Bedolla, A., García, J. (2006). *Esfuerzos residuales generados en la Soldadura*. México.

⁵³ ASM International. (2002). Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel.

3.3.4. POROSIDAD⁵⁴

Los gases emitidos durante el proceso de soldadura, pueden ocasionar porosidades en el depósito de soldadura, los gases son producto de materiales volátiles en el metal base o producto de reacciones químicas entre el material de aporte y la atmósfera.

En el caso de las fundiciones de hierro, las porosidades se deben a que el grafito absorbe y retiene lubricantes, además de otros líquidos que se impregnan en la sección completa. Al darse el proceso de soldadura, los líquidos se desprenden en forma gaseosa y son atrapados en el metal de soldadura como porosidades.

Ya que los problemas de porosidad son atribuidos a contaminantes en el material base, es necesario efectuar una preparación del metal base antes del proceso de soldadura.

3.4. SOLDABILIDAD DEL HIERRO FUNDIDO NODULAR

Con respecto a la clasificación del hierro, la fundición blanca presenta serios problemas de soldabilidad, en cambio la fundición gris es soldable, siempre que se empleen los métodos apropiados de unión. Esto se debe a que el ciclo de calentamiento y enfriamiento que conlleva todo proceso de soldadura, origina fenómenos de expansión y contracción, lo que provoca la creación de tensiones de tracción en la pieza fundida durante la fase de contracción.

Como es conocido, las fundiciones se comportan peor a esfuerzos de tracción que a esfuerzos de compresión, por lo que se justifica la necesidad de aplicar medidas especiales para garantizar una buena soldabilidad.

Por otro lado, las fundiciones nodulares son cada vez más empleadas en la actualidad, un método práctico para soldar piezas de fundición maleable es la soldadura fuerte (brazing) empleando varillas de aleaciones de cobre. En todo caso, para obtener mejores resultados en la soldadura de piezas de fundición nodular y maleable, se recomienda que éstas deban ser soldadas en estado recocido.⁵⁵

⁵⁴ ANSI/AWS D11.2-89 R(2006), Guide for Welding Iron Castings, 6.

⁵⁵ INGEMECÁNICA. (s/f). *Estudio y Clasificación de las Fundiciones*. Recuperado el 19 de diciembre de 2015 de <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn108.html>

3.4.1. PROPIEDADES DEL NÍQUEL Y SU AFINIDAD CON EL HIERRO⁵⁶

En la soldadura de fundiciones de hierro, es una práctica usada la de unir las partes, mediante el uso de electrodos con bajos, medios y altos contenidos de níquel, o directamente con Ni puro. Esta práctica se viene aplicando en fundiciones grises, nodulares y esferoidales.

La aleación Fe – Ni constituida por 50% de níquel e igual porcentaje en peso de hierro, se encuentra en estado líquido por encima de los 1446 °C, formando una solución homogénea de ambos metales. Por debajo de la línea de liquidus, la solución líquida solidifica en una solución sólida gamma, de estructura cristalina cúbica centrada en las caras, FCC desordenada, donde los átomos de níquel ocupan indistintamente los lugares que en algún momento podrían ser ocupados por los átomos de hierro.

Las aleaciones Fe-Ni podrían constituir un sistema de solubilidad total en cualquier proporción que se encuentren los componentes, si no fuera por la transformación alotrópica del hierro a elevada temperatura, que pasa de estructura FCC a BCC, entre los 1395 y los 1538 °C, mientras que a temperaturas de 912 °C, pasa de FCC a BCC, en el eje correspondiente al hierro puro.

Los componentes de este sistema de aleaciones de tipo sustitucionales, responden muy bien a las reglas de solubilidad total.

Además, teniendo ambos elementos un radio atómico muy similar, ya que el hierro presenta 0,124 nm. y el níquel 0,125nm, esto da una diferencia levemente superior al 4%; si en lugar de los radios atómicos se comparan los radios iónicos de los elementos se tiene para el Fe+2 0,077nm y para el Ni+2 0,069nm, invirtiéndose la relación, ya que el Fe+2 es mayor en un 11%.

⁵⁶ Agüera, F., Ansalid, A., Reynoso, A., Fierro, V. (2008). *Análisis de Soldadura de Fundiciones "ADI", con electrodos de Fe-Ni*. Argentina.

Por otra parte, el níquel posee red cristalina FCC y el hierro también entre los 912°C y 1395 °C, siendo la electronegatividad del Ni 1,8 algo superior al Fe, que es de 1,7 en una escala donde el más electropositivo es cero, "0" y el más electronegativo es 4,1.

Por su parte, ambos metales poseen estados de oxidación 2 y 3. Además las densidades de ambos metales son similares, presentando el Ni 8,902 mg/m³ y el Fe algo menos 7,874 mg/m³. Esta última semejanza hace que las escalas de composición en porcentajes referidos a número de átomos del diagrama binario de equilibrio termodinámico de fases sean muy similares a la escala en peso del mismo. También hay similitud en los puntos de fusión de los metales siendo el del hierro de 1538 °C y el del níquel de 1455 °C, dando una diferencia entre ambos de 83 °C.

Otra similitud notable constituye la poca diferencia entre los calores específicos, que es en el Fe de 448 Joule/Kg ° K y siendo el del níquel 440 Joule/Kg ° K.

También sus calores específicos de fusión son parecidos, siendo el del hierro de 14,90 KJ/mol y el del níquel 17,57 KJ/mol.

3.5. ENSAYOS DE SOLDABILIDAD

Los ensayos de soldabilidad permiten evaluar diferentes características del cordón de soldadura o del material base con el propósito de conocer el alcance del procedimiento. Estos ensayos en su mayoría son realizados por investigaciones específicas, los cuales no están normados o reglamentados por entidades oficiales.

Estos ensayos permiten conocer diferentes aspectos tanto del material de aporte como del material base, su importancia radica en la posibilidad de realizar comparaciones válidas para determinar procesos o procedimientos de soldadura. Estos tipos de ensayo proveen información cualitativa acerca de la clasificación de los materiales, condiciones térmicas, procedimientos empleados; ningún ensayo de soldabilidad permite conocer datos cuantitativos como resistencia al cizallamiento.

3.5.1 ENSAYOS DIRECTOS DE SOLDABILIDAD⁵⁷

También se los conoce como ensayos reales, puesto que trata de reproducir las condiciones y procesos más comunes a los que debería estar sometida la soldadura.

3.5.1.1 Ensayo de desgarre

Es un tipo de ensayo destructivo, se usa para juntas a traslape, se puede realizar este ensayo como prueba de soldabilidad para verificar la adhesión y separación de una soldadura. Se lo realiza separando las placas soldadas mediante esfuerzos de tensión en los extremos de la soldadura, lo cual produce un efecto de desgarre en el material, que permite evidenciar la penetración que ha tenido el material.

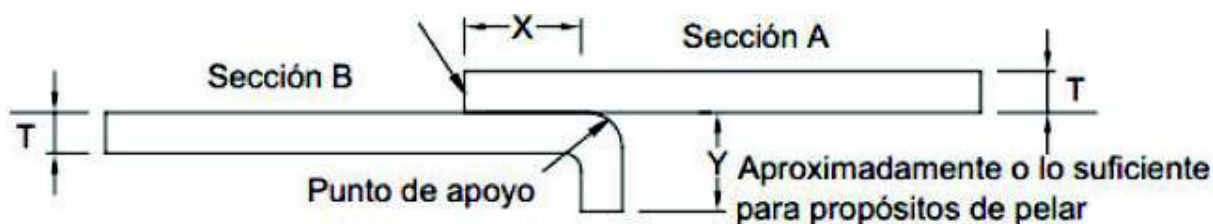


Figura 3.1 Ensayo de desgarre⁵⁷

3.5.1.2. Ensayo Houldcroft⁵⁷

En este ensayo la soldadura es iniciada en el borde de la lámina que tiene un precorte, a través de ranuras, estas ranuras están acomodadas en dirección perpendicular al cordón de soldadura y están separadas en espacios iguales; las ranuras aumentan de tamaño progresivamente hasta el final de la placa. Se deposita un cordón de soldadura de penetración completa a lo largo de la muestra, la longitud de las principales fisuras en varias muestras es usada como medida de la sensibilidad al agrietamiento.

⁵⁷ Messler, R. (2008). *Principles of Welding: processes, physics, chemistry and metallurgy*. EEUU:Wiley-VCH.

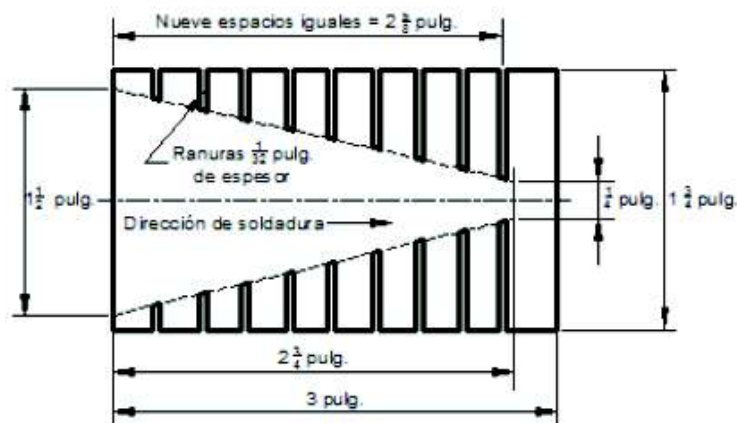


Figura 3.2 Ensayo Houldcroft⁵⁸

3.5.1.3. Ensayo Varestreint⁵⁸

Es la prueba más común que se usa para evaluar la sensibilidad de grietas en caliente. En este ensayo, un extremo de una placa rectangular (50x200x6 mm), es colocado en una posición firme y el otro extremo queda libre en cantiléver. Un cordón de soldadura se coloca en la parte superior de la placa a lo largo de su línea central hasta un punto de tangencia entre la parte en voladizo y un dado que tiene un radio de curvatura determinado que está localizado debajo de la placa (punto "A" en la figura 3.3); la sección en cantiléver es curvada aplicando fuerza neumática o hidráulica tomando la forma del dado, el arco de soldadura continua hasta el punto "C" de la figura, donde se lo apaga.

La evaluación de este ensayo está basado en la mínima deformación aplicada capaz de fisurar el cordón, la fisura de mayor longitud como un índice de susceptibilidad a fisura y la longitud total de la fisura, que se obtiene de la suma de las fisuras observadas en la zona de fusión y en la zona afectada por el calor.

⁵⁸ Messler, R. (2008). *Principles of Welding: processes, physics, chemistry and metallurgy*. EEUU:Wiley-VCH. 582.

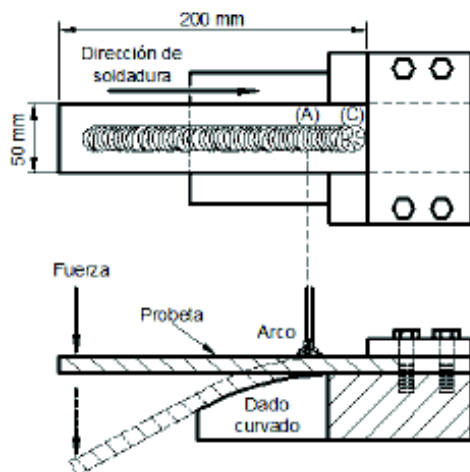


Figura 3.3 Ensayo Varestraint⁵⁹

3.5.1.4. Ensayo Tekken⁶⁰

El ensayo Tekken fue desarrollada en Japón y está estandarizado por la norma japonesa JIS Z 3158, la articulación Y tiene más restricciones que la articulación U o doble U, en este ensayo los parámetros de precalentamiento y soldadura son variados para alterar la tensión; este ensayo es útil para evaluar las grietas y fisuras en la zona afectada por el calor.

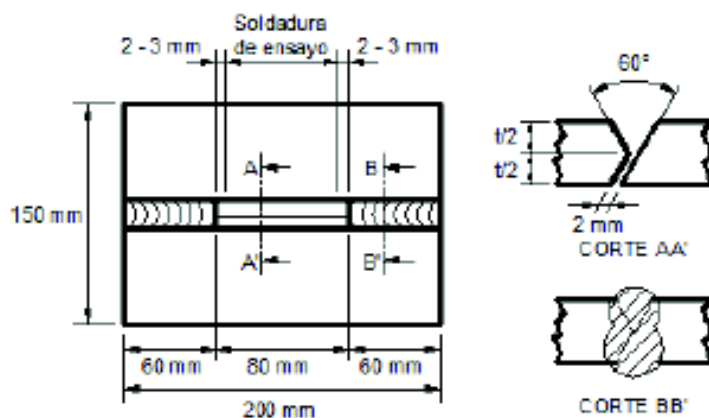


Figura 3.4 Ensayo Tekken⁶⁰

⁵⁹ ASM HANDBOOK.(1993). *Welding, brazing and soldering: American Society of Materials*. Vol. 6. 1498

⁶⁰ Messler, R. (2008). *Principles of Welding: processes, physics, chemistry and metallurgy*. EEUU:Wiley-VCH. 586.

3.5.1.5. Ensayo Vinkier⁶¹

Este ensayo está compuesto por dos placas de 50 mm de espesor soldadas juntas que componen una sola muestra, los extremos son soldados a un bloque de acero inoxidable. La muestra se somete a una carga de tracción inducida por el coeficiente de expansión térmica del bloque de acero con respecto a la muestra. La deformación total puede ser medida en función de las dimensiones de los elementos, módulos de elasticidad y coeficientes de expansión térmica.

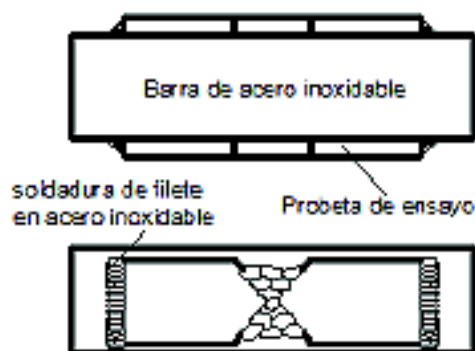


Figura 3.5 Ensayo Tekken⁶¹

3.6 PROGRAMA DE ENSAYO DE SOLDABILIDAD SEGÚN AWS⁶²

Según la ANSI/AWS D11.2-89 R(2006), "Guide for Welding Iron Castings", se consideró ensayos estandarizados para la soldabilidad como son: Varestraint, Cruciform, Lehigh y Houldcroft, pero se limitan en ciertos casos, al aplicarse en diferentes tipos de fundiciones de hierro, debido a que la ductilidad del material base es relativamente bajo en comparación con un material de aporte. Por lo que, se decidió desarrollar un ensayo práctico y simple, con el cual no se requiere metal de aporte.

⁶¹ Messler, R. (2008). *Principles of Welding: processes, physics, chemistry and metallurgy*. EEUU: Wiley-VCH. 588.

⁶² ANSI/AWS D11.2-89 R(2006), Guide for Welding Iron Castings. 16.

3.7. DESARROLLO DEL ENSAYO DE SOLDABILIDAD SEGÚN AWS

El Comité de Soldadura de Fundiciones de Hierro, detalla el programa de ensayo para evaluar la soldabilidad de varios tipos y grados de fundiciones de hierro.

Básicamente consiste en precalentar el material base a diferentes temperaturas con el fin de determinar la mínima temperatura a la cual no se presentan fisuras en el material de prueba, denominada como “temperatura de no-agrietamiento”.

3.8. PROGRAMA DE ENSAYO USADO POR EL COMITÉ DE SOLDADURA DE FUNDICIONES DE HIERRO⁶³

La prueba para cada tipo o grado de fundición requiere un mínimo de 8 y un máximo de 13 probetas. Para el caso de fundición nodular, las especificaciones de la probeta se describen en el capítulo siguiente.

Las probetas deben separarse en tres series de prueba, debidamente preparadas y con un lapso de 24 horas entre cada prueba. Los parámetros de soldadura están definidos por la Norma D11.2-89 R (2006).

3.8.1. PRIMERA SERIE

Para la primera serie de prueba, se requieren de 5 probetas preparadas a distintas temperaturas de precalentamiento, a las cuales se aplica un cordón de soldadura. Las temperaturas para las probetas de esta serie son las siguientes:

T₁: T_{ambiente}

T₂: 121 °C

T₃: 260 °C

T₄: 400 °C

T₅: 540 °C

⁶³ ANSI/AWS D11.2-89 R (2006), Guide for Welding Iron Castings. 66.

Después de 24 horas, se examina cada probeta mediante la aplicación de tintas penetrantes de acuerdo a la sección A4 de la norma D11.2-89 R(2006), y se determina la más alta temperatura a la cual el agrietamiento continúa ocurriendo. A esa temperatura se la denomina T_x .

3.8.2. SEGUNDA SERIE

Para esta serie de prueba, se requieren de 4 probetas nuevas preparadas a distintas temperaturas de precalentamiento, o bien 3 probetas nuevas y la probeta con temperatura T_x de la serie anterior, para ser soldada en otra cara de la misma. A las 4 probetas se aplica un cordón de soldadura. Las temperaturas para las probetas de esta serie son las siguientes:

$$T_1: T_x + 28^\circ\text{C}$$

$$T_2: T_x + 56^\circ\text{C}$$

$$T_3: T_x + 83^\circ\text{C}$$

$$T_4: T_x + 111^\circ\text{C}$$

Después de 24 horas, se examina cada probeta mediante la aplicación de tintas penetrantes y se determina la más alta temperatura a la cual el agrietamiento continúa ocurriendo. A esa temperatura se la denomina T_y .

3.8.3. TERCERA SERIE

Para esta serie de prueba, se requieren de 4 probetas nuevas preparadas a distintas temperaturas de precalentamiento, o bien 3 probetas nuevas y la probeta con temperatura T_y de la serie anterior, para ser soldada en otra cara de la misma. Nuevamente, a las 4 probetas se aplica un cordón de soldadura. Las temperaturas para las probetas de la tercera serie son las siguientes:

$$T_1: T_y + 6^\circ\text{C}$$

$$T_2: T_y + 11^\circ\text{C}$$

$$T_3: T_y + 17^\circ\text{C}$$

$$T_4: T_y + 22^\circ\text{C}$$

Después de 24 horas dado el proceso de soldadura, se examina cada probeta mediante la aplicación de tintas penetrantes y se determina la más baja temperatura a cual el agrietamiento ya no ocurre o bien llamada la Temperatura de no-agrietamiento.

Se debe tomar en cuenta que si se utiliza las probetas para ser soldadas en la segunda cara, el segundo precalentamiento no debe superar la temperatura de precalentamiento de la primera cara soldada de acuerdo con la serie realizada.

3.9. EQUIPAMIENTO REQUERIDO PARA DE ENSAYO MEDIANTE PROCESO GTAW⁶⁴

De acuerdo a la Norma D11.2-89 R (2006), el equipamiento para desarrollar el ensayo de soldabilidad mediante proceso GTAW en fundición nodular es el siguiente:

- Fuente de poder: 300 Amperios
- Tipo de corriente: DC
- Torcha: GTAW con electrodo de aporte de 4.0 mm de diámetro
- Control: Alimentación con control automático para mantener los parámetros de soldadura
- Dirección de soldadura: horizontal
- Fuente de calor: Capaz de calentar las probetas hasta 650 °C
- Medición de temperatura: transmisión continua durante el precalentamiento y la soldadura.

⁶⁴ ANSI/AWS D11.2-89 R(2006), Guide for Welding Iron Castings. 66.

3.10. CONDICIONES DE SOLDADURA REQUERIDAS PARA EL ENSAYO MEDIANTE PROCESO GTAW⁶⁵

Los parámetros o condiciones específicas para desarrollar el ensayo son las siguientes:

- Proceso: GTAW
- Voltaje: 15 + - 0,5 V
- Amperaje: 250 + - 10,0 A
- Polaridad: DCEN (Corriente directa, electrodo negativo)
- Velocidad de soldadura: 5,5 + - 0,2 mm/s
- Electrodo de Tungsteno: 4 mm (diámetro)
- Técnica de inicio: Alta frecuencia
- Aporte de calor: 0,63 + - 0,08 kJ / mm
- Gas de protección: 100% Argón
- Tasa de aporte: 40 cfh (19 L / min)
- Longitud del cordón: 114 + - 6 mm
- Temperatura de precalentamiento: Temperatura ambiente hasta 650 + - 5°C
- Metal de aporte: Ninguno
- Termocupla: Tipo K
- Espécimen: Las dimensiones de la probeta se especifican en el siguiente capítulo, bajo la Norma D11.2-89 R(2006).

3.11 RESULTADOS DEL ENSAYO DE SOLDABILIDAD SEGÚN AWS⁶⁵

Una vez efectuado el procedimiento de soldadura en el material de prueba y hallada la temperatura de no-agrietamiento, se establecieron los resultados que permiten relacionar ciertas variables y ser usadas para determinar la temperatura de no-agrietamiento independientemente de la realización del ensayo.

⁶⁵ ANSI/AWS D11.2-89 R(2006), Guide for Welding Iron Castings. 18.

Las variables evaluadas fueron el metal base y la resistencia dependiendo del grado de fundición de hierro, la soldadura y dureza del mismo, así como la composición química, relacionando los resultados con la Norma ANSI/AWS B2.1-84.

Los resultados la para fundición nodular de grado 65-45-12, muestran una temperatura de no-agrietamiento (450°F o 230°C); resistencia a la tracción (64000 psi ó 304 MPa), Límite de fluencia (48500 psi ó 230 MPa).

3.12 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA SOLDABILIDAD

La soldabilidad es un conjunto de factores entre los cuales se encuentran: material base, metal de aporte, dimensiones de la pieza, tratamiento térmico, capacidad del operario, etc. Los factores que intervienen en la soldabilidad pueden ser operativos y metalúrgicos; los operativos son determinados por la variables del proceso y los factores metalúrgicos dependen de las propiedades de los materiales base y de aporte.

3.12.1 FACTORES OPERATIVOS

3.12.1.1 Diseño de la junta⁶⁶

El diseño de la junta debe cumplir los requisitos del conjunto soldado acabado, también debe mantener una distancia adecuada durante el calentamiento y la solidificación del metal de aportación.

La selección del diseño puede depender de factores como: el método de calentamiento, técnicas de fabricación utilizadas antes de la soldadura, cantidad de elementos a soldar y el método para aplicar la soldadura.

⁶⁶ ASM HANDBOOK.(1993). *Welding, brazing and soldering: American Society of Materials.* (6).

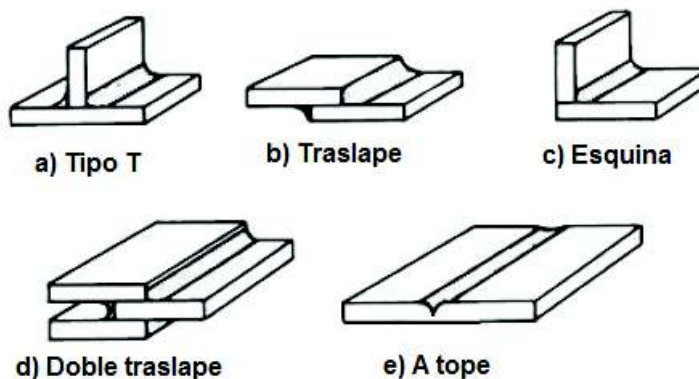


Figura 3.6 Tipos de juntas⁶⁷

3.12.1.2 Rango de aporte de calor⁶⁸

El calor que se aporta debe ser adecuado al espesor del material base y a la temperatura de fusión del mismo, se puede cuantificar con la siguiente ecuación:

$$Q \approx 60 \times \frac{V \times I}{S \times 1000} \times R \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde:

Q = entrada de calor $\left[\frac{kJ}{mm} \right]$

V = voltaje [V]

I = corriente [A]

S= velocidad de avance [mm/min]

R= rendimiento, (éste depende del proceso de soldadura usado, para soldadura de arco de tungsteno y gas R=0.8)

⁶⁷ ASM HANDBOOK.(1993). *Welding, brazing and soldering: American Society of Materials.* (6).

⁶⁸ Weman, K. (2003). Arc welding - an overview: Terminology. *Welding processes handbook* (p. 5). England: Woodhead Publishing Ltd.

3.12.1.3 Presencia de contaminantes⁶⁹

La presencia de ciertos contaminantes en las superficies a soldar produce reacciones no deseadas que se asocian con la formación de escorias o gases que contaminan el cordón de soldadura, lo que genera una pérdida de propiedades. A continuación se detalla algunos gases y sus efectos:

- Nitrógeno.- los nitruros de hierros disminuyen el alargamiento y la resistencia al impacto haciendo que el material sea frágil y aumentan la resistencia a la fluencia y la dureza.
- Oxígeno.- disminuye todas las características mecánicas excepto el alargamiento.
- Hidrógeno.- evoluciona por difusión en fase sólida.

3.12.1.4 Capacidad del operador

La soldabilidad en el proceso de soldadura depende en un cincuenta por ciento de la capacidad del operario, de su experiencia y del correcto manejo de los equipos y herramientas para obtener una soldadura sin defectos.

3.12.2 FACTORES METALÚRGICOS

3.12.2.1 Transformaciones metalúrgicas⁷⁰

Las transformaciones metalúrgicas generan variaciones en las propiedades de la soldadura o fisuras en los límites. La figura 3.7 muestra las estructuras presentes en las zonas de la soldadura de hierro nodular fundido, el cual tiene un contenido de carbono entre 3% y 4% en peso.

⁶⁹ Campos, D. (2012). *Aspectos Metalúrgicos de la Soldadura*. Recuperado el 22 de diciembre de 2015 de <https://es.scribd.com/doc/98774723/Aspectos-Metalurgicos-de-la-Soldadura>

⁷⁰ Enríquez, J. (2012). *Fabricación de Fundición Nodular*. Recuperado el 25 de diciembre de 2015 de: http://oa.upm.es/14450/1/Fundici%C3%B3n_nodular.pdf

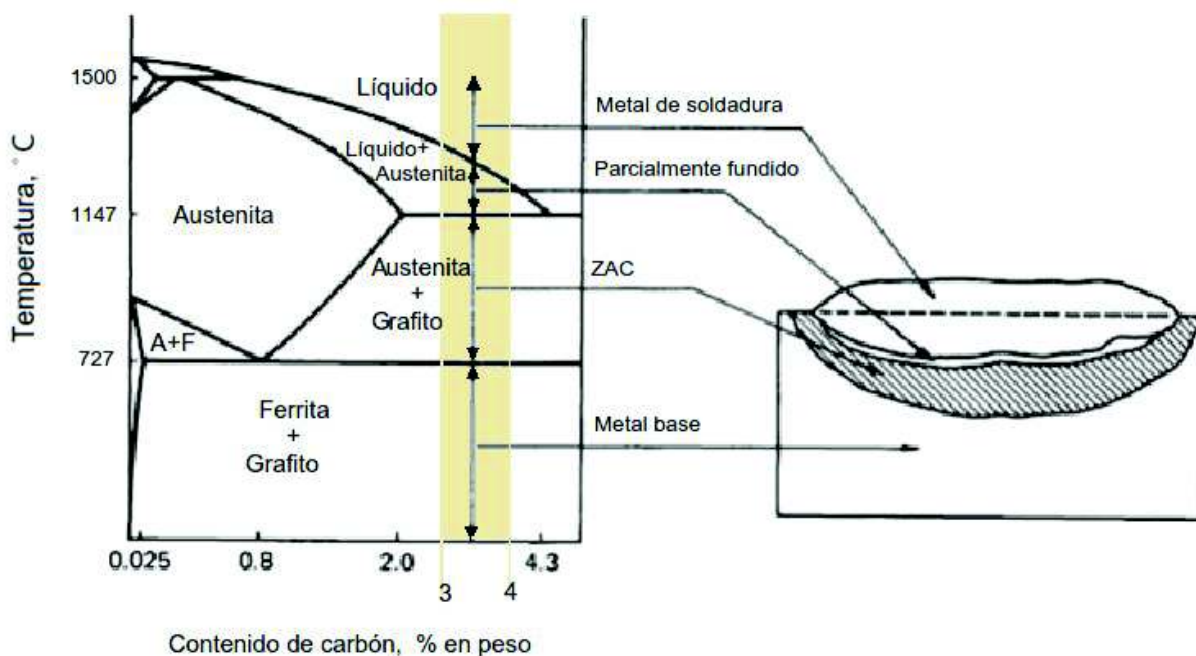


Figura 3.7 Estructuras en las zonas de la soldadura de hierro fundido nodular⁷¹

En las fundiciones la medida de la soldabilidad se define como la tendencia a formar martensita en la zona afectada por el calor (ZAC), para entender mejor este concepto se ha desarrollado la fórmula de Carbono Equivalente (C_E)⁷²:

$$C_E = C_T + \frac{Si+P}{3} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Donde:

C_E = Carbono Equivalente

C_T = % Carbono Total

Si = % Si

P = % P

⁷¹ ASM HANDBOOK. (1993). *Welding, brazing and soldering: American Society of Materials*. (6), 1749.

⁷² Enríquez, J. (2012). *Fabricación de Fundición Nodular*. Recuperado el 25 de diciembre de 2015 de: http://oa.upm.es/14450/1/Fundici%C3%B3n_nodular.pdf

Las propiedades que presentan los materiales dependen de la cantidad de elementos aleantes que poseen e influyen directamente con el grado de soldabilidad, como una regla general al aumentar el contenido de carbono en el material disminuye la soldabilidad; debido a que la excesiva presencia de carbono aumenta la templabilidad.

Se puede concluir que un metal posee buena soldabilidad cuando cumple con los tres tipos de soldabilidad anteriores (metalúrgica, operatoria, constructiva); se dice que tiene soldabilidad regular cuando no cumple con alguno de los tipos de soldabilidad, pero por medio de procesos tecnológicos se puede obtener una unión soldada de buena calidad; por último se establece que una mala soldabilidad es causada cuando no se cumple con dos o más aspectos de la soldabilidad y no existen procesos que puedan mejorar las propiedades mecánicas y químicas en la soldadura.⁷³

3.12.3 DEFECTOS DE SOLDADURA EN FUNDICIONES

3.12.3.1 Contracciones de solidificación

Son defectos que producen deformaciones en la pieza o piezas soldadas. A continuación se detalla las formas de distorsión más comunes.

- **Combadura.**- efecto que se produce en las piezas soldadas y que genera una distorsión longitudinal del cordón de soldadura. Puede ser ocasionado por un diseño inadecuado, contracción del metal de aporte, sujeción defectuosa de las piezas, etc.

⁷³ Serna, A. (2015). *Soldadura-metalurgia de la soldadura-procesos de soldadura-soldabilidad*. Recuperado el 14 de febrero de 2016 de <http://blog.utp.edu.co/metalografia/capitulo-18-Soldadura-metalurgia-de-la-soldadura-procesos-de-soldadura-soldabilidad>



Figura 3.8 Defecto de combadura en piezas soldadas⁷⁴

- Distorsión.- es un defecto producido debido al calentamiento desigual de las piezas o la contracción del metal de aporte.

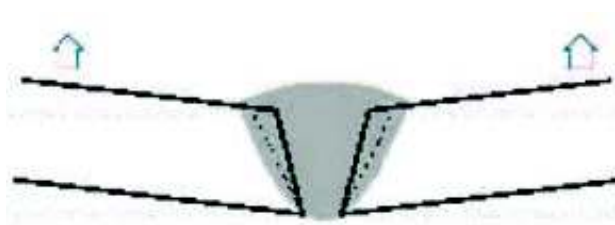


Figura 3.9 Defecto de distorsión en piezas soldadas⁷⁴

- Esfuerzos residuales.- es causado por el enfriamiento del cordón de soldadura.

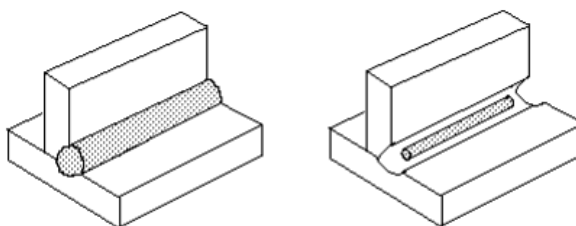


Figura 3.10 Defecto de esfuerzos residuales en piezas soldadas⁷⁵

⁷⁴ DISENSA. (s/f). *Temas Generales de Soldadura*. Recuperado el 25 de diciembre de 2015 de http://disensa.com/main/images/pdf/temas_generales.pdf.

⁷⁵ UCA. (s/f). *Soldadura*. Recuperado el 25 de diciembre de 2015 de <http://www.uca.edu.sv/facultad/clases/ing/m210034/doc4.pdf>,

- Arco desviado.- el arco se puede desviar debido al campo magnético que genera la C.C.

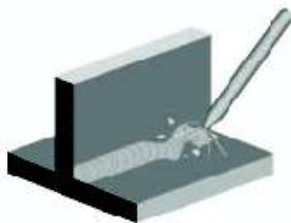


Figura 3.11 Defecto de arco desviado⁷⁶

- Mal aspecto.- puede ser ocasionado por conexiones defectuosas, recalentamiento del electrodo, utilización de electrodo inadecuado o amperaje inadecuado.



Figura 3.12 Mal aspecto del cordón de soldadura⁷⁶

3.13 ZONA AFECTADA POR EL CALOR (ZAC)

La zona afectada por el calor (ZAC) se encuentra fuera de la zona de fusión en los metales puros y fuera de la zona parcialmente fundida en las aleaciones, pero ha sido modificada por la influencia térmica de la soldadura. Es parte del metal base el cual alcanza una temperatura suficientemente alta para provocar cambios metalúrgicos, pero no lo suficientemente alta como para derretir el material.

⁷⁶ DISENSA. (s/f). *Temas Generales de Soldadura*. Recuperado de http://disensa.com/main/images/pdf/temas_generales.pdf el 25 de junio de 2016

El calor generado por la soldadura puede modificar la microestructura del material base en la ZAC produciendo recristalización, reacciones de precipitados, crecimiento de grano, fusión parcial. El calor que se produce durante la soldadura no es suficiente para fundir el material base, pero si logra cambiar las propiedades iniciales del mismo.

La presencia de las modificaciones anteriores puede producir una disminución en la eficiencia de la junta soldada. Para controlar los cambios de dureza que aparecen en el material base se puede usar un durómetro poligonal en la unión de la soldadura.

CAPÍTULO 4

4 PROCESO EXPERIMENTAL

4.1 INTRODUCCIÓN

El presente estudio pretende conocer la soldabilidad del hierro fundido nodular mediante el proceso de soldadura GTAW, para lo cual se detallarán las condiciones generales de equipos y materiales que se utilizan. La elevada concentración de carbono en el material es uno de los limitantes en la soldabilidad, el calor producido por el proceso de soldadura influye en la forma de la estructura del material así como también en sus propiedades.

Existen muchos métodos para establecer la soldabilidad de diferentes tipos de materiales, para la Fundición Nodular se utilizó el método que se detalla en la Guía para la Soldadura de Fundiciones de Hierro (American National Standard Institute / American Welding Society, 1989). Ésta guía permite establecer la soldabilidad de diferentes tipos de fundiciones realizando pruebas de soldadura a diferentes temperaturas de precalentamiento en probetas de dimensiones específicas que se detallan en la norma. Después de determinar la temperatura ideal a la cual no se presentan defectos en el cordón de soldadura se realiza la unión de placas con las condiciones determinadas.

4.2 SELECCIÓN DEL MATERIAL BASE

El material seleccionado es una fundición de hierro nodular 65-45-12, el cual es usado por la EPMAPS (Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento) para el sistema de alcantarillado, siendo las rejillas y tapas los productos más comunes, los cuales están fabricados por la empresa FUNDIEC S.A, bajo las especificaciones de la norma NTE INEN 2 496:2009 y la norma NTE INEN 2 499:2009.

Se ha seleccionado este tipo de material debido a la extensa gama de productos industriales que existe en el mercado, con la finalidad de crear procedimientos o procesos que especifiquen la manera correcta de hacer reparaciones o uniones permanentes usando soldadura.

4.2.1 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

4.2.1.1 Dimensiones

La norma ANSI/AWS D 11.2-89 R (2006) establece las dimensiones para las probetas que se van a utilizar en el proceso de soldadura, tanto de los bloques de fundición como de las placas, la siguiente tabla muestra los valores.

Tabla 4.1 Dimensiones del material base⁷⁷

	Bloque [mm]	Placa [mm]
Largo	177,8	250
Ancho	38,1	150
Espesor	38,1	5

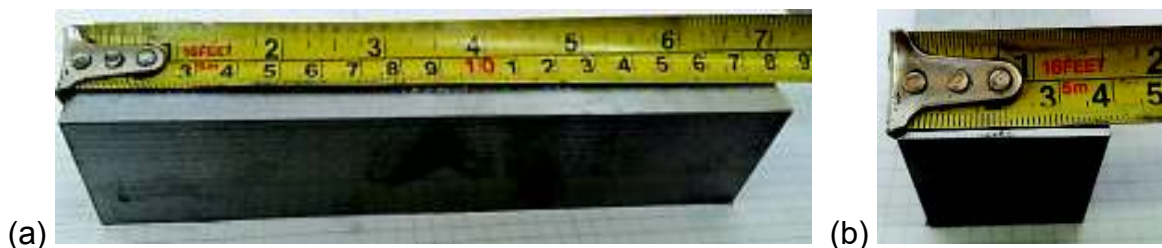


Figura 4.1 Dimensiones del bloque para ensayo de soldabilidad
 (a) Longitud del bloque. (b) Altura y profundidad del bloque.

(Fuente propia)

⁷⁷ ANSI/AWS D11.2-89 R (2006), Guide for Welding Iron Castings, 66.

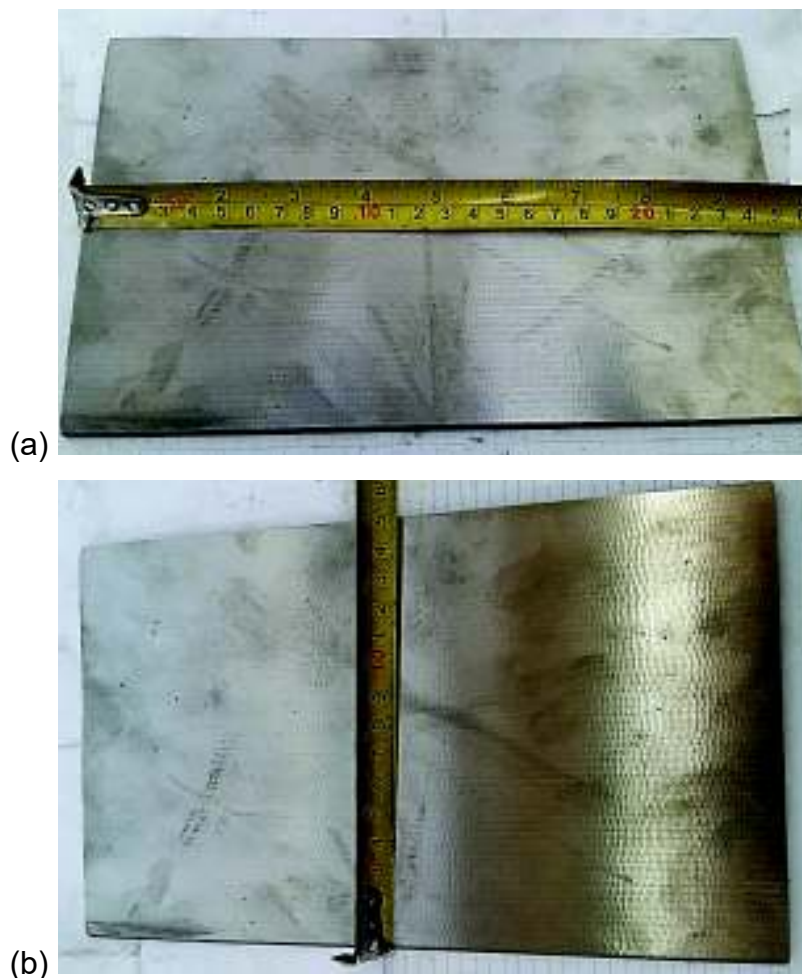


Figura 4.2 Dimensiones de la placa para ensayo de soldabilidad

(a) Longitud de la placa. (b) Altura de la placa.

(Fuente propia)

4.2.1.2 Composición química

La empresa ILPM ENGINEERING CIA. LTDA realizó el ensayo de composición química mediante espectrometría de emisión óptica por chispa, usando un espectrómetro marca Bruker, modelo Q2 ION; el informe se encuentra en el ANEXO 3 y los resultados se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 4.2 Resultado de análisis químico⁷⁸

<i>Metal</i>	<i>Porcentaje (%)</i>
Carbono (C)	4,105
Silicio (Si)	2,686
Manganeso (Mn)	0,645
Fósforo (P)	< 0,003
Azufre (S)	< 0,003
Cromo (Cr)	0,271
Molibdeno (Mo)	< 0,005
Níquel (Ni)	0,029
Cobre (Cu)	0,019
Aluminio (Al)	0,0054
Cobalto (Co)	< 0,003
Magnesio (Mg)	0,031
Niobio (Nb)	0,0087
Titanio (Ti)	0,0069
Vanadio (V)	< 0,003
Wolframio (W)	< 0,01
Boro (B)	< 0,001
Estaño (Sn)	< 0,002
Hierro (Fe)	92,19

⁷⁸ ILPM ENGINEERING CIA. LTDA

4.2.1.3 Características generales

La norma ASTM A 536-84 (2014) detalla algunas propiedades mecánicas del material, la siguiente tabla reúne la información respectiva.

Tabla 4.3 Características mecánicas del material base⁷⁹

Características mecánicas	Fundición nodular 65-45-12	Resultado ensayo tracción FUNDIEC *
Resistencia a la tracción [MPa]	448	540,91
Límite de Fluencia [MPa]	310	359,17
Elongación (%)	12	12,59

* **Nota:** Los resultados corresponden al ensayo de tracción realizado por la empresa FUNDIEC S.A al hierro nodular de grado 65-45-12, el informe de resultados se presenta en el ANEXO 7.

4.2.1.4 Defectos del material base

Debido al espesor mínimo de la placa, el material puede presentar defectos comunes de las fundiciones, los cuales influyen en la homogeneidad y acabado superficial; en la figura 4.3 se muestra poros producidos en el material durante su fabricación.

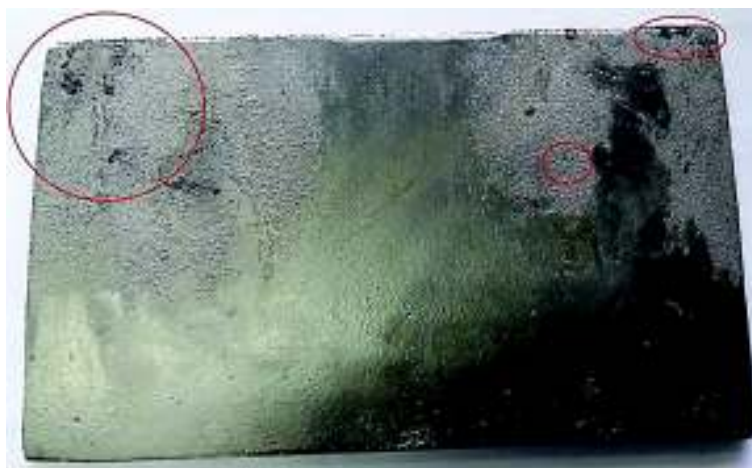


Figura 4.3 Defectos de fabricación en la placa

(Fuente propia)

⁷⁹ ASTM A536-84(2014) Standard Specification for Ductile Iron Castings, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014,



Figura 4.4 Defectos de fabricación en el bloque

(Fuente propia)

Los poros cercanos a la superficie en el material base, pueden aparecer por la generación de gases producida por reacciones molde – metal. El adecuado control de las variables operativas de producción (rediseño de modelos y sistemas de colada) es lo que permitirá obtener piezas libres de defectos.⁸⁰

4.3 SELECCIÓN DEL ELECTRODO⁸¹

La norma ANSI/AWS D11.2-89 R (2006) específica que el electrodo que se usa para GMAW, también se puede utilizar para el proceso de soldadura GTAW, el cual está conformado en base de Níquel, siendo el comúnmente utilizado.

Dentro del mercado nacional existen muchas casas comerciales que ofertan electrodos en base de Níquel. Para el presente estudio se escogió la empresa INDURA. El electrodo seleccionado fue Níquel 55 (Ni-55) con diámetro de 4 mm, el cual tiene una dureza de 200 HB.

La empresa fabricante recomienda usar el electrodo sin recubrimiento, usando el núcleo como material de aporte, la figura 4.5 muestra el alambre con revestimiento y sin revestimiento.

⁸⁰ Martínez, R. (2001). *Caracterización de defectos y propiedades mecánicas en probetas de fundición esferoidal de pequeño espesores*. Recuperado el 05 de septiembre de 2016 de <http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/posadas/trabajos/0219.pdf>

⁸¹ INDURA, (s/f). Catálogo de Procesos y Productos, 18.

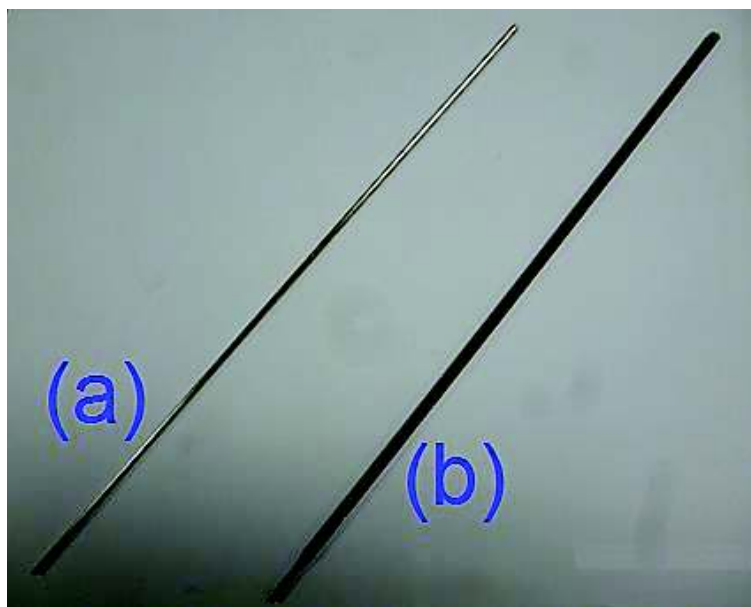


Figura 4.5 (a) Electrodo sin revestimiento. (b) Electrodo con revestimiento.

(Fuente propia)

4.4 MAQUINADO DE PROBETAS

Debido a que el material fundido suele presentar defectos como parte del proceso de fundición en la fabricación, se solicitó sobredimensionamiento en la fabricación con la finalidad de maquinar el material, lograr superficies uniformes sin defectos en lo posible y con las dimensiones especificadas por la Norma ANSI/AWS D11.2-89 R (2006) detalladas en la sección 4.2.1. Los planos de taller para el maquinado de las probetas se detallan en el ANEXO 1 y ANEXO 2. La siguiente tabla muestra los valores iniciales.

Tabla 4.4 Dimensiones iniciales del material base

<i>Espécimen</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Dimensiones iniciales [mm]</i>
Bloque de fundición nodular	13	185 x 42 x 42
Placa de fundición nodular	2	250 x 150 x 7

(Fuente Propia)

Varias operaciones de maquinado, como fresado, torneado, corte por sierra y punzado se relacionan con la deformación plástica del material. En el caso del hierro al tener una estructura B.C.C (cúbica centrada en el cuerpo), el material tiene menos átomos por celda unitaria y no poseen un sistema de deslizamiento bien definido ni tienen un plano realmente compacto, por lo que se tiene una componente crítica del esfuerzo cortante alta necesaria para el deslizamiento, que en el caso del hierro es de 3980 [lb/pulg²]. Lo que provoca que el material no tenga un alto grado de plasticidad.⁸²

Para el maquinado de los 13 bloques y 2 placas de fundición nodular grado 65-45-12 se realizaron los siguientes procesos de máquinas-herramientas:

- Operaciones en limadora.- este proceso comprendió en el acepillado para desbastar las dimensiones de altura y profundidad de los 13 bloques de fundición nodular y el afinado de la junta en las placas de fundición nodular. Se utilizó la limadora de avance horizontal, una cuchilla de acero rápido o HSS (High Speed Steel) debidamente afilada en esmeril y no se utilizó ninguno fluido de refrigeración. El proceso se muestra en la figura 4.6.



Figura 4.6 Desbaste de probetas en la limadora

(Fuente propia)

⁸² Avner, S. (1988). Introducción a la metalurgia física. 2da Edición. México: McGraw Hill. 126.

- Operaciones en torno.- el proceso consistió en el refrentado de la longitud de los 13 bloques de fundición nodular. Se utilizó un torno con avance horizontal, una cuchilla de acero rápido o HSS (High Speed Steel) debidamente afilada en esmeril y no se utilizó ninguno fluido de refrigeración. La figura 4.7 evidencia lo descrito anteriormente.



Figura 4.7 Refrentado de las caras opuestas de los bloques

(Fuente propia)

- Operaciones en taladro.- el proceso consistió en el taladrado de una cara en sentido axial de los 13 bloques de fundición nodular. Se utilizó un taladro fijo con avance vertical, una broca fabricada en acero rápido de 5 [mm] de diámetro y no se utilizó ninguno fluido de refrigeración. La figura 4.8 muestra el proceso mencionado.



Figura 4.8 Taladrado de probetas
(Fuente propia)

Operaciones en rectificadora.- el proceso consistió en el afinado de los 13 bloques y las dos placas de fundición nodular para obtener las medidas especificadas en la sección 4.2.1. Se utilizó una rectificadora con avance de trabajo horizontal, un disco de piedra fina y no se utilizó fluido de refrigeración. En la figura 4.9 se muestra el proceso de afinado para un lado del bloque, este proceso se lo repitió en los cuatro lados del bloque.



Figura 4.9 Rectificado de bloques de fundición nodular
(Fuente propia)

La figura 4.10 muestra el proceso de afinado en una cara de la placa de fundición nodular, el proceso también se realizó en la otra cara.

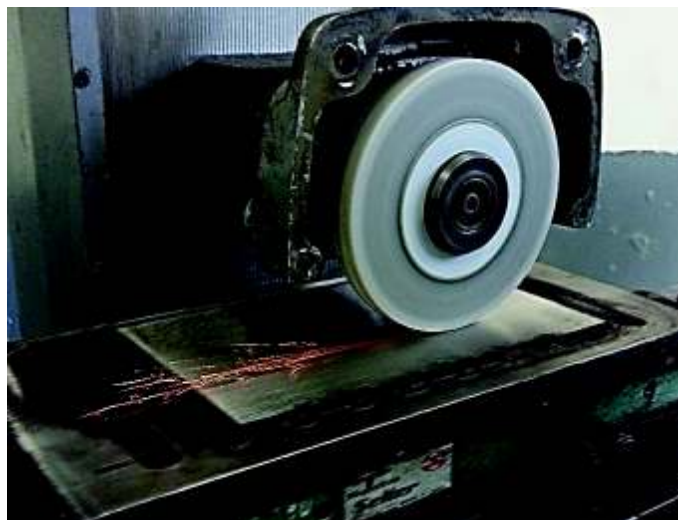


Figura 4.10 Rectificado de placas de fundición nodular

(Fuente propia)

4.5 PROCESO DE SOLDADURA

Después de terminar la preparación de las probetas a utilizar se procedió a realizar los ensayos de soldadura, para lo cual se calculó un régimen de tratamiento térmico que se aplicó en el horno eléctrico con la finalidad de controlar el pre-calentamiento.

A continuación se explica los cálculos realizados para obtener el tiempo de calentamiento y tiempo de permanencia para cada una de las probetas que pertenecen a las series que se especifican en la norma ANSI/AWS D 11.2-89 R (2006).

4.5.1 RÉGIMEN DE TRABAJO PARA EL HORNO ELÉCTRICO

Un régimen de trabajo de tratamiento térmico consiste en controlar cuatro variables principales que son:

- **Temperatura de calentamiento (T_{cal}).**- es la máxima temperatura a la cual se calienta el material y que produce una transformación de fase.

- **Tiempo de permanencia (t_p).**- es el tiempo que se debe mantener el material a la temperatura de calentamiento para conseguir una transformación total o parcial de la microestructura. El tiempo de permanencia es aproximadamente 1/4 del tiempo de calentamiento, se debe considerar que el tiempo de calentamiento depende de la geometría del material y de la conductividad térmica del mismo.

$$t_p = \frac{t_c}{4} \quad (\text{Ec. 4.18})^{83}$$

Dónde: t_p es el tiempo de permanencia y t_c es el tiempo de calentamiento.

- **Velocidad de calentamiento (V_{cal}).**- es el incremento de temperatura en un determinado tiempo, debe ser controlada para evitar que se produzcan microfisuras ocasionadas por la dilatación térmica, equivale a 3 °C/min.⁸³

La velocidad de calentamiento o enfriamiento se puede calcular como la derivada de la temperatura T respecto al tiempo t, como lo muestra la ecuación 4.17.

$$V = \frac{dT}{dt} \quad (\text{Ec. 4.17})^{84}$$

- **Velocidad de enfriamiento (V_{enf}).**- es la disminución de temperatura en un determinado tiempo, su valor depende del medio en que se enfríe el material.

La T_{cal} fue determinada realizando un sobrecalentamiento al material base respecto a la temperatura requerida, con la finalidad de obtener la temperatura deseada al momento de llegar a la mesa de trabajo para realizar el cordón de soldadura.

⁸³ PANTOJA, F. (2015). Apuntes de Tratamientos Térmicos.

⁸⁴ PANTOJA, F. (2015). Apuntes de Tratamientos Térmicos.

4.5.2 MEDICIÓN DE TEMPERATURA

La medición de temperatura se realizó con un termómetro marca Fluke 54 II, acoplado con una termocupla tipo K que permite medir un rango entre $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $1372\text{ }^{\circ}\text{C}$, termocupla se introdujo en el agujero del bloque para controlar la temperatura.



Figura 4.11 Termómetro Fluke 54 II

(Fuente propia)

También se usó un pirómetro laser marca Fluke 62 Mini IR, el cual permitió tomar medidas de la temperatura de la placa durante el proceso de soldadura.



Figura 4.12 Pirómetro Fluke 62 Mini

(Fuente propia)

4.5.3 RÉGIMEN DE TRATAMIENTO TÉRMICO EN LAS SERIES⁸⁵

Para el régimen de tratamiento térmico en cada serie se utilizó carbón para cubrir las probetas con el fin de proteger la superficie del material de la atmósfera oxidante producto del ambiente.

En la sección 3.8 del capítulo anterior se detalla el procedimiento considerando los valores de temperatura de precalentamiento para cada serie de pruebas que sugiere la Guía (ANSI/AWS, 1989) aplicada a la Soldadura de Hierro Fundido para conocer la soldabilidad del hierro fundido nodular.

4.5.3.1 Régimen de tratamiento térmico para la primera serie

Se seleccionó cinco probetas para esta serie, el régimen se detalla a continuación.

4.5.3.1.1 Régimen de tratamiento térmico para la primera probeta

La primera probeta no necesitó precalentamiento, el cordón de soldadura se lo realizó a la temperatura ambiente.

4.5.3.1.2 Régimen de tratamiento térmico para la segunda probeta

La segunda probeta fue calentada con la ayuda de un reverbero a gas y una placa metálica, la figura 4.11 ilustra de mejor manera lo descrito, ésta probeta no fue calentada en el horno debido a que su temperatura de precalentamiento se puede alcanzar de forma controlada usando los materiales mencionados anteriormente.



Figura 4.13 *Pre calentamiento a 121 °C*

(Fuente propia)

⁸⁵ PANTOJA, F. (2015). Apuntes de Tratamientos Térmicos.

4.5.3.1.3 Régimen de tratamiento térmico para la tercera probeta

Se planteó los parámetros principales de temperatura para cada caso del régimen de precalentamiento, considerando una temperatura máxima superior a la temperatura final debido a la caída de temperatura que se produce al sacar el material del horno.

$$T_{amb} = 18 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad V_{cal} = 3 \frac{\text{ }^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$$

$$T_{m\acute{a}x} = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{final} = 260 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad V_{cal} = \frac{\Delta T}{t_c}$$

$$\Rightarrow t_c = \frac{\Delta T}{V_{cal}}$$

$$t_c = \frac{300 \text{ }^{\circ}\text{C} - 18 \text{ }^{\circ}\text{C}}{3 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}}$$

$$\therefore t_c = 94 \text{ [min]}$$

$$t_p = \frac{1}{4} t_c$$

$$t_p = \frac{1}{4} * 94 \text{ [min]}$$

$$\therefore t_p = 24 \text{ [min]}$$

4.5.3.1.4 Régimen de tratamiento térmico para la cuarta probeta

$$T_0 = 260 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad V_{cal} = 3 \frac{\text{ }^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$$

$$T_{m\acute{a}x} = 450 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{final} = 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$V_{cal} = \frac{\Delta T}{t_c}$$

$$\Rightarrow t_c = \frac{\Delta T}{V_{cal}}$$

$$t_c = \frac{450 \text{ }^{\circ}\text{C} - 260 \text{ }^{\circ}\text{C}}{3 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}}$$

$$\therefore t_c = 63 \text{ [min]}$$

$$t_p = \frac{1}{4} t_c$$

$$t_p = \frac{1}{4} * 63 \text{ [min]}$$

$$\therefore t_p = 16 \text{ [min]}$$

4.5.3.1.5 Régimen de tratamiento térmico para la quinta probeta

$$T_0 = 400 \text{ } ^\circ\text{C} \quad V_{cal} = 3 \frac{^\circ\text{C}}{\text{min}}$$

$$T_{m\acute{a}x} = 600 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{final} = 540 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$V_{cal} = \frac{\Delta T}{t_c}$$

$$t_p = \frac{1}{4} t_c$$

$$\Rightarrow t_c = \frac{\Delta T}{V_{cal}}$$

$$t_p = \frac{1}{4} * 67 [\text{min}]$$

$$t_c = \frac{600 \text{ } ^\circ\text{C} - 400 \text{ } ^\circ\text{C}}{3 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}}$$

$$\therefore t_p = 17 [\text{min}]$$

$$\therefore t_c = 67 [\text{min}]$$

Después de terminar la primera serie, la probeta sometida a precalentamiento de 260°C presentó grietas en la soldadura, tras ser analizada mediante ensayo de tintas penetrantes, esta temperatura se la denominó T_x .

4.5.3.2 Régimen de tratamiento térmico para la segunda serie

Tomando en cuenta la temperatura T_x seleccionada como base para el desarrollo de esta serie, se procedió a realizar el régimen de calentamiento para cada probeta conforme lo señala la sección 3.7 del capítulo anterior.

4.5.3.2.1 Régimen de tratamiento térmico para la primera probeta

$$T_{amb} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{final} = 288 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{m\acute{a}x} = 300 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$V_{cal} = 3 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$$

$$V_{cal} = \frac{\Delta T}{t_c}$$

$$\Rightarrow t_c = \frac{\Delta T}{V_{cal}}$$

$$t_c = \frac{300^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}}{3^{\circ}\text{C}/\text{min}}$$

$$\therefore t_c = 93 \text{ [min]}$$

$$t_p = \frac{1}{4} t_c$$

$$t_p = \frac{1}{4} * 93 \text{ [min]}$$

$$\therefore t_p = 23 \text{ [min]}$$

4.5.3.2.2 Régimen de tratamiento térmico para la segunda probeta

$$T_0 = 280^{\circ}\text{C} \quad V_{cal} = 3 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$$

$$T_{m\acute{a}x} = 330^{\circ}\text{C}$$

$$T_{final} = 316^{\circ}\text{C} \quad V_{cal} = \frac{\Delta T}{t_c}$$

$$\Rightarrow t_c = \frac{\Delta T}{V_{cal}}$$

$$t_c = \frac{330^{\circ}\text{C} - 280^{\circ}\text{C}}{3^{\circ}\text{C}/\text{min}}$$

$$\therefore t_c = 16 \text{ [min]}$$

$$t_p = \frac{1}{4} t_c$$

$$t_p = \frac{1}{4} * 16 \text{ [min]}$$

$$\therefore t_p = 4 \text{ [min]}$$

4.5.3.2.3 Régimen de tratamiento térmico para la tercera probeta

$$T_0 = 300^{\circ}\text{C}$$

$$V_{cal} = 3 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$$

$$T_{m\acute{a}x} = 360^{\circ}\text{C}$$

$$T_{final} = 343^{\circ}\text{C}$$

$$V_{cal} = \frac{\Delta T}{t_c}$$

$$\Rightarrow t_c = \frac{\Delta T}{V_{cal}}$$

$$t_c = \frac{360 \text{ }^\circ\text{C} - 300 \text{ }^\circ\text{C}}{3 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}}$$

$$\therefore t_c = 20 \text{ [min]}$$

$$t_p = \frac{1}{4} t_c$$

$$t_p = \frac{1}{4} * 20 \text{ [min]}$$

$$\therefore t_p = 5 \text{ [min]}$$

4.5.3.2.4 Régimen de tratamiento térmico para la cuarta probeta

$$T_0 = 330 \text{ }^\circ\text{C} \quad V_{cal} = 3 \frac{^\circ\text{C}}{\text{min}}$$

$$T_{m\acute{a}x} = 400 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{final} = 371 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$V_{cal} = \frac{\Delta T}{t_c}$$

$$\Rightarrow t_c = \frac{\Delta T}{V_{cal}}$$

$$t_c = \frac{400 \text{ }^\circ\text{C} - 330 \text{ }^\circ\text{C}}{3 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}}$$

$$\therefore t_c = 23 \text{ [min]}$$

$$t_p = \frac{1}{4} t_c$$

$$t_p = \frac{1}{4} * 23 \text{ [min]}$$

$$\therefore t_p = 6 \text{ [min]}$$

Una vez finalizada la segunda serie, la probeta que presentó grietas es la que se precalentó a 316 °C, la cual se denominó como temperatura T_y y se escogió como la temperatura base para el desarrollo de la tercera serie.

4.5.3.3 Régimen de tratamiento térmico para la tercera serie

Tomando en cuenta la temperatura T_y , y debido a que la diferencia de temperaturas entre cada probeta sometida a precalentamiento es mínima, se consideró un solo régimen de tratamiento térmico para las cuatro probetas, controlando su valor exacto con la ayuda de ladrillos refractarios y un reverbero a gas.

La figura 4.12 muestra la estabilización de la temperatura de cada probeta con el reverbero, después de realizado el régimen de precalentamiento.



Figura 4.14 *Precalentamiento a 327 °C*

(Fuente propia)

4.5.3.3.1 Régimen de tratamiento térmico para las cuatro probetas

$$T_{amb} = 20 \text{ °C}$$

$$V_{cal} = 3 \frac{\text{°C}}{\text{min}}$$

$$T_{m\acute{a}x} = 350 \text{ °C}$$

$$V_{cal} = \frac{\Delta T}{t_c}$$

$$t_c = \frac{350 \text{ °C} - 20 \text{ °C}}{3 \text{ °C/min}}$$

$$\Rightarrow t_c = \frac{\Delta T}{V_{cal}}$$

$$\therefore t_c = 110 \text{ [min]}$$

$$t_p = \frac{1}{4} t_c$$

$$t_p = \frac{1}{4} * 110 \text{ [min]}$$

$$\therefore t_p = 28 \text{ [min]}$$

Al finalizar la tercera serie, se aplicó el criterio de selección sin defectos, la probeta que no presentó grietas es la que se precalentó a 327 °C, dicha temperatura se tomó en cuenta para el precalentamiento final de las placas a soldar.

4.5.4 TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO SEGÚN CARBONO EQUIVALENTE

La Guía para la Soldadura de Hierro Fundido ANSI/AWS D 11.2-89 R(2006), relaciona mediante un gráfico el porcentaje de carbono equivalente con la temperatura de precalentamiento a la cual no se presenta fisuras. Usando la fórmula de Carbono equivalente que se especifica en la sección 3.12.2.1, se determinó la temperatura de pre-calentamiento, tomando los valores de los aleantes detallados en la sección 4.2.1.2.

Debido a que el porcentaje de carbono en peso excede el rango normal para fundiciones nodulares, la composición de carbono se estimará usando el diagrama de Heinbauer, el cual hace una relación entre el espesor del material y el carbono equivalente mediante la medida de dureza.

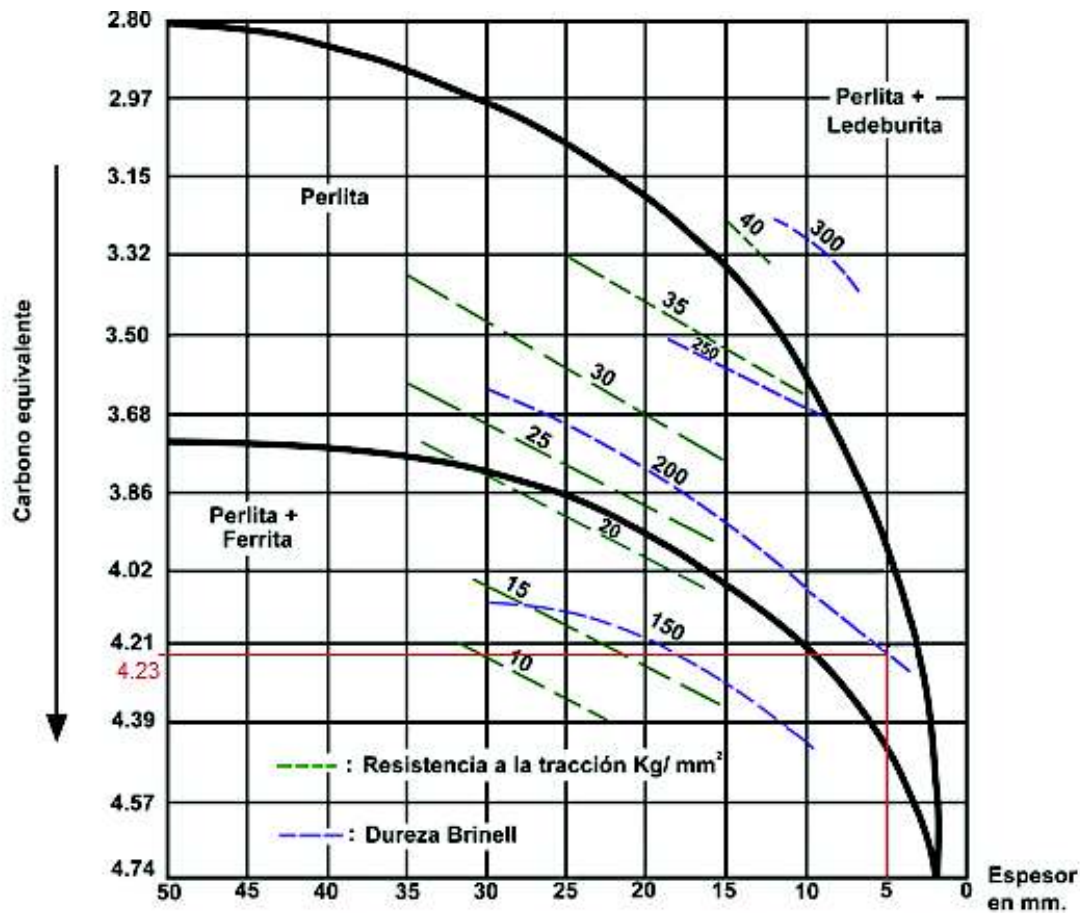


Figura 4.15 Diagrama de Heinbauer⁸⁶

Una vez calculado el carbono equivalente se procedió a encontrar el porcentaje de carbono usando ecuación 4.19:

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

(Ec. 4.19)⁸⁷

⁸⁶ Gordillo, S. (2010). Estudio de los Tratamientos Térmicos de Templado y Revenido en la Fundición de Hierro Dúctil con Matriz Metálica Ferrítica.

⁸⁷ Enríquez, J. (2012). *Fabricación de Fundición Nodular*, pág. 36.

Despejando C_T de la ecuación anterior se tiene:

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

$$C_T = 4,23 - 0.31 (2,686) - 0.33(0,003) - 0.45 (0,003) + 0.028 (0,645) - 0,005 - 0,271 + 0.02 (0,029) + 0.01 (0,019)$$

$$\therefore C_T = 3.14$$

Calculando el grado de saturación S_c , debe obtenerse un valor próximo a la unidad, lo cual corresponde a una fundición nodular ferrítica común de grado 65-45-12 según la norma ASTM A-536, la ecuación 4.20 permite el cálculo del grado de saturación:

$$S_c = \frac{C_T}{4,3 - \frac{Si+P}{3}} \quad (\text{Ec. 4.20})^{88}$$

$$S_c = \frac{3,14}{4,3 - \frac{2,686 + 0,003}{3}}$$

$$\therefore S_c = 1,011$$

De los resultados anteriores se realiza la estimación de la temperatura a la cual el material no presenta grietas, la figura 4.14 permite relacionar el carbono equivalente con la temperatura.

⁸⁸ Gordillo, S. (2010). Estudio de los Tratamientos Térmicos de Templado y Revenido en la Fundición de Hierro Dúctil con Matriz Metálica Ferrítica.

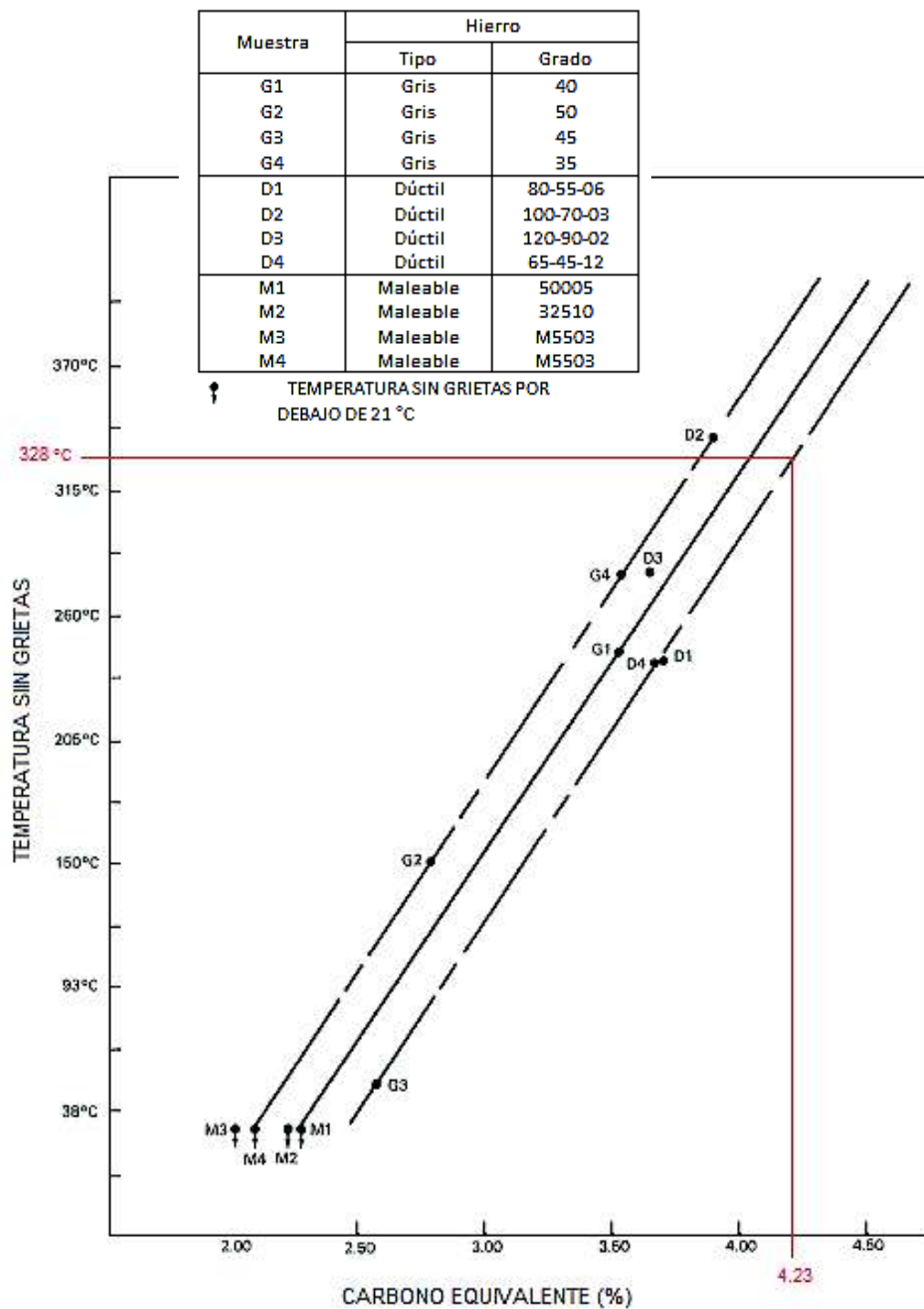


Figura 4.16 Relación entre carbono equivalente y temperatura sin grietas⁸⁹

⁸⁹ ANSI/AWS D11.2-89 R(2006), Guide for Welding Iron Castings, 20.

4.5.5 DISEÑO DE LA JUNTA DE SOLDADURA

La junta que se escogió está detallada en la Guía para la Soldadura de Hierros Fundidos (ANSI/AWS, 1989), la cual sugiere que para materiales que tengan un espesor menor a media pulgada es recomendable un ángulo de bisel de 60° , un talón de 2 mm y una separación de 3 mm como máximo, en la figura 4.17 se observa lo descrito.

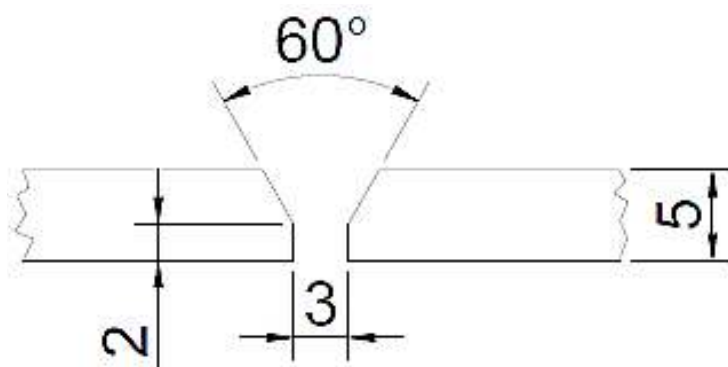


Figura 4.17 Dimensiones de la junta de soldadura⁹⁰

La figura 4.18 indica la junta realizada con la ayuda de una amoladora y un disco de corte.



Figura 4.18 Junta de soldadura

(Fuente propia)

⁹⁰ ANSI/AWS D11.2-89 R(2006), Guide for Welding Iron Castings, 16.

4.5.6 DISEÑO DEL CUPÓN DE SOLDADURA⁹¹

Un cupón de soldadura permite realizar ensayos destructivos y no destructivos con el fin de conocer la calidad de la soldadura, los ensayos destructivos que se realizaron son: ensayo de tracción, doblado de cara y raíz; los ensayos no destructivos que se realizaron fueron: tintas penetrantes e inspección visual.

Se deben considerar algunos aspectos para el desarrollo del cupón, los cuales son:

- Tipo de ensayo a realizarse.
- Dimensiones y geometría de la junta.
- Efectos del calor en el proceso de soldadura.
- Facilidad de maquinado y manipulación.

La figura 4.19 ilustra el modelo del cupón diseñado y los ensayos respectivos que deberán realizarse.

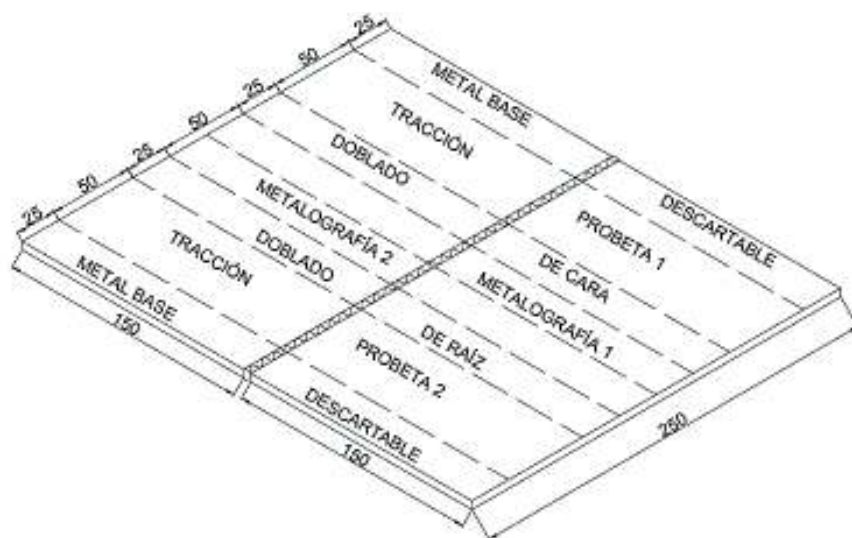


Figura 4.19 Cupón de soldadura

(Fuente propia)

⁹¹ Álvarez Chipugsi, A. (2015). Estudio Comparativo de la Soldabilidad del Hierro Fundido Dúctil con los Procesos SMAW y TB. Tesis de Ingeniería, Escuela Politécnica Nacional. Quito.

4.5.7 PROCESO DE SOLDADURA

Después de determinar las temperaturas de precalentamiento para las probetas y las placas, se procedió a realizar el cordón de soldadura; el proceso utilizado se encuentra detallado en la sección 3.8, la norma ANSI/AWS D11.2-89 R (2006) especifica las condiciones de trabajo para los materiales, herramientas y equipos. Para realizar la soldadura en las probetas que han sido precalentadas, se usó una entenalla para poder sujetarlas. La figura 4.20 muestra lo descrito.



Figura 4.20 Proceso de soldadura en las probetas

(Fuente propia)

Una vez terminada la serie de pruebas en las probetas, se procedió a realizar la soldadura de las placas. Para evitar defectos de deformación en el cordón de soldadura se colocaron respaldos o puentes entre las placas, dejando la distancia correcta de separación, lo dicho se observa en la figura 4.21.

La norma ANSI/AWS D11.2 89 R(2006), no especifica la colaboración de un soldador calificado; sin embargo para el presente proyecto se contrató un soldador calificado en el proceso de soldadura GTAW, su documento de calificación se presenta en el ANEXO 4.



Figura 4.21 Colocación de respaldos entre las placas

(Fuente propia)

De igual manera para evitar defectos de desalineamiento en las placas se soldaron platinas al inicio y al final del espacio destinado al cordón de soldadura como se indica en la figura 4.22.

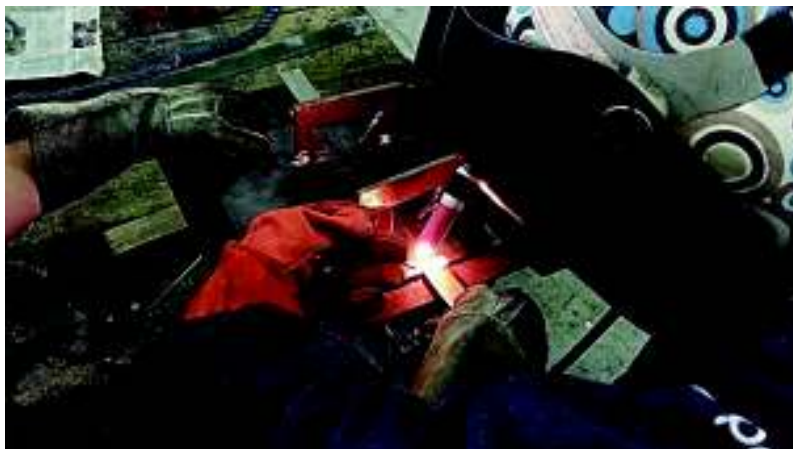


Figura 4.22 Colocación de platinas

(Fuente propia)

Durante el proceso de soldadura de las placas se usó una prensa manual con el fin de mantenerlas fijas a la superficie de apoyo, tal como se observa en la figura 4.23.



Figura 4.23 Realización del cordón de soldadura entre placas

(Fuente propia)

4.5.8 ENFRIAMIENTO POST-SOLDADURA

Al finalizar el proceso de soldadura se realizó un enfriamiento lento debido a que el material se encuentra a elevada temperatura, lo ideal es realizarlo dentro del mismo horno, pero debido a las dimensiones finales de la placa soldada no fue posible realizarlo; por ese motivo se escogió como medio de enfriamiento la arena sílice, la figura 4.24 muestra lo citado anteriormente.



Figura 4.24 Enfriamiento post-soldadura de las placas

(Fuente propia)

4.6 TINTAS PENETRANTES⁹²

Como uno de los métodos de ensayos no destructivos, los líquidos penetrantes permiten detectar defectos abiertos en la superficie, tales como grietas, fisuras y poros. El método es aplicable en metales (ferrosos y no ferrosos), en materiales cerámicos, plásticos y vidrios.

La Norma ASTM-E165, cubre procedimientos para la examinación penetrante de materiales, debe considerarse que este método no indica ni sugiere criterios de evaluación de las indicaciones detectadas. Sin embargo, una vez que se hayan identificado las indicaciones, deben interpretarse o clasificarse y posterior deben evaluarse, por lo que se necesita de un código o especificación diferente, para definir el tipo, el tamaño, la ubicación o la dirección de indicaciones consideradas como aceptables y de aquellas consideradas como inaceptables. Los procesos de inspección en soldadura permiten evaluar algunas características de una unión soldada, tales como dimensiones y forma de los cordones de soldadura.

⁹² ASTM E165 / E165M-12, Standard Practice for Liquid Penetrant Examination for General Industry, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org.

4.6.1 FUNDAMENTO DEL MÉTODO

Este método de inspección se fundamenta en la capacidad que poseen ciertos líquidos para penetrar y ser retenidos en discontinuidades presentes en la superficie que no pueden ser detectadas visualmente, la propiedad se denomina capilaridad y depende de la mojabilidad que poseen los líquidos, como se indica en la figura 4.25.

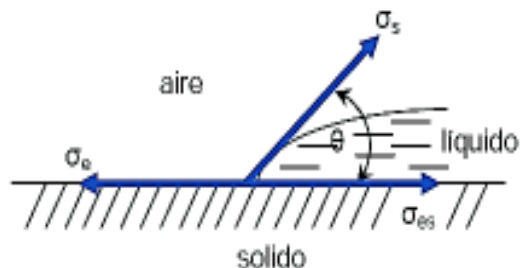


Figura 4.25 Fundamento de acción de líquido penetrante

(Fuente propia)

4.6.2 CLASIFICACIÓN DE LOS LÍQUIDOS PENETRANTES⁹³

Los materiales para la examinación de líquidos penetrantes consisten en: penetrantes fluorescentes y visibles; emulsificantes en base de aceite (acción rápida) y de agua (acción lenta); removedores solventes y reveladores.

Tabla 4.5 Clasificación de líquidos penetrantes⁹⁴

METODO	TIPO	PROCESO	PIGMENTO	REMOCION DEL PENETRANTE
A	1	A1	Fluorescente	Lavable con agua
A	2	A2	Fluorescente	Post - emulsificable
A	3	A3	Fluorescente	Removible con solvente
B	1	B1	Coloreada	Lavable con agua
B	2	B2	Coloreada	Post - emulsificable
B	3	B3	Coloreada	Removible con solvente

⁹³ ASTM E165 / E165M-12, Standard Practice for Liquid Penetrant Examination for General Industry, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org.

⁹⁴ Guía de Prácticas Laboratorio de Ensayos No destructivos, 2015

4.6.2.1 Proceso A1-B1



Figura 4.26 Proceso de aplicación A1 y B1⁹⁵

4.6.2.2 Proceso A2-B2

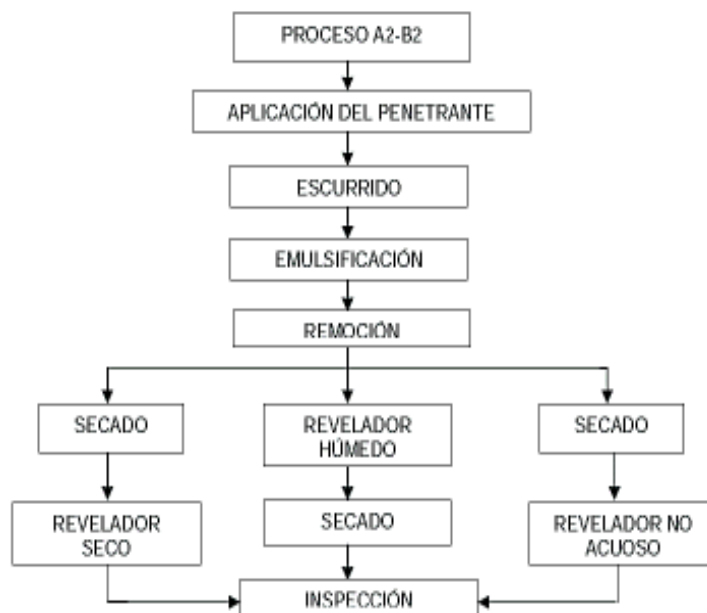


Figura 4.27 Proceso de aplicación A2 y B2⁹⁵

⁹⁵ Guía de Prácticas Laboratorio de Ensayos No destructivos.

4.6.2.3 Proceso A3-B3



Figura 4.28 Proceso de aplicación A3 y B3⁹⁶

4.6.3 SELECCIÓN DE TINTAS PENETRANTES

Para el presente trabajo con material de fundición nodular, el líquido penetrante se escogió es un coloreado por la facilidad que presenta al ser visible a simple vista.

Además, para la remoción del penetrante se seleccionó el lavable con agua, ya que se cumple con la presión promedio que es de 30 a 50 [psi] de agua y una temperatura de 16 a 43 °C.

Entonces para el proceso de ensayo no destructivo que se debe aplicar según lo exige la Norma ANSI / AWS D11.2 89 R(2006) se seleccionó el método B1, los materiales se indican en la figura 4.29.

⁹⁶ Guía de Prácticas Laboratorio de Ensayos No destructivos.



Figura 4.29 (a) Líquido penetrante aplicable al proceso.

(b) Revelador aplicable al proceso.

(Fuente propia)

4.6.4 APLICACIÓN DE LA PRUEBA DE TINTAS PENETRANTES

Este método de ensayo no destructivo se aplicó de acuerdo a la especificación dada por la Norma ANSI/AWS D11.2-89 R(2006) para cada día de prueba. El método de examinación de tintas penetrantes se realizó conforme lo señala la Norma ASTM E-165 siendo aplicada en este proyecto de la siguiente manera.

4.6.4.1 Preparación del material soldado

Se ubicó las probetas soldadas de cada día según la serie correspondiente, clasificándolas de acuerdo a la temperatura a la cual se aplicó el ensayo de soldabilidad, como se indica en la figura 4.30.

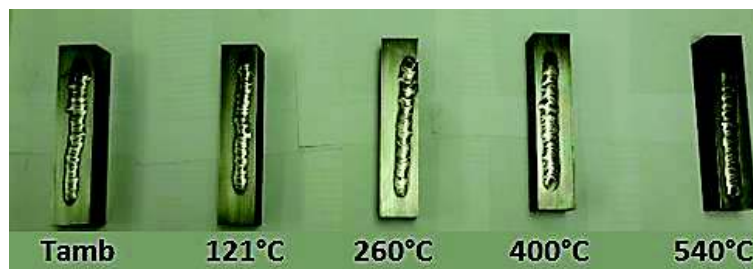


Figura 4.30 Selección de las probetas ensayadas

(Fuente propia)

4.6.4.2 Limpieza del material soldado

Se limpió cada probeta a examinar, con el fin de retirar cualquier contaminante en la superficie, además se secó la superficie de aplicación, lo dicho se muestra en la figura 4.31.



Figura 4.31 Limpieza de cada probeta

(Fuente propia)

4.6.4.3 Aplicación de líquido penetrante

Se agitó el líquido penetrante seleccionado previo a su aplicación. Posterior a esto se aplicó el líquido penetrante uniformemente sobre la superficie a examinar y se dejó actuar durante 10 minutos, con el fin de que el líquido ingrese en las discontinuidades, la aplicación se muestra en la figura 4.32.



Figura 4.32 Aplicación del líquido penetrante en las probetas

(Fuente propia)

4.6.4.4 Limpieza del exceso de tinta penetrante

Cumplido el tiempo de la aplicación y usando un paño limpio se removió el exceso de penetrante de la superficie, tal como se indica en la figura 4.33.



Figura 4.33 Limpieza del exceso de penetrante de cada probeta

(Fuente propia)

4.6.4.5 Aplicación del revelador

Se agitó el revelador seleccionado previo a su aplicación. Posterior se aplicó el revelador uniformemente sobre la superficie a examinar, se dejó actuar durante 7 minutos para bosquejar el penetrante atrapado fuera de la discontinuidad y determinar así el revelador, la figura 4.34 indica el proceso de aplicación del revelador.

Es necesario tomar en cuenta que capas finas de revelador no extraen al penetrante y capas gruesas enmascaran la información.



Figura 4.34 Aplicación del revelador sobre cada probeta

(Fuente propia)

4.6.4.6 Inspección visual

Posterior al tiempo del revelador, la superficie se examinó para emitir el juicio y determinar la presencia o ausencia de indicaciones.

4.6.4.7 Limpieza final

Se realizó la limpieza final de las probetas y del sitio ocupado.

4.7 ENSAYOS DESTRUCTIVOS

Los ensayos destructivos de tracción y doblado se realizaron en la máquina universal de ensayos TINIUS OLSEN de la figura 4.35.

Para la realización de este tipo de ensayos se consideró las propiedades mecánicas del material base y de la soldadura, permitiendo evaluar las características que determinan la tenacidad del material (capacidad del material para resistir la fractura) en la aplicación del proceso GTAW sobre la fundición nodular.

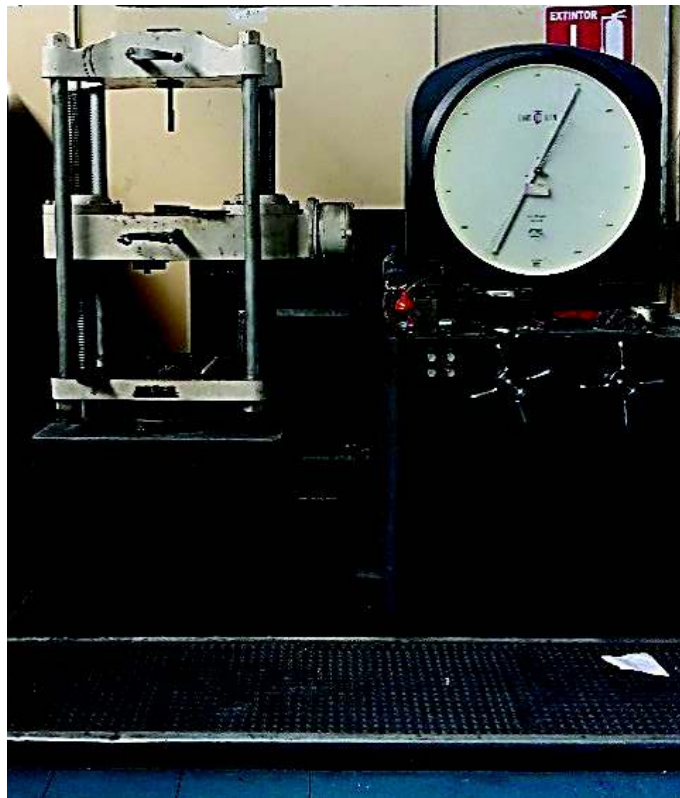


Figura 4.35 Máquina universal de ensayos TINIUS OLSEN

(Fuente propia)

4.7.1 ENSAYO DE TRACCIÓN⁹⁷

La prueba de tensión permite determinar el esfuerzo de fluencia y la ductilidad de los materiales bajo esfuerzos de tracción uniaxial. El ensayo estándar según la Norma ASTM E8M-15a cubre las pruebas de tensión de materiales metálicos en cualquier forma a la temperatura ambiente.

4.7.1.1 Especificaciones para las probetas de tracción

El ensayo se realizó de acuerdo a la Norma ASTM E8M-15a, por lo que se tomó en cuenta los parámetros especificados que permitieron preparar las probetas para el ensayo, la figura 4.36 es un esquema que indica los parámetros a seguir.

Debido a la longitud de las placas soldadas que es inferior a 400 [mm] se seleccionaron los siguientes parámetros.

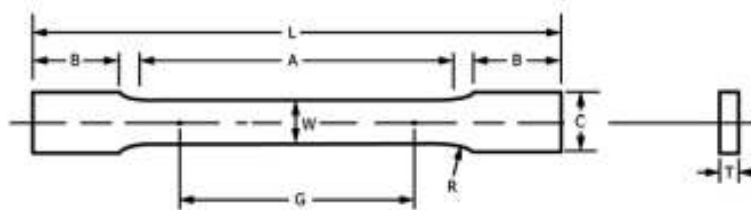


Figura 4.36 Requerimientos para el ensayo de tracción¹⁰⁷

G: cuello de garganta:	50,0 ± 0,1 [mm/min]
W: ancho:	12,5 ± 0,2 [mm/min]
T: espesor del material:	5 [mm]
R: radio del filete:	12,5 [mm]
L: longitud total:	200 [mm]
A: longitud de la sección reducida:	57 [mm/min]
B: longitud de la zona de amordazado:	50 [mm]
C: altura de la sección de amordazado:	20 [mm]

⁹⁷ ASTM E8 / E8M-15a, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org

4.7.1.2 Preparación de probetas T_1 y T_2

Se cortó y se limó la longitud de la sección reducida de cada probeta. Tomando en cuenta el ancho W que debe ser constante a lo largo del cuello, ya que en la sección reducida es la parte que realmente se somete a la carga y al alargamiento. Las probetas maquinadas presentan secciones mayores en los extremos y una sección reducida en el medio, como se indica en la figura 4.37.



Figura 4.37 Corte y limado del espécimen

(Fuente propia)

Se marcó la longitud de trabajo o de calibre en la sección reducida en el medio de la probeta. Esta sección permite determinar la elongación o ductilidad del material después del ensayo. La marca de calibre se indica en la figura 4.38.

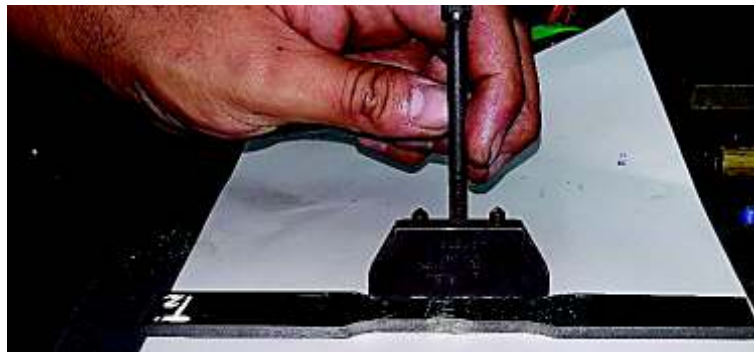


Figura 4.38 Marca de calibre en la probeta de tracción

(Fuente propia)

4.7.1.3 Inspección visual de las probetas T₁ y T₂

Se identificó los defectos presentes en cada probeta, para determinar si influyen en el desarrollo del ensayo alterando los resultados finales.

En la probeta T₁ y en probeta T₂ se observaron discontinuidades inherentes a la colada en el proceso de fundición. Se trata de poros o inclusiones gaseosas, estas indicaciones se forman por el gas que es insoluble en el metal líquido y es atrapado cuando solidifica, lo dicho se indica en la figura 4.39 (a) y (b) para la probeta T₁ y la figura 4.40 (a) y (b) para la probeta T₂.

No se logró eliminar esas discontinuidades mediante la rectificación de las placas. Sin embargo la ubicación de las mismas es en la parte correspondiente al amordazado. El cuello de garganta en la sección reducida no presentó discontinuidades en ambas probetas.

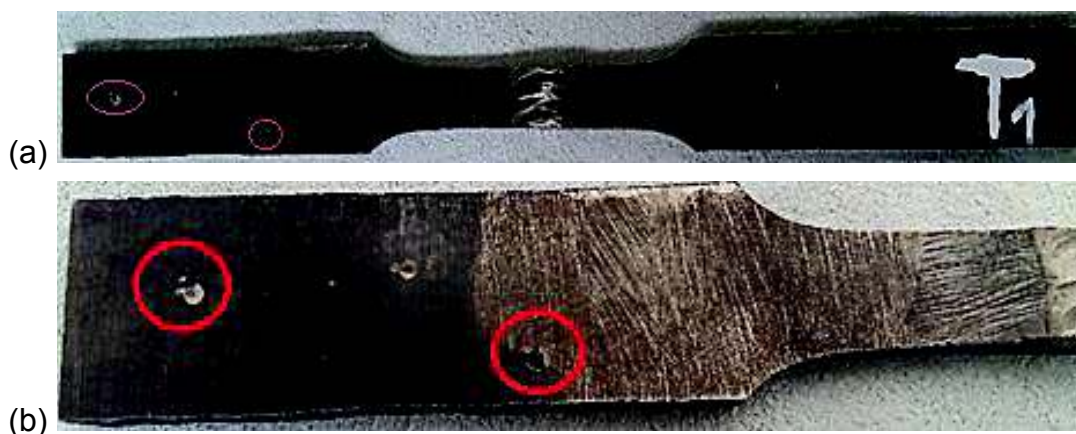


Figura 4.39 (a) Defectos en la probeta T₁. (b) Ampliación de la probeta que muestra las discontinuidades en la región de amordazado.

(Fuente propia)

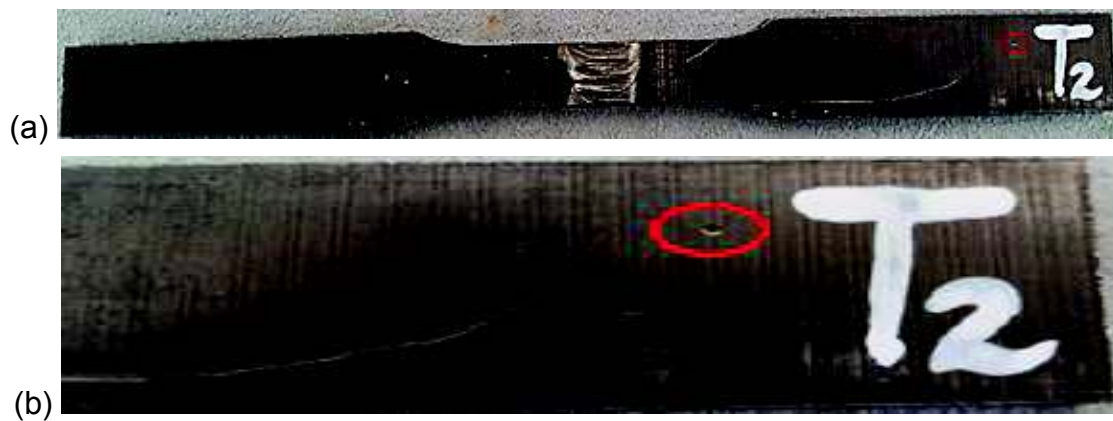


Figura 4.40 (a) Defectos en la probeta T_2 . (b) Ampliación de la probeta que muestra la discontinuidad en la región de amordazado.

(Fuente propia)

4.7.1.4 Realización del ensayo de tracción

Se montó cada probeta en la máquina universal se aplicó la carga como lo indica la figura 4.41. Posterior a esto se registró los valores correspondientes.



Figura 4.41 Realización del ensayo de tracción para la probeta T_1 y T_2

(Fuente propia)

4.7.2 ENSAYO DE DOBLADO⁹⁸

El ensayo de doblado es un método para evaluar la ductilidad del material, pero no puede considerarse como un método cuantitativo para predecir su comportamiento en operaciones de doblado de producción. La severidad de un ensayo de doblado depende del radio de curvatura interior al que se dobla la probeta y de la sección de la probeta.

4.7.2.1 Especificaciones para las probetas de doblado⁹⁹

Según la Norma INEN NTC-110, la probeta debe ser de sección rectangular con aristas levemente redondeadas. Se necesario redondear longitudinalmente las aristas de las probetas de sección rectangular, eliminando grietas o marcas. El radio de redondeo será inferior al espesor de la probeta. En el ensayo de doblado con matriz se recomienda que la longitud de la probeta sea de alrededor de 250 [mm].

4.7.2.2 Preparación de probetas D_C y D_R

Se efectuó el maquinado en la dirección longitudinal de la probeta, hasta donde sea aplicable. Se redondeó longitudinalmente las aristas de las probetas de sección rectangular, eliminando grietas o marcas.

Para la Probeta de doblado de cara se esmeriló la sobremonta hasta obtener una superficie plana. Se verificó que no haya superficies expuestas.

Para la probeta de doblado de raíz se esmerilo el cordón de raíz hasta obtener una superficie plana. Se verificó que no haya superficies expuestas que anulen el ensayo, la figura 4.42 indica el proceso de esmerilado del cordón de raíz.



Figura 4.42 Preparación de la probeta D_R

(Fuente propia)

⁹⁸ NTE INEN 110:1975-03. Ensayo de doblado para el acero. Primera Edición.

4.7.2.3 Inspección visual de las probetas D_C y D_R

Las probetas de doblado de cara y raíz no presentaron indicaciones en la zona de doblado, tal como se puede observar en la figura 4.43.



Figura 4.43 Probeta de doblado de cara (D_C) y probeta de doblado de raíz (D_R)

(Fuente propia)

4.7.2.4 Realización del ensayo de doblado

Se colocó la probeta sobre la matriz y se dobló por medio de una carga aplicada sobre la matriz hasta alcanzar un ángulo especificado. Dado que se trató con un material frágil, se procedió solo a medir el ángulo en el cual empezó la fisura en el material.

Se utilizó el dispositivo de doblamiento en matriz adaptado a la máquina universal (JI de doblado). La matriz tiene un entalle en forma de "U", esto se indica en la figura 4.44.



Figura 4.44 Realización del ensayo de doblado en la probeta D_C y D_R .

(Fuente propia)

4.8 ANÁLISIS METALOGRÁFICO

Para el análisis metalográfico se procedió a extraer dos probetas de material base, las cuales deben ser preparadas de acuerdo a la norma ASTM E-3.

4.8.1 PREPARACIÓN DE LA PROBETA

La preparación de las probetas consiste en una serie de procesos que permitieron realizar una inspección microscópica de su estructura, tamaño de grano, zona afectada por el calor (ZAC) y micro defectos. Para el mejor manejo de las probetas, debido a su espesor reducido, se realizó un recubrimiento con resina poliéster, cobalto al 12% y peróxido MEC a las muestras, la figura 4.45 (a) y (b) muestra este proceso.

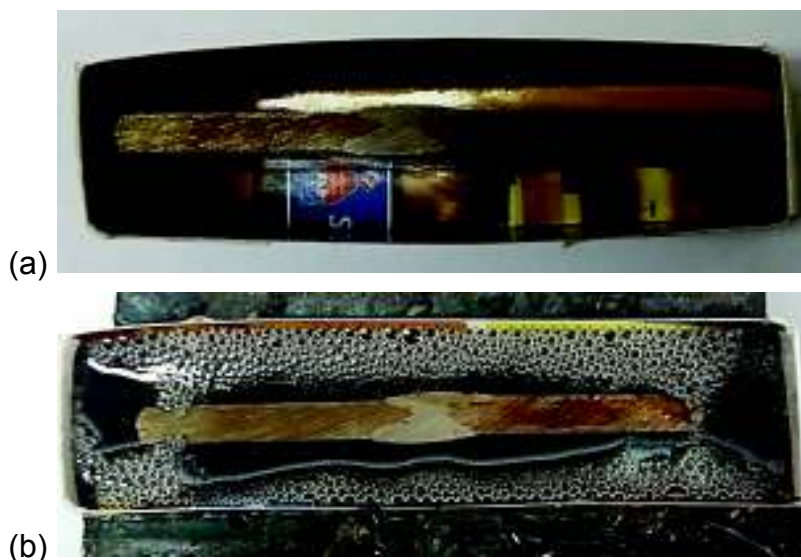


Figura 4.45 (a) y (b) Recubrimiento con resina de las probetas

(Fuente propia)

4.8.1.1 Desbaste grueso

Este proceso permite remover el óxido, pintura, rebabas de la superficie del material, se realizó con una desbastadora de disco que contiene una lija que puede ser de número 60,80 ó100 (grano/pulgada lineal), el proceso de desbaste grueso se indica en la figura 4.46.



Figura 4.46 Desbaste grueso de las probetas M_1 y M_2

(Fuente propia)

4.8.1.2 Desbaste fino

Esta etapa permite remover deformaciones o defectos causados por la etapa anterior, se usaron lijas de número 240, 320, 600 y 1200 (granos/pulgada lineal), las cuales se usan de forma ascendente hasta conseguir una superficie relativamente limpia.



Figura 4.47 Desbaste fino de las probetas M_1 y M_2

(Fuente propia)

4.8.1.3 Pulido

En este proceso se utilizó una pulidora de paño junto con un abrasivo de alúmina de 1 micra, suspendida en agua, el objetivo es remover los defectos causados por el desbaste fino y dejar la superficie resplandeciente como un “espejo” para poder observar la microestructura.



Figura 4.48 Pulido fino de la probeta M_2

(Fuente propia)

4.8.1.4 Ataque químico

Después de terminar con el proceso de desbaste y pulido, se realizó un ataque químico a la muestra. El reactivo que se utilizó es nital al 10% en forma de inmersión. La figura 4.49 muestra lo descrito.

El ataque químico permite hacer visible la microestructura y visualizar la zona afectada por el calor, las zonas se muestran encerradas en un círculo rojo en la figura 4.50.

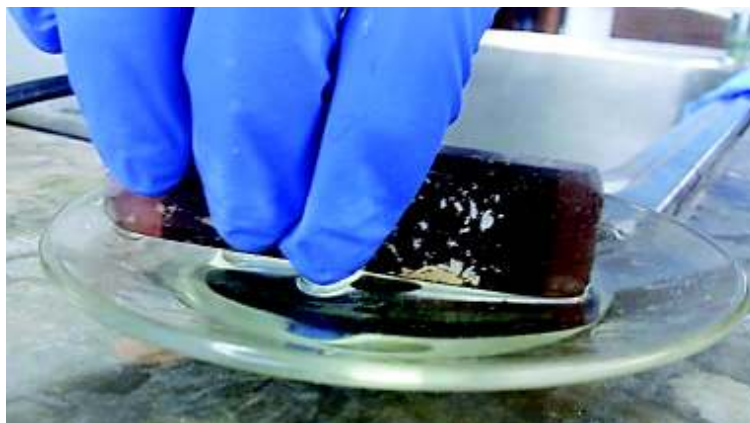


Figura 4.49 Inmersión de la probeta M_1 y M_2 en el reactivo
(Fuente propia)



Figura 4.50 Visualización de la zona afectada por el calor en la probeta M_1
(Fuente propia)

4.8.2 MACROGRAFÍA

Para la realización de macrografías, y una vez ataca la probeta se miró en el microscopio, con la finalidad de observar a detalle las diferentes zonas del material. Lo dicho se puede observar en la figura 4.51 (a) y (b).

Se utilizó el microscopio estereoscópico de barrido en el Laboratorio de Metalografía.

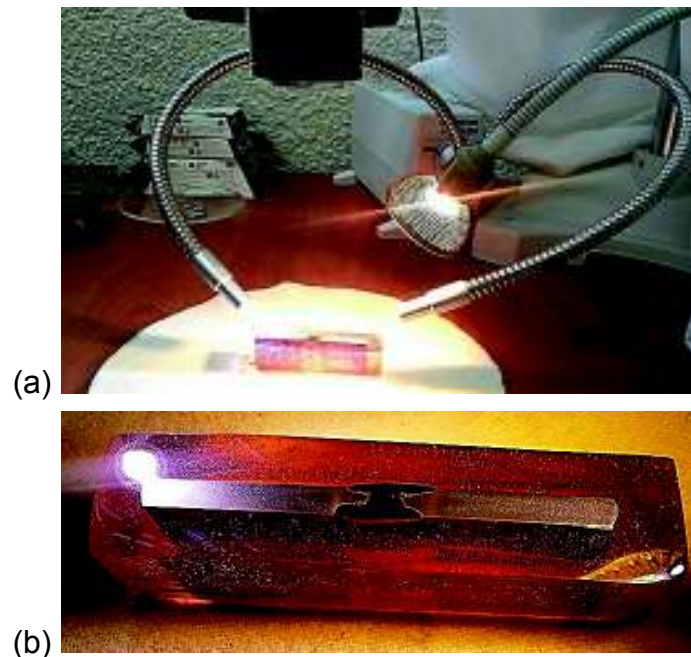


Figura 4.51 (a) Proceso de macrografía con el microscopio estereoscópico aplicado a la probeta M_1 . (b) Visualización de la ZAC en el microscopio.

(Fuente propia)

4.8.3 DUREZA

Para la medición de dureza se utilizó el durómetro modelo HR-150 A, facilitado en el Laboratorio de Metalografía, tanto el equipo como el proceso aplicado al probeta M_1 se indica en la figura 4.52.



Figura 4.52 Durómetro HR-150 A

(Fuente propia)

Los puntos para la medición de dureza se tomaron considerando el espesor de la placa, la zona afectada por el calor, el tamaño de la soldadura y considerando además una distancia que no afecte a cada punto de prueba debido a la indentación.

En el metal base, se realizó una separación de 2 [mm] entre cada indentación logrando un total de 7 puntos de acuerdo a la longitud del lado derecho de la probeta M_1 . En la figura los puntos del metal base son del 1 al 7.

En el metal de aporte de soldadura o zona de soldadura, se realizaron indentaciones a distinto nivel, tomando en cuenta las pasadas realizadas en el proceso de soldadura.

Para los puntos del 8 al 10 se realizó una separación de 3 [mm] entre cada indentación a partir del punto medio (9).

Para los puntos 11 y 12 se tomó una separación de 2 [mm] a partir de punto medio (10).

En la interfaz o zona de fusión se consideraron los puntos del 13 al 16 repartidos en la trayectoria de la zona, tomando en cuenta la separación con otras zonas.

En la zona afectada por el calor se consideraron los puntos 17 y 18 en la parte media del cuello, debido a que por el tamaño de la probeta y la distancia mínima que debe existir entre cada medición no se podía establecer más puntos de prueba. La repartición de los puntos de prueba se observa en la figura 4.53.

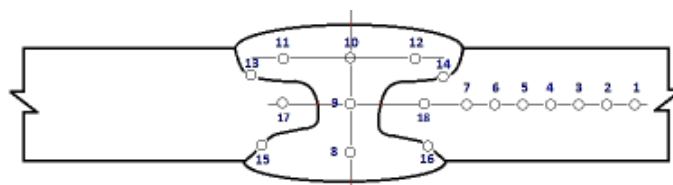


Figura 4.53 Barrido de dureza para la probeta M_1

(Fuente propia)

4.8.4 MICROGRAFÍA

La micrografía se la realizó utilizando un microscopio metalográfico invertido marca OLYMPUS modelo GX41, los lentes usados fueron 50x, 100x y 500x, el cual permite observar la microestructura del material, el tamaño de grano y su tipo de matriz. La comparación se la realizó usando la norma ASTM A-247 (Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Casting). El equipo usado para este propósito se indica en la figura 4.54.



Figura 4.54 Microscopio metalográfico invertido

(Fuente propia)

CAPÍTULO 5

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 RESULTADOS DEL PROCESO DE SOLDABILIDAD

5.1.1 RESULTADOS DE LA PRIMERA SERIE

En la primera serie las temperaturas utilizadas para precalentamiento fueron: temperatura ambiente, 121 °C, 260 °C, 400 °C y 540 °C; los cordones de soldadura realizados con las temperaturas mencionadas anteriormente deben ser inspeccionados después de 24 horas visualmente (a) y con el método de tintas penetrantes (b) como se indica en cada figura, con el fin de encontrar la temperatura a la cual se presentan agrietamientos, dicha temperatura se denominará T_x .

5.1.1.1 Resultados a temperatura ambiente

La temperatura ambiente el día del ensayo fue de 18 °C, realizando inspección visual no se aprecia defectos y de igual manera al aplicar tintas penetrantes no se evidencia poros ni fisuras, sin embargo en el cráter al final del cordón se puede identificar un rechuce, el cual no tiene influencia en éste estudio.

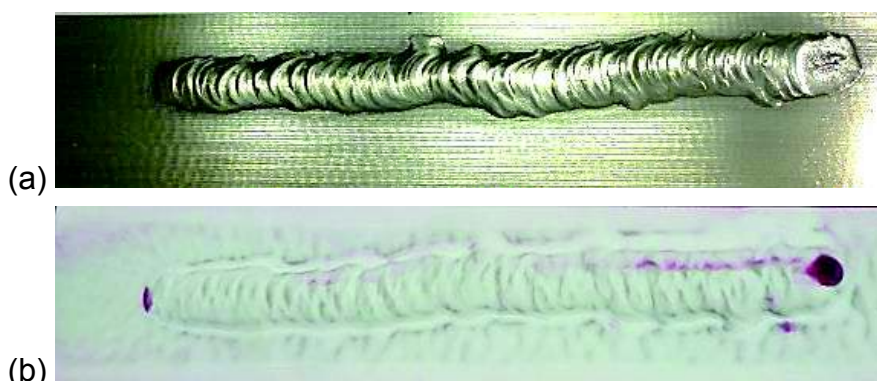


Figura 5.1 Resultados de ensayo de soldabilidad a T_{amb}

(Fuente propia)

5.1.1.2 Resultados a 121 °C

En el cordón realizado a ésta temperatura no se aprecian poros, chisporroteo, fisuras y la uniformidad se mantiene hasta el final. Nuevamente se observa un cráter al final del cordón.

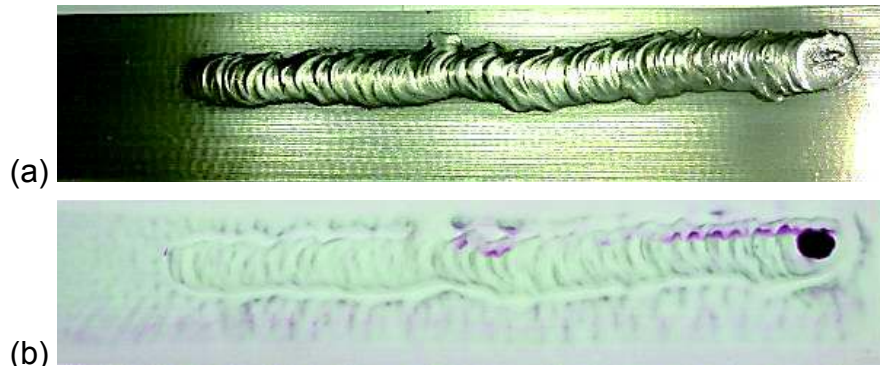


Figura 5.2 Resultados de ensayo de soldabilidad a 121 °C

(Fuente propia)

5.1.1.3 Resultados a 260 °C

En el cordón que se realizó a ésta temperatura no se observa defectos en la inspección visual, sin embargo al aplicar tintas penetrantes se logra reconocer fisuras al inicio del cordón, es por este motivo que se la considera como T_x para el desarrollo de las pruebas siguientes. Al final del cordón también se evidencia un cráter. Los defectos encontrados se encuentran señalados con un círculo rojo, la figura 5.3 (c) amplifica la visión de los mismos.

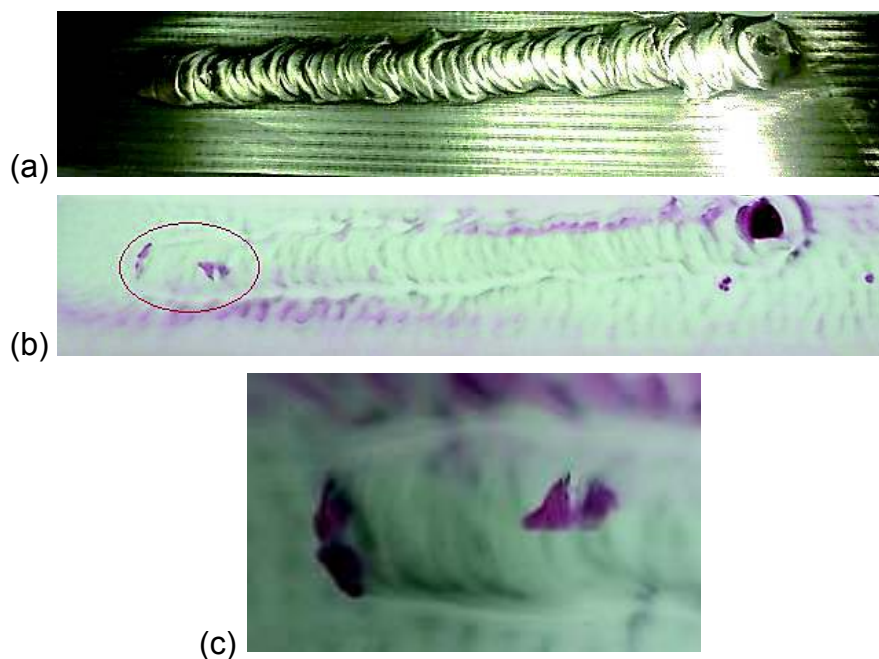


Figura 5.3 Resultados de ensayo de soldabilidad a 260 °C

(Fuente propia)

5.1.1.4 Resultados a 400 °C

En el cordón que se realizó a ésta temperatura no se aprecian defectos en la inspección visual ni al aplicar tintas penetrantes, lo dicho se observa en la figura 5.4.

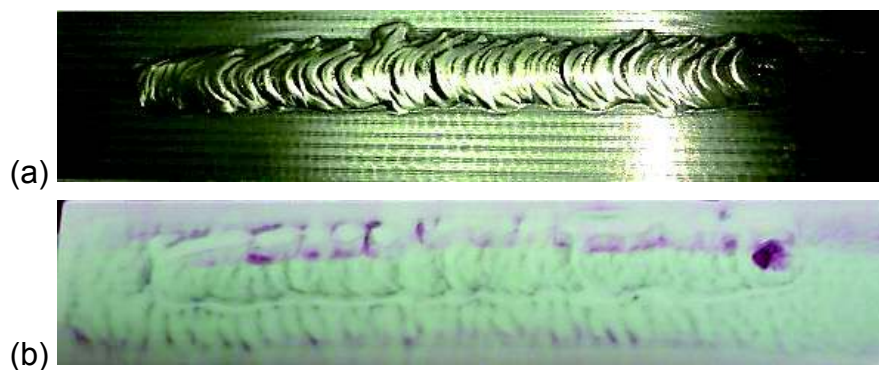


Figura 5.4 Resultados de ensayo de soldabilidad a 400 °C

(Fuente propia)

5.1.1.5 Resultados a 540 °C

En el cordón de soldadura que se realizó a ésta temperatura no se aprecian defectos en la inspección visual ni al aplicar tintas penetrantes. El color rojizo de la probeta se debe a una mala limpieza del penetrante.

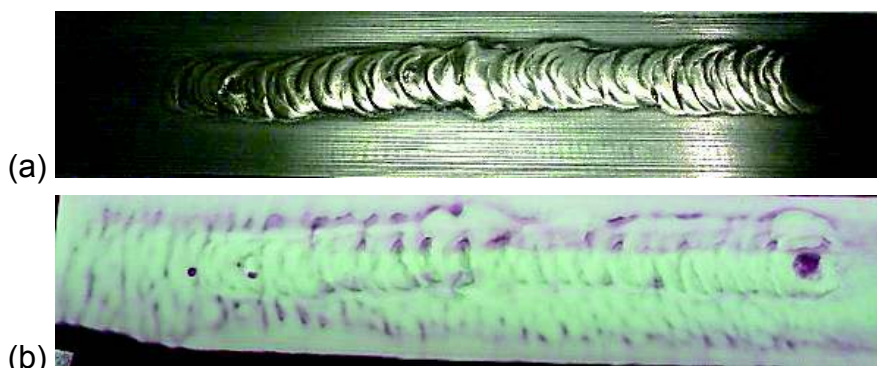


Figura 5.5 Resultados de ensayo de soldabilidad a 540 °C

(Fuente propia)

5.1.1.6 Análisis final de resultados de la primera serie

Después de realizar la inspección visual y aplicar el método de tintas penetrantes, se determinó que las probetas soldadas a temperatura ambiente y con precalentamiento de 121°C, 400 °C y 540 °C, no presentan discontinuidades o defectos que influyan en el proceso. La probeta precalentada a 240 °C fue la única que presentó fisuras y se denominó como T_x .

5.1.2 RESULTADOS DE LA SEGUNDA SERIE

En la segunda serie las temperaturas utilizadas para precalentamiento fueron: 288 °C, 316 °C, 343 °C y 371 °C; los cordones de soldadura realizados con las temperaturas mencionadas anteriormente deben ser inspeccionados después de 24 horas visualmente (a) y con el método de tintas penetrantes (b) como se indica en cada figura, con el fin de encontrar la temperatura a la cual se presentan agrietamientos, dicha temperatura se denominará T_y .

5.1.2.1 Resultados a 288 °C

En el cordón realizado a ésta temperatura no se aprecian defectos en la inspección visual y tampoco se evidencia discontinuidades al aplicar el método de tintas penetrantes como se puede observar en la siguiente figura.

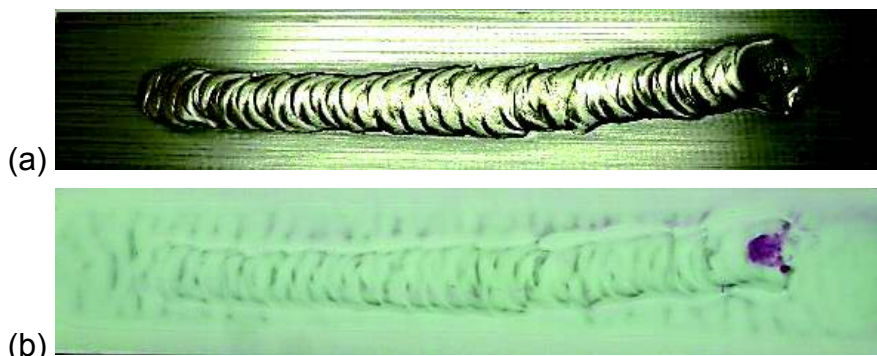


Figura 5.6 Resultados de ensayo de soldabilidad a 288 °C

(Fuente propia)

5.1.2.2 Resultados a 316 °C

El cordón realizado a ésta temperatura no evidencia defectos en la inspección visual pero al aplicar el método de tintas penetrantes se observa una fisura al inicio del cordón, éste defecto está señalado con un círculo rojo en la figura 5.7 (b) y se lo puede observar de mejor manera en la ampliación de figura 5.7 (c). Aplicando el criterio de presencia de defectos se toma ésta temperatura como T_y . Al final del cordón existe la presencia de un cráter común en todos los cordones de soldadura.

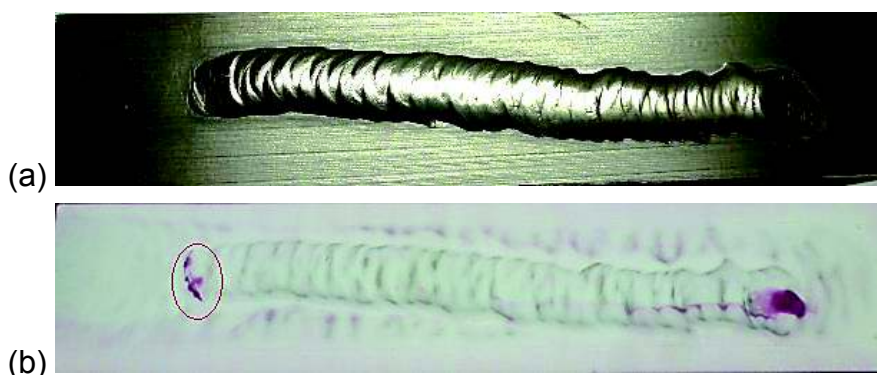


Figura 5.7 Resultados de ensayo de soldabilidad a 316 °C

(Fuente propia)



Figura 5.8 Ampliación del defecto

(Fuente propia)

5.1.2.3 Resultados a 343 °C

En el cordón realizado a ésta temperatura no se evidencian discontinuidades en la inspección visual y tampoco se observa defectos al aplicar el método de tintas penetrantes.

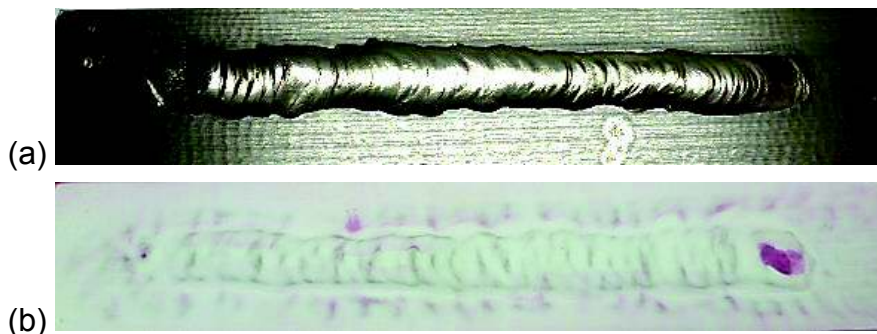


Figura 5.9 Resultados de ensayo de soldabilidad a 343 °C

(Fuente propia)

5.1.2.4 Resultados a 371 °C

En el cordón que se realizó a ésta temperatura no se evidencian discontinuidades en la inspección visual y tampoco se observa defectos al aplicar el método de tintas penetrantes, como se puede observar en la figura 5.10.

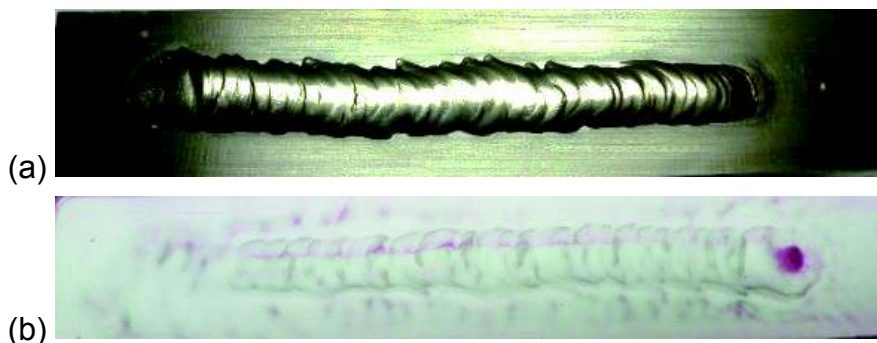


Figura 5.10 Resultados de ensayo de soldabilidad a 371 °C

(Fuente propia)

5.1.2.5 Análisis final de resultados de la segunda serie

Después de realizar la inspección visual y aplicar el método de tintas penetrantes, se determinó que las probetas soldadas con precalentamiento a 288 °C, 343 °C y 371 °C, no presentan discontinuidades o defectos que influyan en el proceso. La probeta precalentada a 316 °C fue la única que presentó fisuras y se denominó como T_y.

5.1.3 RESULTADOS DE LA TERCERA SERIE

En la tercera serie las temperaturas utilizadas para precalentamiento fueron: 322 °C, 327 °C, 333 °C y 338 °C; los cordones de soldadura realizados con las temperaturas mencionadas anteriormente deben ser inspeccionados después de 24 horas visualmente (a) y con el método de tintas penetrantes (b) como se indica en cada figura, con el fin de encontrar la temperatura a la cual no se presenten fisuras o discontinuidades, ésta temperatura será tomada como la temperatura de precalentamiento final para las placas a soldar.

5.1.3.1 Resultados a 322 °C

En el cordón realizado a ésta temperatura no se evidencian discontinuidades en la inspección visual y tampoco se observa defectos al aplicar el método de tintas penetrantes.

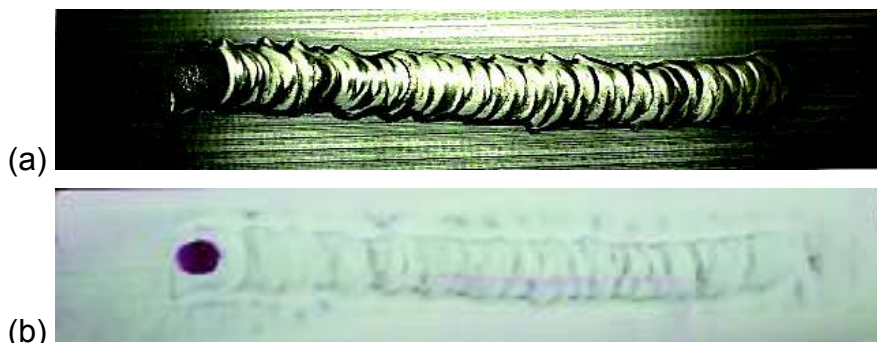


Figura 5.11 Resultados de ensayo de soldabilidad a 322 °C

(Fuente propia)

5.1.3.2 Resultados a 327 °C

En el cordón realizado a ésta temperatura no se evidencian discontinuidades en la inspección visual y tampoco se observa defectos al aplicar el método de tintas penetrantes, además posee mejor uniformidad y estabilidad del arco, por lo cual se define ésta temperatura como la ideal para el proceso de precalentamiento de las placas que se desea soldar, lo dicho anteriormente se puede observar en la figura 5.12.

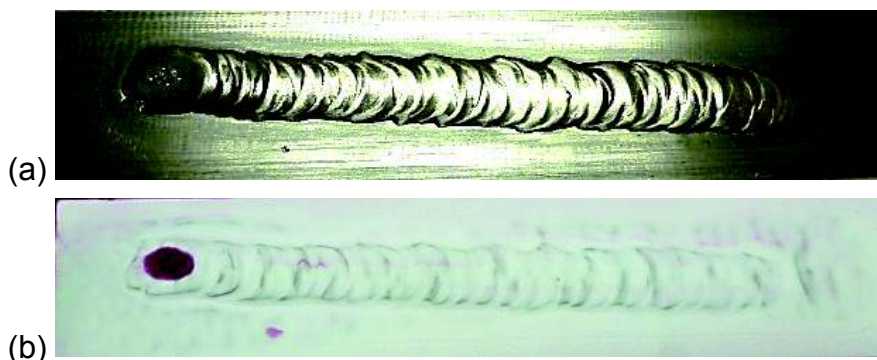


Figura 5.12 Resultados de ensayo de soldabilidad a 327 °C

(Fuente propia)

5.1.3.3 Resultados a 333 °C

En el cordón realizado a ésta temperatura no se observan defectos en la inspección visual y tampoco se evidencian discontinuidades al aplicar el método de tintas penetrantes.

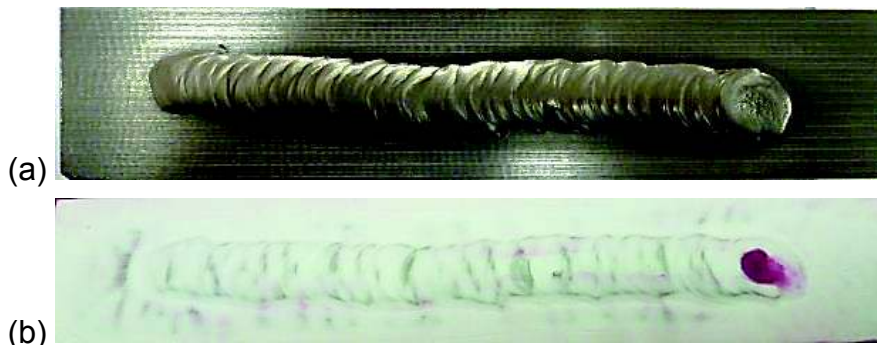


Figura 5.13 Resultados de ensayo de soldabilidad a 323 °C

(Fuente propia)

5.1.3.4 Resultados a 338 °C

En el cordón realizado a ésta temperatura no se evidencian discontinuidades en la inspección visual y tampoco se observa defectos al aplicar el método de tintas penetrantes.

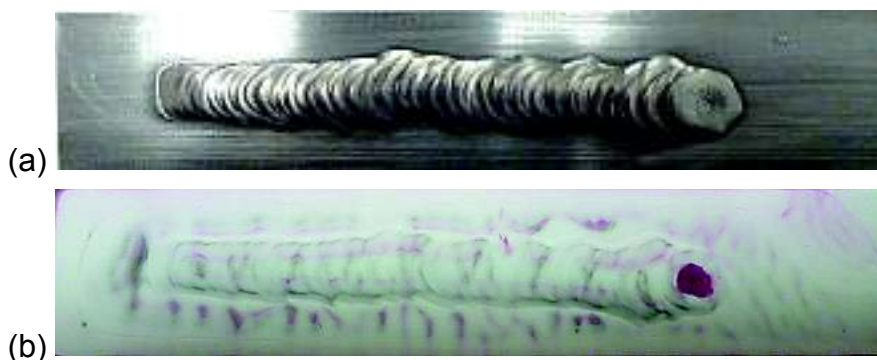


Figura 5.14 Resultados de ensayo de soldabilidad a 338 °C

(Fuente propia)

5.1.3.5 Análisis final de resultados de la tercera serie

Después de realizar la inspección visual y aplicar el método de tintas penetrantes, se determinó que ninguna de las probetas soldadas presenta discontinuidades o fisuras, por lo cual aplicando el criterio de homogeneidad y estabilidad del arco se procede a determinar que la temperatura de 327 °C es la escogida para el precalentamiento de las placas a soldar. Al no presentarse defectos en los cordones en ésta serie se puede asegurar la calidad de la soldadura.

5.1.4 RESULTADOS DEL CORDÓN DE SOLDADURA DE LAS PLACAS

Después de terminar el proceso de soldadura se procedió a limpiar la unión formada por las placas para poder realizar una inspección visual y posteriormente aplicar el método de tintas penetrantes. El cordón de soldadura que une las placas presenta porosidades al inicio y al final. La figura 5.15 (b) evidencia los defectos señalados en un círculo rojo, los cuales están ampliificados en la imagen 5.16 (a) y (b), los defectos señalados en verde son propios del material base.

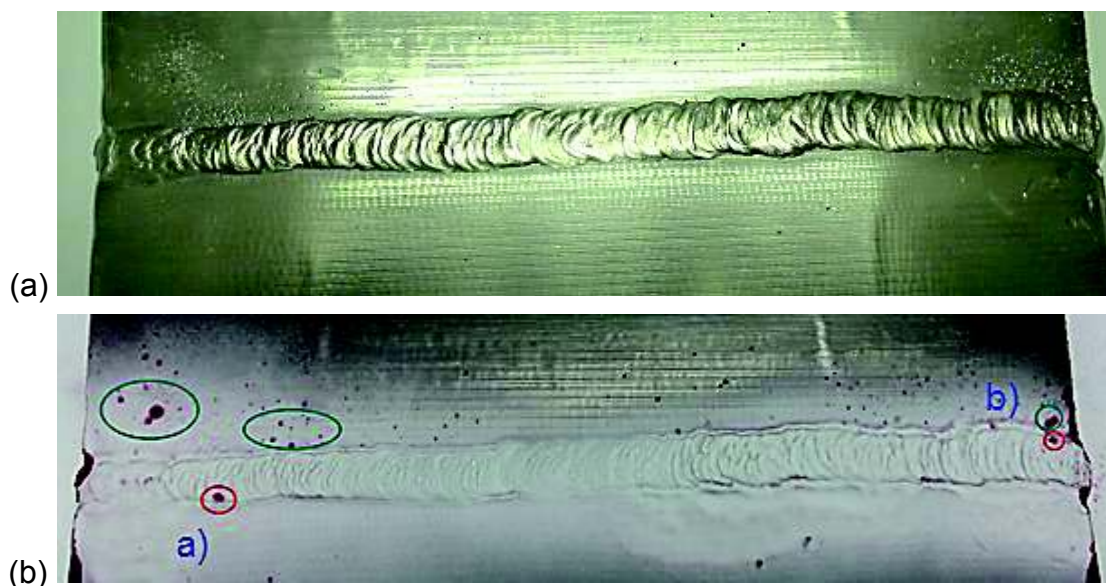


Figura 5.15 Resultados del cordón de soldadura en las placas

(a) Inspección Visual. (b) Inspección con tintas penetrantes

(Fuente propia)

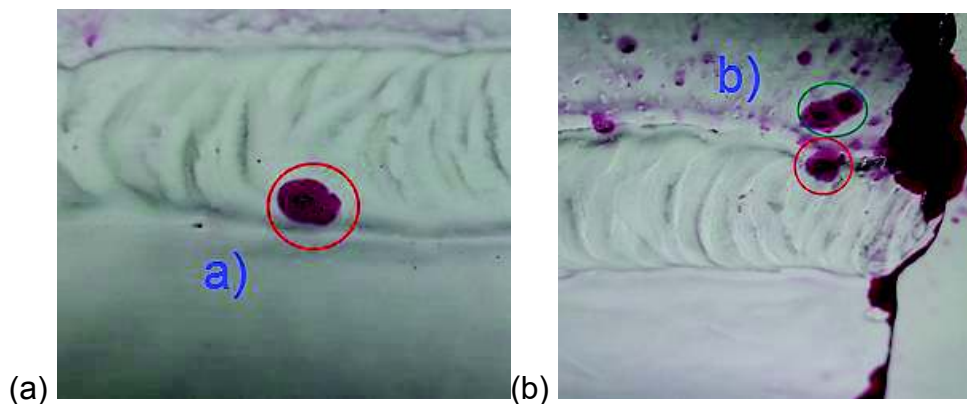


Figura 5.16 (a), (b) Ampliación de los defectos del cordón de soldadura en las placas

(Fuente propia)

5.2 RESULTADOS DE ENSAYOS DESTRUCTIVOS

La tenacidad a la fractura de la fundición nodular fue evaluada en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional. El informe técnico facilitado indica los resultados obtenidos para el ensayo de tracción, doblado de cara y raíz. El informe se encuentra en el ANEXO 5.

5.2.1 ENSAYO DE TRACCIÓN

De acuerdo a la norma ASTM A 536-84 (2014), los requerimientos de tensión para la fundición nodular de grado 65-45-12, son los siguientes:

Tabla 5.1 Requerimientos de tensión ⁹⁹

GRADO 65-45-12	
Resistencia a la tracción mínimo [MPa]	448
Límite de fluencia mínimo [MPa]	310
Elongación en 50 mm mínimo (%)	12

⁹⁹ ASTM A536-84(2014) Standard Specification for Ductile Iron Castings, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014,

Debido a que los ensayos se realizaron en la máquina universal de ensayos descrita en el capítulo anterior, no se cuenta con un gráfico de la curva esfuerzo-deformación mediante datos de computadora. La fundición nodular es un material frágil que no tiene un punto de fluencia bien definido su resistencia es menor a la del acero, los resultados de cada probeta se indicaran a continuación.

5.2.1.1 Probeta T₁

Los resultados obtenidos muestran un valor de resistencia a la tracción máxima de 466,9 [MPa], superando el valor mínimo establecido por la ASTM A 536-84 (2014), que se especifica en la tabla 5.1. Presenta un porcentaje de elongación de 5,3% en 50 [mm] que es menor al indicado en la norma citada anteriormente (12%); el resultado equivale a 2,65 [mm] y evidencia una rotura frágil de la fundición nodular de grado 65-45-12. La figura 5.17 muestra la rotura de la probeta T₁.



Figura 5.17 Rotura de probeta T₁

(Fuente propia)

El valor de resistencia máxima obtenido demuestra que el proceso de soldadura GTAW aplicado a la fundición nodular en la probeta T₁ garantiza una buena soldabilidad, debido a que la rotura se presenta fuera del cordón de soldadura; sin embargo al presentarse en la ZAC evidencia cambios micro-estructurales que influyen en la dureza, lo dicho se puede observar en la figura 5.18 con las medidas respectivas.



Figura 5.18 Medidas en la rotura de la probeta T_1

(Fuente propia)



Figura 5.19 Fractura de la probeta T_1

(Fuente propia)

De acuerdo a la figura 5.20 se determina que la fractura es frágil, presenta superficies brillosas y lisas en la zona 1 y zona 2, no presenta deformación plástica en la parte superior. En la superficie se aprecia cierta cantidad de poros en el material base producidos durante el proceso de fundición de las placas, estos defectos suelen ocurrir debido al espesor pequeño de la fundición. Están señalados en la figura 5.20 (b) con círculos rojos.

En la zona 2 se puede observar marcas de río que convergen en un punto indicando el inicio de la fractura. Este tipo de superficie de fractura se da por la rotura brusca del material lo que permite la formación de planos de clivaje. Se observa que el inicio de la fractura y de las marcas de río son en la parte superior de la probeta.

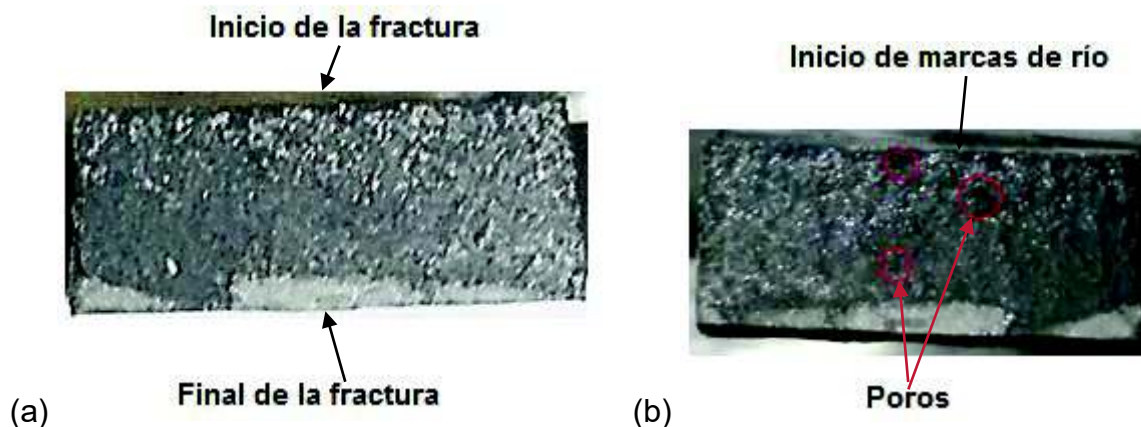


Figura 5.20 (a) Zona 1, parte derecha del cordón, parte inferior afectada en la raíz

(b) Zona 2, parte izquierda del cordón, parte inferior afectada en la raíz

(Fuente propia)

5.2.1.2 Probeta T₂

Los resultados obtenidos muestran un valor de resistencia a la tracción máxima de 480,9 [MPa], superando el valor mínimo establecido por la norma ASTM A 536-84 (2014), que se especifica en la tabla 5.1. Presenta un porcentaje de elongación de 5,8% en 50 [mm] que es menor al indicado en la norma mencionada anteriormente (12%). El resultado equivale a 2,9 [mm], evidenciando una rotura frágil pero mostrando mayor ductilidad con respecto a la anterior probeta de fundición nodular grado 65 - 45 -12. La figura 5.21 indica la rotura de la probeta en el ensayo de tracción.



Figura 5.21 Rotura de la probeta T₂

(Fuente propia)

El valor de resistencia máxima obtenido demuestra que el proceso de soldadura GTAW aplicado a la fundición nodular en la probeta T_2 garantiza una buena soldabilidad, debido a que la rotura se presenta fuera del cordón de soldadura; sin embargo al presentarse en la ZAC evidencia cambios micro-estructurales que influyen en la dureza, como se indica en la figura 5.22.

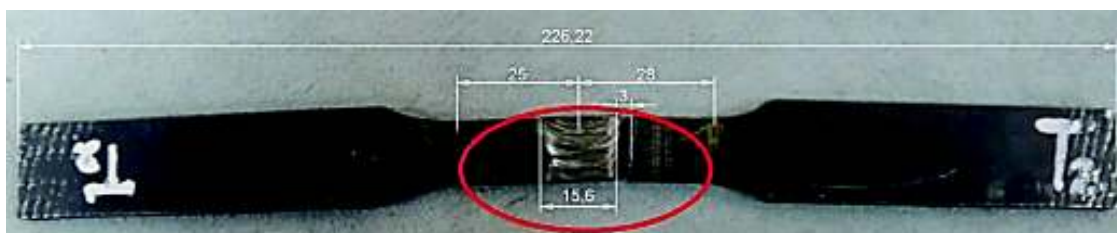


Figura 5.22 Rotura de la probeta T_2

(Fuente propia)



Figura 5.23 Fractura de la probeta T_2

(Fuente propia)

De acuerdo a la figura 5.24 se observa que la fractura es frágil, se visualiza superficies brillantes y lisas en ambas zonas de la probeta T_2 . Además se puede apreciar marcas de río que convergen en el punto superior que se extienden de forma longitudinal y transversal por el material, permitiendo la formación de planos de clivaje, el inicio de las marcas de río se señala con un círculo rojo en la figura 5.24 (a).

La parte superior presenta cierta ductilidad debido que es la zona de fusión entre el material base y el cordón de soldadura.

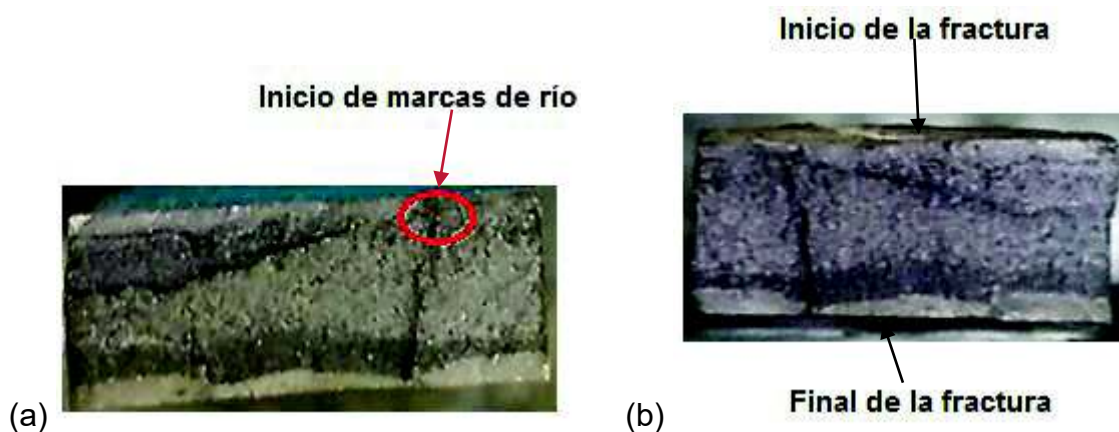


Figura 5.24 Superficies de rotura de la probeta T_2

- (a) Zona 1, parte derecha y superior del cordón, afectada en la sobre monta
 (b) Zona 2, parte izquierda y superior del cordón, afectada en la sobre monta

(Fuente propia)

5.2.2 ENSAYO DE DOBLADO

Dado que el material soldado es frágil, no se completó el doblado como se suele ser en el acero, sino que se midió el ángulo al cual empieza la fisura en el material, el inicio de la fisura se muestra en la figura 5.25.



Figura 5.25 Inicio de fisura en la probeta

(Fuente propia)

5.2.2.1 Probeta Dc

La probeta de doblado de cara no presentó facilidad de doblado. Se registró una fisura inicial en un ángulo de 150° entre los extremos, tal como lo muestra la figura 5.26.

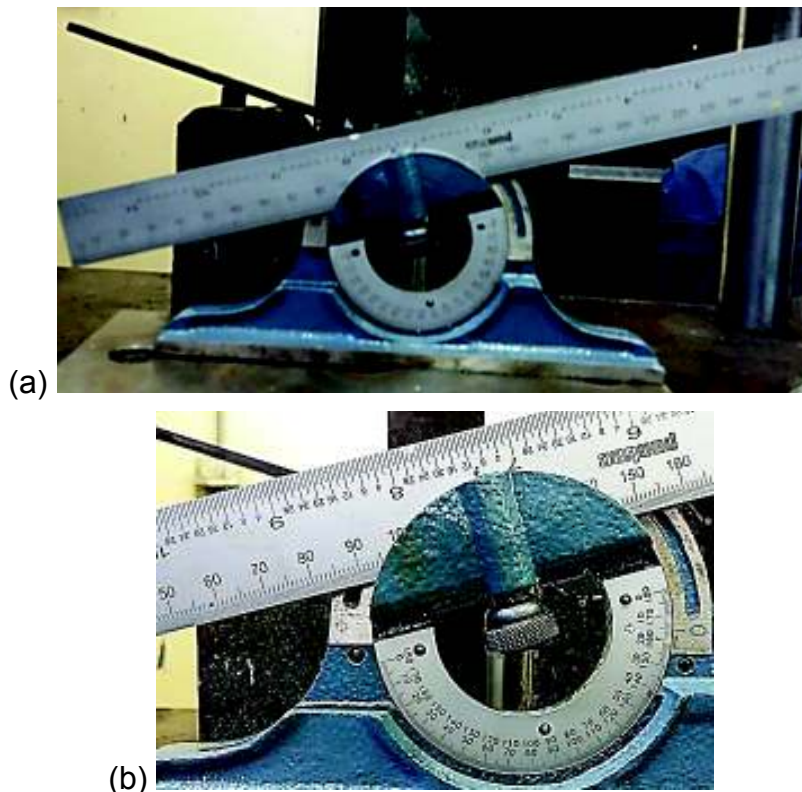


Figura 5.26 (a) Ángulo de doblado de probeta Dc

(b) Ampliación y señalización del ángulo de fisura

(Fuente propia)

La zona de rotura corresponde al área de fusión del material base y material de aporte de soldadura como se puede observar en la figura 5.27. La rotura se debe a la fragilidad que presenta la ZAC, debido a que existe aumento de dureza ocasionado por un cambio microestructural con presencia de cementita; lo dicho se corrobora en la tabla 5.5 con respecto a dureza y la tabla 5.9 con respecto a la microestructura.

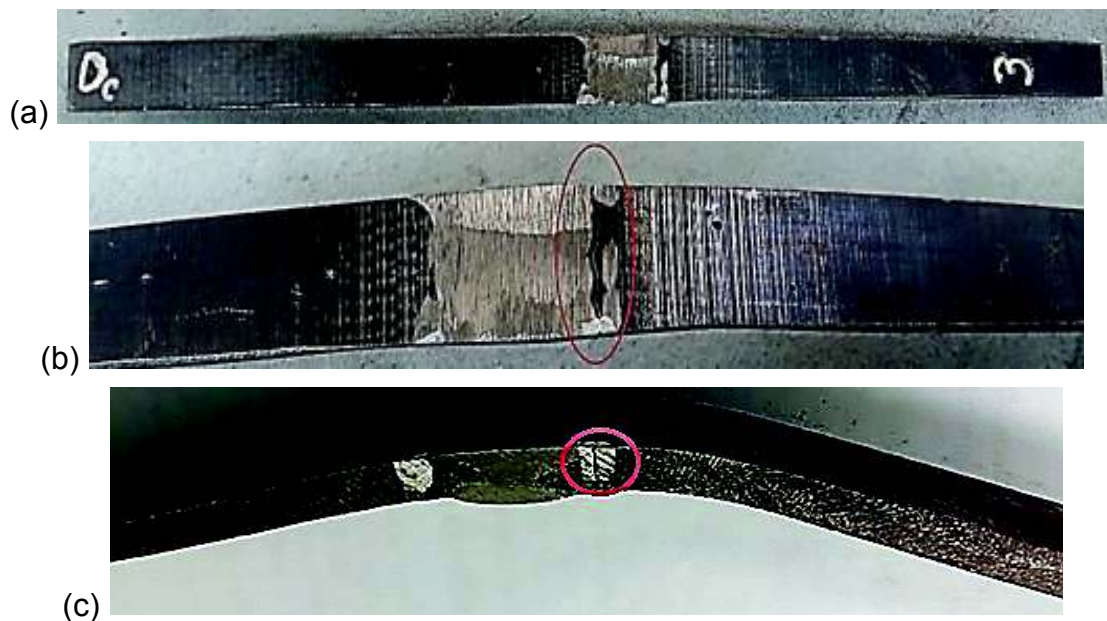


Figura 5.27 Fisura propagada a lo largo de la zona de fusión en la probeta D_c

(a) Vista superior de la fisura en la cara. (b) Ampliación de la zona de fisura

(c) Vista lateral de la propagación de la fisura

(Fuente propia)

5.2.2.2 Probeta D_R

Dado que se trata de un material frágil, no presentó facilidad en el ensayo de doblado de raíz. La figura 5.28 muestra que la probeta de doblado de raíz presenta una fisura inicial en un ángulo de 142° entre los extremos.

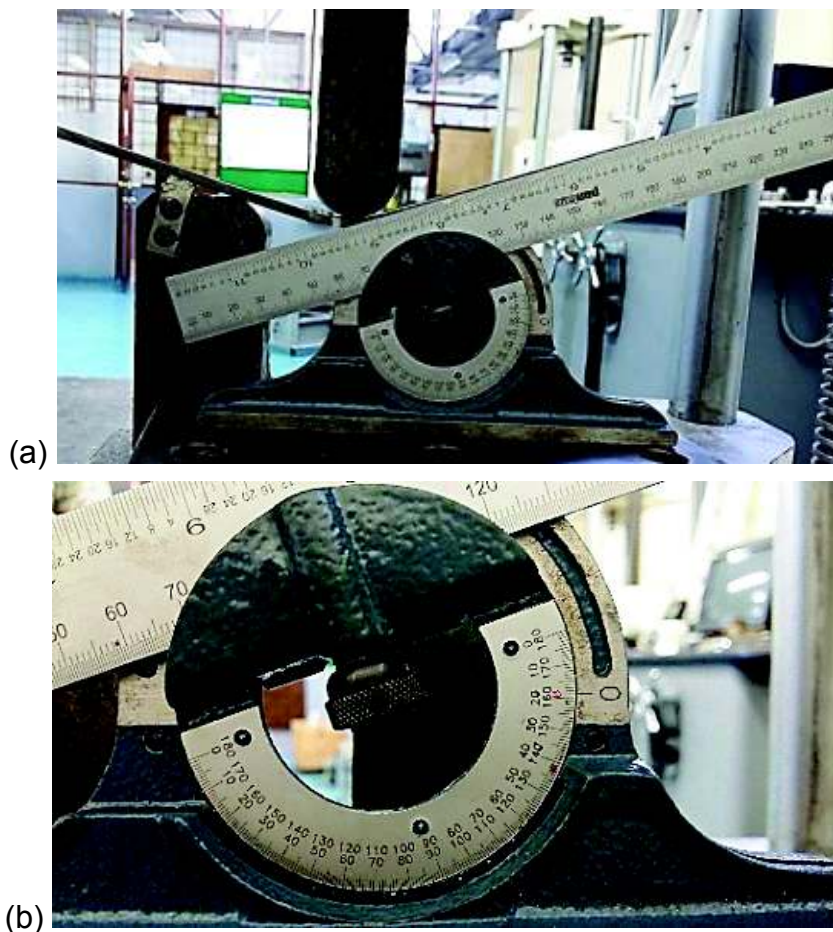


Figura 5.28 (a) Ángulo de doblado de probeta D_R . (b) Ampliación y señalización del ángulo de fisura.

(Fuente propia)

La zona de rotura corresponde al área de soldadura entre el material base y material de aporte de soldadura, esto se muestra en la figura 5.29. La rotura se debe a la fragilidad que presenta la ZAC, debido al aumento de dureza ocasionado por un cambio microestructural del material, el cual presenta cementita; lo dicho se corrobora en la tabla 5.5 con respecto a dureza y la tabla 5.9 con respecto a la microestructura.

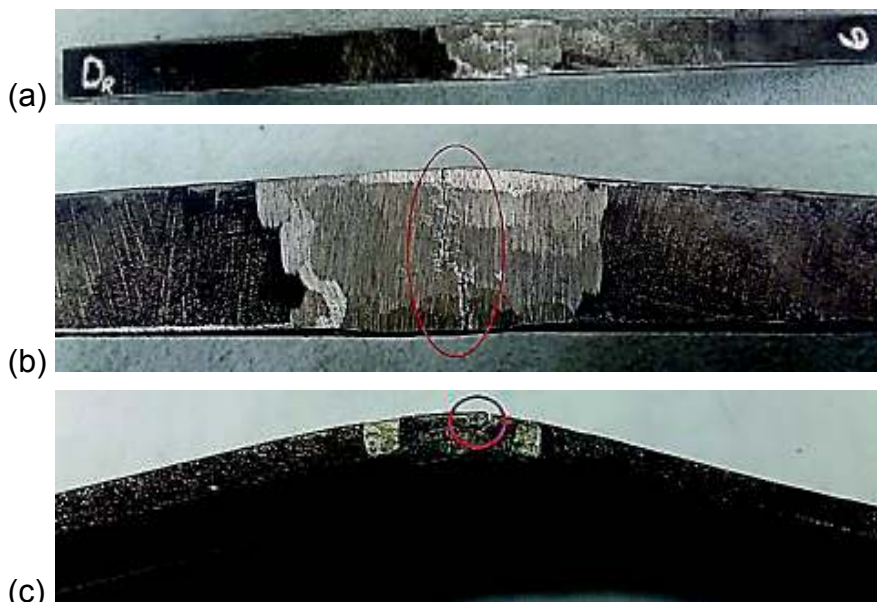


Figura 5.29 Fisura propagada en la raíz del cordón de soldadura en la probeta D_R

(a) Vista superior de la fisura en la raíz. (b) Ampliación de la zona de fisura.

(c) Vista lateral de la propagación de la fisura.

(Fuente propia)

5.3 RESULTADOS DE METALOGRAFÍA

5.3.1 MACROGRAFÍA

En la macrografía realizada a la probeta M_1 con ampliación de 0,5X equivalente a 2 [mm] de ampliación se observa las tres zonas principales: Zona afectada por el calor (ZAC), Zona de fusión y Zona de material de aporte. Además se puede observar un poro atrapado entre la zona de fusión y el depósito de material de aporte. Las zonas se indican en la figura 5.30 y corresponden a ambos lados del cordón.

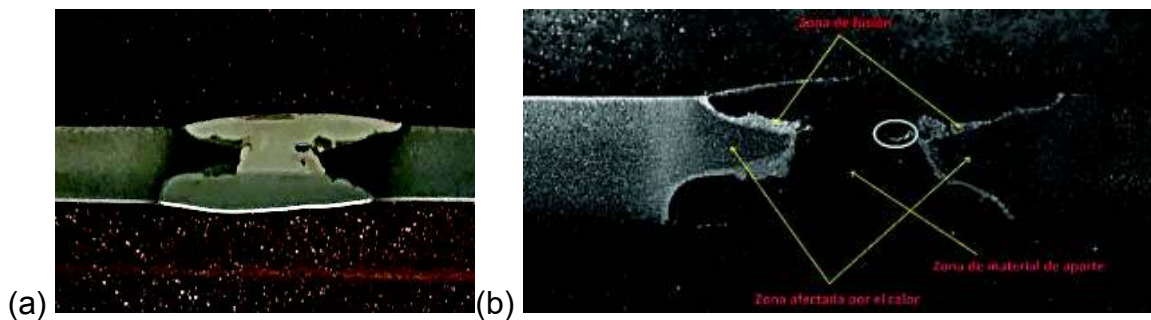


Figura 5.30 Zonas en la ZAC

(Fuente propia)

En la figura 5.31 se distinguen los pases realizados durante el proceso de soldadura. En el segundo pase se observa la presencia de un poro, que se define como una inclusión no metálica y puede estar dada por: inclusiones de escoria, óxidos metálicos, silicatos o carbón. Posiblemente el poro es el resultado de una deficiente limpieza del maquinado entre los pases de soldadura.



Figura 5.31 Pases de soldadura

(Fuente propia)

La zona de soldadura corresponde un área transversal de 63,72 [mm²] y el poro encontrado corresponde un diámetro mayor de 1,04 [mm], indicado en la figura 5.32.

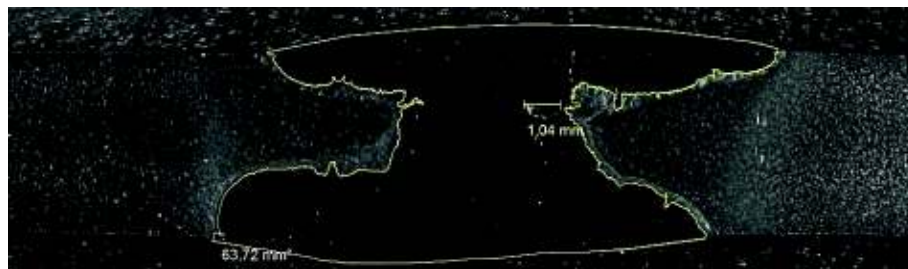


Figura 5.32 Área del cordón de soldadura

(Fuente propia)

La zona afectada por el calor (ZAC) corresponde un área total de 30,35 [mm²], tomando en cuenta la zona izquierda y derecha. La figura 5.33 muestra el área de la zona afectada por el calor en la probeta.

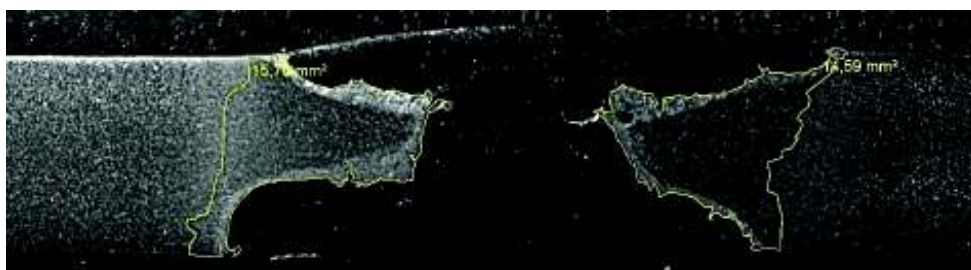


Figura 5.33 Área de la ZAC en cada región del cordón de soldadura

(Fuente propia)

5.3.2 DUREZA

En el ensayo realizado a la probeta M₁. Para el metal base, se utilizó un indentador [HB] tomando en cuenta la dureza estándar de la fundición nodular de grado 65-45-12 es 95 [HRB].

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla, de acuerdo a la selección de los puntos de indentación especificados en la sección 4.8.3.

Tabla 5.2 Resultados del barrido de dureza en el metal base

<i>Punto de prueba (Pi)</i>	1	2	3	4	5	6	7
<i>Dureza [HRB]</i>	91	93	92	95	95	95	96
<i>Dureza [HB]</i>	187	198	193	209	209	209	214

(Fuente propia)

De los siete puntos se eliminó el valor más bajo y el más alto para considerar la dureza media en el metal base, de acuerdo a la ecuación 5.1 para obtener la media de los valores de prueba.

$$\bar{D} = \sum_{i=1}^n \frac{Pi}{n} \quad (\text{Ec. 5.1})$$

$$\bar{D} = \sum_{i=1}^n \frac{198 + 193 + 209 + 209 + 209}{5}$$

$$\bar{D} = 204 \text{ [HB]}$$

La dureza obtenida se encuentra dentro del rango de dureza nominal del material, (170-207 HB), que se especifica en la tabla 1.2. Lo que da a entender que no hubo transformación de estructura cristalina durante el proceso realizado (mecanizado y soldadura).

En la zona del metal de soldadura o metal de aporte, se utilizó el indentador [HRB] tomando en cuenta la dureza estándar del electrodo Ni-55 utilizado durante el proceso de soldadura que es de 94 [HRB]. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5.3 Resultados del barrido de dureza en el metal de aporte

<i>Punto de prueba (Pi)</i>	8	9	10	11	12
<i>Dureza [HRB]</i>	94	86	91	89	83
<i>Dureza [HB]</i>	204	166	187	178	157

(Fuente propia)

En el punto 8 que comprende la zona del primer pase se tiene mayor dureza, debido a la concentración de calor que se aporta al estar entre las capas de soldadura del segundo y el pase de refuerzo. Los puntos correspondientes al segundo y tercer pase muestran durezas similares. En el punto de prueba 11 y 12 que comprenden el lado izquierdo y derecho respectivamente del tercer pase se tiene una diferencia razonable de dureza que puede ser el resultado de un deficiente aporte de calor debido al movimiento de la torcha durante el proceso en el último pase.

En la interfaz o zona de fusión, se hizo un punto de prueba debido a que se trata de una zona de alta concentración de calor, por lo que al realizarse con indentador [HRB] el resultado fue erróneo, entonces se utilizó un indentador [HRC] para obtener valores de dureza más altos. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5.4 Resultados del barrido de dureza en la zona de fusión

<i>Punto de prueba (Pi)</i>	13	14	15	16
<i>Dureza [HRC]</i>	21	22	29	23
<i>Dureza [HB]</i>	231	238	278	242

(Fuente propia)

Se puede observar que existe mayor dureza en la zona inferior del cordón, en particular en la parte izquierda, correspondiente a la sección entre el primer pase de soldadura y el pase de refuerzo, la cual está expuesta a altas temperaturas y cambios micro-estructurales.

En la zona afectada por el calor (ZAC), se utilizó un indentador [HRC]. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5.5 Resultados del barrido de dureza en la ZAC

<i>Punto de prueba (Pi)</i>	17	18
<i>Dureza [HRC]</i>	29	27
<i>Dureza [HB]</i>	278	266

(Fuente propia)

Se puede observar que existe mayor dureza, debido a la concentración de calor que se da durante el proceso de soldadura; la geometría del cordón influye en la disipación del calor que se da en esta zona por ser de menor área.

5.3.3 MICROGRAFÍA

Las muestras que se usaron fueron atacadas con nital al 10%, se analizó una probeta, dejando la otra libre para ensayos macroscópicos y medición de dureza.

5.3.3.1 Análisis de tamaño y tipo de grafito

Haciendo una comparación entre los resultados obtenidos y las fotografías de la norma ASTM A-247, se puede evidenciar que el grafito es de tamaño 5 y 6; el tipo de grafito es I y III. Todas las comparaciones están hechas con imágenes aumentadas a 100X.

Tabla 5.6 Comparación del tipo de grafito

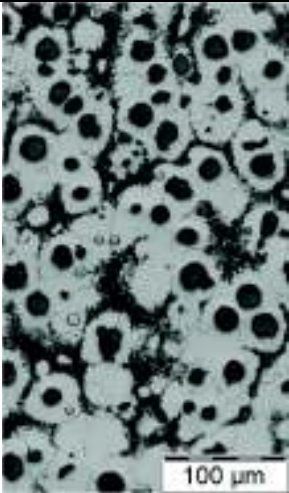
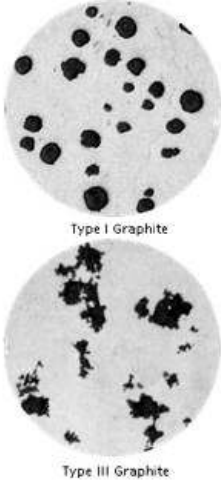
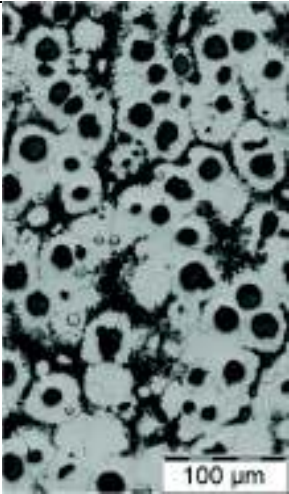
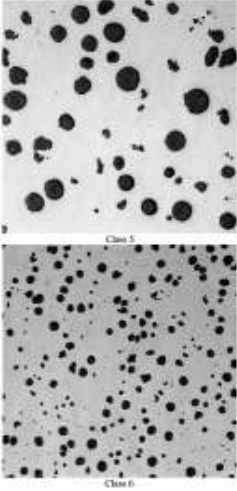
	
<p>Figura 5.34 Micrografía del material base a 100x. (Fuente propia)</p>	<p>Figura 5.35 Tipo de grafito¹⁰⁰</p>

Tabla 5.7 Comparación del tamaño de grafito

	
<p>Figura 5.36 Micrografía del material base a 100x (Fuente propia)</p>	<p>Figura 5.37 Tamaño de grafito¹⁰¹</p>

¹⁰⁰ ASTM A 247, (2016), Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings, 3.

5.3.3.2 Diferentes zonas presentes en la micrografía

Al realizar el análisis metalográfico se puede observar las diferentes zonas que conforman el material, la zona del material base (MB), la zona afectada por el calor (ZAC), la zona de fusión (ZF) que tiene formaciones dendríticas y la zona del cordón de soldadura (ZCS). Las zonas presentes se pueden distinguir en la figura 5.38.

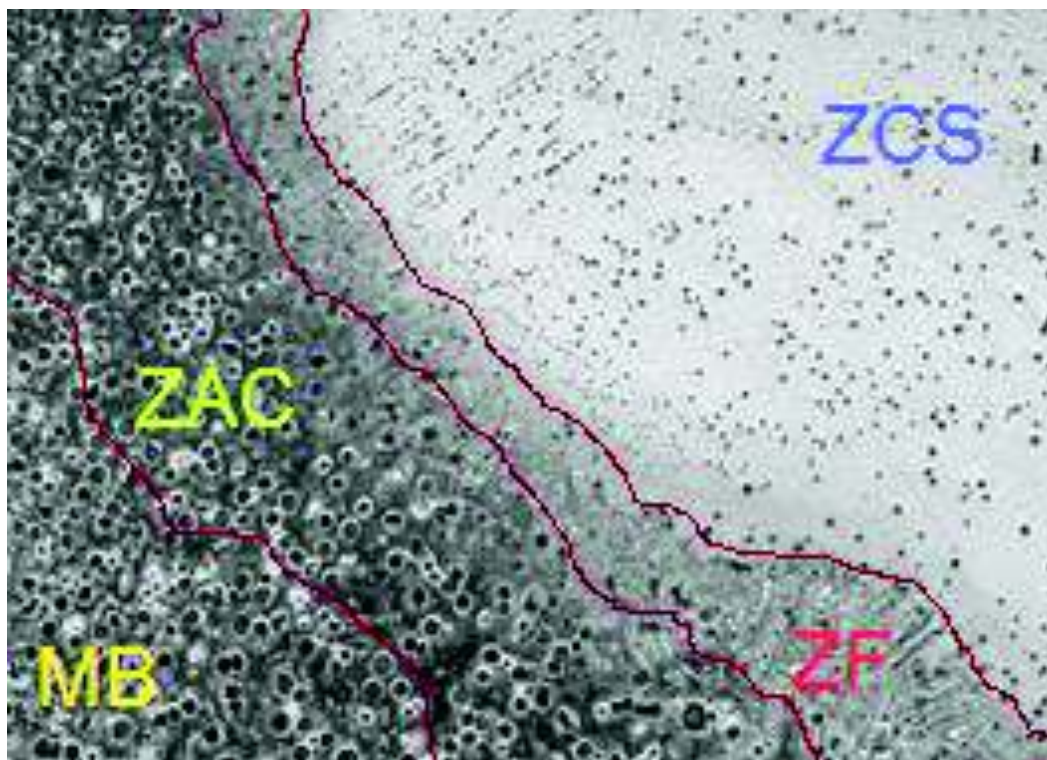


Figura 5.38 Diferentes zonas del material base a 100x.

(Fuente propia)

5.3.3.3 Tipo de matriz presente en la micrografía

Al realizar la comparación entre los resultados obtenidos de la metalografía y las fotografías del ASM HANDBOOK, se puede observar que la matriz presente en el material base es Perlítica-Ferrítica. Todas las comparaciones están hechas con imágenes aumentadas a 100X y se presentan en la figura 5.39 y figura 5.40.

Tabla 5.8 Comparación del tipo de matriz en el material base

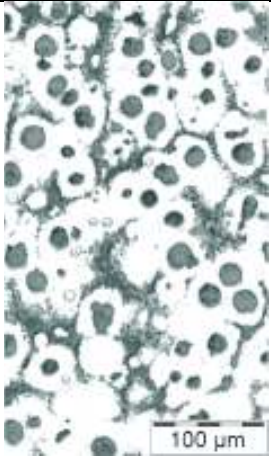
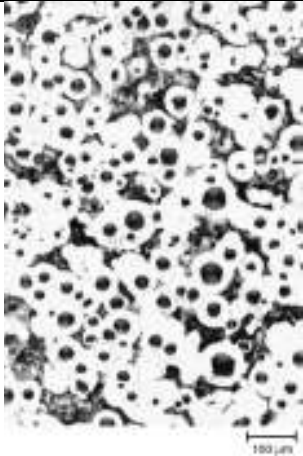
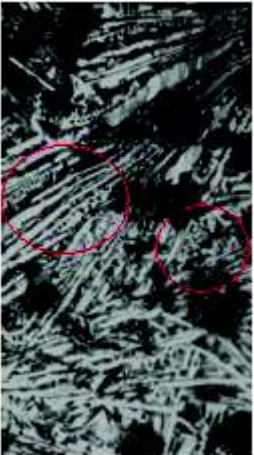

	
<p>Figura 5.39 Micrografía del material base a 100x. (Fuente propia)</p>	<p>Figura 5.40 Tipo de matriz¹⁰¹</p>

Tabla 5.9 Comparación del tipo de matriz en la zona de fusión

	
<p>Figura 5.41 Micrografía de la zona de fusión a 100x. (Fuente propia)</p>	<p>Figura 5.42 Matriz de fundición blanca¹⁰²</p>

¹⁰¹ ASM HANDBOOK, (2004), Metallography and Microstructures, (9), 1368.

¹⁰² Castro, G. (s/f). Fundiciones. Departamento de Ingeniería Mecánica. 7.

En la microestructura de la zona de fusión se puede evidenciar una matriz perlítica en descomposición con presencia de cementita. La cementita contribuye al aumento de dureza y fragilidad del material y es producido por un enfriamiento brusco, causado probablemente por la diferencia de temperatura entre la placa soldada y la arena sílice en la cual se enfrió. El enfriamiento produce una micro-estructura inestable que se asemeja a la micro-estructura de una fundición blanca parcial, que se observan en las zonas encerradas en un círculo rojo en la figura 5.41.

5.3.4 ANÁLISIS FINAL

La temperatura de precalentamiento experimental de 327 °C aplicada a las placas de fundición, corrobora que es una temperatura óptima para obtener una soldabilidad aceptable. El valor máximo del resultado del ensayo de tracción es 480,9 [MPa] y supera el valor de resistencia a la tracción de la norma cuyo valor es 448 [MPa], lo cual es aceptable; así mismo el ensayo de doblado indica que la fractura se produce en la zona afectada por el calor que tiene una dureza superior con respecto a la dureza del metal base y a la dureza del material de aporte. La microestructura de la zona afectada por el calor indica presencia de cementita.

Durante el proceso de soldadura al realizar el cordón de raíz, con el paso de la amoladora y la grata, se produjo un cambio en la geometría de la junta; lo cual provoco que los pases superiores y el pase de raíz estén separados por el material base con área reducida, ésta área sufrió una concentración de calor y debido a esto se produjo la descomposición de la matriz ferrítica - perlítica.

Estos resultados ayudan a mejorar el conocimiento acerca de la soldadura en fundiciones y crean un precedente para el uso de este proceso para usarlo en mantenimiento o reparación de elementos de hierro nodular.

CAPÍTULO 6

6 CONSIDERACIONES PARA LA ELABORACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

6.1 PROCEDIMIENTO

Para soldar planchas con espesor menor a 5 [mm] se requiere realizar ciertos procesos que permitan obtener con exactitud las dimensiones requeridas.

6.1.1 MAQUINADO DE PROBETAS

- Tomar las medidas de las dimensiones de la pieza en bruto, para conocer la cantidad de material a desbastar.
- Escoger la máquina-herramienta a utilizar para reducir las dimensiones del material (limadora, fresadora, torno, rectificadora).



Figura 6.1 Maquinado de material base

(Fuente propia)

- Maquinar las probetas hasta alcanzar las dimensiones especificadas en la sección 2.1.1 del capítulo 4.
- Realizar un agujero en uno de los extremos de las probetas tomando en cuenta las consideraciones detalladas en la sección 4.3 del capítulo 4.

6.1.2 PRECALENTAMIENTO DE PROBETAS

- Calcular el régimen de tratamiento térmico siguiendo las indicaciones en la sección 5.1 del capítulo 4.
- Con la ayuda de una entenalla, realizar el cordón de soldadura en una de la superficie de los tochos.



Figura 6.2 Cordón de soldadura en una de las caras del tocho

(Fuente propia)

- Controlar la temperatura con la ayuda de un termómetro o pirómetro.
- Dejar enfriar durante 24 horas el cordón de soldadura.
- Realizar una limpieza de la superficie con grata o cepillo metálico.
- Aplicar tintas penetrantes para determinar discontinuidades y defectos presentes en el cordón.



Figura 6.3 Aplicación de tinta penetrante y revelador

(Fuente propia)

- Después de terminar cada serie, escoger el dato de temperatura con el cual se va a trabajar en la siguiente serie.
- Determinar el valor de la temperatura de precalentamiento de las placas.

6.1.3 SOLDADURA DE PLACAS

- Configurar el equipo de soldadura según las especificaciones de la sección 3.9.
- Realizar el bisel de soldadura según la sección 5.5 del capítulo 4.
- Para evitar defectos de deformación soldar puentes o respaldos entre las placas y platinas en los extremos del espacio destinado al cordón de soldadura.



Figura 6.4 Colocación de respaldo y platinas

(Fuente propia)

- Fijar la placa a la mesa de trabajo con la ayuda de una prensa manual.
- Precalentar las placas a la temperatura calculada mediante un soplete a gas.



Figura 6.5 Calentamiento de la placa con soplete a gas

(Fuente propia)

- Controlar la temperatura con la ayuda de un termómetro o pirómetro.
- Después de cada pase realizar la limpieza del cordón usando la grata y la moladora.



Figura 6.6 Limpieza del cordón de soldadura con moladora

(Fuente propia)

- Una vez terminado todos los pases, dejar enfriar dentro del horno o en arena sílice.
- Apagar el equipo y cerrar la válvula de paso del gas.
- Después de 24 horas retirar los respaldos y platinas, verificando que no exista deformaciones.

6.1.4 INSPECCIÓN DE LA SOLDADURA

- Realizar una limpieza de la superficie con grata o cepillo metálico.
- Limpiar la superficie del cordón con una lija 240.
- Realizar la inspección visual del cordón de soldadura.
- Tomar las medidas de la sobremonta y de la raíz del cordón de soldadura.
- Aplicar la tinta penetrante en la superficie del cordón y esperar 10 min.
- Remover el exceso de tinta penetrante con un paño limpio hasta dejar la superficie limpia.



Figura 6.7 Remoción del exceso de tinta penetrante

(Fuente propia)

- Aplicar el revelador en la superficie del cordón y esperar 15 min.
- Observar si existen defectos y tomar fotografías de los mismos.
- Limpiar la superficie aplicando el removedor indicado para cada método.
- Diseñar el cupón de soldadura como se establece en la sección 5.5 del capítulo 4, para realizar las pruebas de soldabilidad y ensayos destructivos.

6.2 MATERIALES Y EQUIPOS

6.2.1 MATERIALES

- 13 Tochos de Fundición Nodular 65-45-12
- 2 placas de Fundición Nodular 65-45-12
- Calibrador pie de rey

- Cuchilla de acero rápido
- Piedra para rectificar (5" x 3/4" x 1 1/4")
- Broca (5 mm)
- Arco de sierra
- Lima manual
- Disco de desbaste 2 x 1/4" x 7/8"
- Entenalla
- Guaípe
- Equipo de Protección Personal
- Electrodo NiFe-CI (Ø4mm)
- Grata
- Prensa manual
- Tanque de gas de Argón
- Reverbero a gas
- Cepillo metálico
- Combo
- Soplete a gas
- Termómetro
- Pirómetro
- Termocupla tipo K
- Tintas penetrantes solubles en agua
- Carbón
- Arena sílice
- Cámara fotográfica
- Documentos de calificación (WPS, PQR, WPQ)
- Normas Técnicas
- Recipientes para carbón

6.2.2 EQUIPOS

- Limadora
- Torno
- Rectificadora
- Taladro vertical
- Horno eléctrico
- Soldadora TIG

6.3 PROBLEMAS COMÚNES DURANTE EL PROCESO DE SOLDADURA¹⁰³

6.3.1 ERRORES EN LAS CONEXIONES DE LA MÁQUINA

- **Defecto:** La máquina no enciende.

Causa(s): El enchufe de alimentación esta desconectado.

La máquina está conectada a una fuente de alimentación más baja de lo requerido.

Solución(es): Revisar que los cables estén correctamente conectados.

Verificar que las condiciones de las instalaciones correspondas a las requeridas por el equipo.

- **Defecto:** No hay voltaje de salida.

Causa(s): Existe daño en el circuito de alimentación.

Solución(es): Revisar el circuito principal y notifique al proveedor.

6.3.2 ERRORES EN EL PROCEDIMIENTO TIG

- **Defecto:** Dificultad para encender el arco.

Causa(s): Falta de gas de protección.

Electrodo contaminado o mojado.

¹⁰³ GAMMA. (s/f). Manual de Uso/Manutención. *Soldadora TIG 160 Inverter*. 12 – 13.

Solución(es): Revisar la válvula de paso de gas protector.

Mantener los electrodos en un lugar seco.

- **Defecto:** No hay flujo de gas.

Causa(s): La válvula del cilindro está cerrada o hay poco gas.

Algo traba la válvula.

La válvula está dañada.

Solución(es): Abra totalmente la válvula o cambie el cilindro

Retire la obstrucción de la válvula.

Cambie la válvula.

- **Defecto:** El electrodo se consumen rápidamente.

Causa(s): La corriente es demasiada alta para el diámetro del electrodo.

Solución(es): Escoger correctamente el diámetro del electrodo de acuerdo al espesor del material.

- **Defecto:** El arco se desvía.

Causa(s): El electrodo es demasiado grueso respecto a la corriente escogida.

El conector de masa está conectado incorrectamente.

Solución(es): Escoger correctamente el diámetro del electrodo de acuerdo a las especificaciones del equipo.

Conectar correctamente el borne de masa.

6.4 PRECAUCIONES GENERALES¹⁰⁴

Todas las personas que requieran usar la máquina, deben seguir las instrucciones de seguridad y de uso dispuestas por el personal técnico. El operador debe conocer el comportamiento de la máquina para evitar el mal uso o la utilización incorrecta de la misma. Nuestra seguridad depende de nosotros mismos. A continuación se detalla algunos riesgos propios del proceso.

¹⁰⁴ GAMMA. (s/f). Manual de Uso/Manutención. *Soldadora TIG 160 Inverter*. 2 – 4.

6.4.1 FUEGO

- Mantener cerca de la zona de soldadura dispositivos contra incendios.
- Retirar de la zona de soldadura cualquier tipo de material inflamable.
- Permitir enfriar el material soldado antes de tocarlo o de ponerlo en contacto con materiales inflamables.
- No realizar soldaduras en recipientes que hayan contenido combustibles o lubricantes, así éstos se encuentren vacíos.



Figura 6.8 Riesgo de incendio al soldar¹⁰⁵

6.4.2 HUMO

- Trabajar en espacios que dispongan de una ventilación adecuada.
- Colocar extractores de vapor o humo, de preferencia debajo de la zona de soldadura.
- Utilizar mascarillas o respiraderos apropiados para el proceso de soldadura.

¹⁰⁵ INDURA. (s/f). *Catálogo de Electrodo*s, 6.

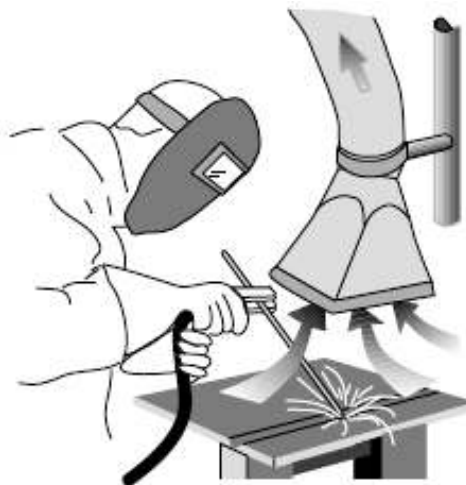


Figura 6.9 Uso de extractores de vapor al soldar¹⁰⁶

6.4.3 EXPLOSIONES

- No realizar soldaduras cerca de recipientes a presión.
- Evitar soldar en ambientes que tengan polvo, gas o vapores explosivos.

6.4.4 QUEMADURAS

- Evitar quemaduras causadas por las chispas o residuos de metal fundido utilizando vestimenta que cubra la superficie del cuerpo expuesto.
- Utilizar equipo de protección personal adecuado.
- Usar casco de soldadura con vidrio de protección.

6.4.5 SHOCK ELÉCTRICO

El shock eléctrico puede causar la muerte y es potencialmente fatal.

- Usar guantes y prendas de vestir aislantes para evitar descargas a tierra.
- Evitar usar prendas de vestir (guantes, zapatos, gorras) húmedos o mojados.
- Evitar apoyarse en la pieza que se va a soldar.
- Realizar periódicamente revisiones y mantenimiento del equipo.

¹⁰⁶ INDURA. (s/f). *Catálogo de Electrodo*s, 6.



Figura 6.10 Riesgo de shock eléctrico¹⁰⁷

6.5 TÉRMINOS GENERALES ¹⁰⁸

- **Electrodo de tungsteno.-** electrodo de alambre de tungsteno, no es consumible, se lo utiliza en el proceso de soldadura por arco eléctrico TIG.
- **Fundente.-** material usado para disolver o evitar la formación de óxido e inclusiones.
- **Longitud de arco.-** distancia entre el extremo del electrodo y el lugar donde el arco hace contacto con la superficie de trabajo.
- **Metal base.-** metal que se va a soldar.
- **Penetración.-** es la distancia que la zona de fusión se extiende por debajo de la superficie.

¹⁰⁷ INDURA. (s/f). *Catálogo de Electrodo*, 6.

¹⁰⁸ VENETOOL. (s/f). *Manual de Soldadura. Proceso TIG/GTAW*. 3.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- La fundición nodular material del cual se fabrican accesorios para la Empresa Municipal de Agua Potable del Distrito Metropolitano de Quito tiene características entre la variedad de fundiciones que permiten realizar procesos de unión, ya sea para soldar materiales que sean de la misma naturaleza o para realizar procesos de recuperación en los mismos, las propiedades químicas son indispensables para mantener las características del material
- La fundición nodular de grado 65-45-12 es soldable por el proceso GTAW utilizando varillas de en base de níquel, como parámetro principal se debe tomar en cuenta que solo el núcleo del electrodo sirve para el proceso TIG como material de aporte.
- La temperatura de soldabilidad experimental para la fundición nodular mediante el proceso GTAW es de 327 °C, similar a la señalada por la Norma ANSI-AWS D11.2 R (2006), esta temperatura permite la unión del material garantizando una buena penetración sin disminuir la resistencia del material base.
- La microestructura que presenta la fundición nodular pos soldadura demuestra que si existe cambio micro-estructural con respecto a la estructura del material base lo cual influye en las propiedades mecánicas, haciendo que los valores obtenidos sean mayores a los que se presentan en la norma.
- El cambio de la geometría en la junta durante el proceso de soldadura ocasiona cambios de la microestructura en la zona de fusión, que le otorgan al material mayor dureza pero a la vez aumenta su fragilidad.
- El proceso de soldadura GTAW permite realizar reparaciones o mantenimiento en determinados componentes de espesores pequeños, aunque se debe analizar el costo de reparación con el costo de fabricación de un nuevo elemento, para

poder escoger el proceso más conveniente.

- El precalentamiento del material base antes de ser soldado es un procedimiento esencial, debido a que reduce las posibilidades de fisura, agrietamiento o falta de penetración en el cordón de soldadura.
- Los ensayos destructivos y no destructivos permiten valorar la calidad de la soldadura, así como también ayudan a evaluar las propiedades mecánicas de la soldadura en conjunto con el material base.
- Las cualidades de las piezas de pequeños espesores están condicionadas por su calidad metalúrgica, las propiedades mecánicas son muy dependientes de los defectos micro-estructurales presentes.
- Los defectos disminuyen la resistencia y la ductilidad de las piezas y generan gran dispersión de resultados en los ensayos mecánicos, por eso para evaluar propiedades en pequeños espesores debemos producir piezas estructuralmente sanas.
- La utilización de simulación en computadora permite optimizar las variables de colada y diseñar moldes a partir de los cuales pueden obtenerse placas de espesores delgados libres de defectos de colada, tanto micro como macro-estructurales. Otras variables operativas tales como la composición química pueden influir significativamente en la sanidad de las piezas.
- El exceso de carbono en la composición del hierro nodular influye en la disminución de la elongación del material cuando éste está sometido a cargas de tracción.
- Cuando el material se calienta durante el proceso de soldadura, la matriz se enriquece de carbono, debido al enfriamiento rápido en la zona afectada por el calor, pueden formarse fases duras y frágiles que causan agrietamiento o micro fisuras. Debido a estos factores metalúrgicos, los hierros fundidos son más difíciles de soldar que los aceros al carbono.

7.2 RECOMENDACIONES

- Unos de los limitantes que se considera al final de este proyecto es que el proceso GTAW es un método apto para soldar espesores pequeños, por este motivo se recomienda utilizar otros procesos que permitan la unión de materiales de mayor espesor como son las rejillas de alcantarillado.
- Es necesario conocer la composición química del material a trabajar debido a que alguna alteración en el proceso de fabricación modifica las propiedades del mismo, convirtiéndolo en un material extremadamente duro para realizar procedimientos de desbaste.
- Es recomendable seleccionar correctamente el tipo de tinta penetrante que se utilizará en el proceso de inspección, debido a que algunos materiales reaccionan con los elementos que poseen las tintas.
- El factor humano es una consideración importante al momento de realizar un proceso de soldadura, por este motivo es recomendable contar con el servicio de un soldador calificado en el proceso de soldadura GTAW con el fin de evitar errores o defectos en el proceso.
- Debido a que el proceso de soldadura GTAW produce temperaturas elevadas, se recomienda usar equipos de protección personal para evitar accidentes de trabajo o afecciones a la salud del soldador.
- Se recomienda que el proceso de precalentamiento de las placas así como de los tochos se lo realice en un lugar cercano al puesto de trabajo del soldador, para evitar pérdida de temperatura al momento de trasladar la pieza.
- Durante el proceso de soldadura se recomienda mantener la geometría de la junta, con el fin de evitar áreas de material base aislado que concentran calor y modifican la micro-estructura del material.

BIBLIOGRAFÍA

Agüera, F. (2008). *Análisis de Soldadura de Fundiciones "ADI", con electrodos de Fe-Ni*. Argentina.

Álvarez, A. (2015). *Estudio Comparativo de la Soldabilidad del Hierro Fundido Dúctil con los procesos SMAW y TB*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.

American Filler Metals. (s/f). Tungsten Alloys. Obtenido de http://www.amfiller.com/assets/tungsten_alloys.pdf

ANSI/AWS A3.0 (1994). Standard Welding Terms and Definitions.

ANSI/AWS D11.2-89 R(2006), Guide for Welding Iron Castings.

Askeland, D. (2004). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales* (4ta. ed.). México: Thomson.

ASM HANDBOOK, (2004), Metallography and Microstructures, Vol. 9.

ASM HANDBOOK. (1993). Welding, brazing and soldering: American Society of Materials. Vol. 6.

ASM International. (2002). Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel.

ASTM A 247, (2016), Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings.

ASTM A48, (2012), Standard Specification for Gray Iron Castings, ASTM International, West Conshohocken.

ASTM A 536-84 (2014), Standard Specification for Ductile Iron Castings, ASTM International, West Conshohocken.

- ASTM E165 / E165M-12, (2012), Standard Practice for Liquid Penetrant Examination for General Industry, ASTM International, West Conshohocken.
- ASTM E8 / E8M-15a, (2015), Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken.
- Avner, S. (1988). *Introducción a la metalurgia física* (2da. ed.). México: Mc-Graw Hill.
- AWS Welding Handbook. (2004). Welding Processes Part 1. Vol. 2.
- Callister, W. (2007). *Materials Science and Engineering* (7ma. ed.). USA: John Wiley & Sons.
- Campos, D. (2012). *Aspectos Metalúrgicos de la Soldadura*. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/98774723/Aspectos-Metalurgicos-de-la-Soldadura>
- Castro, G. (s/f). Fundiciones.
- De Máquinas y Herramientas. (2014). Sistemas de Enfriamiento. Obtenido de <http://www.demaquinasyherramientas.com/soldadura/seleccionar-la-antorcha-correcta-para-un-proceso-de-soldadura>
- DISENSA. (s/f). *Temas Generales de Soldadura*. Obtenido de http://disensa.com/main/images/pdf/temas_generales.pdf.
- Enríquez, J. (2012). *Fabricación de Fundición Nodular*. Obtenido de http://oa.upm.es/14450/1/Fundici%C3%B3n_nodular.pdf
- Eyheralde, M. (2012). *Inspección en Soldadura*. Obtenido de <http://campusvirtual.edu.uy/archivos/mecanica-general/soldadura/08%20Proceso%20GTAW.pdf>
- GAMMA. (s/f). Manual de Uso/Manutención. *Soldadora TIG 160 Inverter*.
- GLIMGLO. (2013). *Aportación para la Soldadura TIG GTAW - Varillas*. Obtenido de <http://soldadura.org/soldadura-2/aportacion-para-la-soldadura-tig-varillas>

Gordillo, S. (2010). Estudio de los Tratamientos Térmicos de Templado y Revenido en la Fundición de Hierro Dúctil con Matriz Metálica Ferrítica.

GTZ. (s/f). Tablas para la Industria Metalúrgica.

Guía de Prácticas del Laboratorio de Ensayos No Destructivos. (2015).

Guzmán, R. (2014). *Soldabilidad de los Materiales*. Obtenido de <http://es.scribd.com/doc/215613920/4-Soldabilidad-de-Los-Materiales#scribd>

INDURA. (2010). Catálogo de Electrodo para Recubrimiento y Recuperación de Piezas.

INDURA. (s/f). Catálogo de Electrodo.

INDURA. (s/f). Catálogo de Procesos y Productos.

INGEMECÁNICA. (s/f). *Técnica y Fundamentos de la Soldadura TIG*. Obtenido de <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn52.html>

Martinez, R. (2001). *Caracterización de defectos y propiedades mecánicas en probetas de fundición esferoidal de pequeño espesores*. Obtenido de <http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/posadas/trabajos/0219.pdf>

Mejía, I. (2006). *Esfuerzos residuales generados en la Soldadura*. México.

Messler, R. (2004). *Principles of Welding*. Singapur: John Wiley & Sons.

Messler, R. (2008). *Principles of Welding: process, physics, chemistry and metallurgy*. USA: Wiley-VCH.

Mora, C. (2008). *Proceso TIG*. Obtenido de http://carlosmora-smaw.blogspot.com/2008_03_01_archive.html

NTE INEN 110:1975-03. Ensayo de doblado para el acero. Primera Edición

NTE INEN 2499:2009 Fundición Nodular (Hierro Dúctil). Requisitos. Primera Edición.

Pantoja, F. (2015). Apuntes de Tratamientos Térmicos.

Serna, A. (2015). *Soldadura-metalurgia de la soldadura-proceso de soldadura-soldabilidad*. Obtenido de [http://blog.utp.edu.co/metalografia/capitulo-18-Soldadura-metalurgia de la soldadura-procesos de soldadura-soldabilidad](http://blog.utp.edu.co/metalografia/capitulo-18-Soldadura-metalurgia-de-la-soldadura-procesos-de-soldadura-soldabilidad)

Shakelford, J. (2005). *Introducción a la Ciencia de Materiales para Ingenieros* (6ta. ed.). México: Prentice Hall.

STEELWORKER. (2009). *Hierro Nodular*. Obtenido de <http://hierronodular.blogspot.mx/>

UCA. (s/f). *Soldadura*. Obtenido de <http://www.uca.edu.sv/facultad/clases/ing/m210034/doc4.pdf>

Vargas, J. (2011). Fundamentos de Virutaje de las Máquinas-Herramientas y de las Máquinas CN/CNC.

VENETOOL. (s/f). Manual de Soldadura. *Proceso TIG/GTAW*.

Weman, K. (2003). *Arc Welding - an overview: Terminology*. England: Woodhead Publishing Ltd.

ANEXOS

ANEXO 1: PLANO DE LA PLACA A SOLDAR

ANEXO 2: PLANO DEL TOCHO

ANEXO 3: COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL BASE



ILPM ENGINEERING CIA. LTDA.
Ingeniería Líder en Proyectos y Materiales



Muestra: 2016-083/ FUNDIEC/03-16/ HD

Fecha: 21 03 2016 12:05:15

Método: Fe120

Equipo: Bruker Q2ION

Calibración: 04/Feb/2016

Temperatura: 20degC

Humedad: 55%

REGISTRO DE ENSAYO DE COMPOSICION QUIMICA MEDIANTE ESPECTROMETRIA DE EMISION OPTICA POR CHISPA

∅	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
	4.105	2.686	0.645	<0,003	<0,003
∅	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Cu [%]	Al [%]
	0.271	<0,005	0.029	0.019	0.0054
∅	Co [%]	Mg [%]	Nb [%]	Ti [%]	V [%]
	<0,003	0.031	0.0087	0.0069	<0,003
∅	W [%]	B [%]	Sn [%]	Fe [%]	
	<0,01	<0,001	<0,002	92.19	

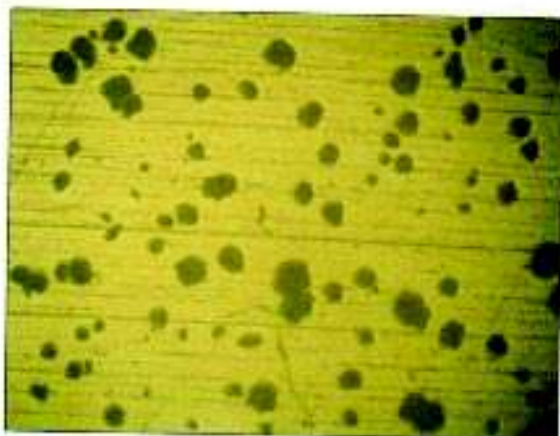
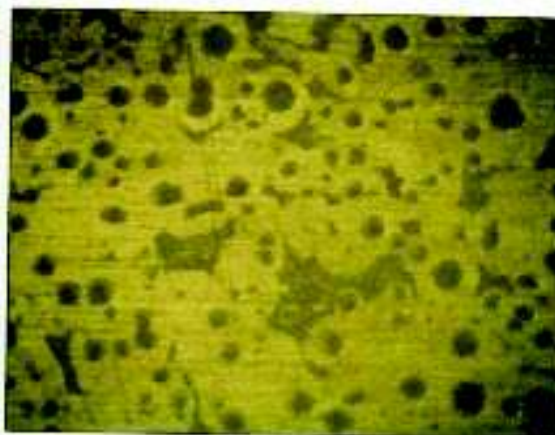
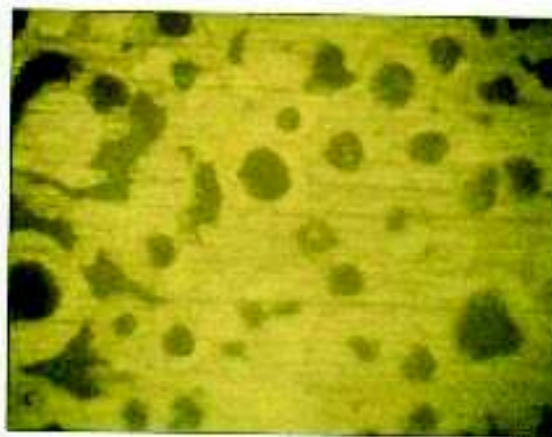
Realizado por:

Emilio Estrada
Emilio Estrada



Revisado por:



Emilio Estrada N54-139 y Oruna (Sector La Kennedy) Quito - Ecuador

TOCHO 40x40:**10x****ATAQUE NITAL****20x****ATAQUE NITAL**

ANEXO 4: CALIFICACIÓN DEL SOLDADOR EN PROCESO DE SOLDADURA GTAW

SISTEMA DE CONTROL DE CALIDAD PAM EP				
CALIFICACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL SOLDADOR				
PAM EP-ECU-QAQC-39-FRM-033-00				
	No. CONTRATO / O.S.	13043	CONTRATISTA:	PROCEPET S.A.
	PROYECTO:	TRABAJOS MECANICOS PARA INTERCONEXION DE BOMBAS BOOSTERS PATEXOS, P-87024, P-87027, P-87028 EN OSD B SPP BLOQUE 7, DE PAM EP		
	RES. No.:	STP130-09-FRM-004-01	LOCACION:	OSD B SPP BLOQUE 7
	FECHA:	03/02/15	OT. No.	
CALIFICACIÓN REALIZADA DE ACUERDO A				
	CODIGO	WPS No	PQR No	PROCESO DE SOLDADURA
	ASME IX 2010	PA-ECU-WPS-001	PA-ECU-PQR-031	GTAW - SMAW
	DATOS DEL SOLDADOR			
	NOMBRE DEL SOLDADOR	NACIONALIDAD	C.I.	ESTAMPA No
LLANBA LLANBA AISEL	ECUATORIANO	0503176534	W-25	
NUMERO DE SOLDADORES POR CUPON DE PRUEBA				1
DATOS DE PRUEBA				
LUGAR Y FECHA DE PRUEBA			OSD B SPP BLOQUE 7, 03/03/2014	
METAL BASE				
ESPECIFICACION	ASTM A106 GR B	ESPESOR CUPON DE PRUEBA		18,26 mm
GRUPO	P-No. 1 Group No. 1	DIAMETRO CUPON DE PRUEBA		NPS 6"
MATERIAL DE APORTE				
GRUPO	F-No. 4 A-No. 1	ESPECIFICACION AWS	A5.1	
TIPO	ER618 (SMAW)	DIAMETRO	3,2 mm	
GRUPO	F-No. 6 A-No. 1	ESPECIFICACION AWS	A5.18	
TIPO	ER706-G (GTAW)	DIAMETRO	2,4mm	
TAMANO Y TIPO DE ELECTRODO DE TUNGSTENO		AWS EWTh-2 · DIAM 2,4mm		
GAS DE PROTECCIÓN		Argon 99,9% (GTAW)		
DISEÑO DE JUNTA				
TIPO	A TOPE CON BISEL EN V	POSICIÓN DE SOLDADURA	6G	
RESPALDO	NO	PROGRESIÓN	ASCENDENTE	
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS				
TIPO DE CORRIENTE	DC	POLARIDAD	DC-GTAW / DC+ SMAW	
RESULTADOS ENSAYOS				
TIPO	ACEPTADO	RECHAZADO	REALIZADO POR	INFORME No
INSPECCIÓN VISUAL	X		Felipe Parafalón	NA
END (GAMAGRAFIA)	X		Radcoval Cia. Ltda.	PPT-RT-001-03/03/2015
ENSAYOS DESTRUCTIVOS				
RESULTADO FINAL				
LA CALIFICACION ES	ACEPTADA	X		
	RECHAZADA			
RANGO DE CALIFICACION				
ASME SECCION IX 2010				
De P-No. 1 Group No. 1 A P-No. 1 Group No. 2				
RANGO DE MATERIALES				
RANGO DE DIAMETROS	Desde	OD 2 7/8"	Hasta	Ilimitado
RANGO DE ESPEORES	Desde	4,6 mm	Hasta	38,52 mm
POSICION	TODAS			
PROGRESIÓN	ASCENDENTE			
	ELABORADO POR	REVISADO POR	REVISADO POR	APROBADO POR
NOMBRE:	<i>Florencia Lopez</i>	A. SANTOS	F. Parafalón	<i>Eduardo Parafalón</i>
CARGO:	CC CONTRATISTA	CAJCC CONTRATISTA	INSPECTOR DE SOLDADURA	FISCALIZADOR CAJCC
FIRMA:	<i>[Signature]</i>	<i>[Signature]</i>	<i>[Signature]</i>	<i>[Signature]</i>
FECHA:	05-03-2015	05-03-2015	05-03-2015	05-03-2015

ANEXO 5: ENSAYO DE TRACCIÓN



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
LABORATORIO DE ANÁLISIS
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES



INFORME TÉCNICO LAEV – MAY 16.02

Quito, 4 de mayo de 2016

TRABAJO SOLICITADO POR: Sr. Moya López Alexander Vladimir
Sr. Vaca Guato Medardo José

Los resultados contenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en muestras de hierro fundido nodular, pertenecientes a los señores Moya Alexander y Vaca Medardo, para el proyecto de titulación "EVALUACIÓN DE LA SOLDABILIDAD DEL HIERRO FUNDIDO NODULAR CON PROCESO DE SOLDADURA GTAW". Las muestras fueron entregadas en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional.

RESULTADOS

1. MUESTRAS: Dos (2) juntas soldadas de hierro fundido para ensayo de tracción y dos (2) juntas soldadas de hierro fundido para ensayo de doblado.

2. ENSAYO DE TRACCIÓN BAJO LA NORMA ASTM E 8

En la tabla 1 se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de tracción realizada a las probetas.

Tabla 1. Resistencia a la tracción y elongación de las probetas de hierro fundido.

Id.	Ancho promedio	Diámetro promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		% Elongación en 50 mm
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	
T1	12,40	4,84	6.300	28.024	67,7	466,9	5,3
T2	12,61	4,75	6.475	28.802	69,7	480,9	5,8



3. ENSAYO DE DOBLADO

En la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de doblado.

Tabla 2. Resultados del ensayo de doblado.

Identificación	Observaciones
Doblado Cara	La fisura comienza en un ángulo de 150° entre los extremos.
Doblado Raíz	La fisura comienza en un ángulo de 142° entre los extremos.

En el anexo se presenta fotografías del montaje en la máquina universal de ensayos.


 Ing. Salvatore Reina M.Sc.
**JEFE DEL LABORATORIO DE
 ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES**

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA



ESUELA POLITECNICA NACIONAL



Fotografía 1. Montaje en la máquina universal de ensayos y ángulo en el cual comienza la fisura.




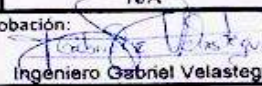


Fotografía 2. Fisura en el inicio del cordón de soldadura.



ANEXO 6: DOCUMENTOS DE CALIFICACIÓN DEL PROCESO

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)																																																									
Nombre de la Compañía:	Escuela Politécnica Nacional	Identificación:	E.P.N-WPS01																																																						
WPS Nro.:	E.P.N-WPS01	Revisión:	Ing. Gabriel Velastegui																																																						
PQR de apoyo nro.:	E.P.N-PQR01	Fecha:	Quito, Abril 25 del 2016																																																						
Según Norma:	ANSI/AWS D11.2-89(R2006)	Organización:	E.P.N.																																																						
ARTÍCULO I: JUNTA UTILIZADA		ARTÍCULO I: TÉCNICA DE SOLDADURA																																																							
Tipo de junta:	A tope	Proceso:	GTAW																																																						
Preparación de la junta:	En ranura	Tipo: Manual (X) Semi-automática () Automática ()																																																							
Configuración del bisel:	En "V"	Soldadura a:	Un lado () Dos lados (X)																																																						
Apertura de raíz:	3 [mm]	Cordón de respaldo:	Si (X) No ()																																																						
Talón:	2 [mm]	Tiempo entre pases:	p1 - p2 16,59 [s] p2 - p3 9,34 [s] p3 - pr 9,19 [s]																																																						
Ángulo de ranura:	60°	Vanilla:	Simple (X) Múltiple ()																																																						
Método:	Amoladora	Control de distorsión:	Presión																																																						
Preparación de bisel:	Si (X) No ()	Sujeción:	Si (X) No ()																																																						
Placa de respaldo:	Si (X) No ()	Limpeza de pase raíz:	Cepillo, grata																																																						
ARTÍCULO III: METAL BASE		Limpeza de Pases subsiguientes:	Cepillo, grata, amoladora con disco de corte																																																						
Tipo:	Fundición Nodular	ARTÍCULO V: POSICIÓN DE SOLDADURA																																																							
Grado:	65-45-12	Posición de soldadura:	1G																																																						
Espesor nominal:	5 [mm]	Progresión:	Empuje																																																						
Medidas aproximadas:	250 x 150 [mm]	Avance:	Derecha a izquierda																																																						
ARTÍCULO IV: METAL DE APORTE		Técnica:	Un pase () Varios pases (X)																																																						
Especificación o Norma:	ANSI/AWS D11.2-89(R2006)	ARTÍCULO VII: GAS																																																							
Clasificación:	AWS E-NiFe-CI	Gas Protector:	Argón																																																						
Diámetro:	4 [mm]	Composición Porcentual:	100%																																																						
Casa Comercial:	Indura	Tasa de aporte:	19 [L/min]																																																						
Designación Comercial:	Ni-55	ARTÍCULO VI: TRATAMIENTO TÉRMICO																																																							
ARTÍCULO VII: ELECTRODO		*Precalentamiento:																																																							
Especificación o Norma:	ANSI/AWS A5.12	Tiempo de precalentamiento:	35 [min]																																																						
Clasificación:	EWTh-2	Técnica de calentamiento:	Soplete a gas																																																						
Diámetro:	2,4 [mm]	Técnica de mantenimiento de temperatura:	Soplete a gas																																																						
Color:	Rojo	con la boquilla dirigida a la parte inferior de las placas																																																							
ARTÍCULO VII: NOTAS		Temperatura de precalentamiento, min:	327 [°C]																																																						
<ul style="list-style-type: none"> * Limpieza del bisel con cepillo posterior al precalentamiento de las placas, para eliminar el carbono producido por la atmósfera oxidante. * Control de temperatura de las placas entre pases * Control de temperatura en el cordón entre pases * Limpieza entre pases * Enfriamiento lento para evitar el agrietamiento * La rigidez excesiva de las placas produce fisuras 		Temperatura entrepases, máx:	330 [°C]																																																						
		* Post-soldadura:																																																							
		Rango de temperatura:	150 [°C] - Tamb																																																						
		Rango de tiempo:	24 horas																																																						
DETALLE DE LA JUNTA:		Tipo de enfriamiento:	Lento en arena sílice																																																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Nro. Pase</th> <th colspan="2">Metal de Aporte</th> <th colspan="2">Corriente</th> <th rowspan="2">Tensión de Trabajo [V]</th> <th rowspan="2">Velocidad de Avance [cm/min]</th> <th colspan="2">Técnica de Soldadura</th> </tr> <tr> <th>Clase</th> <th>Φ [mm]</th> <th>Tipo y Polaridad</th> <th>Intensidad [A]</th> <th>Oscilado</th> <th>Recto</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>E-NiFe-CI</td> <td>4</td> <td>DCEN</td> <td>200-210</td> <td>15,5</td> <td>6,25</td> <td>X</td> <td></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>E-NiFe-CI</td> <td>4</td> <td>DCEN</td> <td>220</td> <td>14,7</td> <td>5,96</td> <td>X</td> <td></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>E-NiFe-CI</td> <td>4</td> <td>DCEN</td> <td>195</td> <td>16,2</td> <td>5,84</td> <td>X</td> <td></td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>E-NiFe-CI</td> <td>4</td> <td>DCEN</td> <td>184</td> <td>15,8</td> <td>7,19</td> <td>X</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Nro. Pase	Metal de Aporte		Corriente		Tensión de Trabajo [V]	Velocidad de Avance [cm/min]	Técnica de Soldadura		Clase	Φ [mm]	Tipo y Polaridad	Intensidad [A]	Oscilado	Recto	1	E-NiFe-CI	4	DCEN	200-210	15,5	6,25	X		2	E-NiFe-CI	4	DCEN	220	14,7	5,96	X		3	E-NiFe-CI	4	DCEN	195	16,2	5,84	X		4	E-NiFe-CI	4	DCEN	184	15,8	7,19	X		Realizado por: Alexander Moya Medardo Vaca			Examinador o Entidad de Aprobación: Ingeniero Gabriel Velastegui		
Nro. Pase		Metal de Aporte		Corriente				Tensión de Trabajo [V]	Velocidad de Avance [cm/min]	Técnica de Soldadura																																															
	Clase	Φ [mm]	Tipo y Polaridad	Intensidad [A]	Oscilado	Recto																																																			
1	E-NiFe-CI	4	DCEN	200-210	15,5	6,25	X																																																		
2	E-NiFe-CI	4	DCEN	220	14,7	5,96	X																																																		
3	E-NiFe-CI	4	DCEN	195	16,2	5,84	X																																																		
4	E-NiFe-CI	4	DCEN	184	15,8	7,19	X																																																		

 ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA REGISTRO DE LA CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO (PQR)						
Nombre de la Compañía: Escuela Politécnica Nacional PQR Nro.: E.P.N-PQR01 WPS de apoyo Nro.: E.P.N-WPS01 Según Norma: ANSI/AWS D11.2-89(R2006)		ESQUEMA				
ARTÍCULO I: METAL BASE Tipo: Fundición Nodular Grado: 65-45-12 Espesor nominal: 5 [mm] Medidas aproximadas: 250 x 150 [mm]						
ARTÍCULO IV: METAL DE APORTE Especificación o Norma: ANSI/AWS D11.2 - 89 R(2006) Clasificación: AWS E-NiFe-CI Diámetro: 4 [mm] Casa Comercial: Indura Designación Comercial: Ni-55						
ARTÍCULO VII: ELECTRODO Especificación o Norma: ANSI/AWS A5.12 Clasificación: EWTh-2 Diámetro: 2,4 [mm] Color: Rojo		ARTÍCULO V: POSICIÓN DE SOLDADURA Posición de soldadura: 1G Progresión: Empuje Avance: Derecha a izquierda Técnica: Un pase () Varios pases (X)				
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS Tipo de Corriente: DCEN Amperaje [A]: 184 - 205 Voltaje [V]: 14,7 - 16,2		ARTÍCULO VI: TRATAMIENTO TÉRMICO *Pre calentamiento: Temperatura de pre calentamiento: 327 [°C] Tiempo de pre calentamiento: 35 [min] Técnica de calentamiento: Soplete a gas Mantenimiento de temperatura: Soplete a gas * Post-soldadura: Tipo de enfriamiento: Lento en arena sílice				
ARTÍCULO I: TÉCNICA DE SOLDADURA Proceso: GTAW Tipo: Manual (X) Semi-automática () Automática () Soldadura a: Un lado () Dos lados (X) Cordón de respaldo: Sí (X) No () Varilla: Simple (X) Múltiple () Electrodo: Tungsteno Control de distorsión: Prensa Sujeción: Sí (X) No () Limpieza de raíz: Cepillo, grata Pases subsiguientes: Cepillo, grata, amoladora		ARTÍCULO VII: NOTAS * Limpieza del bisel con cepillo posterior al pre calentamiento de las placas, para eliminar el carbono producido por la atmósfera oxidante. * Control de temperatura de las placas entre pases. * Control de temperatura en el cordón entre pases. * Limpieza entre pases * Enfriamiento lento para evitar el agrietamiento * La rigidez excesiva de las placas produce fisuras				
PRUEBAS						
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS						
INSPECCIÓN VISUAL						
Uniformidad del cordón estable en la parte media, presenta ligeras desviaciones al inicio y final del cordón.						
INSPECCIÓN CON TINTAS PENETRANTES						
Porosidades en la parte inicial y final del cordón, el defecto alcanza una longitud mayor de 1 [mm]						
ENSAYOS DESTRUCTIVOS						
ENSAYO MACROGRÁFICO						
Probeta M1 Cuatro pases de soldadura, presencia de un poro en la zona de aporte, de longitud 1 [mm]						
ENSAYO MICROGRÁFICO						
Probeta M2 Formaciones dendríticas en la zona afectada por el calor						
ENSAYO DE TRACCIÓN						
Probeta	Ancho promedio	Elongación	Carga Máxima	Resistencia a la tracción	Rotura	Califica
T1	4,84 [mm]	5,30%	28024 [N]	466,9 [N]	Metal base	N/A
T2	4,75 [mm]	5,80%	28802 [N]	480,9 [N]	Metal base	N/A
ENSAYO DE DOBLADO						
Probeta	Tipo	Angulo de fisura	Zona de Rotura	Califica		
Dc	Doblado de cara	150° entre los extremos	Metal base	N/A		
Dr	Doblado de raíz	142° entre los extremos	Zona de fusión	N/A		
Realizado por: Alexander Moya Medardo Vaca			Examinador o Entidad de Aprobación:  Ingeniero Gabriel Velastegui			

ANEXO 7: ENSAYO DE TRACCIÓN EMPRESA FUNDIEC S.A

		LABORATORIO DE ENSAYOS INFORME DE RESULTADOS		Hoja N° 2 de 5					
Edición: 02									
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS									
FECHA DE REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS:		2016-05-17							
TIPO DE ENSAYO:		CUANTITATIVO							
NORMA DE REQUISITOS:		NTE INEN 2499:2009. FUNDICIÓN NODULAR (HIERRO DÚCTIL). REQUISITOS							
MÉTODO DE ENSAYO:		LE-PTG-G-02. TRACCIÓN EN MATERIALES METÁLICOS A TEMPERATURA AMBIENTE REFERENCIA: NTE INEN 109:2009 ENSAYO DE TRACCIÓN PARA MATERIALES METÁLICOS A TEMPERATURA AMBIENTE/ NTE INEN 2481:2009 FUNDICIONES DE HIERRO GRIS. REQUISITOS/ NTE INEN 2499:2009 FUNDICIÓN NODULAR (HIERRO DÚCTIL). REQUISITOS							
LUGAR DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO		LABORATORIO DE ENSAYOS GENERALES							
CONDICIONES AMBIENTALES:		Temperatura [°C]	23,7	Humedad relativa [%]	51,0				
EQUIPOS UTILIZADOS:		Máquina de Ensayos Universal. Código: 2500. Calibrador. Código: 1876. Termohigrometro. Código: EI-G-06							
CÓDIGO DE OBJETO DE ENSAYO:		OE-2016-47-02							
CÓDIGO DEL CLIENTE:		N/A							
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN									
CÓDIGO DE OBJETO DE ENSAYO	Diámetro mm	Carga de fluencia N	Carga de rotura N	Límite de fluencia MPa	Resistencia a la Tracción MPa	Porcentaje de Alargamiento %	Requisito NTE INEN 2499:2009 (*)		
							Límite de fluencia Mínima MPa	Resistencia a la Tracción Mínima MPa	Porcentaje de Alargamiento Mínimo %
OE-2016-47-02	13,18	49033,25	73844,07	359,17	540,91	12,59	310	448	12
OBSERVACIONES:		(*) Los requisitos especificados pertenecen al grado 65-45-12, el cual fue proporcionado por FUNDICIONES DEL ECUADOR, FUNDIEC S.A.							
Realizado por:		Ing. César Reyes 							
ESTE INFORME NO SIGNIFICA CERTIFICACIÓN DE CALIDAD. NO DEBE SER USADO CON FINES PUBLICITARIOS Y NO DEBE SER REPRODUCIDO TOTAL NI PARCIALMENTE SIN AUTORIZACIÓN ESCRITA Y CERTIFICADA DEL ENTE EMISOR.									
RESPONSABLES									
									
Ing. Marcela Cáceres Jefe de Laboratorios de Ensayo		Ing. Franklin Villa Responsable de Laboratorio							