ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO COMPARATIVO DE LA SOLDABILIDAD DEL HIERRO FUNDIDO DÚCTIL CON LOS PROCESOS: SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO CON ELECTRODO REVESTIDO (SMAW) Y SOLDADURA FUERTE CON TORCHA (TB)

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

ALEX VINICIO ALVAREZ CHIPUGSI
alexvinicio1990@gmail.com

DIRECTOR: ING. DIEGO MARCELO ESPINOSA CHAUVÍN
espinosadie@gmail.com

Quito, noviembre del 2015

DECLARACIÓN

Yo, Alex Vinicio Alvarez Chipugsi, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

_____

Alex Vinicio Alvarez Chipugsi

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por ALEX VINICIO ALVAREZ CHIPUGSI, bajo nuestra supervisión.

_____

Ing. Diego Espinosa Chauvín
DIRECTOR DEL PROYECTO

_____

Ing. Gabriel Edmundo Velasteguí M.Sc.

COLABORADOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios y a la vida, por la luz en mi camino.

Agradezco infinitamente a mi familia por su presencia durante toda mi vida, por el apoyo incondicional durante toda esta etapa académica. A mi padre, mi madre y mis hermanos y sobrinos, por estar siempre a mi lado, motivándome a seguir adelante en los momentos difíciles.

Agradezco a mi director: Ing. Diego Espinosa, por la propuesta del tema, buena predisposición, guía y supervisión. Agradezco a mi codirector: Ing. Gabriel Velasteguí, por la paciencia, guía y consideración durante todo el proyecto.

A la empresa Fundireciclar por la colaboración con el material base, a Messer por la provisión del metal de aporte. A los soldadores: Sr. William Gallardo y Sr. César Arguello por prestarme sus habilidades en la soldadura.

A mis amigos: Daniel Escorza y Carlos Garzón por su desinteresada colaboración en el proyecto, así mismo por el aporte de buen humor.

A mi gran compañía a varios kilómetros de aquí: Caron Hernández y Alí Apolo, por sus sabios consejos y apoyo constante.

Alex

“Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como la oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber”.

Albert Einstein

DEDICATORIA

Para mi madre María Carmela Chipugsi y mi padre Jorge Rafael Alvarez, gracias a ustedes tengo la oportunidad de vivir de este logro tan importante.

Alex

“Somos arquitectos de nuestro propio destino”.

Albert Einstein

CONTENIDO

DECLARACIÓN i
CERTIFICACIÓN ii
AGRADECIMIENTOS iii
DEDICATORIA iv
CONTENIDO v
ÍNDICE DE FIGURAS xviii
ÍNDICE DE TABLAS xxv
RESUMEN xxviii
PRESENTACIÓN xxx
CAPÍTULO 1 1
FUNDICIONES 1
1.1. INTRODUCCIÓN 1
1.2. DIAGRAMA HIERRO-CARBONO 1
1.3. DIAGRAMA HIERRO-CARBONO METAESTABLE 1
1.4. PRINCIPALES MICROCONSTITUYENTES DE LAS FUNDICIONES 3
1.4.1. FERRITA 3
1.4.2. FERRITA ALFA 3
1.4.3. FERRITA DELTA 3
1.4.4. CEMENTITA 3
1.4.5. PERLITA 3
1.4.6. AUSTENITA 4
1.4.7. MARTENSITA 4
1.4.8. GRAFITO 4
1.4.8.1. Influencia del silicio 4
1.4.8.2. Enfriamiento en la formación de grafito 5

1.4.9. LEDEBURITA 5
1.4.10. STEADITA 6
1.5. ALEANTES EN LAS FUNDICIONES 6
1.5.1. ALUMINIO 6
1.5.2. TITANIO 6
1.5.3. COBRE 6
1.5.4. MANGANESO 6
1.5.5. MOLIBDENO 7
1.5.6. NÍQUEL 7
1.5.7. CROMO 7
1.5.8. MOLIBDENO 7
1.5.9. COBRE 8
1.6. CLASIFICACIÓN DE LAS FUNDICIONES 9
1.7. SEGÚN EL TIPO DE FRACTURA 9
1.8. SEGÚN SU ESTRUCTURA METALOGRÁFICA 9
1.8.1. HIERRO FUNDIDO GRIS 9
1.8.2. HIERRO FUNDIDO BLANCO 11
1.8.3. HIERRO FUNDIDO MALEABLE 11
1.8.4. FUNDICIÓN DE HIERRO DÚCTIL 12
1.8.5. EFECTO DE LA MATRIZ SOBRE EL HIERRO DÚCTIL 13
1.8.5.1. Fundición nodular de matriz ferrítica 13
1.8.5.2. Fundición nodular de matriz ferrítica – perlítica 13
1.8.5.3. Fundición nodular de matriz perlítica 13
1.8.5.4. Fundición nodular martensítica 14
1.8.5.5. Fundición nodular austenítica 14
1.8.5.6. Fundición nodular bainítica 14
1.9. PROPIEDADES DE LAS FUNDICIONES DÚCTILES 14

1.10. TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LAS FUNDICIONES DE GRAFITO ESFEROIDAL 15
1.10.1. RECOCIDO DE ALIVIO O ELIMINACIÓN DE TENSIONES 15
1.10.2. RECOCIDO 15
1.10.3. TEMPLE Y REVENIDO 16
1.10.4. NORMALIZADO Y REVENIDO 17
1.11. FABRICACIÓN DE HIERRO FUNDIDO DÚCTIL 19
1.11.1. INOCULACIÓN 20
1.11.2. NODULIZACIÓN 20
1.12. EL HIERRO DÚCTIL SEGÚN LA AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM) 20
1.12.1. EFECTO DE LA DENSIDAD DE LOS NÓDULOS 22
CAPÍTULO 2 25
SOLDADURA POR ARCO DE METAL PROTEGIDO (SMAW) 25
2.1. INTRODUCCIÓN 25
2.2. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO 25
2.3. ELECTRODOS REVESTIDOS 27
2.4. CAPACIDADES Y LIMITACIONES 27
2.5. MATERIAL BASE 28
2.6. ELECTRODOS REVESTIDOS 29
2.6.1. ELECTRODOS DE ACEROS AL CARBONO 29
2.6.2. ELECTRODOS DE ACERO DE BAJA ALEACIÓN 29
2.6.3. ELECTRODOS PARA ACEROS INOXIDABLES 30
2.6.4. ELECTRODOS DE NÍQUEL Y ALEACIONES DE NÍQUEL 30
2.6.5. ELECTRODOS DE ALUMINIO Y ALEACIONES DE ALUMINIO 31
2.6.6. ELECTRODOS DE COBRE Y ALEACIONES DE COBRE 32
2.6.7. ELECTRODOS DE RECUBRIMIENTOS DUROS 32

2.6.8. ELECTRODOS PARA HIERRO FUNDIDO 32
2.7. APLICACIONES DEL PROCESO SMAW 33
2.7.1. ESPESORES 33
2.7.2. POSICIÓN DE SOLDADURA 33
2.7.3. UBICACIÓN DE LA SOLDADURA 35
2.8. PREPARACIÓN DE LAS UNIONES 35
2.8.1. SOLDADURA DE RANURA 35
2.8.2. SOLDADURA DE FILETE 37
2.8.3. RESPALDOS DE SOLDADURA 37
2.8.4. GEOMETRÍAS DE UNIÓN TÍPICAS 37
2.9. PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA 39
2.9.1. DIÁMETRO DEL ELECTRODO 39
2.9.2. CORRIENTE DE SOLDADURA 39
2.9.2.1. Corriente continua 39
2.9.2.2. Corriente alterna 40
2.9.3. AMPERAJE 40
2.9.4. LONGITUD DEL ARCO 41
2.9.5. VELOCIDAD DE AVANCE 42
2.9.6. INCLINACIÓN DEL ELECTRODO 42
2.9.7. ELIMINACIÓN DE ESCORIA 43
2.10. CALIDAD DE LA SOLDADURA 43
2.10.1. POROSIDAD 44
2.10.2. INCLUSIONES DE ESCORIA 44
2.10.3. FUSIÓN INCOMPLETA 45
2.10.4. SOCAVAMIENTO 46
2.10.5. FRACTURA 46
2.10.5.1. Fracturas de superficie 46

2.10.5.2. Fracturas internas 47
2.11. CONSIDERACIONES TOMADAS AL SOLDAR HIERRO DÚCTIL CON SMAW 47
2.11.1. ELECTRODOS ENi-CI 48
2.11.2. ELECTRODOS ENIFE-CL 48
2.11.3. DISEÑO DE LA JUNTA 49
2.11.4. MATERIAL BASE DELGADO 49
2.11.5. MATERIAL BASE GRUESO 50
2.11.6. PRECALENTAMIENTO 52
CAPÍTULO 3 53
SOLDADURA FUERTE CON SOPLETE (TB) 53
3.1. INTRODUCCIÓN 53
3.2. APLICACIONES 53
3.3. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO 54
3.4. PROCESOS DE SOLDADURA FUERTE 55
3.5. SOLDADURA FUERTE CON SOPLETE 55
3.5.1. VARIABLES IMPORTANTES 56
3.5.2. VENTAJAS DE LA SOLDADURA FUERTE 56
3.6. METALES DE APORTE 57
3.6.1. FUSIÓN Y FLUIDEZ 57
3.6.2. LICUACIÓN 57
3.6.3. MOJADO Y ADHESIÓN 58
3.7. SELECCIÓN DEL METAL DE APORTE 59
3.7.1. METALES DE APORTE COBRE-CINC 59
3.7.2. METALES DE APORTE DE COBRE-FÓSFORO 59
3.7.3. METALES DE APORTE DE PLATA 60
3.7.4. METALES DE APORTE DE Níquel 60

3.7.5. METAL DE APORTE DE COBALTO 61
3.7.6. FUNDENTES Y ATMÓSFERAS 61
3.8. MATERIAL BASE 61
3.8.1. ALUMINIO Y ALEACIONES DE ALUMINIO 61
3.8.2. COBRE Y ALEACIONES DE COBRE 63
3.8.3. ACEROS DE BAJO CARBONO Y DE BAJA ALEACIÓN 63
3.8.4. ACEROS DE HERRAMIENTAs DE ALTO CARBONO Y DE ALTA VELOCIDAD 63
3.8.5. ACEROS INOXIDABLES 63
3.8.6. ALEACIONES DE NÍQUEL Y DE ALTO NÍQUEL 63
3.8.7. HIERRO COLADO 64
3.9. DISEÑO DE LAS UNIONES 64
3.9.1. SEPARACIÓN DE LA UNIÓN 65
3.10. METALURGIA DE LA SOLDADURA FUERTE 66
3.11. PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA FUERTE 67
3.11.1. LIMPIEZA PREVIA Y PREPARACIÓN DE SUPERFICIES 67
3.11.2. APLICACIÓN DEL FUNDENTE 68
3.11.3. COLOCACIÓN DEL METAL DE APORTE 68
3.11.4. ELIMINACIÓN DEL FUNDENTE 68
3.12. INSPECCIÓN DE SOLDADURA FUERTE 68
3.12.1. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS 69
3.12.2. MÉTODOS DESTRUCTIVOS 69
3.13. IMPERFECCIONES EN SOLDADURA FUERTE 69
3.13.1. FALTA DE LLENADO 69
3.13.2. ATRAPAMIENTO DE FUNDENTE 69
3.13.3. EROSIÓN DEL METAL BASE 69
3.13.4. ASPECTO SUPERFICIAL INSATISFACTORIO 70

3.13.5. GRIETAS 70
3.14. SOLDADURA FUERTE CON LATÓN (LATONADO) 71
3.14.1. VENTAJAS DEL LA SOLDAURA FUERTE CON LATÓN FRENTE A LA SOLDADURA POR FUSIÓN CONVENCIONAL 71
3.14.2. DESVENTAJAS DE LA SOLDADURA FUERTE CON LATÓN 72
3.14.3. EQUIPO PARA SOLDADURA FUERTE 72
3.14.4. MATERIAL DE APORTE 72
3.14.5. FUNDENTES 73
3.14.6. METALURGIA DE LA SOLDADURA FUERTE CON LATÓN 74
3.14.7. APLICACIONES DE LA SOLDADURA FUERTE CON LATÓN 74
3.14.8. TIPOS DE SOLDADURAS 75
3.15. CONSIDERACIONES TOMADAS AL SOLDAR HIERRO DÚCTIL CON SOLDADURA FUERTE 75
3.15.1. DISEÑO DE LA JUNTA Y PREPARACIÓN 76
3.15.2. PRECALENTAMIENTO 76
3.15.3. TÉCNICA DE SOLDADURA FUERTE 76
3.15.4. MEZCLA COMBUSTIBLE-COMBURENTE ADECUADA 77
3.15.5. CALOR DE LA COMBUSTIÓN 77
3.15.6. TEMPERATURA DE LA LLAMA 78
3.15.7. VELOCIDAD DE LA COMBUSTIÓN 78
3.15.8. INTENSIDAD DE LA COMBUSTIÓN 79
3.15.9. AJUSTE DE LA LLAMA 80
CAPÍTULO 4 83
SOLDABILIDAD EN EL HIERRO FUNDIDO 83
4.1. INTRODUCCIÓN 83
4.2. SOLDABILIDAD EN LAS FUNDICIONES 83
4.3. INCIDENCIA TÉRMICA EN LA SOLDADURA 84

4.3.1. ZONA AFECTADA POR EL CALOR (ZAC) 84
4.3.2. ZONA PARCIALMENTE FUNDIDA (ZPF) 85
4.3.3. ZONA DE FUSIÓN TOTAL (ZFT) 85
4.4. SOLIDIFICACIÓN DEL METAL DE APORTE 85
4.4.1. PARÁMETROS BÁSICOS 85
4.4.1.1. Velocidad de crecimiento o velocidad de solidificación 86
4.4.1.2. Gradiente de temperatura 86
4.4.1.3. Sobreenfriamiento constitucional 86
4.4.2. NUCLEACIÓN Y CRECIMIENTO 86
4.4.3. MODOS DE SOLIDIFICACIÓN 87
4.4.3.1. Crecimiento planar 87
4.4.3.2. Crecimiento celular 87
4.4.3.3. Crecimiento dendrítico o columnar dendrítico 88
4.4.3.4. Crecimiento equiaxial dendrítico 88
4.5. DIAGRAMAS TTT (TRANSFORMACIÓN-TIEMPO-TEMPERATURA) 89
4.6. DIFICULTADES EN LA SOLDADURA DE HIERROS FUNDIDOS 90
4.6.1. EL METAL DE SOLDADURA 91
4.6.2. ZONA DE FUSIÓN 91
4.6.3. ZONA AFECTADA POR EL CALOR 91
4.6.4. ESFUERZOS EN LA SOLDADURA 91
4.6.5. POROSIDADES 91
4.7. ENSAYO DE SOLDABILIDAD SEGÚN LA AWS 92
4.7.1. DESARROLLO DEL ENSAYO DE SOLDABILIDAD 92
4.7.2. RESULTADOS DEL ENSAYO DE SOLDABILIDAD 92
4.7.3. FÓRMULA DE CARBONO EQUIVALENTE 93
4.8. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO DE SOLDABILIDAD 94
4.8.1. PRIMERA SERIE 94

4.8.2. SEGUNDA SERIE 94
4.8.3. TERCERA SERIE 94
4.8.4. PROCEDIMIENTO DE PRUEBA 95
4.9. PRIMER NIVEL DE INSPECCIÓN DE LA SOLDADURA 96
4.9.1. INSPECCIÓN VISUAL 97
4.9.1.1. Ventajas de la inspección visual 97
4.9.1.2. Desventajas de la inspección visual 97
4.9.2. TINTAS PENETRANTES 97
4.9.2.1. Procedimiento de la inspección por tintas penetrantes 98
4.9.2.2. Ventajas de las tintas penetrantes 99
4.9.2.3. Desventajas de las tintas penetrantes 99
4.9.3. PARTÍCULAS MAGNÉTICAS 99
4.9.3.1. Ventajas de las partículas magnéticas 99
4.9.3.2. Desventajas de las partículas magnéticas 100
4.9.4. RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL 100
4.9.4.1. Ventajas de la radiografía industrial 100
4.9.4.2. Desventajas de la radiografía industrial 100
4.9.5. ULTRASONIDO 100
4.9.5.1. Ventajas del ultrasonido 101
4.9.5.2. Desventajas del ultrasonido 101
4.10. SEGUNDO NIVEL DE INSPECCIÓN DE LA SOLDADURA 101
4.10.1. ANÁLISIS MACROGRÁFICO 101
4.10.2. ANÁLISIS METALOGRÁFICO 102
4.10.2.1. Desbaste grueso 102
4.10.2.2. Desbaste fino 102
4.10.2.3. Pulido grueso 102
4.10.2.4. Pulido fino 103

4.10.2.5. Ataque químico 103
4.10.3. ANÁLISIS QUÍMICO 103
4.11. TERCER NIVEL DE INSPECCIÓN 103
4.11.1. ENSAYO DE TRACCIÓN 103
4.11.1.1. Deformación elástica y deformación plástica 103
4.11.1.2. Esfuerzo de fluencia 104
4.11.1.3. Resistencia a la tensión 104
4.11.1.4. Resistencia a la tracción de las fundiciones de hierro dúctil 105
4.11.2. ENSAYO DE DOBLADO 106
4.11.3. ENSAYO DE DUREZA 106
4.11.4. ENSAYO DE IMPACTO 108
CAPÍTULO 5 110
PROCESO EXPERIMENTAL 110
5.1. INTRODUCCIÓN 110
5.2. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL 110
5.2.1. DIMENSIONES 110
5.2.2. ENSAYO DE DUREZA 112
5.2.3. ANÁLISIS QUÍMICO 113
5.2.4. ANÁLISIS METALOGRÁFICO 115
5.2.5. ENSAYO DE TRACCIÓN 117
5.2.6. DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL 118
5.3. DISEÑO DEL CUPÓN DE SOLDAURA 118
5.4. TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO 119
5.4.1. MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA 121
5.4.2. DISPOSITIVOS DE CALENTAMIENTO 124
5.4.2.1. Calentamiento general en horno 124
5.4.2.2. Calentamiento parcial mediante oxigas 124

5.5. DISEÑO DEL TIPO DE JUNTA 125
5.6. MATERIALES DE APORTE..... 125
5.6.1. SMAW 125
5.6.2. TB 125
5.7. ENSAYO DE SOLDABILIDAD PARA SMAW 126
5.7.1. PRIMERA SERIE DE PRUEBA 126
5.7.1.1. Resultados a temperatura ambiente 127
5.7.1.2. Resultados a 121 °C 128
5.7.1.3. Resultados a 260 °C 129
5.7.1.4. Resultados a 400 °C 129
5.7.1.5. Resultados a 540 °C 130
5.7.1.6. Resultados finales de la primera serie 131
5.7.2. SEGUNDA SERIE DE PRUEBA..... 131
5.7.2.1. Resultados a 288 °C 131
5.7.2.2. Resultados a 316 °C. 132
5.7.2.3. Resultados a 343 °C 132
5.7.2.4. Resultados a 471 °C 133
5.7.2.5. Resultados finales de la segunda serie..... 134
5.7.3. TERCERA SERIE DE PRUEBA 134
5.7.3.1. Resultados a 322 °C 134
5.7.3.2. Resultados a 327 °C 135
5.7.3.3. Resultados a 333 °C 135
5.7.3.4. Resultados a 338 °C 136
5.7.3.5. Resultados finales de la tercera serie 137
5.8. PROCESO DE SOLDADURA CON SMAW..... 138
5.8.1. SECADO DE ELECTRODOS 138
5.8.2. CONTROL DE TEMPERATURA 139

5.9. INSPECCIÓN VISUAL 141
5.10. MACROGRAFÍAS 142
5.10.1. PROBETA M1 142
5.10.2. PROBETA M2 143
5.11. MICROGRAFÍAS 143
5.11.1. PROBETA M1 143
5.11.2. PROBETA M2 145
5.12. ENSAYO DE DUREZA 147
5.12.1. PROBETA M1 147
5.12.2. PROBETA M2 148
5.13. ENSAYO DE TRACCIÓN 149
5.13.1. PROBETA T1 149
5.13.2. PROBETA T2 150
5.14. ENSAYO DE DOBLADO 150
5.15. ENSAYO DE SOLDABILIDAD PARA TB 151
5.15.1. DETERMINACIÓN DE LA MEZCLA DE GAS ADECUADA 152
5.15.2. PRIMERA SERIE DE PRUEBA 154
5.15.2.1. Resultados a 300 °C 154
5.15.2.2. Resultados a 400 °C 155
5.15.2.3. Resultados a 500 °C 156
5.15.2.4. Resultados a 600 °C 156
5.15.2.5. Resultados finales de la primera serie 157
5.15.3. SEGUNDA SERIE DE PRUEBA 157
5.15.3.1. Resultados a 420 °C 158
5.15.3.2. Resultados a 440 °C 158
5.15.3.3. Resultados a 460 °C 159
5.15.3.4. Resultados a 480 °C 160

5.15.3.5. Resultados finales de la segunda serie 160
5.16. PROCESO DE SOLDADURA CON TB 161
5.16.1. PRECALENTAMIENTO EN HORNO REALIZADO PARA SMAW Y TB..... 161
5.16.2. OBSERVACIONES AL SOLDAR CON TB 161
5.16.2.1. Resultados de esta prueba 162
5.16.3. SEGUNDA PRUEBA DE SOLDADURA CON TB..... 163
5.16.4. INSPECCIÓN VISUAL..... 164
5.16.5. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS 166
5.16.5.1. Micrografías 166
5.16.6. ENSAYOS DESTRUCTIVOS 167
5.17. ANÁLISIS DE RESULTADOS..... 168
CAPÍTULO 6 172
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 172
6.1. CONCLUSIONES 172
6.2. RECOMENDACIONES 174
BIBLIOGRAFÍA 176
ANEXOS 179

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Diagrama hierro-carburo de hierro. 2

Figura 1.2. Diagrama de Norbury 5

Figura 1.3. Microestructura de una fundición gris con matriz perlítica, 400x. 10

Figura 1.4. Microestructura de una fundición blanca, 100x. 11

Figura 1.5. Microestructura de una fundición maleable, 100x. 12

Figura 1.6. Fundición de hierro dúctil, 100x. 13

Figura 1.7. Nódulos de grafito rodeados de aureolas de ferrita sobre un fondo de perlita. 16

Figura 1.8. Hierro dúctil templado con nódulos de grafito en un fondo de agujas de martensita..... 17

Figura 1.9. Tratamiento térmico vs característica mecánica en fundiciones nodulares..... 18

Figura 1.10. Microestructuras resultantes de ciertos tratamientos térmicos. 19

Figura 1.11. Morfología del grafito presente en el hierro colado..... 21

Figura 1.12. Densidad de nódulos de grafito (1)..... 22

Figura 1.13. Densidad de nódulos de grafito (2)..... 23

Figura 2.1. Elementos del circuito de soldadura típico para SMAW 26

Figura 2.2. Soldadura por arco de metal protegido. 27

Figura 2.3. Electrodos para materiales de hierro dúctil. 28

Figura 2.4. Soldadura en uniones de filete. 34

Figura 2.5. Soldadura en uniones biseladas..... 34

Figura 2.6. Soldadura en uniones de tuberías. 34

Figura 2.7. Tipos de juntas en soldadura. 36

Figura 2.8. Tipos de soldadura. 36

Figura 2.9. Diseños de junta. 36

Figura 2.10. Geometrías de Unión típicas en SMAW (1). 37

Figura 2.11. Geometrías de Unión típicas en SMAW (2). 38

Figura 2.12. Geometrías de Unión típicas en SMAW (3). 38

Figura 2.13. Efectos del amperaje sobre el cordón de soldadura. 41

Figura 2.14. Inclinación del electrodo en la soldadura de surco. 43

Figura 2.15 Soldadura porosa. 44

Figura 2.16. Imperfecciones de soldadura en juntas a tope. 45

Figura 2.17. Penetración o fusión incompleta. 45

Figura 2.18. Socavadura. 46

Figura 2.19. Fracturas en el cráter de una soldadura de filete. 47

Figura 2.20. Fractura longitudinal en unión a tope. 47

Figura 2.21. Disposición de junta para espesores delgados (1). 50

Figura 2.22. Disposición de junta para espesores delgados (2). 50

Figura 2.23. Disposición de junta para espesores gruesos (1). 51

Figura 2.24. Disposición de junta para espesores gruesos (2). 51

Figura 2.25. Disposición de junta para espesores gruesos (3). 52

Figura 3.1. Soldadura fuerte con soplete. 55

Figura 3.2. Diagrama constitucional plata – cobre. 58

Figura 3.3. Metal de aporte de cobre para soldadura fuerte. 60

Figura 3.4. Uniones traslapada y a tope básicas para soldadura fuerte. 65

Figura 3.5. Ángulo de contacto mayor a 90 °- No hay mojado. 66

Figura 3.6. Ángulo de contacto menor a 90 °- Hay mojado. 66

Figura 3.7. Varilla de aleación de bronce recubierta de fundente. 74

Figura 3.8. Intensidad de combustión total de diversas mezclas oxígeno-combustible. 79

Figura 3.9. Soplete típico usado en la soldadura fuerte. 81

Figura 3.10. Llama neutra..... 81

Figura 3.11. Llama carburante..... 82

Figura 3.12. Llama oxidante. 82

Figura 4.1. Interfase sólido-líquido durante el crecimiento planar. 87

Figura 4.2. Interfase sólido-líquido durante el crecimiento celular. 88

Figura 4.3. Interfase sólido-líquido durante el crecimiento dendrítico. 88

Figura 4.4. Interfase sólido-líquido durante el crecimiento equiaxial dendrítico... 89

Figura 4.5. Diagrama TTT para una fundición de 3.75 % de C y 2.09 % de Si. .. 90

Figura 4.6. Relación entre el carbono equivalente y la temperatura sin agrietamiento..... 93

Figura 4.7. Bloque de prueba para hierro dúctil y gris. 95

Figura 4.8. Bloques de inspección por líquidos penetrantes. 98

Figura 4.9. Curva esfuerzo deformación de hierro dúctil. 105

Figura 4.10. Probeta rectangular para tracción de soldaduras. 106

Figura 4.11. Jig para ensayos de doblado. 107

Figura 4.12. Probetas resultantes del ensayo Charpy. 109

Figura 5.1. Bloques de ensayo para soldabilidad. 111

Figura 5.2. Extremo donde va ubicado la termocupla en el bloque de ensayo. 111

Figura 5.3. Placas biseladas de hierro dúctil. 112

Figura 5.4. Espectrómetro de chispa Bruker, modelo Q4TASMAN. 113

Figura 5.5. Diagrama de Heinbauer. 115

Figura 5.6. Microestructura para grafito nodular de forma I y V, tamaño 6 y 7, 100x. 116

Figura 5.7. Microestructura para grafito nodular de matriz ferrítica-perlítica, atacado con picral, 1000x..... 116

Figura 5.8. Curva esfuerzo-deformación para el metal base. 117

Figura 5.9. Diseño del cupón de soldadura. 119

Figura 5.10. Determinación de la temperatura de precalentamiento para hierro dúctil según la ANSI/AWS D 11.2. 120

Figura 5.11. Determinación del rango de temperaturas de transformación martensítica. 121

Figura 5.12. Termómetro Fluke. 122

Figura 5.13. Pirómetro Fluke 68. 123

Figura 5.14. Ubicación de los puntos de medición de las temperaturas entre pases..... 124

Figura 5.15. Diseño de junta elegida. 125

Figura 5.16. Precalentamiento de las probetas de soldabilidad. 127

Figura 5.17. Resultados del ensayo de soldabilidad a temperatura ambiente. . 128

Figura 5.18. Resultados del ensayo de soldabilidad a 121 °C. 128

Figura 5.19. Resultados del ensayo de soldabilidad a 260 °C. 129

Figura 5.20. Resultados del ensayo de soldabilidad a 400 °C. 130

Figura 5.21. Resultados del ensayo de soldabilidad a 540 °C. 130

Figura 5.22. Resultados del ensayo de soldabilidad a 288 °C. 131

Figura 5.23. Resultados del ensayo de soldabilidad a 316 °C. 132

Figura 5.24. Resultados del ensayo de soldabilidad a 343 °C. 133

Figura 5.25. Resultados del ensayo de soldabilidad a 471 °C. 133

Figura 5.26. Resultados del ensayo de soldabilidad a 322 °C. 134

Figura 5.27. Resultados del ensayo de soldabilidad a 327 °C. 135

Figura 5.28. Resultados del ensayo de soldabilidad a 333 °C. 136

Figura 5.29. Resultados del ensayo de soldabilidad a 338 °C. 137

Figura 5.30. Secado de electrodos. 139

Figura 5.31. Mantención del calor en la soldadura. 139

Figura 5.32. Mantención del calor con flameador. 140

Figura 5.33. Control de distorsiones. 140

Figura 5.34. Cupón de soldadura después de la limpieza. 141

Figura 5.35. Detección de mordeduras en el cupón de soldadura. 142

Figura 5.36. Cordón de soldadura y zona afectada por el calor, 40x. 142

Figura 5.37. Pases de soldadura y la ZAC, 40x. 143

(Alex Alvarez) 143

Figura 5.38. Zona de fusión parcial, 500x 144

Figura 5.39. Crecimiento dendrítico hacia el máximo gradiente de temperatura, 500x 144

Figura 5.40. Crecimiento columnar dendrítico en el metal de aporte, 100x. 145

Figura 5.41. Zona de fusión parcial, 100x 145

Figura 5.42. Agujas de cementita en la zona de fusión parcial, 500x. 146

Figura 5.43. Microestructura de perlita en la zona de fusión parcial, 500x. 146

Figura 5.44. Barrido de dureza para la probeta M1. 147

Figura 5.45. Esquema del barrido de dureza para las probetas M1 y M2. 148

Figura 5.46. Barrido de dureza para la probeta M2. 148

Figura 5.47. Curva esfuerzo vs deformación para el material base y las probetas T1 y T2. 149

Figura 5.48. Presencia de dos poros en la probeta T1. 150

Figura 5.49. Jig para el ensayo de dobaldo. 150

Figura 5.50. Resultados al usar glp-oxígeno en TB. 152

Figura 5.51. Uso de glp-oxígeno en soldadura fuerte a diferentes temperaturas. 152

Figura 5.52. Cilindro de acetileno (rojo); oxígeno (verde) y soplete usados en el ensayo de soldabilidad para TB. 153

Figura 5.53. Precalentamiento de probetas para ensayo de soldadura con TB. 154

Figura 5.54. Resultados del ensayo de soldabilidad a 300 °C. 155

Figura 5.55. Resultados del ensayo de soldabilidad a 400 °C. 155

Figura 5.56. Resultados del ensayo de soldabilidad a 500 °C. 156

Figura 5.57. Resultados del ensayo de soldabilidad a 600 °C. 157

Figura 5.58. Resultados del ensayo de soldabilidad a 420 °C. 158

Figura 5.59. Resultados del ensayo de soldabilidad a 440 °C. 159

Figura 5.60. Resultados del ensayo de soldabilidad a 460 °C. 159

Figura 5.61. Resultados del ensayo de soldabilidad a 480 °C. 160

Figura 5.62. Agrietamiento de un punto se sujeción y desalineamiento en soldadura con TB. 162

Figura 5.63. Prensas y puntos de soldadura para evitar el desalineamiento entre placas. 163

Figura 5.64. Puente entre placas para evitar distorsión. 163

Figura 5.65. Proceso de soldadura con TB. 164

Figura 5.66. Defectos en el cupón de soldadura. 164

Figura 5.67. Falta de llenado en la zona de descarte superior. 165

Figura 5.68. Falta de llenado en la zona de descarte inferior. 165

Figura 5.69. Falta de llenado en una placa, 40x. 166

Figura 5.70. Medición de la falta de llenado, 80x. 167

Figura 5.71. Separación del cupón de soldadura. 167

Figura 5.72. Porosidades en el metal de aporte y la intercara..... 168

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Influencia de los aleantes en el hierro colado. 8

Tabla 1.2. Morfologías del grafito esferoidal según la ASTM A 247. 21

Tabla 1.3. Morfologías del grafito esferoidal según la ASTM A 247. 24

Tabla 1.4. Clasificación del hierro fundido dúctil según la ASTM 536..... 24

Tabla 2.1. Especificaciones de la AWS para electrodos recubiertos. 29

Tabla 2.2. Composición química de electrodos para hierro fundido 48

Tabla 2.3. Propiedades mecánicas de electrodos para hierro fundido. 49

Tabla 3.1. Combinaciones metal base - metal de aporte. 62

Tabla 3.2. Soluciones a los problemas típicos en soldadura fuerte. 70

Tabla 3.3. Composición química de varillas de aporte para soldadura fuerte. 72

Tabla 3.4. Propiedades y aplicaciones de material de aporte para soldadura fuerte. 73

Tabla 3.5. Procedimiento de la soldadura fuerte con latón. 75

Tabla 3.6. Características de los gases combustibles comunes. 78

Tabla 3.7 Características de tamaños de boquillas vs presión de gases. 80

Tabla 4.1. Comparación de los ensayos de dureza típicos. 108

Tabla 5.1. Dimensiones del metal base para el proceso de soldadura. 111

Tabla 5.2. Resultados del ensayo de dureza del metal base. 112

Tabla 5.3. Resultados del análisis químico al metal base. 114

Tabla 5.4. Propiedades mecánicas del metal base..... 117

Tabla 5.5. Características del metal base. 118

Tabla 5.6. Especificaciones termómetro Fluke 54 II. 122

Tabla 5.7. Especificaciones pirómetro Fluke 68..... 123

Tabla 5.8. Inspección en el ensayo de soldabilidad en SMAW para 19 °C..... 127

Tabla 5.9. Inspección en el ensayo de soldabilidad en SMAW para 121 °C..... 128

Tabla 5.10. Inspección en el ensayo de soldabilidad en SMAW para 260 °C.... 129

Tabla 5.11. Inspección en el ensayo de soldabilidad en SMAW para 400 °C.... 129

Tabla 5.12. Inspección en el ensayo de soldabilidad en SMAW para 540 °C.... 130

Tabla 5.13. Inspección en el ensayo de soldabilidad en SMAW para 288°C..... 131

Tabla 5.14. Inspección en el ensayo de soldabilidad en SMAW para 316 °C.... 132

Tabla 5.15. Inspección en el ensayo de soldabilidad en SMAW para 343 °C.... 132

Tabla 5.16. Inspección en el ensayo de soldabilidad en SMAW para 471 °C.... 133

Tabla 5.17. Inspección en el ensayo de soldabilidad en SMAW para 322 °C.... 134

Tabla 5.18. Inspección en el ensayo de soldabilidad en SMAW para 327 °C.... 135

Tabla 5.19. Inspección en el ensayo de soldabilidad en SMAW para 333 °C.... 136

Tabla 5.20. Inspección en el ensayo de soldabilidad en SMAW para 338 °C.... 136

Tabla 5.21. Resultados de ensayo a la temperatura de soldabilidad encontrada. 137

Tabla 5.22. Parámetros de soldadura en la tercera serie de prueba. 138

Tabla 5.23. Temperatura para el secado de electrodos..... 138

Tabla 5.24. Registro del control de temperatura durante la soldadura con SMAW. 141

Tabla 5.25. Resultados del ensayo de doblado. 151

Tabla 5.26. Resultados de prueba previa al ensayo de soldabilidad para TB con acetileno-oxígeno. 153

Tabla 5.27. Inspección en el ensayo de soldabilidad en TB para 300 °C. 154

Tabla 5.28. Inspección en el ensayo de soldabilidad en TB para 400 °C. 155

Tabla 5.29. Inspección en el ensayo de soldabilidad en TB para 500 °C. 156

Tabla 5.30. Inspección en el ensayo de soldabilidad en TB para 600 °C. 156

Tabla 5.31. Parámetros de soldadura en la primera serie de prueba en TB..... 157

Tabla 5.32. Inspección en el ensayo de soldabilidad en TB para 420 °C. 158

Tabla 5.33. Inspección en el ensayo de soldabilidad en TB para 420 °C. 158

Tabla 5.34. Inspección en el ensayo de soldabilidad en TB para 460 °C. 159

Tabla 5.35. Inspección en el ensayo de soldabilidad en TB para 480 °C. 160

Tabla 5.36. Parámetros de soldadura en la segunda serie de prueba en TB. ... 161

Tabla 5.37. Acciones correctoras en el proceso TB..... 171

RESUMEN

El presente proyecto trata del estudio de la soldadura en el hierro fundido dúctil, comúnmente conocido como fundición nodular. Varias piezas mecánicas están fabricadas de este tipo de fundición, por ejemplo: tuberías para transporte de agua residual, blocks de motor, cajas diferenciales, engranajes, y varios componentes de máquinas. Su principal aplicación está en la reparación y mantenimiento de todos los elementos antes mencionados, siendo importante la investigación de la factibilidad del proceso de soldadura.

El capítulo 1, describe los tipos de hierros fundidos que se tratan en la actualidad, sus propiedades más relevantes, la influencia de los distintos aleantes en sus características, así también el efecto que se produce en cada tratamiento térmico que se puede aplicar.

El capítulo 2, trata todo lo concerniente al proceso de soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW), los varios tipos de materiales de aporte que se pueden usar, la preparación del material a ser soldado, hasta la calidad final de la soldadura a la que se llega aplicando correctamente este proceso; además se hace énfasis en su empleo para la unión de fundiciones nodulares.

El capítulo 3, hace referencia a la soldadura fuerte con soplete (TB), proceso muy útil cuando se trata de hacer reparaciones, se menciona a la selección de los distintos metales de aporte de acuerdo a la variedad de materiales base en los que pueden ser aplicados mediante este tipo de soldadura. Así mismo se detalla las consideraciones que se tiene al aplicar soldadura fuerte en el hierro dúctil.

El capítulo 4, contiene todas las recomendaciones de la American Welding Society (AWS D11.2) para la soldadura de hierros fundidos, detallando el ensayo de soldabilidad realizado para determinar el carácter cualitativo y cuantitativo de este material, al ser unido mediante los procesos de soldadura más conocidos a nivel mundial.

El capítulo 5, detalla todo el proceso experimental realizado en este proyecto para determinar la soldabilidad en la fundición nodular. Se llevan a cabo ensayos de

tipo no destructivo y destructivo, con el fin de determinar las características de la unión soldada.

El capítulo 6, determina las conclusiones finales del estudio, compartiendo los resultados encontrados de acuerdo al método aplicado para determinar la soldabilidad; de igual modo se recomienda aspectos a considerarse al unir este metal.

PRESENTACIÓN

La soldadura aplicada a las fundiciones es un tema del cual se maneja poca información ya que los aceros son los predilectos para la utilización con fines tecnológicos, no obstante, esto no significa que los hierros fundidos no tengan cabida en el mundo de los materiales; por el contrario, la soldadura en este tipo de aleaciones de hierro, se ve limitada por el alto porcentaje de carbono que presentan en su composición química, lo que los hace poco factibles de soldar.

Adentrándose más en el tema, con la diferente bibliografía que se puede adquirir, no es difícil darse cuenta que la coalescencia de hierros fundidos provee razones de una relativa factibilidad, igual caso para la soldadura con materiales disímiles que incluyan a los distintos tipos de fundiciones.

Se toma como metal de estudio, al hierro fundido dúctil, encontrado en varios textos como fundiciones nodulares, o de grafito esferoidal; de variada aplicabilidad en el mundo de los materiales, tal como: las tuberías de transporte de efluentes residuales, blocks de motores, diferentes tipos de válvulas y una variedad de piezas mecánicas; por lo que resulta importante conocer los métodos de soldadura más adecuados en el soldeo de fundiciones esferoidales. Teniendo en mente que el uso más frecuente para su aplicación, es orientado a la reparación y mantenimiento de los mismos.

De acuerdo a lo antes expuesto, el presente estudio, trata de dar luces en todo lo que conlleva su unión. Se ha establecido comparar los resultados de unir mediante dos procesos de diferente índole, tal como son: la soldadura por arco de metal con electrodo revestido (SMAW); el cual fusiona el metal de aporte y el metal base, y la soldadura fuerte con soplete (TB), proceso que establece su unión mediante la difusión.

Se tienen dos procesos de diferente naturaleza enfocados a un mismo fin, el resultado preponderante está en determinar el mejor proceso de soldadura que conlleve una unión exitosa en estos metales.

CAPÍTULO 1

FUNDICIONES

1.1. INTRODUCCIÓN

Se denomina hierro fundido o fundición, a la aleación de componentes como: hierro, carbono, silicio, manganeso, azufre, fósforo, entre otros. El contenido de carbono es superior al 2.1 % pero en la práctica contienen entre 2.5 y 4 % en carbono. Estas aleaciones se funden a temperaturas en el rango de 1250 a 1300 °C, temperaturas considerablemente más bajas que las de los aceros, siendo este el motivo por el cual se moldean con facilidad. En este material el carbono se presenta como grafito, dependiendo sus propiedades mecánicas de la composición y del tratamiento térmico.

La ductilidad en este material es muy baja limitándose a no poder laminarse, estirarse o trabajarse a temperatura ambiente, también es frágil; aunque con una buena aleación, apropiado control de la fundición y un tratamiento térmico adecuado las propiedades mecánicas (inferiores a la de los aceros) pueden variar de manera amplia.

1.2. DIAGRAMA HIERRO-CARBONO

Se trata de una representación gráfica de temperaturas versus composición de fases, refiriéndose a fase como una región que se diferencia de otra por su estructura y/o composición. Este diagrama se da hasta 6.67 % de carbono de manera teórica, al superarse este porcentaje, se habla de un compuesto químico llamado cementita (Smith & Javad, 2004).

1.3. DIAGRAMA HIERRO-CARBONO METAESTABLE

Este diagrama entra en uso cuando se trata de aceros y fundiciones blancas, correspondiente a un contenido menor de 1 % de silicio.

Al hablarse de fundiciones grises, el estudio se lo realiza con el diagrama hierro-carbono estable, usado en aleaciones con contenidos de silicio entre 1 y 4 %. Por

lo tanto, en el diagrama hierro-carbono estable se estudiará los constituyentes: grafito y hierro, diferentes de la cementita y hierro constituyentes del metaestable que se muestra en la siguiente figura (Smith & Javad, 2004).

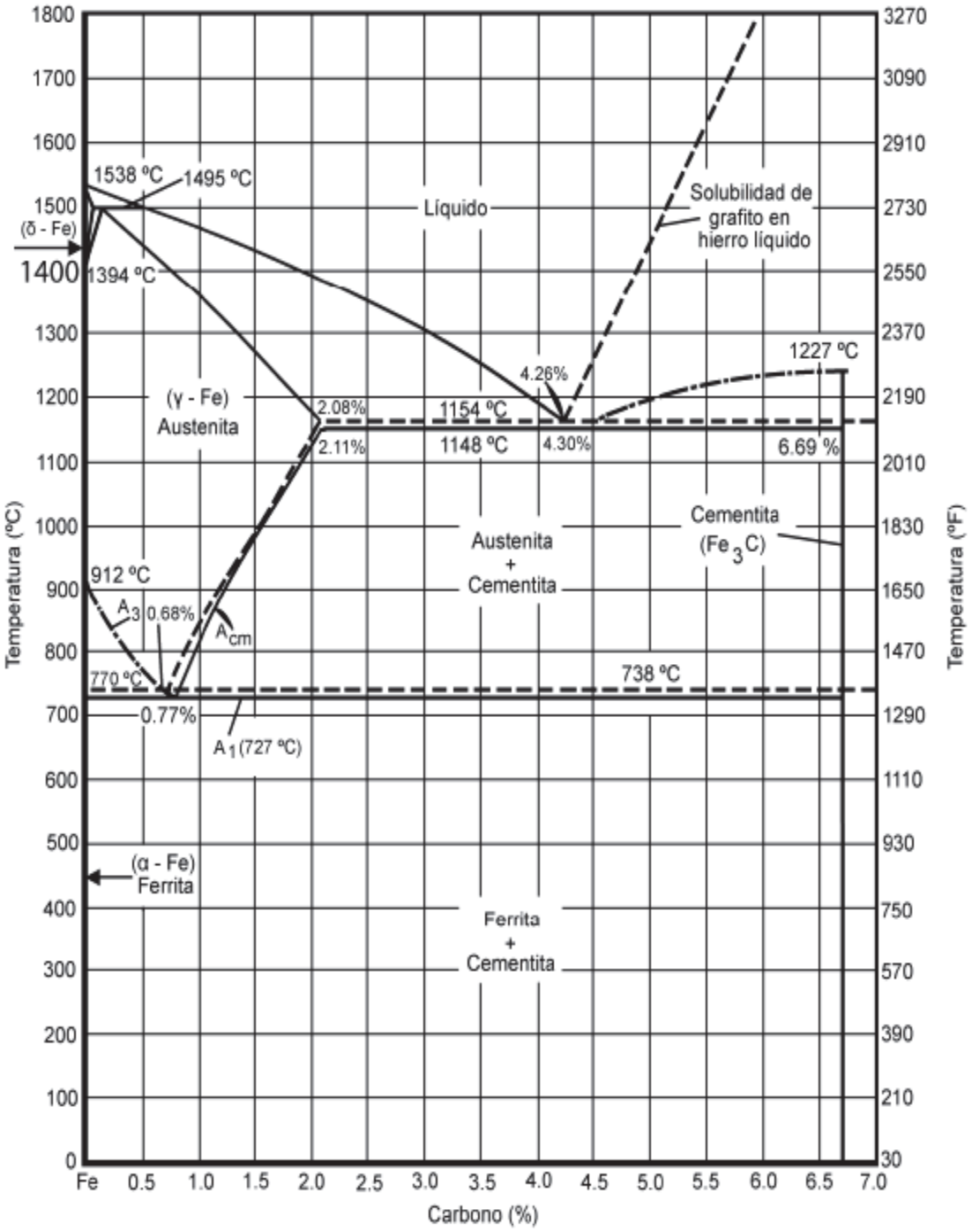


Figura 1.1. Diagrama hierro-carburo de hierro.

(Smith & Javad, 2004)

1.4. PRINCIPALES MICROCONSTITUYENTES DE LAS FUNDICIONES

De acuerdo con (Gordillo, 2010) los microconstituyentes más comunes en las fundiciones son: ferrita, cementita, perlita y grafito. También pudiéndose observar steadita y martensita.

1.4.1. FERRITA

La ferrita está presente en las fundiciones, se diferencia de los aceros en que contiene en disolución, cantidades importantes de silicio que provoca un aumento de dureza y resistencia.

1.4.2. FERRITA ALFA

Es una solución sólida intersticial de carbono en hierro-α; posee una estructura BCC (cúbica de cuerpo centrado). Este compuesto puede disolver hasta 0.0218 % de carbono a 727 ºC, debido a que los espacios intersticiales de la estructura son de bajo tamaño.

1.4.3. FERRITA DELTA

Solución sólida intersticial de carbono en hierro-δ, que posee una estructura BCC. La solubilidad máxima de esta fase es de 0.09 % de carbono a 1495 ºC. Sin importancia tecnológica.

1.4.4. CEMENTITA

Más conocida como carburo de hierro (Fe_3C), se trata de una fase metaestable que contiene 6.67 % de carbono; concentración que coincide con el 100 % molar del compuesto intermetálico. De característica dura, quebradiza con tendencia a la descomposición. Su dureza es superior a 800 Brinell.

1.4.5. PERLITA

Producto de la reacción eutectoide, donde la austenita se transforma en ferrita-α y cementita a temperatura constante de 727 ºC aproximadamente. Debido a la presencia de silicio el contenido de carbono de la perlita de las fundiciones es inferior al de los aceros. Su dureza varía entre los 200 Brinell de dureza para la

perlita gruesa enfriada lentamente y los 300 Brinell para la perlita fina proveniente de un enfriamiento rápido según Apraiz Barreiro (1971).

1.4.6. AUSTENITA

Solución sólida intersticial de carbono en hierro-γ; tiene una estructura cristalina FCC (cúbica centrada en las caras), que permite el alojamiento de mayor cantidad de átomos de carbono con la característica que la distorsión que provocan en la matriz, es muy pequeña. Inestable a temperatura ambiente. El carbono es un estabilizador de la austenita; su solubilidad alcanza un máximo de 2.11 % de carbono a 1148 °C. Su dureza es de aproximadamente 300 Brinell.

1.4.7. MARTENSITA

Se conforma por una solución sólida sobresaturada de carbono o carburo de hierro en ferrita. Este microconstituyente tiene una dureza de 400 a 700 Brinell y un alargamiento del 0.5 al 2.5 %, de característica dura y frágil.

1.4.8. GRAFITO

Forma más elemental del carbono. Es blando y de color gris oscuro encontrándose en estado libre en algunas fundiciones, ejerciendo una influencia en sus propiedades y características de acuerdo a su tamaño, forma y distribución. Por ejemplo tratándose de fundiciones grises, el grafito forma hojuelas, en las fundiciones maleables se presenta en forma de nódulos, en las fundiciones dúctiles en forma de esferas.

Cuando el grafito tiene forma de hojuelas y se encuentra en cantidades importantes, causa una disminución de la dureza, la resistencia y el módulo de elasticidad; además reduce la ductilidad, plasticidad y tenacidad. Por otra parte esta mejora la resistencia al desgaste y corrosión, mejora la maquinabilidad y reduce las contracciones en la solidificación. La disminución de resistencia y tenacidad es menor cuando el grafito está presente en forma de nódulos o esferas. Los factores que dan lugar a la formación del grafito son:

1.4.8.1. Influencia del silicio

No hay influencia de este elemento cuando se tiene entre 0.1 a 0.6%, superando este porcentaje, se tiene una variación en las propiedades mecánicas de la

aleación hierro-carbono. La relación entre el porcentaje de carbono y silicio, da lugar al diagrama de Norbury de la figura 1.2. En resumen, en cuanto mayor porcentaje de carbono se tiene en la aleación, mayores son las probabilidades de formación de grafito.

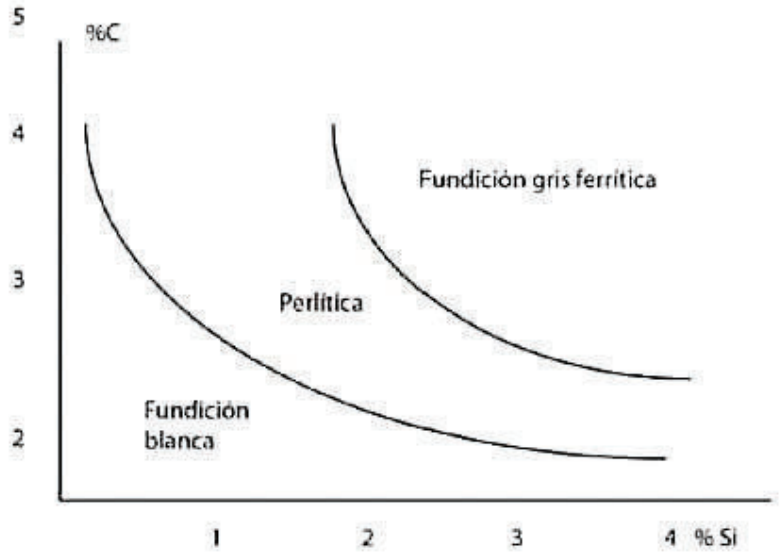


Figura 1.2. Diagrama de Norbury
(Apraiz, 1971)

1.4.8.2. Enfriamiento en la formación de grafito

Para altas velocidades se obtienen fundiciones blancas, coladas en moldes de pequeños espesores; para el caso contrario se favorece a la formación del grafito obteniendo fundiciones grises. Esta clara variación influye en la microestructura, teniendo durezas altas en espesores delgados y bajas durezas en las zonas de mayor espesor.

1.4.9. LEDEBURITA

Constituyente eutéctico que formado en el enfriamiento de las fundiciones en el momento que termina la solidificación, contiene un 52 % de cementita y 48 % de ausentita. Este compuesto no está presente a temperatura ambiente en fundiciones ordinarias, sin embargo es reconocible su existencia en zonas a causa del aspecto eutéctico de sus agrupaciones de perlita y cementita.

1.4.10. STEADITA

Compuesto duro y frágil, se lo encuentra cuando se obtiene una fundición con un porcentaje mayor al 0.15 % de fósforo. El fosfuro de hierro que forma parte de la steadita tiene una dureza entre los 600 a 700 Vickers.

1.5. ALEANTES EN LAS FUNDICIONES

Los aleantes en las fundiciones modifican su microestructura por lo tanto su dureza y resistencia. Aleantes como: silicio, aluminio, níquel y cobre, son los encargados de favorecer la grafitización; estos se disuelven en ferrita aumentando la dureza y resistencia de las fundiciones.

El cromo, manganeso y molibdeno se encargan de formar carburos, dificultando la grafitización además de tener a formar fundición blanca en vez de fundición gris.

La matriz austenítica se ve favorecida gracias al níquel, manganeso y cobre. El silicio, molibdeno y aluminio fomentan la aparición de ferrita estable, formando la matriz ferrítica. José Apraiz destaca los siguientes aleantes:

1.5.1. ALUMINIO

Aumentando el porcentaje de aluminio de 2 a 4 % se obtiene un decrecimiento de la grafitización hasta su nulidad.

1.5.2. TITANIO

Es aún más grafitizante que el silicio, aspecto que disminuye en porcentajes mayores al 0.2 %.

1.5.3. COBRE

Decrece su acción grafitizante a 0.05 % si el contenido de carbono es mayor a 3 %.

1.5.4. MANGANESO

Los porcentajes de 0.8 a 1.5 % de este aleante corresponden al coeficiente de -0.25 (Ver tabla 1.1). Cuando se está por debajo de 0.8 %, el manganeso decrece en su accionar. Cuando se trata de 0.6 % favorece la formación de grafito al momento de combinarse con azufre.

1.5.5. MOLIBDENO

Los porcentajes de 0.8 a 1.5 % corresponden a un coeficiente de -0.30 de molibdeno (Ver tabla 1.1). Porcentajes inferiores al antes mencionado derivan en un accionar más débil, por el contrario de lo que sucede con porcentajes superiores.

La acción individual de los aleantes es la siguiente:

1.5.6. NÍQUEL

Ayuda al proceso de grafitización, disminuye la estabilidad del carburo. El triple de contenido de este elemento tiene el mismo efecto que una parte de silicio, por lo que su acción es menos activa. Confiere un aumento de la resistencia de la matriz, reduce el tamaño del grafito laminar y del tamaño de granos.

Una acción muy importante es que previene la formación de hierro blanco en esquinas y secciones delgadas de piezas, aumentando la maquinabilidad.

Porcentajes mayores a 15 % de níquel dan lugar a fundiciones austeníticas, con buenas propiedades de resistencia a la corrosión y al calor. De 3.5 a 5 % de este aleante proveen fundiciones martensíticas de alta dureza. Con porcentajes de 0.5 a 3 % se obtienen fundiciones de alta resistencia.

1.5.7. CROMO

Actúa como estabilizador de cementita evitando la grafitización. Provoca un efecto de decrecimiento leve en el tamaño de las láminas de grafito, aumentando la dureza de la matriz. De 12 a 30% de cromo se utiliza para conferir propiedades de resistencia a la corrosión y altas temperaturas, formando también carburos de cromo estables.

1.5.8. MOLIBDENO

Favorece ligeramente a un carburo de hierro estable, reduciendo las láminas de grafito, por el contario aumentando la resistencia de la matriz. Su uso más frecuente está dirigido a fundiciones aciculares poseedores de una alta tenacidad.

1.5.9. COBRE

Es un grafitizador de acción leve, aumenta la fragilidad el material y la resistencia de la matriz. Proporciona cualidades antifricción y mejora la resistencia al desgaste y la corrosión tanto de agentes corrosivos como atmosféricos.

Tabla 1.1. Influencia de los aleantes en el hierro colado.

Elemento	Grafitización y coeficientes de grafitización	Efecto sobre los carburos a alta temperatura	Efecto en la estructura del grafito	Efecto en el carbono combinado de la perlita	Efecto que produce en la matriz
Carbono	Favorece	Decrece estabilidad	Engruesa	Decrece fuertemente	Ablanda y favorece la formación de ferrita
Silicio	Favorece +1	Decrece estabilidad	Engruesa	Decrece fuertemente	Ablanda y favorece la formación de ferrita
Aluminio	Favorece +0,5	Decrece estabilidad	Engruesa	Decrece fuertemente	Ablanda y favorece la formación de ferrita
Titanio	Favorece +0,4	Decrece estabilidad	Afina fuertemente	Decrece	Ablanda y favorece la formación de ferrita
Níquel	Favorece +0,35	Decrece ligeramente estabilidad	Afina fuertemente	Decrece y estabiliza la perlita	Afina la perlita y da dureza
Cobre	Favorece +0,20	Indiferente	Indiferente	Decrece ligeramente	Da dureza
Manganeso	Se opone -0,25	Estabiliza	Afina fuertemente	Aumenta	Afina la perlita y da dureza
Molibdeno	Se opone -0,30	Indiferente	Afina fuertemente	Aumenta ligeramente	Afina la perlita y da resistencia
Cromo	Se opone -1	Estabiliza fuertemente	Afina fuertemente	Aumenta	Afina la perlita y da dureza
Vanadio	Se opone -2,5	Estabiliza fuertemente	Afina	Aumenta	Afina la perlita y da dureza

(Apraiz, 1971)

1.6. CLASIFICACIÓN DE LAS FUNDICIONES

Se tratará a las fundiciones según las siguientes formas: según el tipo de fractura y según la microestructura presentada.

1.7. SEGÚN EL TIPO DE FRACTURA

Se clasifican en fundiciones: gris, blanca y atruchada. La fundición formada por un enfriamiento lento y con contenido de silicio de 1.5 a 3.5 %, teniendo su color grisáceo en referencia al tono de su fractura por las láminas de grafito que posee, mismo color que presenta la fundición atruchada con 0.6 a 1.5 % de silicio. La fundición blanca formada con un enfriamiento rápido con 1 % de silicio, su zona de fractura es de color blanco o brillante. También se ha obtenido la fundición maleable fruto del recocido de la fundición blanca en condiciones especiales según Apraiz Barreiro.

1.8. SEGÚN SU ESTRUCTURA METALOGRÁFICA

Se consideran las siguientes variables: el contenido de carbono, contenido de aleación e impurezas, la velocidad de enfriamiento y el tratamiento térmico después de fundirse. Dichas variables influyen en la forma del carbono, pudiendo encontrarse como carburo de hierro en cementita o simplemente libre como grafito (Avner, 1992).

1.8.1. HIERRO FUNDIDO GRIS

Es la forma más común de fundición y la más ampliamente utilizada. La mayoría son aleaciones hipoeutécticas con un porcentaje de carbono que varía del 2.5 al 4 %. El exceso de carbono precipita en hojuelas de grafito de forma alargado y curvo proporcionando la característica grisácea o negruzca visible al momento de la fractura encerrado en una matriz ferrítica, perlítica o mezcla de los dos microconstituyentes, cabe recalcar que la matriz será originaria de la resistencia de este material.

De acuerdo a una composición y velocidad de enfriamiento puntuales se tendrá una cementita eutectoide dando nacimiento a una matriz completamente ferrítica; por otro lado evitando que se grafitice la cementita eutectoide se conseguirá una

matriz perlítica. La mezcla grafito-ferrita proporcionará una resistencia y dureza incrementadas por causa del carbono combinado (Avner, 1992).

El producto resultante tiene una moderada resistencia, excelente maquinabilidad y propiedades de amortiguamiento en contraste de una baja ductilidad, en adición de un costo bajo y fácil moldeo. Tiene una resistencia a la tensión mayor a 40 000 psi (276 MPa). El aumento de la resistencia mecánica se da con la adición de cualquiera de los siguientes elementos:

- Silicio (más de 6 %)
- Níquel (más de 36 %)
- Cobre (entre 1.5 y 7.5 %)
- Cromo (entre 1 y 6 %)
- Molibdeno (más de 1 %)

Se puede obtener un aumento en la resistencia a la tensión hasta de 80 000 psi (380 MPa). Se requieren procesos especiales de soldadura debido a la gran cantidad de aleantes encontrados en este material y no todos los grados de hierro grises son soldables. (American National Standar & American Welding Society, 1989).

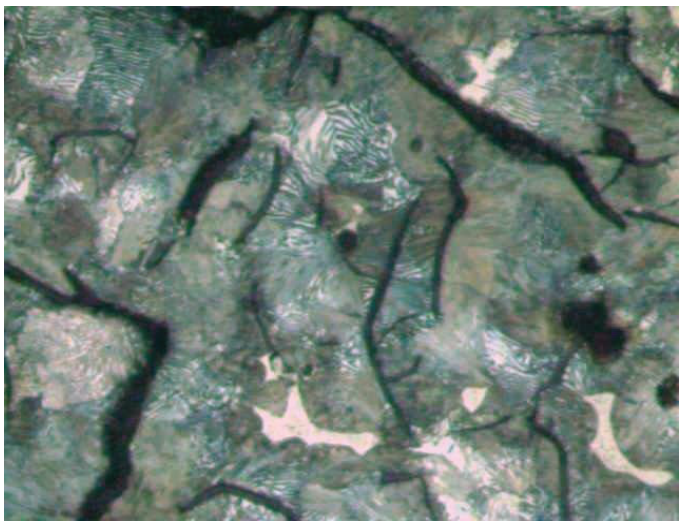


Figura 1.3. Microestructura de una fundición gris con matriz perlítica, 400x.
(Universidad Politécnica de Valencia, 2013)

1.8.2. HIERRO FUNDIDO BLANCO

Si el enfriamiento es rápido, el carbono aparece como cementita en vez de grafito. Se la caracteriza así porque su superficie de rotura es de tonalidad blanca. Debido a la gran cantidad de cementita este hierro blanco tiende a ser duro y frágil, por lo que no es mecanizable. Su aplicación conlleva componentes de gran dureza y resistencia al desgaste sin propiedades de ductilidad como son los cilindros de trenes de laminación.

La cantidad de cementita relativamente grande proporciona características resistentes al desgaste pero con baja ductilidad haciéndola difícil de maquinar.

Debido a su dureza y baja maquinabilidad, estos hierros fundidos blancos tienen pocas aplicaciones industriales, se aprovecha de mejor manera su característica resistente al desgaste haciéndola útil en: camisas para mezcladores de cemento, esferas de trituración para acería, dados para estiramiento y boquillas de extrusión (Avner, 1992). La resistencia a la tensión va de 160 a 620 MPa (American National Standar & American Welding Society, 1989).

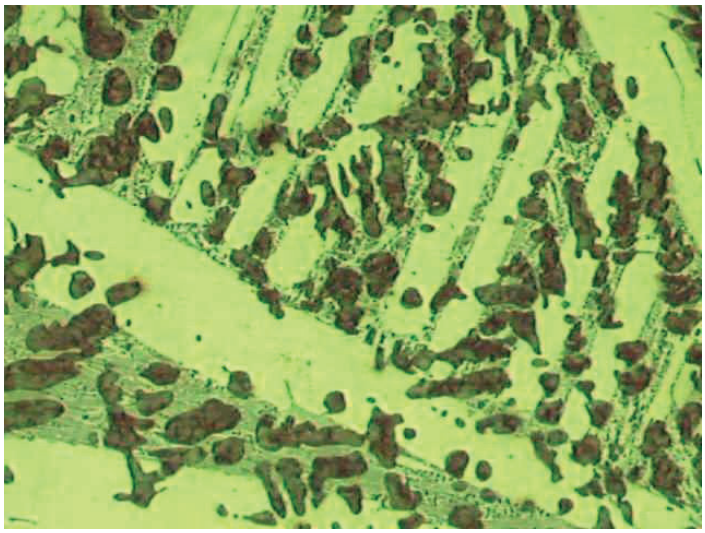


Figura 1.4. Microestructura de una fundición blanca, 100x.
(Universidad Politécnica de Valencia, 2013)

1.8.3. HIERRO FUNDIDO MALEABLE

La tendencia de la cementita a formar carbono y hierro sin combinar es la base de la idea del hierro fundido maleable. Calentando el hierro fundido blanco entre 800

y 900 °C en tiempos prolongados y con atmósfera neutra, se dará lugar a que la cementita se descomponga formando grafito en una matriz ferrítica o perlítica, dependiendo la estructura de la misma de la velocidad de enfriamiento, mientras que la microestructura será parecida a la de una fundición dúctil. Este material dispondrá de resistencia relativamente alta y una apreciada maleabilidad y ductilidad.

Se aplica para la fabricación de tubos de dirección, engranajes de transmisión y cajas diferencias en industria automovilística; rebordes, muelles tubulares, partes de válvulas para la industria y otros fines (Callister, 2002). El rango de resistencia a la tensión va desde 310 a 620 MPa (American National Standar & American Welding Society, 1989).

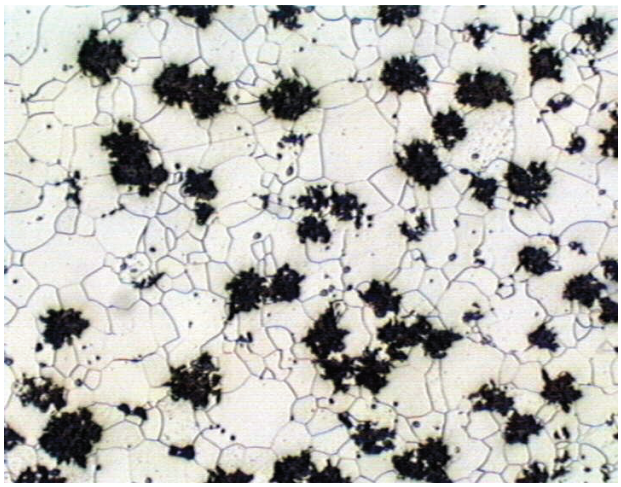


Figura 1.5. Microestructura de una fundición maleable, 100x.
(Universidad Politécnica de Valencia, 2013)

1.8.4. FUNDICIÓN DE HIERRO DÚCTIL

Por ser el material a usar para este estudio se dará más énfasis en su descripción. Se le conoce con varios nombres como: hierro dúctil, hierro esferulítico o hierro de grafito esferoidal, donde el grafito se encuentra en forma de pequeñas esferas o esferoides.

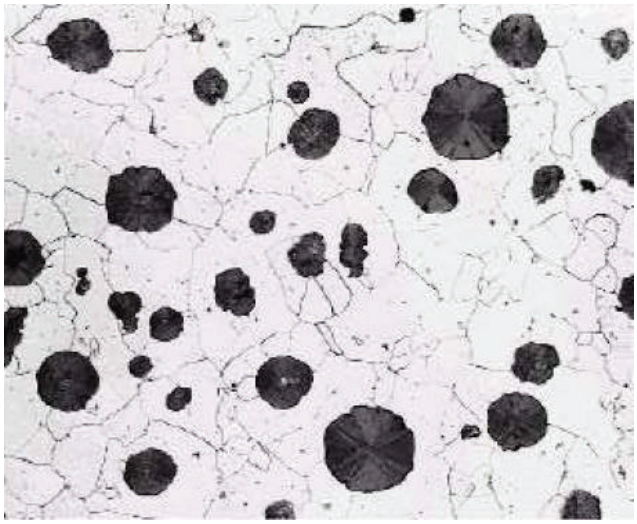


Figura 1.6. Fundición de hierro dúctil, 100x.
(American Society for Metals HandBook Volume 1, 1997)

1.8.5. EFECTO DE LA MATRIZ SOBRE EL HIERRO DÚCTIL

De acuerdo a Apraiz Barreiro, los hierros dúctiles con buena nodulización, cantidad de esferas de grafito y carburos aceptables, además de una baja porosidad, son materiales definidos de acuerdo a los componentes de su matriz y dureza.

1.8.5.1. Fundición nodular de matriz ferrítica

Es de buena resistencia a impactos, de característica muy dúctil, equiparando su resistencia mecánica y fluencia a la de un acero de bajo carbono. Es susceptible a aplicar un recocido con el objeto de tener una ductilidad elevada a su punto máximo y tenacidad a bajas temperaturas.

1.8.5.2. Fundición nodular de matriz ferrítica – perlítica

Tiene un bajo costo de producción en contraste con su fabricación, para cual se requiere un mayor control en sus variables al ser fabricado. Su microestructura se conoce como: “ojo de buey”.

1.8.5.3. Fundición nodular de matriz perlítica

Esta matriz otorga al material: alta resistencia mecánica, ductilidad moderada, buena resistencia al desgaste y al impacto, de excelente maquinabilidad. Son las

más comúnmente obtenidas en el proceso de fundición pero se les puede tratar térmicamente o introducirles elementos adicionales con el objeto de elevar sus propiedades de acuerdo a la aplicación solicitada.

1.8.5.4. Fundición nodular martensítica

Un tratamiento térmico controlado más la adición de aleantes que evitan la formación de perlita se obtiene el tipo de matriz martensítica. Presenta una baja ductilidad y tenacidad, por el contrario es dueña de elevada resistencia mecánica y al desgaste.

1.8.5.5. Fundición nodular austenítica

Con la introducción de aleantes estabilizadores de la matriz austenítica se obtiene este tipo de matriz. Tiene una resistencia mecánica excelente, soporta los efectos de la corrosión, es estable a elevadas temperaturas y de buenas propiedades magnéticas.

1.8.5.6. Fundición nodular bainítica

Nace de un temple austenítico (austempering) que proporciona una resistencia mecánica aproximada al doble de la fundición nodular con matriz perlítica, extrayendo para sí elevada ductilidad y tenacidad, elevando la resistencia a la fatiga (Baño, 2008).

1.9. PROPIEDADES DE LAS FUNDICIONES DÚCTILES

Este tipo de material tiene resistencias entre 45 y 90 $\mathrm{Kg/mm^2}$, siendo de cierta forma comparable a un acero semiduro, su límite elástico es aproximadamente de 65 % de la carga de rotura, alcanza hasta el 85 % de elasticidad después de haberse sometido a un temple y revenido. El valor del módulo de elasticidad es de 17 500 $\mathrm{Kg/mm^2}$, menor al de los aceros.

Cuando el hierro dúctil se somete a un ensayo de tracción se puede conocer que las cargas actuantes son proporcionales a las deformaciones producidas, lo que se contrasta en las fundiciones grises que no siguen la ley de proporcionalidad a causa del impedimento que causan las láminas de grafito.

Para obtenerse piezas delgadas se necesita una cantidad mayor de silicio con el objetivo de evitar que la fundición blanquee. Se cuenta con un punto de fusión más bajo que otra aleación hierro-carbono debido a su proximidad a la composición eutéctica. Cuenta con una colabilidad y mayor fluidez que demás las aleaciones Fe-C permitiendo la provisión de piezas complicadas, fundiéndose el carbono sin dificultad en el cubilote.

Tiene gran resistencia al desgaste siendo tomada en cuenta cuando se fabrica elementos de máquinas y motores.

El grafito mejora la maquinabilidad contribuyendo también a la lubricación de superficies, actuando como recipiente donde se acumula el lubricante.

1.10. TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LAS FUNDICIONES DE GRAFITO ESFEROIDAL

Su microestructura puede constituirse de: ferrita, ferrita y perlita, perlita, martensita, y martensita revenida o bainita, todo de acuerdo a los tratamientos térmicos, siendo estos aplicables según sea el requerimiento, recocidos normalizados, recocido de eliminación de tensiones, temples y revenidos, austempering o endurecimientos superficiales con inducción y varios más de acuerdo a Apraiz Barreiro.

1.10.1. RECOCIDO DE ALIVIO O ELIMINACIÓN DE TENSIONES

La temperatura de este tratamiento va de 525 a 675 ºC usándose a temperatura baja cuando se quiere evitar el ablandamiento de piezas, y temperatura alta cuando no es relevante la disminución de la dureza o resistencia, siendo de interés la eliminación de las tensiones residuales.

1.10.2. RECOCIDO

Se da un recocido de grafitización para obtener piezas de máxima ductilidad o máxima maquinabilidad, ya que este proceso proporciona una estructura de ferrita y grafito esferoidal. Se realiza en dos fases:

a) Se calienta el hierro dúctil por encima de la temperatura crítica disolviendo así los carburos de austenita.

b) Se procede a un enfriamiento haciendo que la austenita se transforme en ferrita, y el carbono precipite en forma de grafito alrededor de las partículas de grafito de forma esferoidal ya existentes. La temperatura crítica dependerá de la composición del hierro dúctil, pudiendo esta variar muy poco con los elementos de la aleación.

Se siguen tres ciclos de recocido diferentes:

a) Tres horas de calentamiento a 900 ºC con un enfriamiento posterior dentro de un horno a 690 ºC, de cinco a ocho horas, sin cuidados especiales.

b) Tres horas de calentamiento a 900 ºC con un enfriamiento posterior dentro de un horno a 650 ºC, de tal manera que el enfriamiento comprendido entre 790 y 650 ºC se efectúe con una velocidad de 15 ºC por hora.

c) Calentamiento a 925 ºC, y enfriamiento rápido con aire hasta 600 ºC, a continuación de un ligero calentamiento con el fin de realizar un recocido isotérmico a 720 ºC por seis horas, finalmente terminando con un segundo enfriamiento al aire.

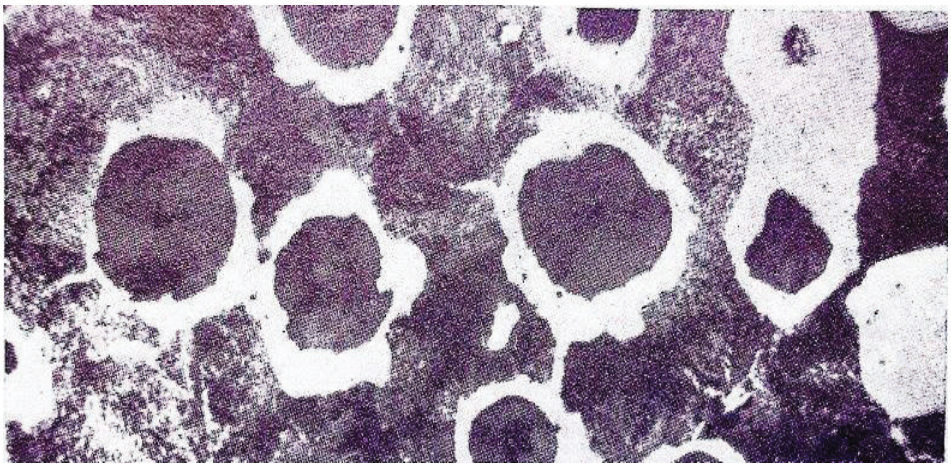


Figura 1.7. Nódulos de grafito rodeados de aureolas de ferrita sobre un fondo de perlita. (Apraiz, 1971)

1.10.3. TEMPLE Y REVENIDO

El temple de la fundición dúctil se asemeja al temple de los aceros, siendo de gran influencia la temperatura de austenización y el contenido en silicio. Generalmente se emplean temperaturas variables de 850 a 925 °C. El

enfriamiento habitualmente es realizado en aceite para reducir al mínimo las tensiones que pueden presentarse. Sin embargo el temple en agua también resulta una opción viable.

La templabilidad de la fundición dúctil depende mucho de su composición. Dentro de las composiciones normales el carbono y el silicio tienen poca influencia en la disminución de la misma, por el contrario el molibdeno, cromo y manganeso tienen una influencia apreciable.

Después del temple se obtiene una estructura de grafito esferoidal y martensita, tal como se ve en la figura 1.7. Con el revenido, se disminuye la dureza y la resistencia pero se aumenta el alargamiento.

1.10.4. NORMALIZADO Y REVENIDO

El normalizado consiste en calentar las piezas hasta austenizarlas y enfriarlas luego al aire. De esta forma se consiguen muy buenas características mecánicas. Las temperaturas del normalizado suelen variar de 875 a 925 °C. La microestructura que se obtiene por normalizado depende de la composición de las piezas y de la velocidad de enfriamiento que a su vez es función de la temperatura y del espesor de las piezas.

Con el normalizado se obtiene en general una estructura homogénea de perlita fina.

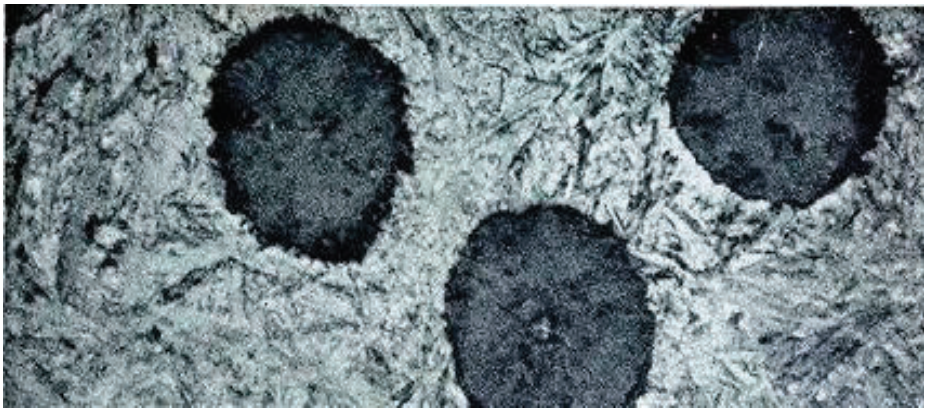


Figura 1.8. Hierro dúctil templado con nódulos de grafito en un fondo de agujas de martensita.
(Apraiz, 1971)

La templabilidad de estas fundiciones se modifica notablemente por la adición de elementos de aleación. De esta forma es posible obtener perlita fina en piezas de hasta 150 mm de espesor. El níquel es muy utilizado porque aumenta sensiblemente la resistencia de las piezas gruesas y no forma carburos. El molibdeno combinado con el níquel es muy útil para mejorar la resistencia y la dureza de esta clase de fundiciones.

Después del normalizado, generalmente se da a las piezas un calentamiento subcrítico que suele recibir el nombre de revenido, debido a que en este proceso se disminuye la dureza y se reducen las tensiones internas que pueden aparecer en el normalizado de piezas de gran espesor.

El efecto del revenido en la dureza y la resistencia depende de la composición y del nivel de dureza que se obtiene en el normalizado.

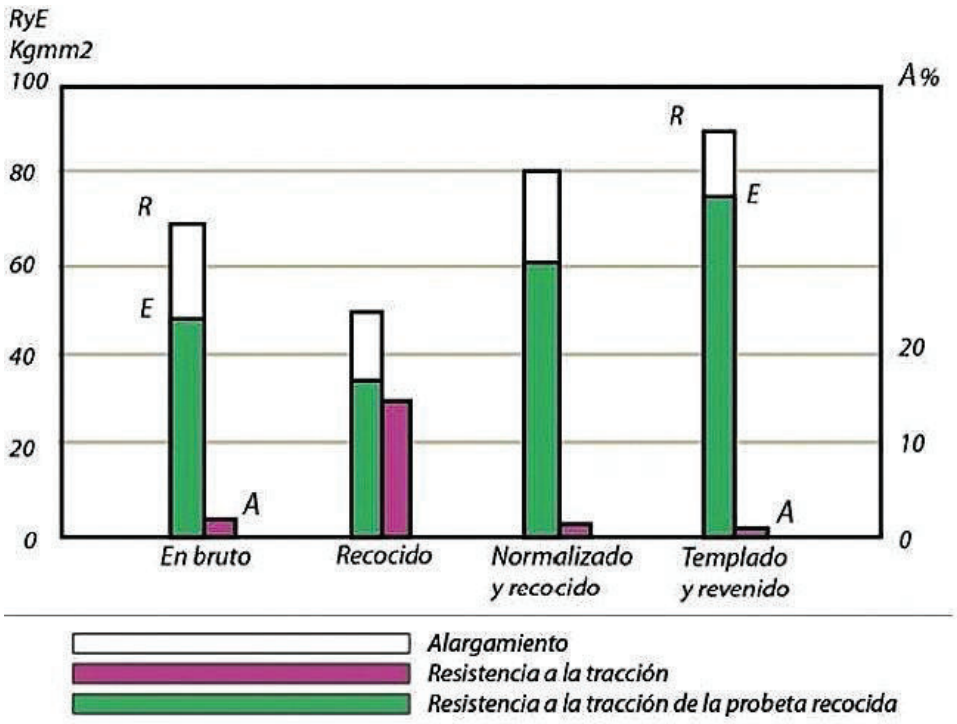


Figura 1.9. Tratamiento térmico vs característica mecánica en fundiciones nodulares.

(Gordillo, 2010)

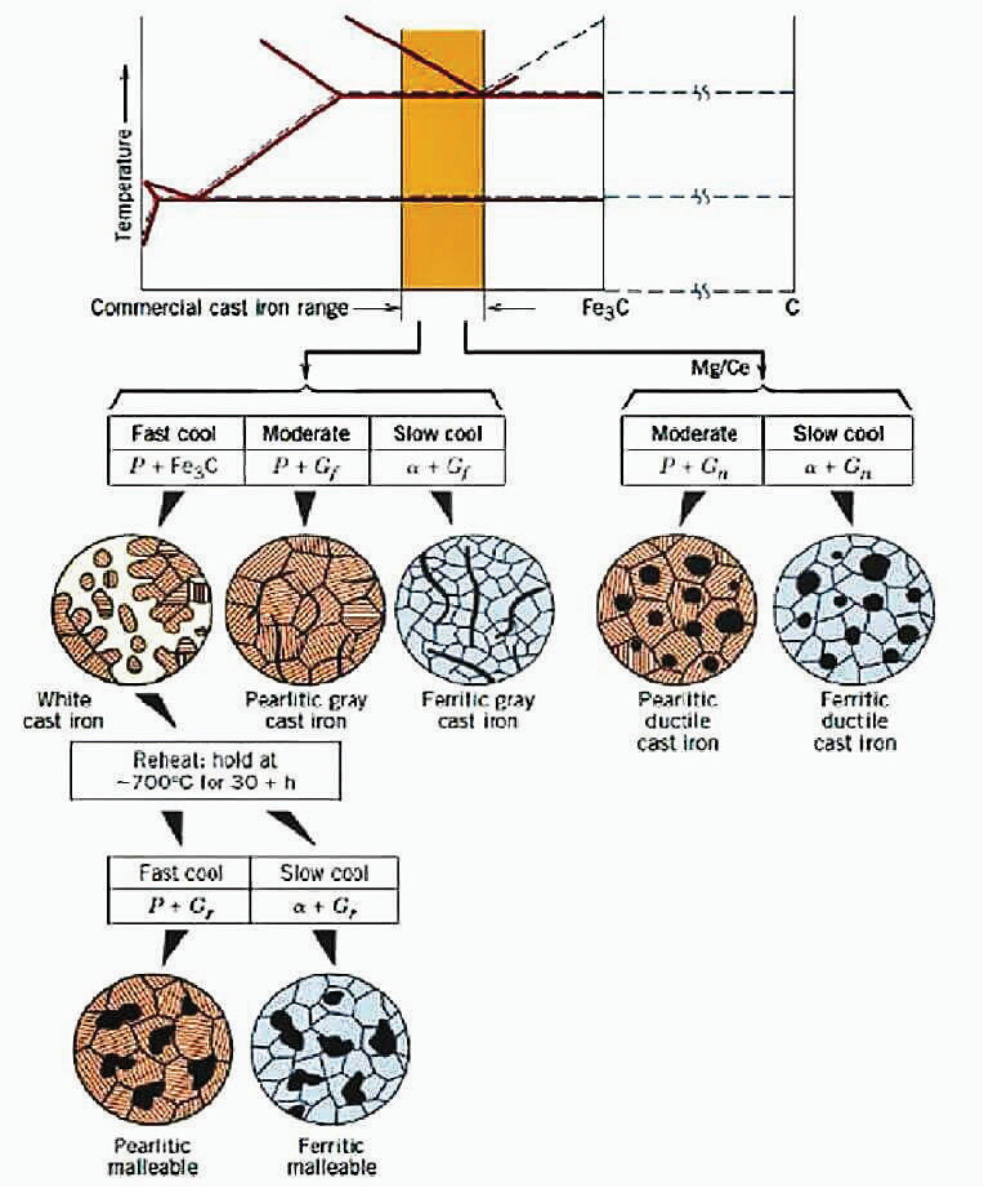


Figura 1.10. Microestructuras resultantes de ciertos tratamientos térmicos. (Callister, 2002)

1.11. FABRICACIÓN DE HIERRO FUNDIDO DÚCTIL

Al hierro líquido bajo en azufre (0.02 % en peso) se le añade un aditivo con magnesio (0.04 a 0.06 % en peso), luego se inocula con una aleación de silicio un poco antes de ser vertido. Se debe evitar elementos que promuevan una reacción perlítica de la matriz.

El elemento que determina el tipo de matriz es el manganeso; para una matriz ferrita de colada, el contenido de manganeso no de exceder el 0.2 %. Si el requerimiento es de una matriz perlítica, el contenido de manganeso debe ser del 1 % en peso de manganeso.

Según (Gordillo, 2010) los métodos de fabricación de hierros colados dúctiles son:

1.11.1. INOCULACIÓN

Consiste en la adición de elementos inoculantes ricos en silicio con el objetivo de promover la formación de grafito durante la solidificación, de esta forma disminuyendo el subenfriamiento. El exceso de inoculantes puede provocar porosidades e inclusiones, disminuyendo la calidad de las piezas fundidas. De forma general se utilizan de 0.5 a 1.0 % de ferrosilicio (Fe-Si) con aproximadamente un 75 % de silicio o de 0.3 a 0.6 % de inoculantes más eficaces.

1.11.2. NODULIZACIÓN

Se añaden entre 0.04 y 0.08 % de magnesio, teniendo en cuenta que el porcentaje de azufre sea bajo. Al superar el 0.1 % de magnesio, la forma del grafito que se precipita es degenerada. Este proceso se da entre 1470 ºC y 1510 ºC, conociendo que si se sobrepasa de este intervalo de temperatura, el rendimiento del magnesio disminuye por oxidación y volatilización.

Si la temperatura es menor al rango especificado, se corre el riesgo de que la cementita precipite. Para porcentajes entre 0.02 y 0.04 % de cerio, serían suficientes para la obtención de estructura totalmente nodular. Si se usa calcio se recomienda porcentajes entre 0.01 y 0.02 %.

1.12. EL HIERRO DÚCTIL SEGÚN LA AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM)

La norma ASTM A 247, hace una comparación de la forma del grafito observada en la muestra metalográfica con las formas de las microestructuras estándar que según la siguiente figura clasifican la morfología del grafito.

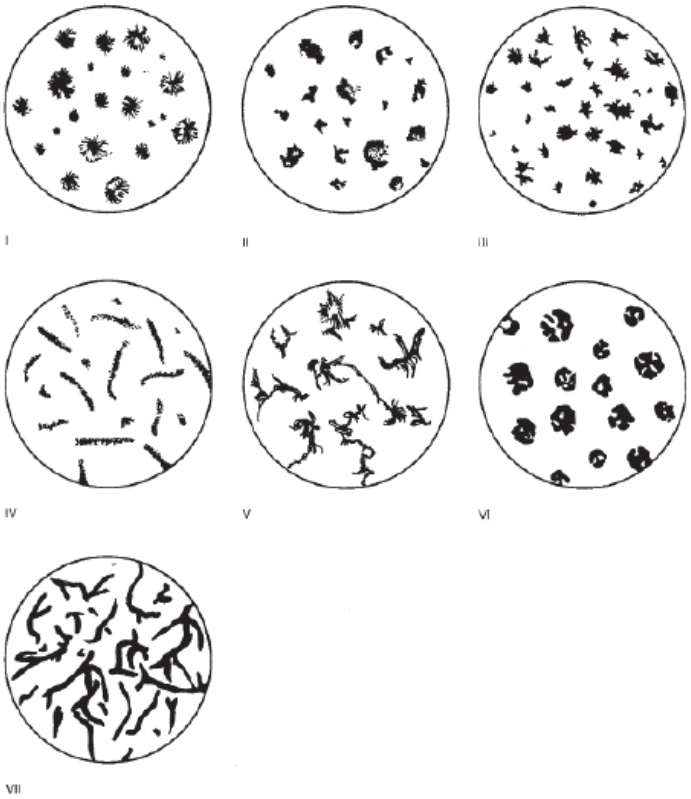


Figura 1.11. Morfología del grafito presente en el hierro colado.
(American Standard For Testing Materials, 1998)

Las partículas de grafito son designadas por números y letras, proporcionando una descripción del tamaño, tipo y forma del grafito.

Tabla 1.2. Morfologías del grafito esferoidal según la ASTM A 247.

ASTM	ISO	Descripción
I	VI	Grafito nodular o esferoidal
II	VI	Grafito nodular con morfología irregular
III	IV	Grafito o carbono revenido
IV	III	Grafito con morfología parecida a hojuelas
V	II	Grafito en forma de molinete
VI	V	Nódulos irregulares o abiertos
VII	I	Hojuelas de grafito

(American Standard For Testing Materials, 1998)

1.12.1. EFECTO DE LA DENSIDAD DE LOS NÓDULOS

Se refiere a la relación entre la cantidad de nódulos en una determinada área, proporcionando información sobre la elaboración del hierro dúctil, lo cual no afecta a las propiedades mecánicas, caso contrario sucede en la matriz, afectando su homogeneidad. Una mayor densidad de nódulos conlleva una reducción de la segregación de elementos iniciadores de carburos, degenerando además la morfología del nódulo.

El número de nódulos se relaciona con el porcentaje de perlita, microconstituyente que disminuye con la precipitación de una gran cantidad de nódulos, el resultado es una disminución en los valores de resistencia a la tracción, aumentando la ductilidad (Gordillo, 2010).

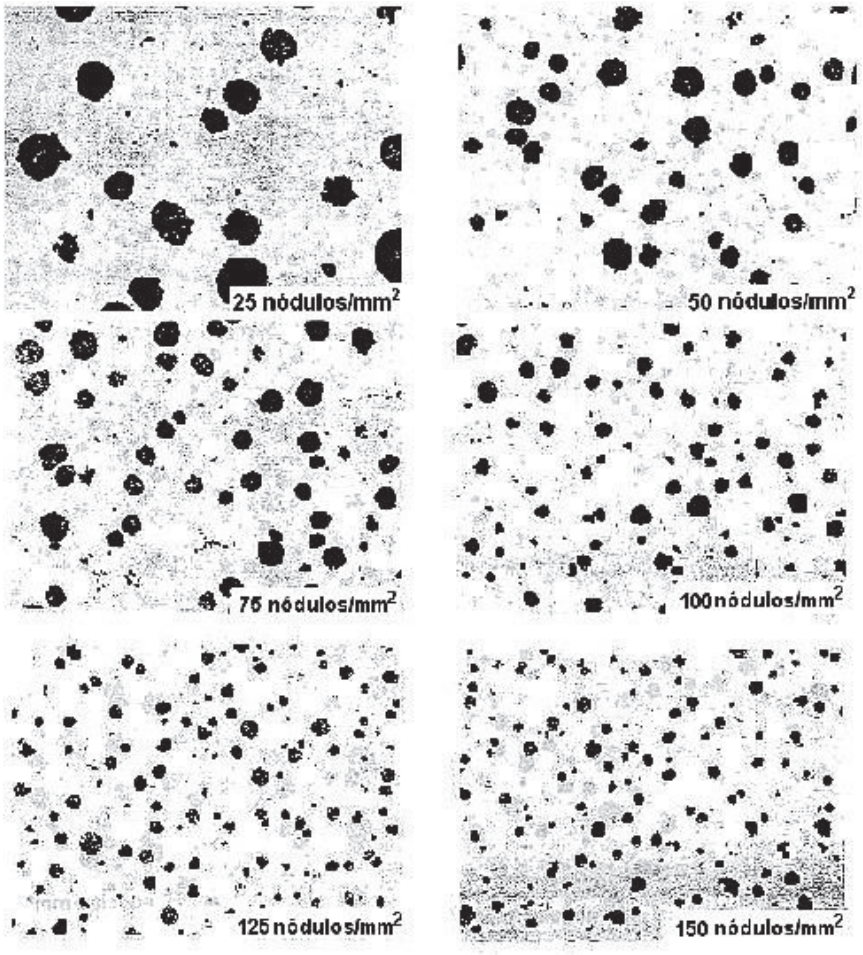


Figura 1.12. Densidad de nódulos de grafito (1).
(Gordillo, 2010)

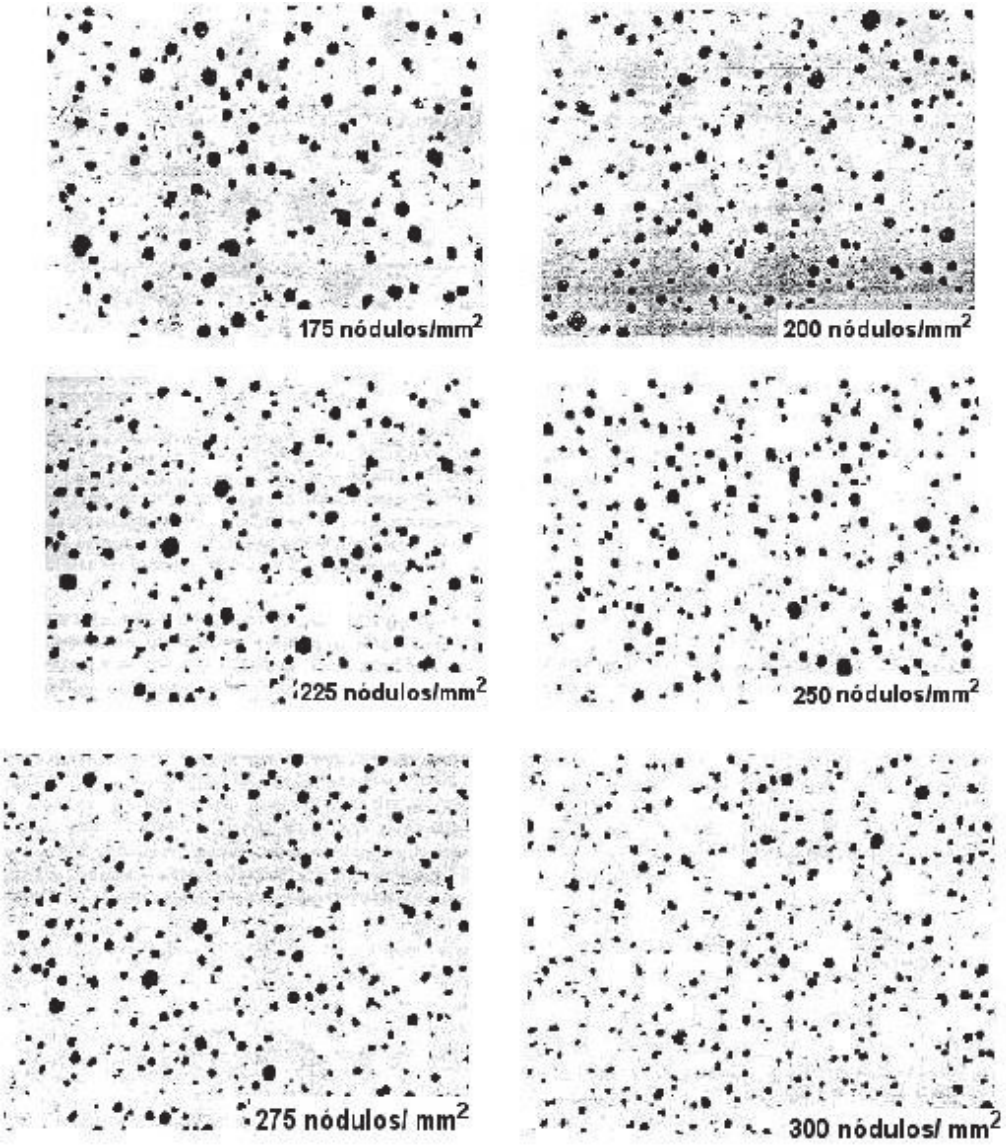


Figura 1.13. Densidad de nódulos de grafito (2).
(Gordillo, 2010)

La ASTM A 247 especifica que la determinación del tamaño de partículas de grafito debe realizarse mediante una comparación con tamaños estándar, siendo necesaria una probeta con un aumento de 100x.

El tamaño del grafito es designado por esta norma de acuerdo a números arábigos que van del 1 al 8, tal como se indica en la siguiente tabla.

Tabla 1.3. Morfologías del grafito esferoidal según la ASTM A 247.

Tamaño	Dimensión máxima a 100x, mm^A
1	128
2	64
3	32
4	16
5	8
6	4
7	2
8	1

(American Standard For Testing Materials, 1998)

A: Graduación de los tamaños para cada clase desde la máxima dimensión calculada para la National Bureau of Standars, empleando datos actualizados de micrografías.

La ASTM A 536 clasifica a las fundiciones de hierro dúctil en cinco grados de acuerdo a sus propiedades mecánicas (American Standard For Testing Materials, 2014).

Tabla 1.4. Clasificación del hierro fundido dúctil según la ASTM 536.

	ASTM 536				
Propiedades Mecánicas	**Grado 60-40-18**	**Grado 65-45-12**	**Grado 80-55-06**	**Grado 100-70-03**	**Grado 120-90-02**
Resistencia a la tracción, min (psi)	60 000	65 000	80 000	100 000	120 000
Límite elástico, min (psi)	40 000	45 000	55 000	70 000	90 000
%Elongación, min en 50 (mm)	18	12	6.0	3.0	2.0

(Ductile Iron Society, 2013)

CAPÍTULO 2

SOLDADURA POR ARCO DE METAL PROTEGIDO (SMAW)

2.1. INTRODUCCIÓN

El contenido de este capítulo se basa en los fundamentos que provee el Manual de Soldadura, Tomo I (American Welding Society, 1996) en cuanto a los conceptos y descripción de la soldadura por arco de metal protegido (shielded metal arc welding, SMAW), denominándolo como un proceso de soldadura que provoca una coalescencia de metales mediante el calor de un arco eléctrico mantenido entre la punta de un electrodo revestido y la superficie del metal base en la unión a ser soldada.

Las funciones primordiales del revestimiento del arco son: estabilizar el arco y proteger el metal derretido de la atmósfera por medio de los gases creados por la descomposición del recubrimiento debido al calor en el arco.

La protección, más otros componentes del revestimiento y del alambre del núcleo, controlan en gran parte las propiedades mecánicas, la composición química y la estructura metalúrgica del metal de soldadura, además de las características del arco del electrodo.

2.2. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

Este proceso aprovecha el calor del arco para derretir el metal base y la punta de un electrodo consumible revestido. El electrodo y la pieza de trabajo forman parte de un circuito eléctrico, el cual inicia con la fuente de potencia eléctrica incluyendo los cables de soldadura, portaelectrodos, conexión con la pieza a soldar, la pieza de trabajo y un electrodo.

Uno de los dos cables provenientes de la fuente de potencia se conecta al material a ser soldado, el otro cable al portaelectrodos. La soldadura dará inicio al

encenderse el arco eléctrico entre la punta del electrodo y el trabajo (pieza de trabajo). Se derrite la punta del electrodo y la superficie de soldadura debido al intenso calor del arco. En la punta del electrodo se produce la formación de glóbulos de metal fundido, transferidos a través del chorro del arco hasta el charco de soldadura. El arco se mueve sobre el área a ser soldada con una longitud de arco y velocidad de desplazamiento adecuados, fusionando el metal base y añadiendo continuamente metal de aporte.

En este proceso se necesita la suficiente corriente eléctrica para derretir tanto el electrodo así como una cantidad de metal base. Se requiere también de un espacio adecuado entre la punta del electrodo y el charco de soldadura, requisitos necesarios para establecer la forma en la que se dará la coalescencia.

Los tamaños y tipos de electrodos para soldadura con arco de metal protegido definen requerimientos de voltaje (intervalo global: 16 a 40 V) y de amperaje (intervalo global: 20 a 550 A) del arco. La corriente puede ser de naturaleza alterna o continua según el electrodo empleado, pudiendo la fuente de potencia controlar el nivel de corriente en un intervalo razonable con el fin de responder a las variables del proceso de soldadura en sí (American Welding Society, 1996).

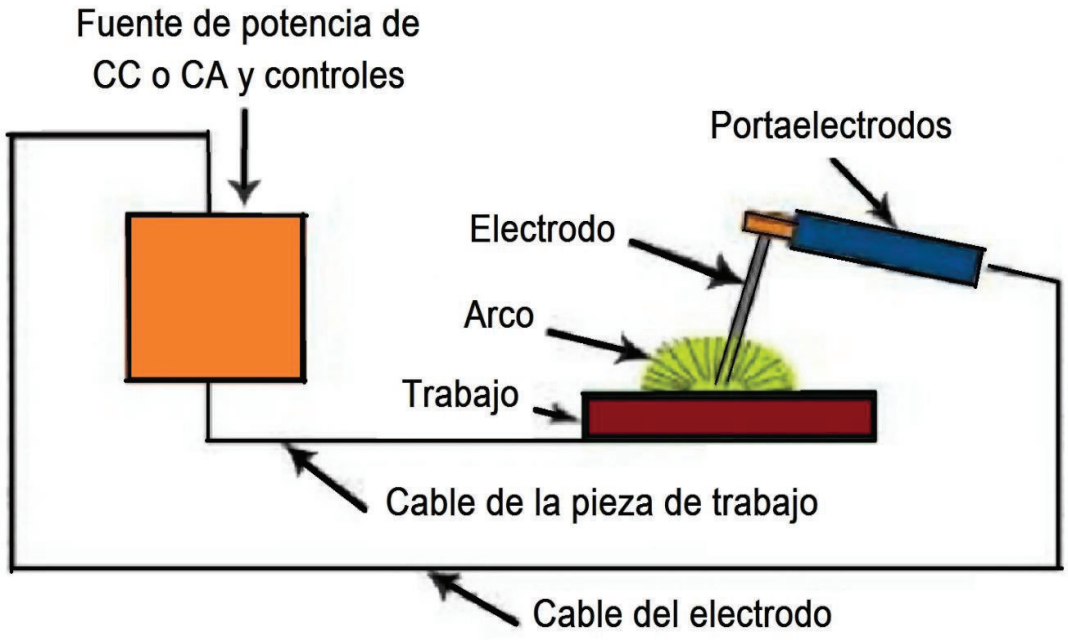


Figura 2.1. Elementos del circuito de soldadura típico para SMAW
(Electrodos de soldadura, 2014)

2.3. ELECTRODOS REVESTIDOS

Se componen de núcleo metálico y un revestimiento químico (American Welding Society, 1996).

2.4. CAPACIDADES Y LIMITACIONES

Este es un proceso ampliamente utilizado, aún más en soldaduras cortas en trabajos de producción, mantenimiento y reparación. Las ventajas son las siguientes:

a) Equipo relativamente sencillo, portátil y de bajo costo.
b) El electrodo revestido proporciona el metal de aporte, así como su protección contra la oxidación durante la soldadura.
c) No es necesario protección auxiliar con gas, ni fundente granular.
d) Menor sensibilidad al viento y corrientes que otros procesos con arco protegido.
e) Utilizable en lugares de acceso limitado.
f) Se puede utilizar en gran variedad de metales y aleaciones.

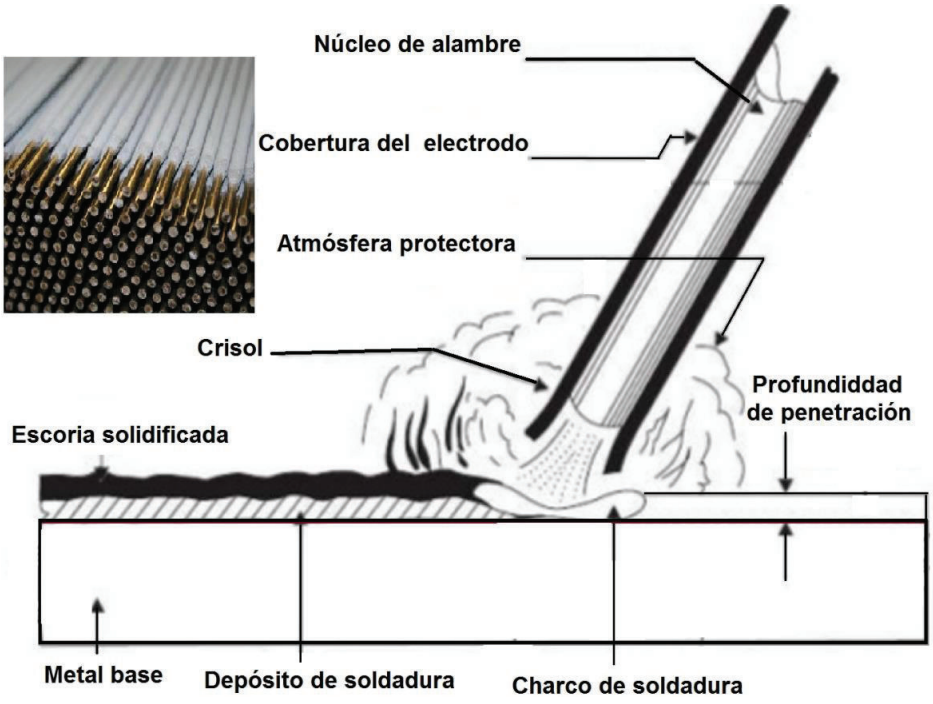


Figura 2.2. Soldadura por arco de metal protegido.
(Electrodos de soldadura, 2014)

Se tienen electrodos para SMAW usados en la soldadura de aceros al carbono y de baja aleación, aceros inoxidables, hierro colado, cobre, níquel y sus aleaciones, y para algunas aplicaciones de aluminio. Los metales de bajo punto de fusión: como el plomo, el estaño, cinc y sus aleaciones, no se sueldan con SMAW debido al intenso calor del arco supera su temperatura de fusión. El proceso no es adecuado para metales reactivos como: titanio, zirconio, tantalio y colombio debido a una insuficiente protección del arco al momento de evitar la contaminación con oxígeno (American Welding Society, 1996).

2.5. MATERIAL BASE

El proceso es idóneo para un metal base específico, dependiendo de la disponibilidad de un electrodo recubierto cuyo metal de aporte contenga la composición y propiedades requeridas. Los metales base compatibles con este proceso son:

a) Aceros al carbono
b) Aceros de baja aleación
c) Aceros resistentes a la corrosión
d) Hierros colados (dúctiles y grises)
e) Aluminio y sus aleaciones
f) Cobre y sus aleaciones
g) Níquel y sus aleaciones

Figura 2.3. Electrodos para materiales de hierro dúctil.
(Soldaduras Zelecta , 2004)

2.6. ELECTRODOS REVESTIDOS

En el Manual de Soldadura, tomo I (American Welding Society, 1996) se tiene información de electrodos, misma que presenta especificaciones para la clasificación de los electrodos recubiertos.

Tabla 2.1. Especificaciones de la AWS para electrodos recubiertos.

Tipos de electrodo	Especificaciones de la AWS
Acero al carbono	A5.1
Acero de baja aleación	A5.5
Acero resistente a la corrosión	A5.4
Hierro fundido	A5.15
Aluminio y sus aleaciones	A5.3
Cobre y sus aleaciones	A5.6
Níquel y sus aleaciones	A5.11
Recubrimiento	A5.13 y A5.21

(American Welding Society, 1996)

2.6.1. ELECTRODOS DE ACEROS AL CARBONO

Según la especificación ANSI/AWS A 5.1, se tienen dos niveles de resistencia mecánica: la serie 60 con resistencia a la tensión mínima de 62 ksi. Para la serie 70 es de 72 ksi. La mayor parte de los electrodos está diseñada para soldar en todas las posiciones, sin embargo los que contienen altas cantidades de polvo de hierro u óxido de hierro en su recubrimiento, generalmente están restringidos a soldaduras de surco en posición plana y a soldaduras de filete horizontales.

2.6.2. ELECTRODOS DE ACERO DE BAJA ALEACIÓN

La especificación ANSI/AWS A 5.5, fija límites para el contenido de humedad de electrodos de bajo hidrogeno, empacados en recipientes sellados herméticamente, yendo desde el 0.2 hasta 0.6 % en peso, de acuerdo a la clasificación del electrodo. Cuanto mayor sea la resistencia mecánica, el límite de contenido de humedad será más bajo, debido a que la humedad es fuente primaria de hidrógeno, siendo este capaz de producir agrietamiento si no existe un precalentamiento empleado a temperatura elevada y ciclos de enfriamiento largos y lentos.

Cuanto mayor sea la resistencia mecánica de la soldadura y del metal base, mayor será la necesidad de menores valores de humedad, todo con el fin de evitar el agrietamiento. Si la humedad relativa es del 70 % o más, se provocará un nivel elevado de esta en el electrodo en pocas horas.

2.6.3. ELECTRODOS PARA ACEROS INOXIDABLES

Los electrodos para soldar aceros resistentes a la corrosión se clasifican según la especificación ANSI/AWS A 5.4 en: especificación para electrodos de acero al cromo y al cromo-níquel, resistentes a la corrosión, cubiertos para soladura.

La norma de estos electrodos omite la descripción de compuestos del revestimiento, pero en coberturas -15 generalmente contienen una proporción elevada de caliza, ingrediente que suministra monóxido de carbono y dióxido de carbono, protectores del arco. Los aceros inoxidables se dividen en tres tipos básicos: austeníticos, martensíticos y ferríticos. El grupo austenítico: 2XX y 3XX, es el más grande, el grupo 5XX se refiere a los aceros refractarios. Normalmente la composición del metal de soldadura de un electrodo de acero inoxidable es similar a la del metal base para el que fue diseñado.

La especificación ANSI/AWS A 5.4 consta de dos clasificaciones para electrodos cubiertos de aceros inoxidables al cromo puro (4XX). Una prescribe del 11 al 13.5 % de cromo, la otra del 15 a 18 %. El contenido de carbono en ambas es 0.1 % como mucho. Ambas clasificaciones se endurecen en aire, además de que las piezas soldadas con estos electrodos requieren precalentamiento y tratamiento térmico posterior con el fin de aumentar la ductilidad, igual caso se presenta con los electrodos para soldar aceros al cromo-molibdeno.

2.6.4. ELECTRODOS DE NÍQUEL Y ALEACIONES DE NÍQUEL

De acuerdo a la especificación ANSI/AWS A 5.11, la letra E indica electrodo, la letra R indica varilla de soldadura, Después van las letras de los diferentes símbolos químicos de los elementos principales de la clasificación. Por ejemplo CoCr, ser refiere a una aleación de cobalto y cromo, CuZn es una aleación de cobre y zinc.

Estos electrodos tienen composiciones que se asemejan a la del metal base destinado a unirse, algunos tiene adiciones de elementos como: titanio, manganeso y colombio para desoxidar el metal de soldadura, evitando así el agrietamiento.

La resistividad eléctrica del núcleo es muy alta, por lo que un amperaje excesivo tenderá a sobrecalentar el electrodo, dañando la cobertura, provocando un arco inestable con excesiva salpicadura. Cada clasificación y tamaño de electrodo tiene un intervalo de amperaje óptimo.

La mayoría de estos electrodos se usa con polaridad directa, aunque algunos también pueden operar con corriente alterna evitando golpes de arco, por ejemplo cuando se suelda un acero con 9 % de níquel.

La letra “E” designa electrodo y el símbolo químico “Ni” indica aleación con base níquel. Se pueden agregar otros símbolos químicos con el fin de indicar los elementos de la aleación seguida de números que indican la clasificación dentro del grupo. Por ejemplo, el electrodo ENiCrFe contiene: hierro, cromo, además de níquel.

2.6.5. ELECTRODOS DE ALUMINIO Y ALEACIONES DE ALUMINIO

La ANSI/AWS A 5.3, especificación para electrodos de aluminio y aleación de aluminio para soldadura con arco de metal protegido, contiene dos clasificaciones para la soldadura de metales base de aluminio. Esta clasificación se basa en las propiedades mecánicas del material sin tratamiento térmico y en la composición del núcleo.

Las funciones del revestimiento de este tipo de electrodos son: proveer de gas para la protección del arco, un fundente para disolver al óxido de aluminio y escoria protectora que recubre la franja de soldadura; escoria que debe ser eliminada inmediatamente después de la soldadura por su efecto corrosivo. La porosidad debido a la humedad que se puede presentar en estos electrodos, puede evitarse guardándolos en un gabinete de calefacción.

Los electrodos de aluminio cubiertos se usan para soldadura no crítica y reparación. Es importante usar con metales base para los que se recomienden

metales de aporte 1100 o 4043, metales de soldadura que no hayan sido sometidos a tratamientos térmicos de endurecimiento por precipitación.

2.6.6. ELECTRODOS DE COBRE Y ALEACIONES DE COBRE

Según la especificación ANSI/AWS A 5.6, su designación es similar a la de los electrodos de níquel. La letra E designa electrodo. Los grupos: CuSi son para el bronce de silicio, usándose en aleaciones de cobre, cinc y algunos materiales de hierro colado. El grupo CuSn para el bronce fosforado, suelda metales base de latón y aleaciones de cobre. El grupo CuNi para el cupro-níquel, suelda una amplia gama de aleaciones de cobre y níquel, además de revestimientos de cupro-níquel en acero. El grupo CuAl para el bronce de aluminio, de amplio uso en soldadura de aleaciones con base de cobre y algunas combinaciones de metales disímiles; se emplean también para soldar en fuerte metales ferrosos y aplicar superficies de apoyo resistentes al desgaste y la corrosión. En los electrodos de cobre y aleaciones de cobre se usan con polaridad directa.

2.6.7. ELECTRODOS DE RECUBRIMIENTOS DUROS

De acuerdo a las especificaciones ANSI/AWS A 5.13 y A 5.21, el recubrimiento con este tipo de electrodos es empleado para revestimientos duros, engrosamientos y superficies duras. El objetivo es conferir a estas superficies una o más de las siguientes propiedades:

a) Resistencia a la corrosión.
b) Control metalúrgico.
c) Control dimensional.
d) Resistencia al desgaste.
e) Resistencia al impacto.

La elección de electrodos para recubrimientos se da después de un análisis de las propiedades que debe tener el metal de soldadura aplicado al metal base específico.

2.6.8. ELECTRODOS PARA HIERRO FUNDIDO

Cumplen la especificación ANSI/AWS A 5.15, estos electrodos son de níquel (ENi), níquel-hierro (ENiFe), aleaciones de níquel-cobre (ENiCu) y una aleación

de acero. La soldadura se efectúa con polaridad directa de bajo amperaje con el objetivo de minimizar la dilución con el metal base.

Los electrodos de níquel y aleaciones de níquel sirven para reparar piezas fundidas y unir diversos tipos de hierros fundidos y otros metales. La dureza del metal de soldadura depende del grado de dilución del metal base.

Hoyos y grietas pequeñas pueden soldarse sin precalentamiento, como consecuencia la soldadura no será maquinable. Siempre será recomendable un precalentamiento al soldar hierro fundido.

2.7. APLICACIONES DEL PROCESO SMAW

El proceso de soldadura por arco con electrodo revestido une la mayor parte de metales y aleaciones usadas cotidianamente tal como se indicó en la tabla 2.1, además de una amplia variedad de materiales disímiles. No se usa para materiales donde la protección del arco es insuficiente, como en los materiales reactivos: titanio y circonio; y los materiales refractarios: colombio, tantalio y molibdeno.

2.7.1. ESPESORES

Con espesores menores a 1.6 mm, el metal base se fundirá y el metal de aporte se perderá, a menos que se empleen fijaciones y soldaduras especiales. No se establece un límite superior, pero los procesos SAW o FCAW ofrecen mayores cantidades de deposición y ahorros en espesores mayores a 38 mm. La mayor parte del uso de SMAW se presenta en espesores que van desde los 3 y 38 mm, excepto cuando la forma de la pieza a soldar es irregular.

2.7.2. POSICIÓN DE SOLDADURA

Se puede soldar la mayoría de materiales en cualquier posición con este proceso, siendo muy útil al soldar uniones que no se las puede realizar en posición plana. Es recomendable soldar en posición plana cuando sea posible, ya que se requiere menos habilidad, siendo posible el uso de electrodos de mayor diámetro que ofrecen altas tasas de depósitos. Las posiciones de soldadura siguientes se basan en la ANSI/AWS A 3.0.

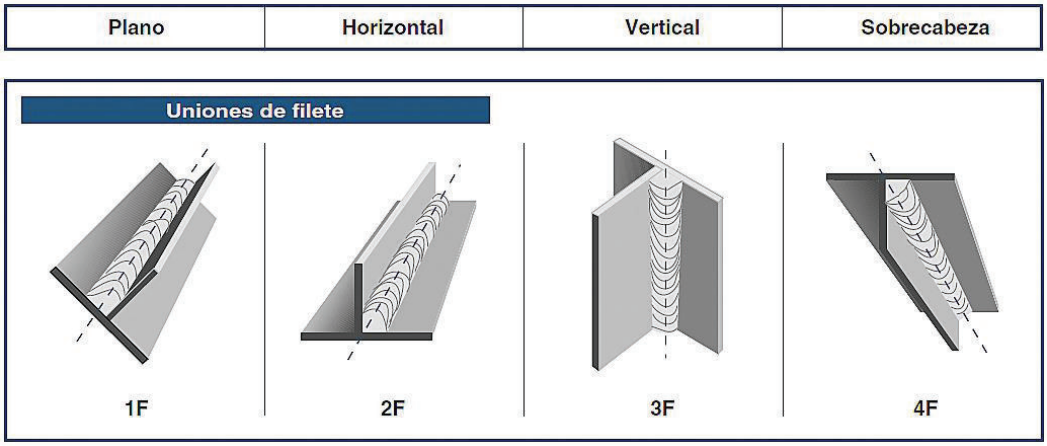


Figura 2.4. Soldadura en uniones de filete.

(Indura, 2007)

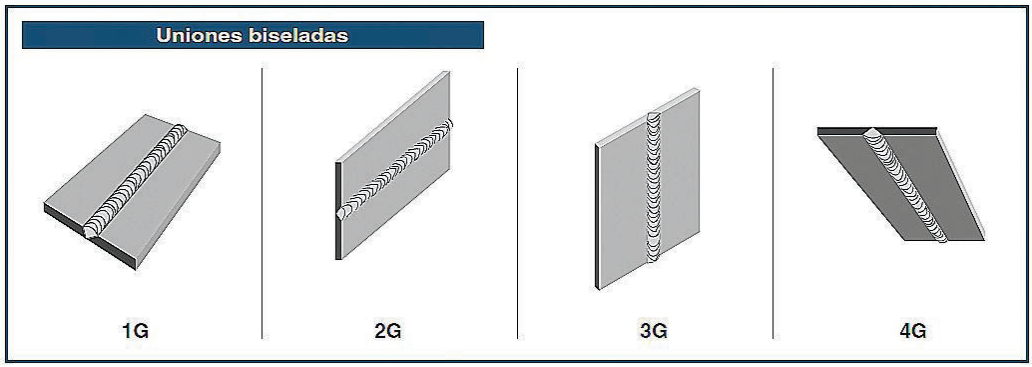


Figura 2.5. Soldadura en uniones biseladas.

(Indura, 2007)

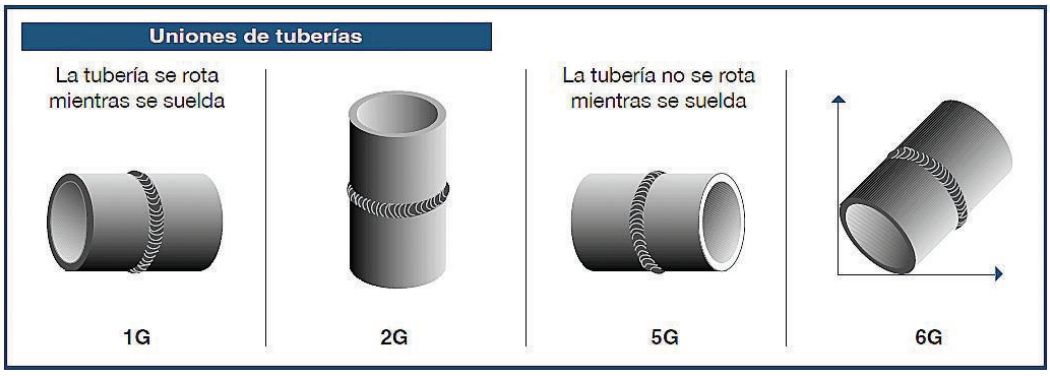


Figura 2.6. Soldadura en uniones de tuberías.

(Indura, 2007)

2.7.3. UBICACIÓN DE LA SOLDADURA

Se trata de un proceso versátil en cuanto a la operación y ubicación. Se puede soldar en interiores, exteriores, en una línea de producción, un barco, un puente, un edificio, una refinería de petróleo, una tubería a campo traviesa, entre otros.

2.8. PREPARACIÓN DE LAS UNIONES

El diseño de las uniones toma en cuenta la resistencia mecánica y la seguridad que el elemento debe presentar en condiciones de servicio. Cuando se va a soportar una carga dinámica se exige considerar la resistencia a la fatiga y la fractura fría, haciendo efectivo también tomar en cuenta un diseño para la eliminación de los concentradores de esfuerzos, sin olvidar que las uniones deber ser económicas y accesibles para el soldador durante la fabricación (American Welding Society, 1996).

2.8.1. SOLDADURA DE RANURA

Al seleccionar el diseño óptimo influyen los siguientes aspectos:

a) Idoneidad para la estructura considerada.
b) Accesibilidad a la unión.
c) Costo de la soldadura.
d) Posición de soldadura.

Las ranuras cuadradas son las más económicas y fáciles de preparar, al necesitar un recorte recto del borde en cada miembro.

Hablando de economía, de minimizar distorsiones y de esfuerzos residuales; el diseño de las uniones de soldadura deben incluir una abertura de raíz y un ángulo de ranura con el objetivo de proporcionar resistencia mecánica e integridad con la mínima deposición de metal de aporte.

Para secciones grandes, es recomendable uniones en “J” y “U”, ya que el gasto en la preparación de estos es compensado con el ahorro en tiempo de soldadura y metal de aporte.

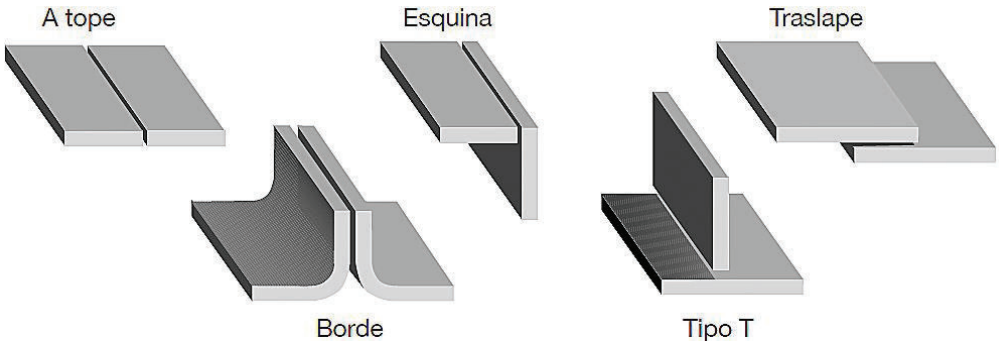


Figura 2.7. Tipos de juntas en soldadura.

(Indura, 2007)

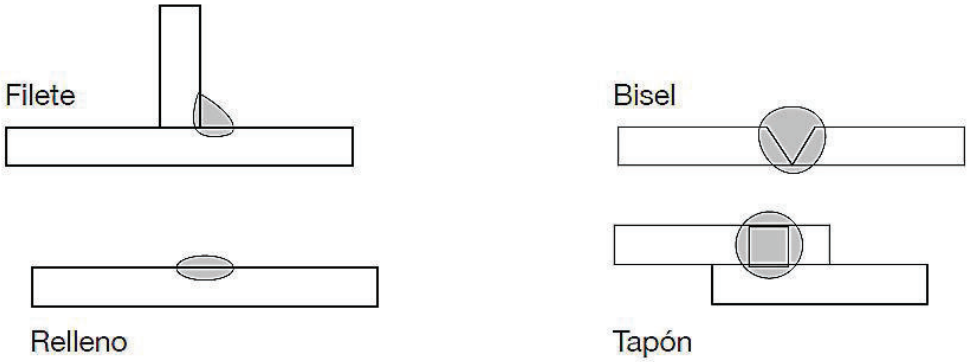


Figura 2.8. Tipos de soldadura.

(Indura, 2007)

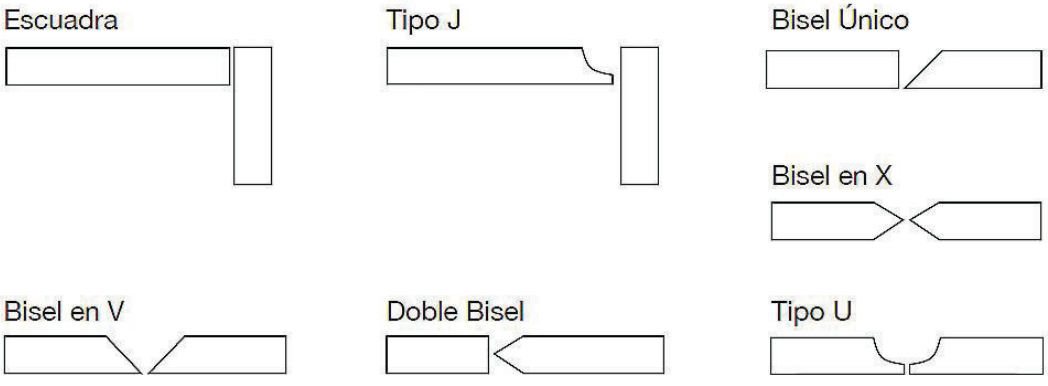


Figura 2.9. Diseños de junta.

(Indura, 2007)

2.8.2. SOLDADURA DE FILETE

Requieren poca o ninguna preparación de la unión. La soldadura de filete se puede combinar con una soldadura de surco minimizando los concentradores de esfuerzos.

2.8.3. RESPALDOS DE SOLDADURA

Cuando una penetración completa es requerida y al soldarse desde un lado de la unión, un respaldo de soldadura es la mejor opción. La finalidad consiste en proveer un lugar para el depósito de la primera capa de metal derretido evitando que este escape por la raíz de la unión.

2.8.4. GEOMETRÍAS DE UNIÓN TÍPICAS

Se utilizan para obtener soldaduras integrales y económicas, siendo de entendimiento que se requieran otros diseños de uniones para casos especiales.

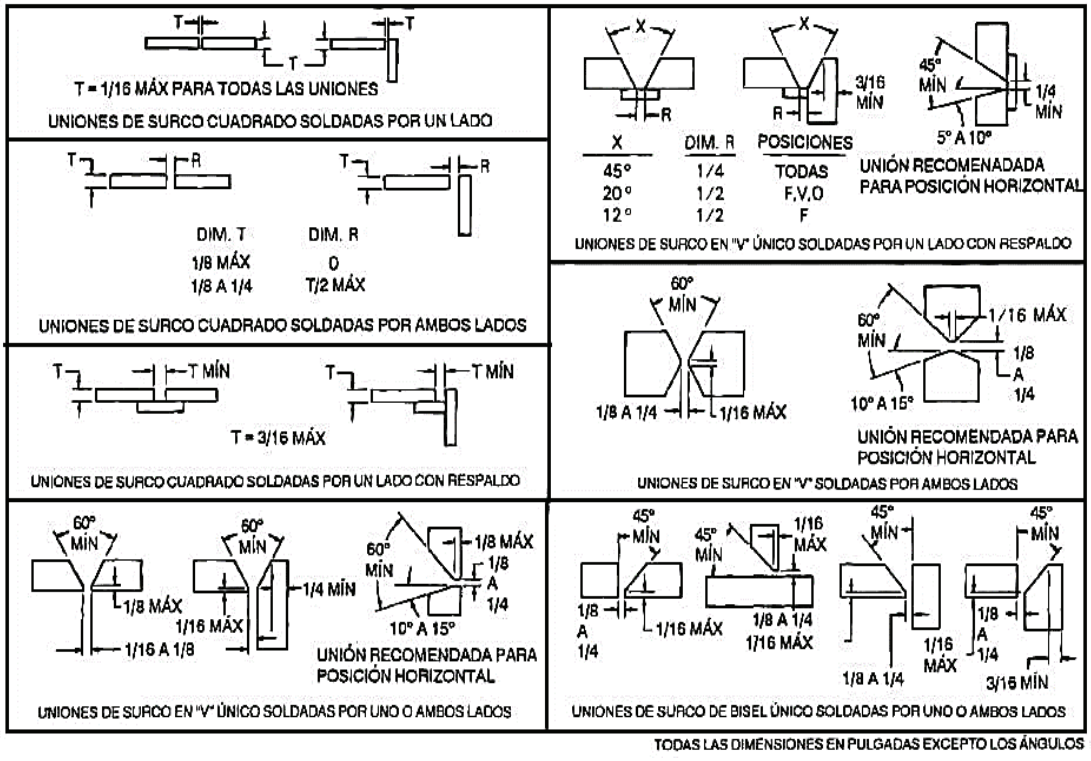


Figura 2.10. Geometrías de Unión típicas en SMAW (1).
(American Welding Society, 1996)

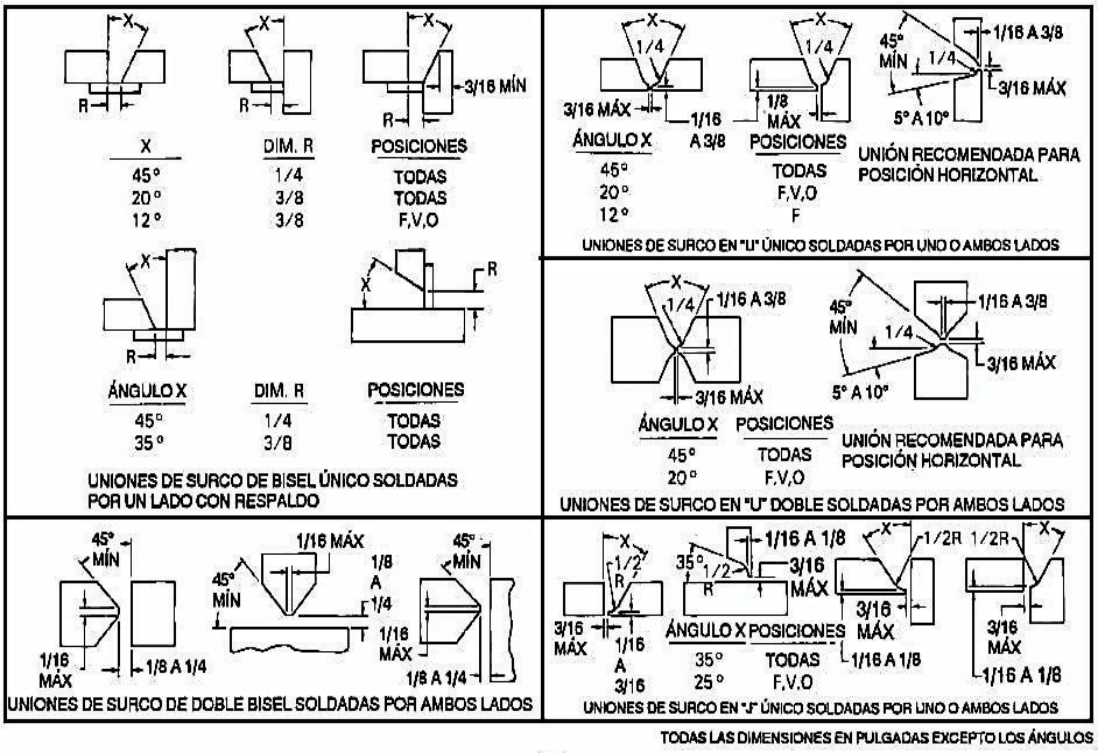


Figura 2.11. Geometrías de Unión típicas en SMAW (2).

(American Welding Society, 1996)

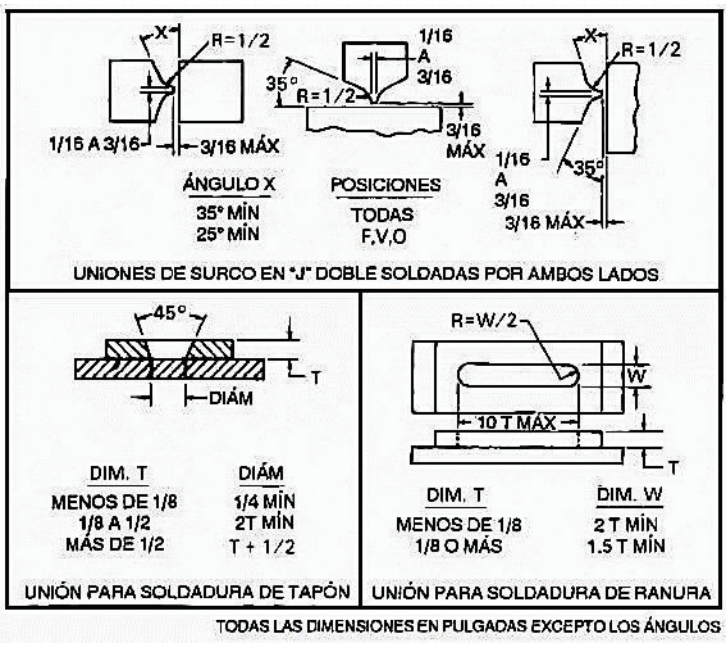


Figura 2.12. Geometrías de Unión típicas en SMAW (3).

(American Welding Society, 1996)

2.9. PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

De acuerdo al Tomo I del Manual de Soldadura (American Welding Society, 1996), se toman en cuenta los siguientes aspectos:

2.9.1. DIÁMETRO DEL ELECTRODO

El diámetro seleccionado dependerá del espesor del material a soldar, la posición de soldadura y el tipo de unión. Se escogen electrodos de mayor diámetro en aplicaciones de materiales de espesores gruesos y al soldar en posición plana, con la finalidad de aprovechar las grandes tasas de deposición.

Al momento de soldar en posiciones: horizontal, vertical y cenital, el metal de soldadura fundido tiende a fluir hacia fuera de la unión debido a la fuerza gravitacional, siendo esta tendencia factible de control mediante el empleo de electrodos de diámetros pequeños, a fin de reducir el charco de soldadura.

El electrodo empleado en las pasadas iniciales debe ser lo más pequeño posible con el objetivo de manipularse con mayor facilidad en la raíz de la unión.

2.9.2. CORRIENTE DE SOLDADURA

Este proceso de soladura puede ser efectuado mediante corriente alterna y corriente continua.

2.9.2.1. Corriente continua

Proporciona un arco más estable con una transferencia de metal aún más uniforme que la corriente alterna. El charco de soldadura moja de mejor manera las superficies de unión produciendo una franja uniforme incluso para amperajes bajos.

La corriente continua se usa para la soldadura en posición vertical o cenital, y también para soldar con arco corto. El golpe de arco (desviación del arco en el trayecto deseado) puede ser un inconveniente al soldar hierro y níquel. Una solución a este problema conlleva el cambio a corriente alterna.

2.9.2.2. Corriente alterna

Una gran ventaja sobre la corriente continua es ausencia de golpe de arco además de un ahorro sustancial en el costo de la fuente de potencia.

Al no haber cortes de arco se puede utilizar electrodos de mayor diámetro con corrientes más elevadas. El costo de un transformador de corriente alterna es menor que una fuente de potencia equivalente en corriente continua, teniendo en cuenta además que al momento de seleccionar una fuente se consideran otros factores operativos.

2.9.3. AMPERAJE

Para un tipo y tamaño de electrodo específico, el amperaje óptimo está ligado a factores como la posición a soldar y tipo de unión. El amperaje debe ser el suficiente para obtener una buena fusión y penetración, controlando el charco de soldadura.

Al soldar en posición vertical o cenital, se recomienda usar amperajes óptimos que pertenezcan a la región baja del intervalo permitido.

No es conveniente usar amperajes que superen el intervalo recomendado, debido a que el electrodo puede sufrir un sobrecalentamiento, causando salpicaduras, golpe de arco, socavamiento y agrietamiento en el metal de soldadura.

La siguiente figura detalla los efectos del amperaje, la longitud del arco y la velocidad de recorrido al soldar sobre el cordón de soldadura.

a) Amperaje, longitud de arco y velocidad de recorrido correctos
b) Amperaje demasiado bajo
c) Amperaje demasiado alto
d) Arco demasiado corto
e) Arco demasiado largo
f) Velocidad de recorrido demasiado lenta
g) Velocidad de recorrido excesiva

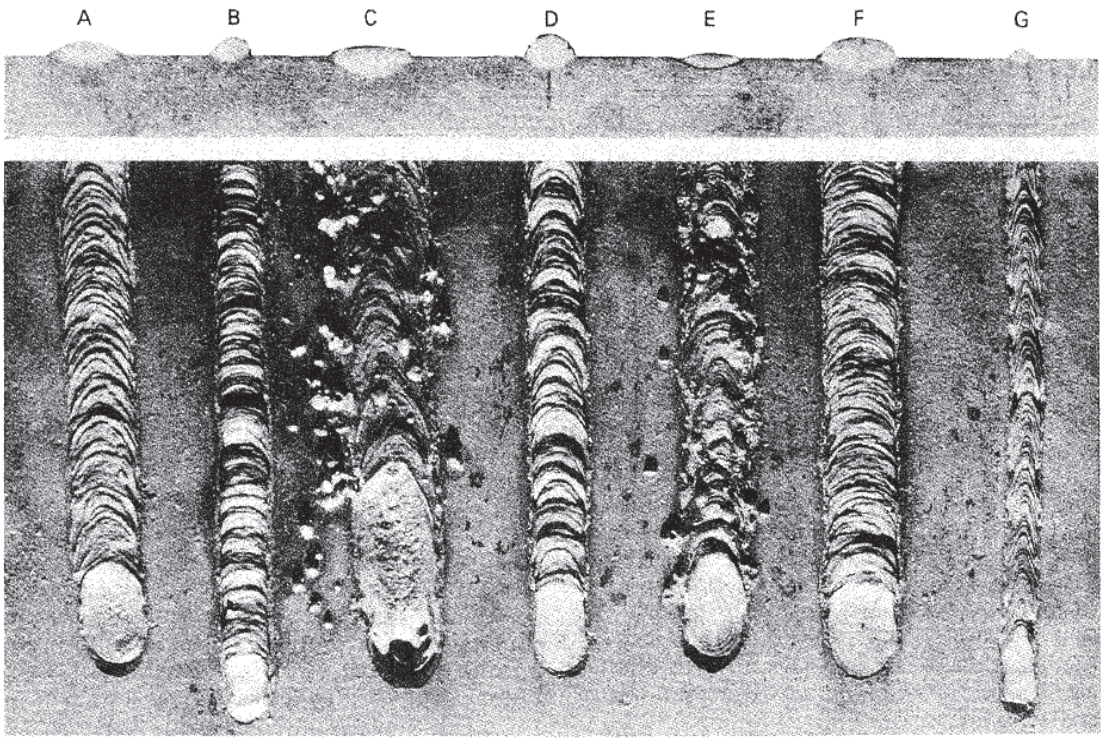


Figura 2.13. Efectos del amperaje sobre el cordón de soldadura.
(American Welding Society, 1996)

2.9.4. LONGITUD DEL ARCO

Este término está referido a la distancia entre la punta derretida del núcleo del electrodo y la superficie del charco de soldadura. La longitud óptima del arco variará con el tipo de electrodo, diámetro, composición de su revestimiento, amperaje y posición de soldadura. Por regla general se tiene que la longitud del arco no debe exceder el diámetro del alambre del núcleo del electrodo, aunque suele ser aún más corta cuando se trata de electrodos de cobertura gruesa.

Si el arco es demasiado corto, producirá cortocircuito durante la transferencia de metal. Por otro lado, si el arco es demasiado largo producirá una carencia de dirección e intensidad, tendiendo a dispersar el metal fundido.

El control de la longitud del arco depende en gran medida de la habilidad del soldador, que implica: conocimiento, experiencia, y destreza manual.

2.9.5. VELOCIDAD DE AVANCE

Hace referencia a la rapidez con que el electrodo se desplaza a lo largo de la unión de soldadura. Los factores que la determinan son:

a) Tipo de corriente, amperaje y polaridad.
b) Posición de soldadura.
c) Rapidez de fusión del electrodo.
d) Espesor del material.
e) Condición de la superficie del metal base.
f) Tipo de unión.
g) Manipulación del electrodo.

La velocidad de avance debe estar ajustada con la finalidad de que el arco vaya adelante del charco de soldadura. Hasta cierto punto, un aumento en la velocidad de recorrido reduce el ancho de la franja de soldadura y aumenta la penetración.

Un aumento excesivo en la velocidad de avance producirá una reducción en el ancho de la franja de soldadura y aumentará la penetración. Por el contrario, si la velocidad de recorrido es baja, la franja de soldadura será ancha y convexa, y con poca penetración.

2.9.6. INCLINACIÓN DEL ELECTRODO

Una inclinación correcta se da de acuerdo al tipo y tamaño del electrodo, la posición de soldadura y la geometría de la unión. Una inclinación incorrecta podría causar inclusiones de escoria, porosidad y socavamiento.

El ángulo de desplazamiento es el menor a 90 grados entre el eje del electrodo y la línea perpendicular al eje de soldadura. El ángulo de trabajo tiene menos de 90 grados entre la línea perpendicular a la superficie principal a la pieza de trabajo y un plano determinado por el eje del electrodo y el eje de soldadura.

La técnica derecha se da cuando el electrodo apunta hacia la dirección de soldadura, y el ángulo se denominará de empuje. En el ángulo de arrastre, el electrodo apunta a la dirección opuesta a la soldadura.

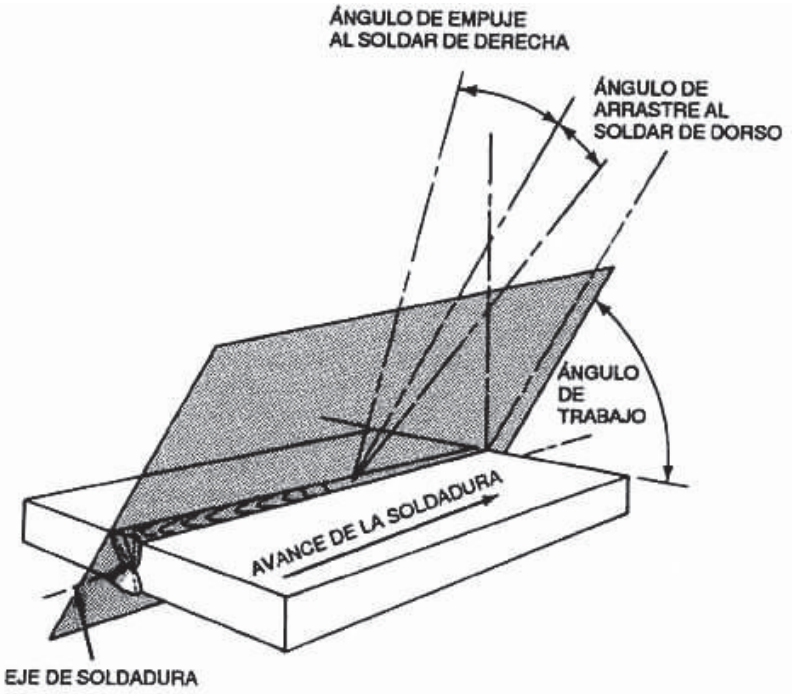


Figura 2.14. Inclinación del electrodo en la soldadura de surco.
(American Welding Society, 1996)

2.9.7. ELIMINACIÓN DE ESCORIA

Para una eliminación completa y eficiente, es necesario que cada franja de soldadura tenga el perfil apropiado y se funda de manera continua con la franja o metal adyacente. Franjas de menor tamaño son enfriadas con mayor rapidez, siendo lo contrario en la franjas de mayor tamaño; facilitando así el retiro de la escoria de las franjas pequeñas. Los soldadores experimentados saben que se necesita eliminar toda la escoria antes de proseguir con la soldadura.

2.10. CALIDAD DE LA SOLDADURA

El Manual de Soldadura, Tomo I (American Welding Society, 1996) establece que la unión de soldadura debe tener las propiedades físicas y mecánicas requeridas, para lo cual debe constar de cierta microestructura y composición química. Además es importante también el tamaño, forma de la soldadura y una correcta unión.

Las uniones soldadas contienen discontinuidades diversas, variando en tipos y tamaños. Debajo de ciertos niveles, no se consideran perjudiciales; por encima del nivel establecido, se consideran defectos. El nivel puede variar según la severidad de servicio, en base a lo que se ha establecido una norma correspondiente. En este proceso se pueden encontrar las siguientes discontinuidades y defectos:

2.10.1. POROSIDAD

Son bolsas de gas o espacios en el metal de soldadura, resultado de reacciones químicas que ocurren en la misma. Por lo general se puede prevenir con adecuado amperaje y una longitud de arco correcta.

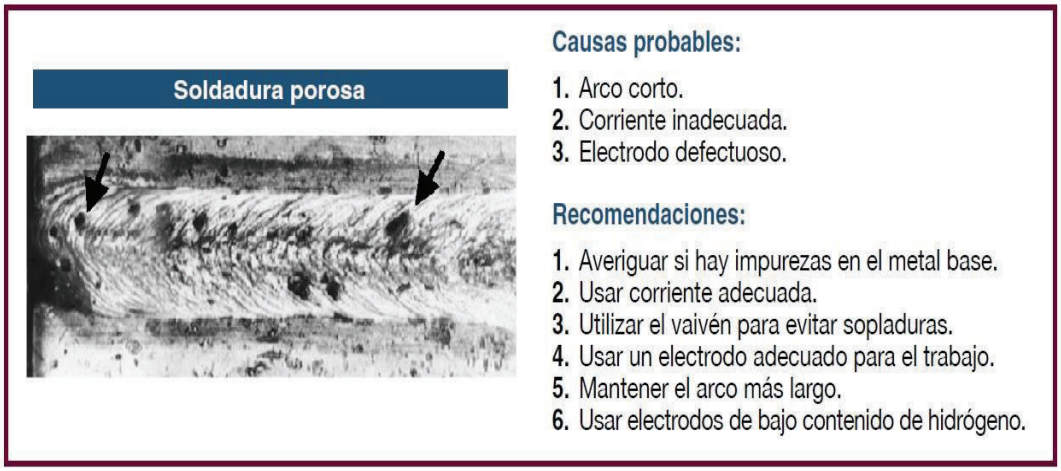


Figura 2.15 Soldadura porosa.

(Indura, 2007)

2.10.2. INCLUSIONES DE ESCORIA

Se tratan de óxidos y sólidos no metálicos que han quedado atrapados en el metal de soldadura entre franjas adyacentes, o en el metal de soldadura y el metal base. La mayor parte de las inclusiones de escoria se puede prevenir con una adecuada práctica de soldadura, además de preparar debidamente el surco de soldadura antes del siguiente depósito. Un ejemplo de varias discontinuidades encontradas en el proceso de soldadura se representa en la figura 2.16.

2.10.3. FUSIÓN INCOMPLETA

Se refiere a la incapacidad para unir franjas adyacentes de soldadura, o el metal de soldadura con el metal base. Puede ser local o generalizada, pudiendo evitarse con la adecuada preparación de superficies, es decir, que estas estén limpias, embonadas y lisas.

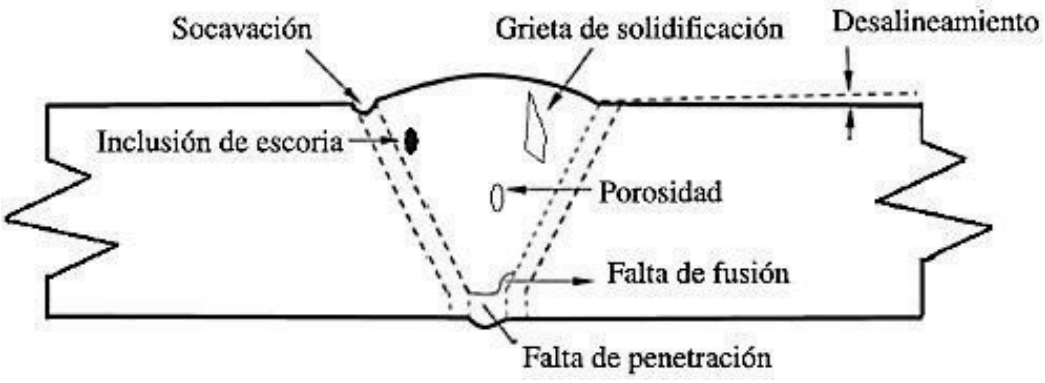


Figura 2.16. Imperfecciones de soldadura en juntas a tope.
(Ingeniare, 2012)

Para la fusión incompleta de raíz, se debe asegurar que la cara de raíz no sea muy grande, ni la abertura demasiado angosta, que el electrodo no sea demasiado grande, la corriente de soldadura no sea muy baja, ni la velocidad de soldadura sea demasiado rápida.

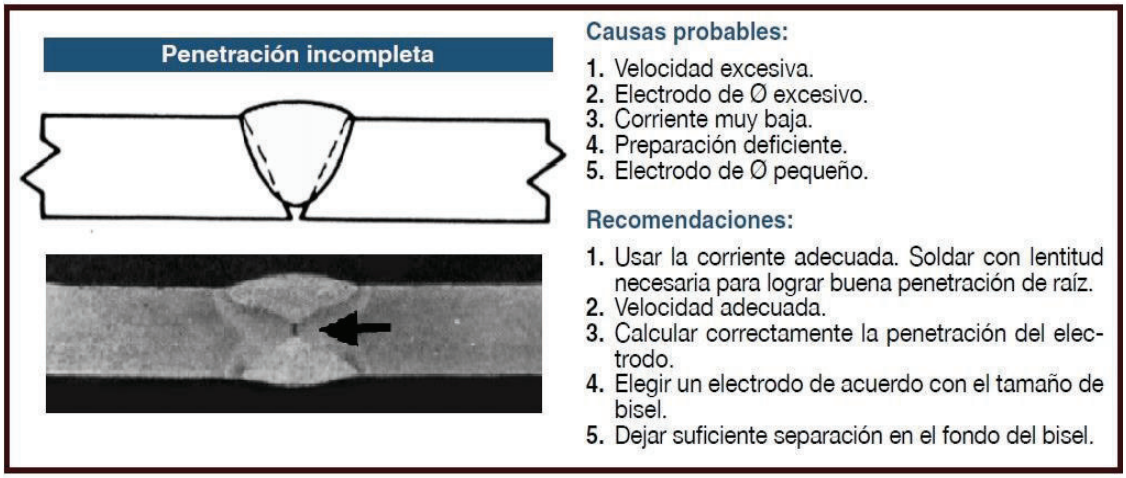


Figura 2.17. Penetración o fusión incompleta.
(Indura, 2007)

2.10.4. SOCAVAMIENTO

En una primera instancia se produce cuando la pared lateral de un surco de soldadura en el borde de la franja es derretido. En segunda instancia se produce cuando se ha reducido el espesor del material base, donde se encuentra la línea de franjas de la capa fina del metal de soldadura con la superficie de metal base.

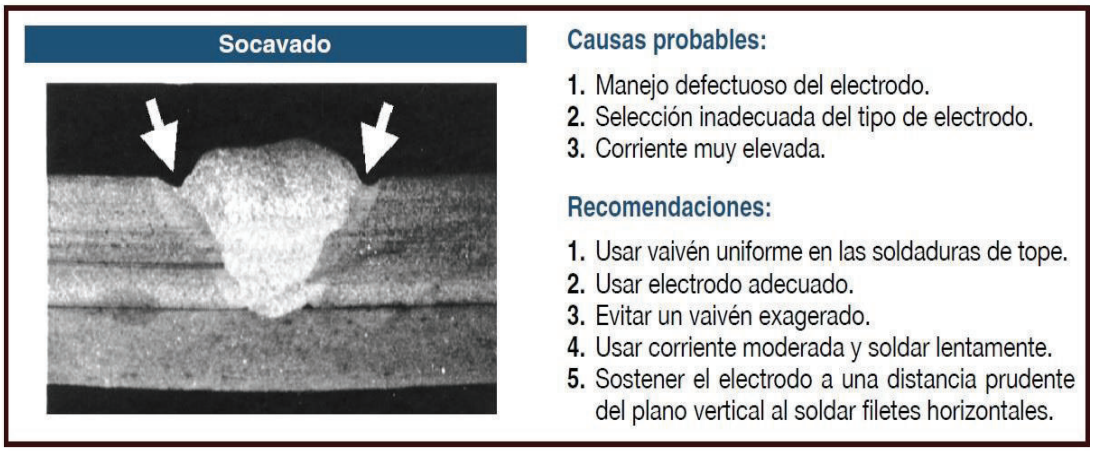


Figura 2.18. Socavadura.

(Indura, 2007)

2.10.5. FRACTURA

Se refiere a la separación de un tamaño indeterminado o una discontinuidad en la estructura homogénea del metal de soldadura o del metal de base soldado, es considerada como el defecto más importante en soldadura. Se origina como consecuencia de: técnica deficiente al soldar, exceso de temperatura, enfriamiento brusco, fricción, exceso de tensión, fatiga del metal, entre otros. Este defecto siempre debe ser corregido, ya que es causante de accidentes y de la destrucción de la pieza o parte fracturada. Las fracturas se dividen en:

2.10.5.1. Fracturas de superficie

Son de longitud y profundidad pequeñas, conocidas como fisuras o microfisuras. Pueden ser longitudinales o transversales, y son determinadas mediante inspección visual, líquidos penetrantes y partículas magnéticas.

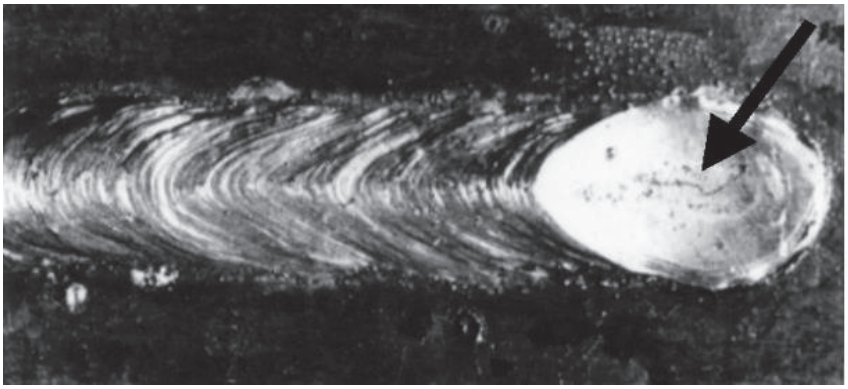


Figura 2.19. Fracturas en el cráter de una soldadura de filete.
(Kobel Steel, 2015)

2.10.5.2. Fracturas internas

Se presentan en el interior de la pieza o debajo del cordón de soldadura, son detectadas por medio de radiografías y pruebas de ultrasonido. (De la Vega, 1988)

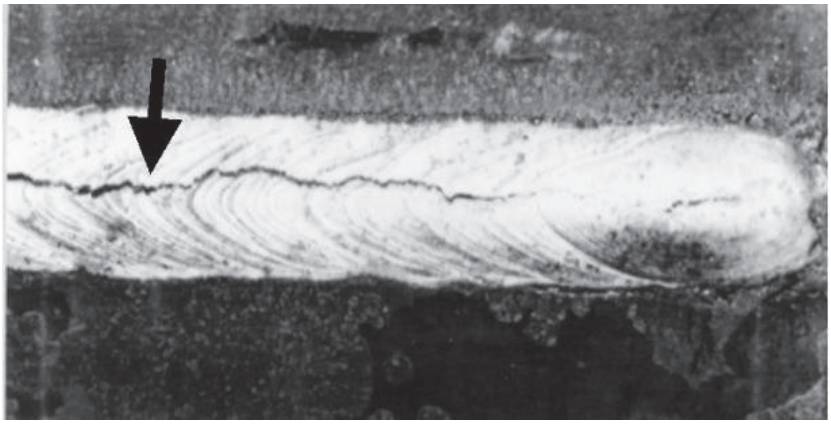


Figura 2.20. Fractura longitudinal en unión a tope.
(Kobel Steel, 2015)

2.11. CONSIDERACIONES TOMADAS AL SOLDAR HIERRO DÚCTIL CON SMAW

Las consideraciones se realizan de acuerdo a la Guía para la Soldadura de Hierro Fundido (American Standard For Testing Materials, 2014), la cual otorga

directrices sobre el procedimiento y consideraciones a tenerse al soldar distintos tipos de hierro fundido con diversos procesos de unión.

2.11.1. ELECTRODOS ENI-CL

Los electrodos de base níquel, contrario al hierro, este elemento no forma carburos estables, teniendo en estado sólido una baja solubilidad para el carbono.

Este tipo de electrodo provee un alto contenido de níquel en el metal base, dando como resultados depósitos de baja dureza y alta ductilidad, haciéndolo altamente maquinable.

Tabla 2.2. Composición química de electrodos para hierro fundido

AWS Classification	C	Mn	Si	P	S	Fe	Ni[3a]	Cu[3b]	Al	Total Other Elements
				Nickel Base Electrodes						
ENi-CI	2.0	1.0	4.0	—	0.03	8.0	85 min	2.5	1.0	1.0
ENi-CI-A	2.0	1.0	4.0	—	0.03	8.0	85 min	2.5	1.0–3.0	1.0
ENi-Fe-CI	2.0	1.0	4.0	—	0.03	remainder	45–60	2.5	1.0	1.0
ENiFE-CI-A	2.0	1.0	4.0	—	0.03	remainder	45–60	2.5	1.0–3.0	1.0
ENiCu-A	0.35–0.55	2.3	0.75	—	0.025	3.0–6.0	50–60	35–45	—	1.0
ENiCu-B	0.35–0.55	2.3	0.75	—	0.025	3.0–6.0	60–70	25–35	—	1.0
				Mild Steel Electrodes						
ESt	0.15	0.30–0.60	0.03	0.04	0.04	remainder	—	—	—	—

(American Standard For Testing Materials, 2014)

a. Níquel más cobalto incidente.
b. Cobre más plata incidente.
c. Requerimientos de composición química para electrodos basados en análisis de juntas soldadas.

2.11.2. ELECTRODOS ENIFE-CL

Estos electrodos proveen una cantidad aproximadamente igual de níquel y hierro, resultando en depósitos de mayor resistencia y ductilidad que los de ENi-Cl de níquel puro.

La resistencia de este material la hace adecuada para la soldadura de hierro dúctil y gris, especialmente cuando se trabaja con poco espesor, gracias a su bajo coeficiente de expansión; además siendo usado para la unión de metales disímiles como: aceros de bajo carbono, fundiciones con adición de cromo y aleaciones de base níquel-hierro.

El fósforo es conocido por causar agrietamiento en uniones metálicas de níquel, la presencia de hierro en la unión metálica incrementa la tolerancia al fósforo, por lo que estos electrodos son ampliamente usados en especial en la unión de hierro fundido gris con alto contenido de fósforo.

Tabla 2.3. Propiedades mecánicas de electrodos para hierro fundido.

	Esfuerzo en tensión		**Esfuerzo de fluencia**		**Elongación**
Electrodo	ksi	Mpa	ksi	Mpa	% en 2 pulg.
ENi-Cl	40	276	38	263	3-6
ENiFe-Cl	58-84	397-579	43-63	296-434	6-13
ENiFe-Cl	65-72	449-500	45-52	310-358	8-19
ENiFe-Cl	79	544	61-67	420-462	6-10

(American Standard For Testing Materials, 2014)

a. En condiciones de soldadura.
b. Recocido a 898 °C por 4 horas, enfriado en horno.
c. Recocido entre 845 y 890 °C, por 3 horas, enfriado en horno a 690 °C por 3 horas, enfriado en horno lentamente a 590 °C, enfriamiento en aire.

2.11.3. DISEÑO DE LA JUNTA

El diseño de la junta puede generar gran influencia en las propiedades del metal soldado en su calidad de servicio. El espesor del material base, metal de aporte y accesibilidad influenciarán en el diseño de la junta.

2.11.4. MATERIAL BASE DELGADO

Las juntas pueden ser simples en V o simples en U, inclusive para fines de reparación de piezas. Con metales de aporte de base níquel los ángulos de la junta deberán ser mayores para permitir una manipulación lenta en el charco de

soldadura. La cara de raíz debe ser reducida ya que los electrodos ENi-CI tienen una menor penetración en esta cara.

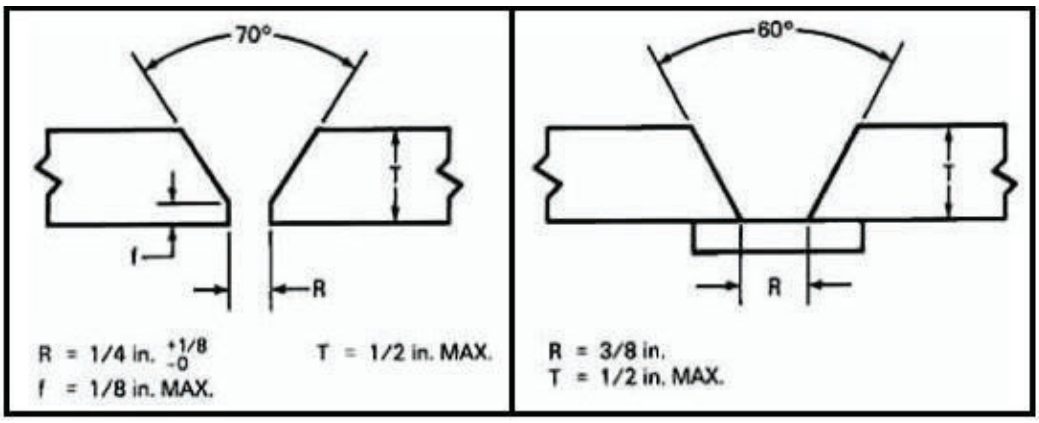


Figura 2.21. Disposición de junta para espesores delgados (1).
(American Standard For Testing Materials, 2014)

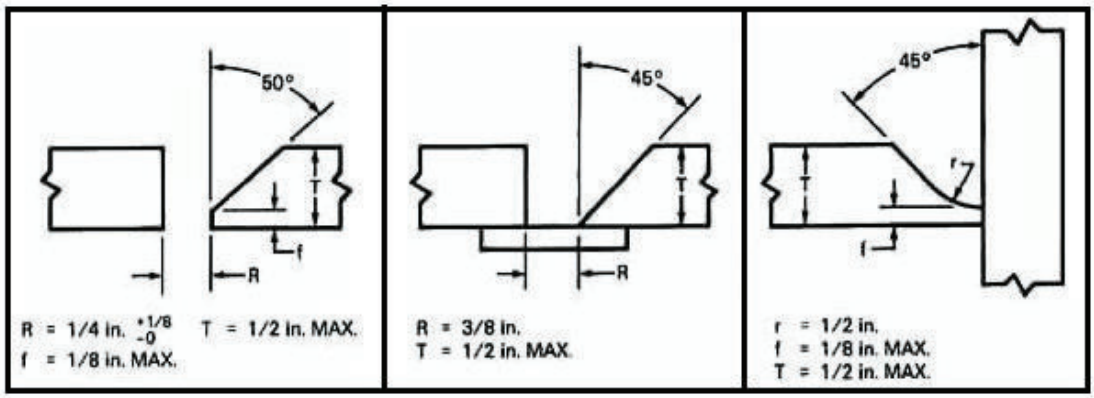


Figura 2.22. Disposición de junta para espesores delgados (2).
(American Standard For Testing Materials, 2014)

2.11.5. MATERIAL BASE GRUESO

Cuando se trata de espesores mayores a 12.7 mm se debe usar juntas que eventualmente distribuyan los esfuerzos inducidos durante la soldadura. Las juntas dobles son altamente efectivas en varias aplicaciones cuando ambos lados son accesibles a unir. Para soldaduras mayores a 19 mm son consideradas las juntas: doble en V, con doble bisel o doble en J. Si solo un lado del metal es accesible, entonces se recomienda una junta modificada en U.

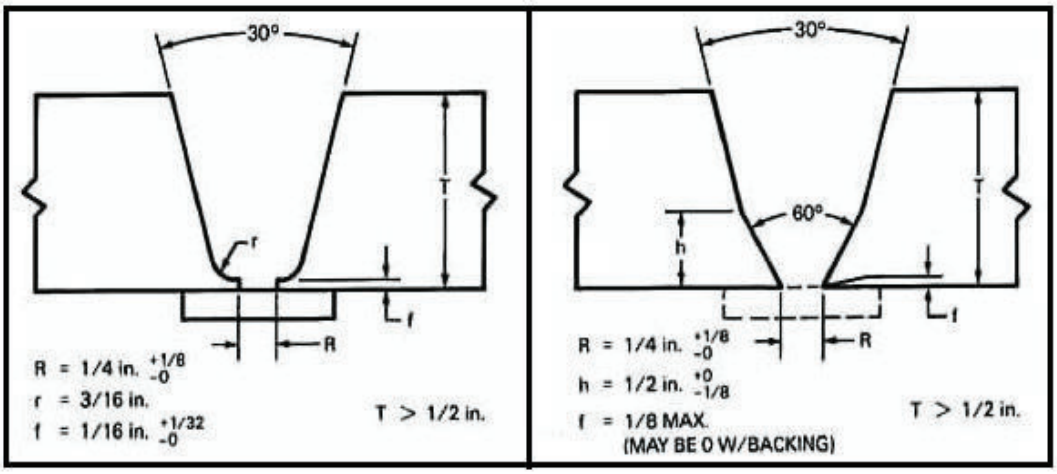


Figura 2.23. Disposición de junta para espesores gruesos (1).

(American Standard For Testing Materials, 2014)

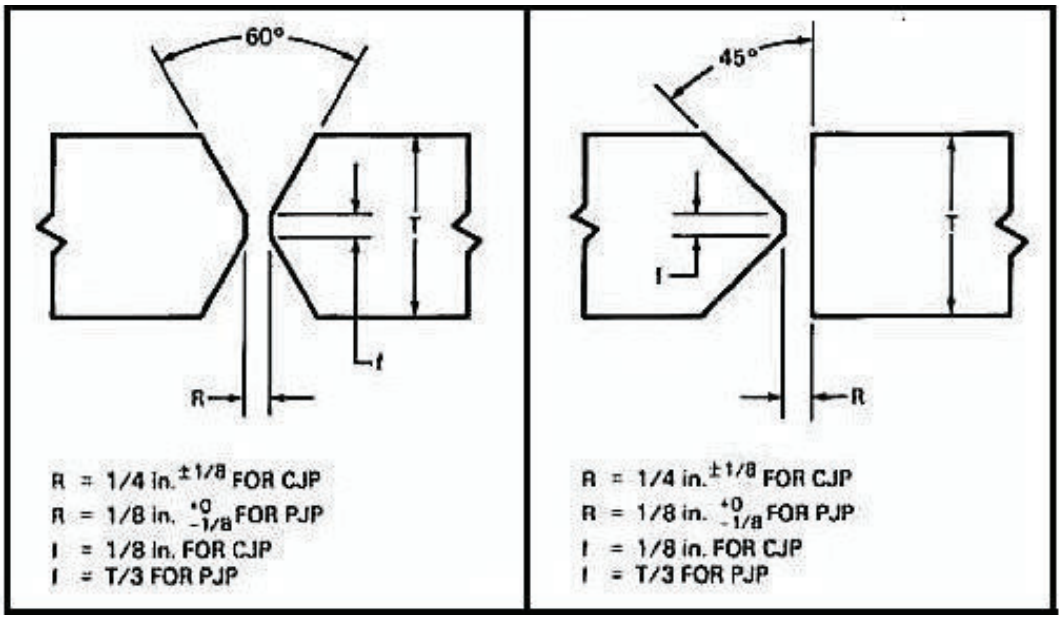


Figura 2.24. Disposición de junta para espesores gruesos (2).

(American Standard For Testing Materials, 2014)

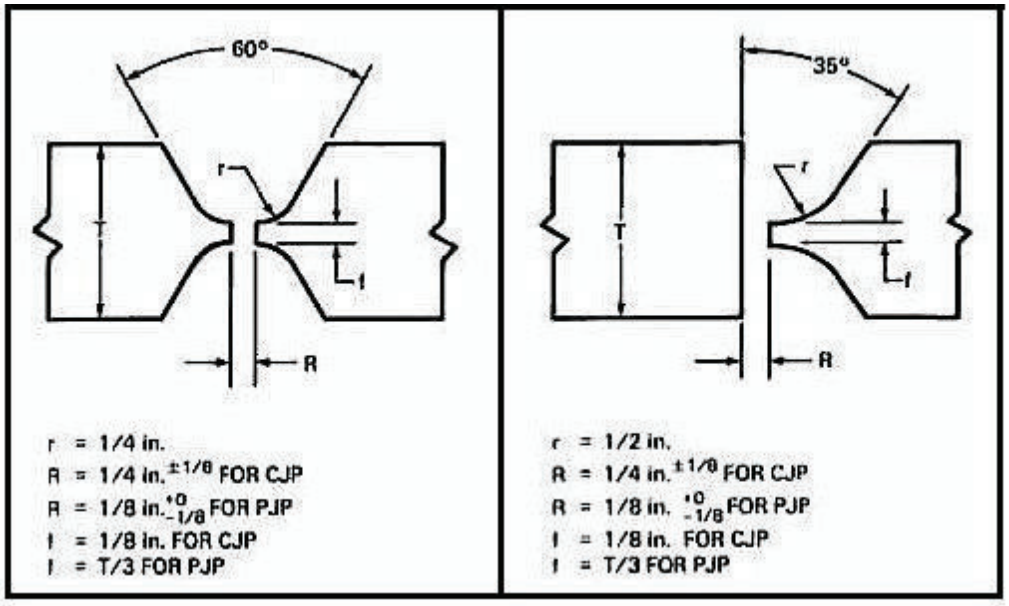


Figura 2.25. Disposición de junta para espesores gruesos (3).
(American Standard For Testing Materials, 2014)

2.11.6. PRECALENTAMIENTO

El tamaño de la zona afectada por el calor depende del calor que suministrado, por lo que se busca la menor cantidad de calor a ser aplicada. El precalentamiento, tiene las siguientes ventajas:

a) Ayuda a obtener una mejor fusión del metal de soldadura.
b) Previene el agrietamiento por los gradientes térmicos y los esfuerzos térmicos.
c) Reduce esfuerzos residuales y distorsión.
d) Reduce la dureza de la zona afectada por el calor.

Se debe tener presente que a más alto valor de carbono equivalente, se requerirá mayor temperatura de precalentamiento. Hierros fundidos de baja resistencia requieren menor precalentamiento que los de alta resistencia. Los hierros dúctiles y maleables generalmente requieren menor temperatura de calentamiento que los hierros grises y maleables, así también, una estructura ferrítica usualmente requiere menor temperatura de precalentamiento que la estructura martensítica y perlítica. Al precalentar a alta temperatura (320-540 °C), la velocidad de enfriamiento será disminuida minimizando la formación de martensita.

CAPÍTULO 3

SOLDADURA FUERTE CON SOPLETE (TB)

3.1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo se basa en los fundamentos conceptuales extraídos del Manual de Soldadura, Tomo II (American Welding Society, 1996) respecto a la unión en fuerte, describiéndola como un procedimiento de soldadura utilizado para unir materiales en presencia de un metal de aporte que posee un cambio de fase líquida superior a los 450 ºC, y debajo del cambio de fase sólida de los metales base. El metal de aporte es distribuido entre las superficies de la unión, embonados por acción capilar. La soldadura fuerte se diferencia de la soldadura blanda porque los metales de aporte de esta última tiene un liquidus por encima de los 450 ºC. La soldadura fuerte debe satisfacer tres criterios:

1. Las piezas deben unirse sin fusión de los metales base.
2. El metal de aporte debe tener una temperatura de liquidus mayor que 450 °C.
3. El metal de aporte debe mojar las superficies del metal base y penetrar en la unión o mantenerse en ella por acción capilar.

El material a unirse debe tener un correcto proceso de limpieza, además de ser protegido con fundente.

3.2. APLICACIONES

Se utiliza en la industria de muebles, construcción de carrocería, en motores de aviones de gran calidad, vehículos aeroespaciales, y varias más. Produce resultados que no siempre pueden obtenerse con otros procesos más cotidianos de unión.

Consta de las siguientes ventajas:

a) Gran distribución de esfuerzos.
b) Carácter económico para ensambles de gran complejidad.

c) Mecanismo simple para unir secciones de empalme grandes.
d) Unión de espesores de distintas dimensiones.
e) Se requieren acabados mínimos en las uniones.
f) Muy utilizado en soldadura de materiales disímiles.
g) Une metales y no metales.
h) Ahorro de coste en la producción de grandes lotes.
i) Se puede desensamblar.

Así también se presentan desventajas en este proceso como:

a) El soldador debe tener una determinada experiencia.
b) Posibilidad de interacciones desfavorables con el metal líquido.
c) Se puede presentar erosión y baja ductilidad en materiales de poco espesor.

No obstante, al contar con un metal de aporte adecuado, proceso elegido con minuciosidad y un correcto diseño de uniones, la soldadura será sumamente satisfactoria.

3.3. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Según la AWS (American Welding Society, 1996) el principio físico imperante es el de flujo laminar, el mismo que garantiza una correcta unión cuando el metal de aporte moja las superficies de empalme. Típicamente la unión de soldadura contiene una superficie de soldadura grande con una separación angosta, la misma que es recubierta con fundente, el cual disuelve óxidos metálicos sólidos evitando la oxidación. Después de que el área de unión es calentada, el fundente se derrite y el metal de aporte se funde en la superficie. La atracción capilar entre el metal base y el metal de aporte es mucho más grande que entre el metal base y el fundente; entonces, el metal de aporte desplaza al fundente. Después de alcanzar la temperatura ambiente, la unión de soldadura quedará llena de metal de aporte y fundente solidificados; el segundo será desplazado a la periferia de la unión. Comúnmente la separación entre el material base que se va a unir varía entre 0.025 a 0.25 mm. Este proceso utiliza atmósfera que hace innecesaria una limpieza posterior, asegurando también la ausencia de un residuo corrosivo de

fundente mineral. La soldadura fuerte resulta económica en la producción de uniones de alta resistencia mecánica conservando propiedades del metal base.

3.4. PROCESOS DE SOLDADURA FUERTE

Los procesos en fuerte se designan de acuerdo al origen de calentamiento, por ejemplo:

a) Soldadura fuerte con soplete.
b) Soldadura fuerte en horno.
c) Soldadura fuerte por inducción.
d) Soldadura fuerte por resistencia.
e) Soldadura fuerte por inmersión.
f) Soldadura fuerte al infrarrojo.

Cualquiera que sea el método en fuerte escogido, siempre deberá cumplir las características esenciales: metal de aporte con punto de fusión mayor a 450°C, pero menor que el punto de fusión del metal base, extendiéndose dentro de la unión de forma capilar (Almeida & Villena, 2009).

3.5. SOLDADURA FUERTE CON SOPLETE

El calentamiento se da con soplete de gas, siendo los gases combustibles: acetileno, propano, gas licuado de petróleo, etc.

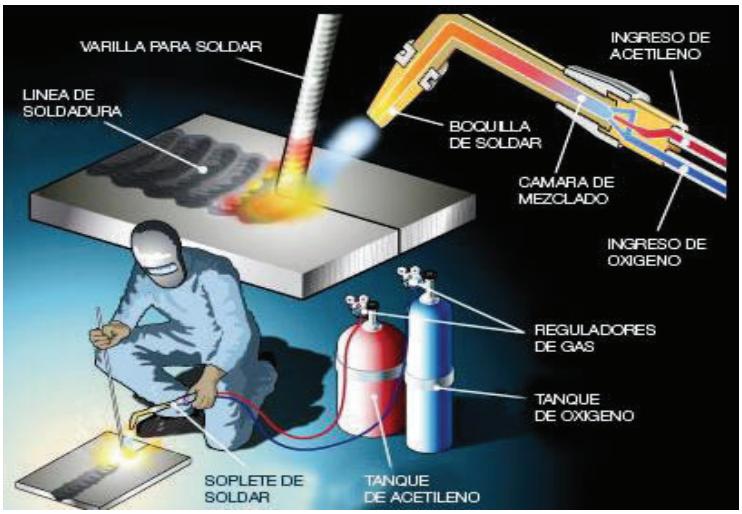


Figura 3.1. Soldadura fuerte con soplete.

(Vanilla, Manuel, s.f.)

Puede ser quemado con aire u oxígeno comprimido. Para secciones de piezas de pequeño espesor se pueden usar sopletes de aire-gas natural o aire-acetileno. Los sopletes que utilizan oxígeno y gas natural, son los que poseen las más altas temperaturas de llama.

El calentamiento con soplete sólo puede usarse con metales de aporte acompañados de fundente o con autofundente. Por ejemplo: aluminio-silicio, plata, cobre-fósforo, cobre-cinc y níquel. A excepción de los metales de aporte de cobre-fósforo, todos requieren fundente. Primeramente se aplicará calor a la unión de soldadura, derritiendo el fundente, luego se hará lo mismo con el metal de aporte, el cual fluirá al interior de la unión. Se debe tener cuidado al evitar el sobrecalentamiento del metal base, así como también del metal de aporte, ya que el segundo podría difundirse con rapidez y salir de la unión por efectos gravitatorios. El gas natural resulta el más adecuado tratándose de soldadura fuerte con soplete, debido a que la temperatura relativamente baja de su llama tiende a reducir el peligro de sobrecalentamiento.

La colocación del metal de aporte puede darse de forma manual en forma de varilla o puede hacerse en forma de rondanas, tiras o polvos. Se debe evitar que el cono interior de la llama haga contacto con la unión debido a que la fusión del metal base y la dilución del metal de aporte harían más viscoso el flujo, también el fundente puede sobrecalentarse afectando el flujo capilar (Almeida & Villena, 2009).

3.5.1. VARIABLES IMPORTANTES

Las variables más importantes en la soldadura fuerte son: la temperatura, el tiempo de permanencia en la temperatura, el metal de aporte y la atmósfera. Existen otras variables como: el embonamiento de las uniones, la cantidad de metal de aporte y el modo de calentamiento. Cabe decir que todas estas características son factibles de una automatización donde se incluya la inspección, limpieza y operaciones continuas.

3.5.2. VENTAJAS DE LA SOLDADURA FUERTE

a) Altas tasas de producción.
b) Productividad elevada de los trabajadores.

c) Ahorro de metal de aporte.
d) Consistencia de los resultados.
e) Ahorro de energía.
f) Adaptabilidad y flexibilidad.

3.6. METALES DE APORTE

De acuerdo a (American Welding Society, 1996) las características del metal de aporte son las siguientes:

a) Fluidez adecuada a la temperatura de soldadura fuerte, para distribuirse por acción capilar en las uniones.
b) Composición homogénea y estable, que minimiza la separación de los constituyentes (licuación).
c) Capacidad para mojar las superficies de los metales base y formar una unión fuerte e íntegra.

3.6.1. FUSIÓN Y FLUIDEZ

En el punto C de la figura 3.2 se tiene una composición de 72 % plata y 28 % cobre, indicativo de que esta aleación se funde a esa temperatura específica (temperatura eutéctica). Esta aleación posee una composición eutéctica; tan fluida siendo comparable a la de un metal puro, en tanto que las demás combinaciones porcentuales son pastosas entre sus temperaturas de solidus y de liquidus. Una mayor separación entre estas dos temperaturas determina una menor fluidez en el interior de una unión capilar.

3.6.2. LICUACIÓN

Metales de aporte con pequeños intervalos de fusión no tienden a separarse, fluyendo fácilmente al interior de uniones muy angostas. Para metales de aporte con grandes intervalos de fusión deber ser calentados con prontitud, o en su defecto, colocados en la unión cuando el metal base alcance la temperatura de soldadura fuerte, a fin de minimizar la separación, denominada como licuación. Los metales de aporte propensos a la licuación fluyen lentamente, sólo penetran en uniones bastante separadas y forman filetes grandes en las extremidades de las uniones.

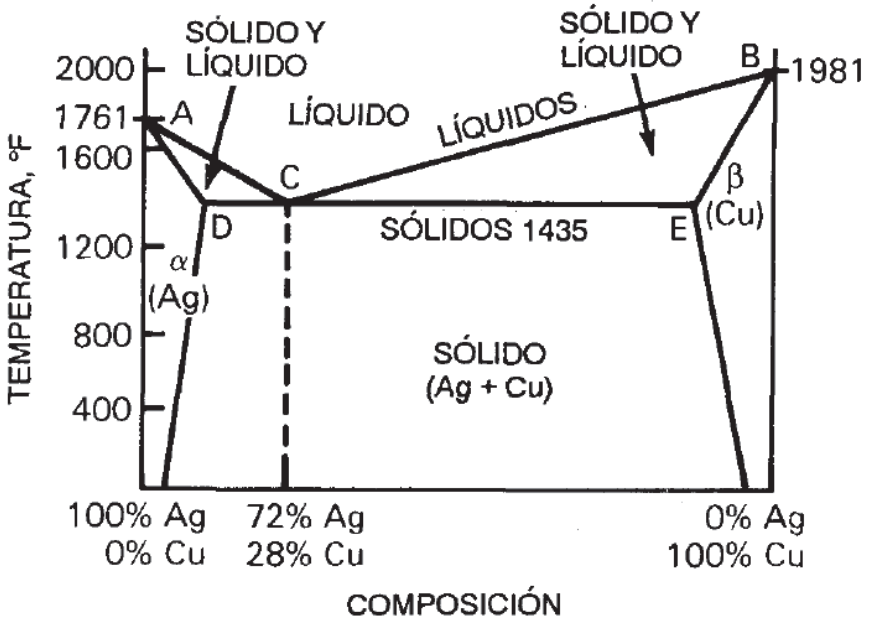


Figura 3.2. Diagrama constitucional plata – cobre.
(American Welding Society, 1996)

3.6.3. MOJADO Y ADHESIÓN

Un metal de aporte de soldadura fuerte debe alearse con la superficie del metal base evitando:

- Difusión de manera indeseable al interior del metal base.
- Diluir el metal base y erosionarlo.
- No formar compuestos quebradizos.

Se debe variar la composición de los metales de aporte, con el objetivo de evitar los problemas recién mencionados, otorgando además características de resistencia a la corrosión entre otras. Por ejemplo, se añade cinc, cadmio, o combinados, para bajar las temperaturas del liquidus y solidus. De similar manera sucede al añadir silicio en la soldadura fuerte de aluminio y con base níquel. El litio, fósforo o boro actúan reduciendo óxidos superficiales del metal base, formando compuestos con punto de fusión por debajo de la temperatura de soldadura fuerte.

3.7. SELECCIÓN DEL METAL DE APORTE

Con base en (American Welding Society, 1996) son cuatro los factores que determinan la selección de un correcto material de aporte:

a) Compatibilidad con el metal base y tipo de unión de soldadura.
b) Funcionalidad en servicio
c) Temperatura de soldadura fuerte
d) Método de calentamiento

La norma ANSI/AWS A 5.8, Especificación para metales de aporte de soldadura fuerte, determina una división de metales de aporte en siete categorías y varias clasificaciones. En la tabla 3.1 se dan las combinaciones metal base - metal de aporte, sugeridas por dicha norma. Se verá de manera más amplia algunos tipos de metales de aporte más usados.

3.7.1. METALES DE APORTE COBRE-CINC

Este aporte une metales ferrosos y no ferrosos. Tienen una mala resistencia a la corrosión, insuficiente en la unión de cobre y sus aleaciones. Los metales de aporte de soldadura fuerte de cobre son adecuados para la soldadura de aleaciones con base de níquel y aleaciones cobre-níquel y acero inoxidable cuando no se requiere resistencia a la corrosión, ya que estos metales fluyen con cierta facilidad. Usados con frecuencia con soplete, inducción y en horno con una atmósfera de gas quemado, hidrógeno o amoniaco disociado, y sin fundente. Un metal de aporte de cobre es un óxido de cobre que se suspende en un vehículo orgánico. Como fundente es usado el bórax con ácido bórico.

3.7.2. METALES DE APORTE DE COBRE-FÓSFORO

Unen cobre y sus aleaciones, son muy limitados con las uniones de plata, molibdeno y tungsteno; no deben usarse con aleaciones ferrosas o con base de níquel, ni aleaciones cobre-níquel que tengan más del 10 % de este elemento. Contiene propiedades autofundentes y son factibles de usar con todos los tipos de soldadura fuerte.

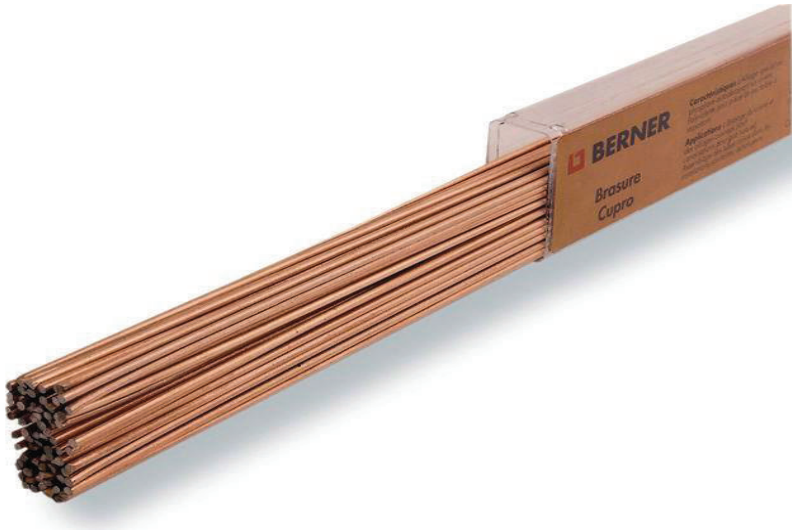


Figura 3.3. Metal de aporte de cobre para soldadura fuerte.
(Berner, 2002)

3.7.3. METALES DE APORTE DE PLATA

No unen al aluminio ni magnesio. El cinc es usado para bajar la temperatura de fusión y flujo de las aleaciones plata-cobre. Cuando se agrega cadmio a aleaciones plata-cobre-cinc, se baja las temperaturas de fusión y flujo, pero aumenta la fluidez y capacidad de mojado en varios metales base. Se debe tener cuidado con los gases, ya que los vapores de óxido de cadmio son nocivos para la salud. Los metales ferrosos son mojados con mayor facilidad con la adición de cinc a los metales de aporte.

3.7.4. METALES DE APORTE DE NÍQUEL

Mayoritariamente se utiliza en aceros inoxidables de las series 300 y 400, aleaciones con base de cobalto y níquel, e incluso acero al carbono, aceros de baja aleación y cobre, cuando se desean propiedades específicas. Son muy resistentes a la corrosión y a la aplicación de calor. Tienen una presión de vapor muy baja, propia para la utilización de los tubos al vacío a temperaturas elevadas. Con la adición de fósforo, se tiene baja ductilidad porque forman fosfuros de níquel.

3.7.5. METAL DE APORTE DE COBALTO

Muy usado por sus propiedades a alta temperatura y compatibilidad con los metales con base de cobalto. Existen fundentes especiales de alta temperatura para soldar en fuerte con soplete.

3.7.6. FUNDENTES Y ATMÓSFERAS

Se usan: fundentes, atmósferas protectoras, y vacío para evitar la producción de los óxidos que ya están presentes. Hay que tener en cuenta que el fundente o la atmósfera no eliminan la necesidad de limpiar las piezas antes de soldarlas en fuerte. Cuando se deba impedir el flujo indebido, el soldador aplicará un material "bloqueador" para retardar el flujo del material de aporte, teniéndose en cuenta el cuidar que este material no llegue a la unión por soldar, si esto ocurre se impediría la adhesión. Después de la soldadura, este material puede eliminarse lavando con agua caliente o mediante raspado de índole química o mecánica.

3.8. MATERIAL BASE

El Manual de Soldadura (American Welding Society, 1996) establece que son soldables en fuerte algunos materiales, de los cuales se destacan:

3.8.1. ALUMINIO Y ALEACIONES DE ALUMINIO

Las series ASTM 1XXX y 3XXX, aleaciones de aluminio forjadas no tratables por calor, son las que mejor se sueldan, y las aleaciones ASTM SXXX, de bajo magnesio. Los metales de aporte disponibles se funden por debajo de las temperaturas de solidus de todas las aleaciones comerciales forjadas que no son susceptibles de tratamiento térmico.

Las aleaciones forjadas susceptibles de tratamiento térmico que con más frecuencia se sueldan en fuerte son las de la serie ASTM 6XXX. Las series ASTM 2XXX y 7XXX son de bajo punto de fusión por lo que no pueden soldarse en fuerte, a excepción de las aleaciones 7072 y 7005.

Tabla 3.1. Combinaciones metal base - metal de aporte.

	Al y sus aleaciones	MG y sus aleaciones	Cu y sus aleaciones	Aceros al carbono y de baja aleación	Hierro Colado	Acero inoxidable	Ni y sus aleaciones	Ti y aleac.	W, Mo, Ta, Cb y aleaciones (metales refractarios)	Aceros De herramienta
Al y sus aleaciones	BAlSi									
Mg y sus aleaciones	X	BMg								
Cu y sus aleaciones	X	X	BAg,BAu, BCuP,RBCuZn	B Ni						
Aceros al carbono y de baja aleación	BAlSi	X	BAg,BAu, RBCuZn,B Ni	BAg,BAu,BCu RBCuZn,B Ni						
Hierro Colado	X	X	BAg,BAu, RBCuZn,B Ni	BAg, RBCuZn, B Ni	BAg,RBCuZn, B Ni					
Acero inoxidable	BAlSi	X	BAg,B Au	BAg,BAu,BCu, B Ni	BAg,BAu,BCu, B Ni	BAg,BAu, BCu,B Ni				
Ni y sus aleaciones	X	X	BAg,BAu, RBCuZn,B Ni	BAg,BAu,BCu RBCuZn,B Ni	BAg,BCu RBCuZn	BAg,BAu, BCu,B Ni	BAg,BAu, BCu,B Ni			
Ti y aleaciones	BAlSi	X	BAg	BAg	BAg	BAg	BAg	Y		
W, Mo, Ta, Cb y aleaciones (metales refractarios)	X	X	BAg, B Ni	BAg,B Cu ,B Ni*	BAg, BCu, B Ni*	BAg, BCu, B Ni*	BAg, BCu, B Ni*	Y	Y	
Aceros de herramienta	X	X	BAg,BAu, RBCuZn,B Ni	BAg,BAu,BCu RBCuZn,B Ni	BAg,BAu, RBCuZn,B Ni	BAg,BAu, BCu,B Ni	BAg,BAu, BCu RBCuZn, B Ni	X	X	BAg,BAu, BCu RBCuZn, B Ni

X: No se recomienda, aunque se puede usar con técnicas especiales para ciertas combinaciones de metales disimiles.]
Y: No es posible hacer generalizaciones sobre estas combinaciones. Consultar el Manual de Soldadura fuerte para averiguar cuáles metales se pueden usar
*: Existen metales de aporte de soldadura fuerte especiales y se usan con éxito con combinaciones de metales específicas.

Metales de Aporte:

BAlSi: Aluminio	B Cu P:	Cobre Fósforo	B Au: Base de Oro	BMg: Base de Magnesio
B Ag: Base de Plata	RBCuZn	Cobre Zinc	B Cu: Cobre	B Ni: base de Niquel

(American Welding Society, 1996)

3.8.2. COBRE Y ALEACIONES DE COBRE

Se sueldan aleaciones de base cobre y aleaciones cobre-cinc (latón), cobre-silicio (bronce de silicio), cobre-aluminio (bronce de aluminio), cobre-estaño (bronce fosforado), cobre-níquel y varias más.

3.8.3. ACEROS DE BAJO CARBONO Y DE BAJA ALEACIÓN

Este tipo de material base se suelda en fuerte sin inconvenientes incluso a temperaturas superiores a 1080 °C con metal de aporte de cobre en una atmósfera controlada, o a temperaturas más bajas con metales de aporte con base de plata.

En el caso de los aceros de aleación, el metal de aporte debe tener un solidus bastante por encima de cualquier temperatura de tratamiento térmico con la finalidad de evitar daños a uniones susceptibles a recibir tratamiento térmico.

3.8.4. ACEROS DE HERRAMIENTAS DE ALTO CARBONO Y DE ALTA VELOCIDAD

Es mejor efectuar la soldadura fuerte de los aceros de alto carbono antes de la operación de endurecimiento, o simultáneamente. Las temperaturas de endurecimiento para los aceros al carbono varían entre 760 y 820 °C, por lo que conviene usar metales de aporte con temperaturas de soldadura fuerte mayores a 820 °C.

3.8.5. ACEROS INOXIDABLES

Tienen dificultad de ser soldados en fuerte debido a su elevado contenido de cromo. Por lo tanto se debe usar bajo hidrógeno purificado (seco) o en el vacío. Es preciso mantener puntos de rocío por debajo de -51 °C ya que el mojado se dificulta después de la formación del óxido de cromo. La soldadura fuerte con soplete requiere fundente para reducir la cantidad de óxidos de cromo presentes.

3.8.6. ALEACIONES DE NÍQUEL Y DE ALTO NÍQUEL

Los elementos: azufre, cinc, plomo, bismuto y antimonio son causantes de la baja ductilidad en aleaciones de alto níquel. Las superficies de los metales base se deben limpiar exhaustivamente antes de la soldadura fuerte a fin de eliminar los

elementos mencionados. Las piezas deben recocerse antes de la soldadura fuerte, ya que el níquel es propenso a fisurarse, por lo que se debe eliminar esfuerzos residuales, o someterse a un tratamiento cuidadoso de liberación de tensiones durante el ciclo de soldadura fuerte.

3.8.7. HIERRO COLADO

Todos los tipos de hierro colado, el blanco, el gris, el maleable y el dúctil, requieren consideraciones especiales, teniendo muy en cuenta que el hierro colado blanco casi nunca se suelda en fuerte.

Las superficies de empalme casi siempre se limpian electroquímica o químicamente, se queman con llama oxidante o se someten a ráfagas de abrasivo. Si se usan metales de aporte de plata de bajo punto de fusión, se facilita el mojado con el metal de aporte. Los hierros colados dúctiles y maleables deben soldarse en fuerte por debajo de los 760 °C. Al soldarse con cobre, la temperatura debe ser baja con la finalidad de evitar la fusión de áreas localizadas en el material, especialmente con espesores delgados.

3.9. DISEÑO DE LAS UNIONES

Se utilizan dos configuraciones de uniones: traslapada y a tope. La primera puede hacerse tan fuerte como el miembro más débil, inclusive usando metal de aporte de baja resistencia o con pequeños defectos en la unión, si se usa un traslape de por lo menos tres veces el espesor del miembro más delgado. Conllevan una elevada eficiencia de unión y facilidad de fabricación; su desventaja está en el aumento de espesor de metal en la unión crea una concentración de esfuerzos en los cambios abruptos de área transversal.

El segundo tipo de unión, a tope se usa en los casos en que el espesor de la unión traslapada sería objetable y cuando la fortaleza de una unión a tope satisface los requisitos de servicio. Su resistencia mecánica dependerá en parte de la resistencia mecánica del metal de aporte. Ambos esquemas de unión se pueden apreciar en la figura 3.4 (Almeida & Villena, 2009).

3.9.1. SEPARACIÓN DE LA UNIÓN

Este aspecto influye en el desempeño mecánico de una unión soldada en fuerte, es decir cuando se le aplican cargas: estáticas, de fatiga y de impacto. Entre los efectos de la separación de la unión sobre el desempeño mecánico están:

a) Restricción del flujo plástico del metal de aporte por un metal base de mayor resistencia mecánica.
b) Atrapamiento de escoria.

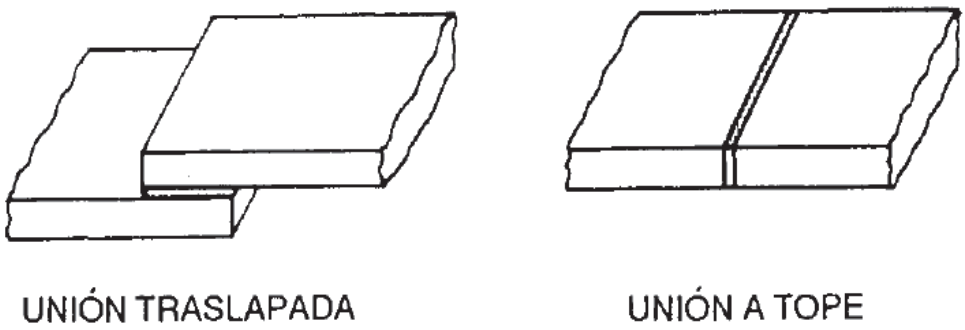


Figura 3.4. Uniones traslapada y a tope básicas para soldadura fuerte.
(American Welding Society, 1996)

c) Relación entre la separación de la unión y la fuerza capilar que implica la distribución del metal de aporte.
d) Cantidad de metal de aporte que debe difundirse en el metal base cuando se suelda por difusión.

Al estar la unión; libre de defectos como: inclusiones de fundente, huecos, áreas no soldadas, o porosidad, la resistencia en corte dependerá del espesor de la unión.

Los fundentes minerales deben fundir a una temperatura por debajo del intervalo de fusión del metal de aporte debiendo fluir hacia el interior de la unión, por delante del metal de aporte. Se debe tener en cuenta que si la separación de la unión es demasiado pequeña, el fundente mineral puede quedar retenido en la unión y no ser desplazado por el metal de aporte fundido, dando lugar a defectos

en la unión. Si la separación es demasiado grande, el metal de aporte fundido fluirá alrededor de “bolsas” de fundente provocando inclusiones de fundente.

3.10. METALURGIA DE LA SOLDADURA FUERTE

Un ángulo de contacto menor que 90 grados, medidos entre el sólido y el líquido, da como resultado un mojado positivo. Los ángulos de contacto mayores que 90 grados indican que el mojado es nulo. En algunos procesos de soldadura fuerte, el mojado y el flujo se promueven con la adición de fundente.

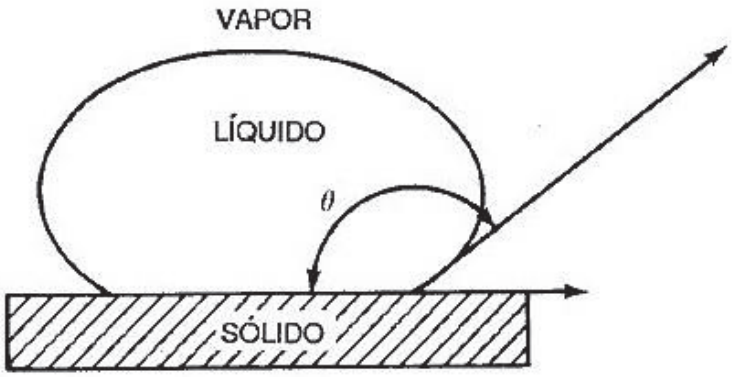


Figura 3.5. Ángulo de contacto mayor a 90 °- No hay mojado.
(American Welding Society, 1996)

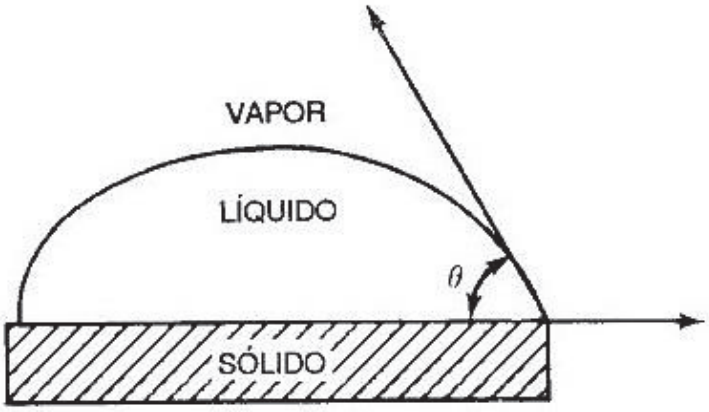


Figura 3.6. Ángulo de contacto menor a 90 °- Hay mojado.
(American Welding Society, 1996)

Cuando se tiene la temperatura máxima de soldadura fuerte, se puede dar erosión del metal base cuando hay metal de aporte líquido en la unión. La rapidez

de disolución del metal base por el metal de aporte depende de los límites de solubilidad mutuos, de la cantidad de metal de aporte disponible en la unión, de la temperatura de soldadura fuerte y de la potencial formación de aleaciones eutécticas de más baja temperatura.

Puede darse el caso en que haya penetración de metal de aporte líquido en las fronteras de grano del metal base, especialmente de los metales bases sometidos a esfuerzos de metal líquido. Metales de aporte de cobre usados en aleaciones de alto hierro-níquel sometidos a esfuerzos, tienden a fallar rápidamente. Los elementos de aleación se difunden con mayor rapidez en las fronteras de los granos que en la red cristalina (American Welding Society, 1996).

3.11. PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA FUERTE

De acuerdo al Manual de Soldadura, Tomo II (American Welding Society, 1996), para soldar en fuerte se debe proceder acatando los siguientes pasos:

3.11.1. LIMPIEZA PREVIA Y PREPARACIÓN DE SUPERFICIES

Se debe quitar grasas, aceites, suciedades y óxidos debido a que éstos impiden una adecuada fluidez del material de aporte haciendo también que se adhiera uniformemente, además bloquean las funciones del fundente. Se puede limpiar el metal base con los siguientes agentes limpiadores:

- Limpieza con disolventes de petróleo.
- Desengrasado con vapor.
- Limpieza con silicatos, detergentes, jabones o hidróxidos.
- Limpieza con ácidos grasos, y agentes humectantes.
- Limpieza electrolítica.

Para eliminar incrustaciones se usa:

- Limpieza con agentes ácidos tipo fosfato.
- Baños químicos con ácidos: sulfúrico, nítrico y clorhídrico.

La soldadura fuerte debe ser practicada lo más pronto posible después de haberse dado el proceso de limpieza.

3.11.2. APLICACIÓN DEL FUNDENTE

Se puede aplicar en polvo, pasta, líquido, o mojando el extremo de la varilla de aporte en el recipiente del fundente y luego colocándolo sobre la unión. Los óxidos que se forman durante el calentamiento son de características blandas, por lo tanto fáciles de remover, provocando que se requiera una acción del fundente limitada. La viscosidad que presenta el fundente es factible de disminución calentándolo a 60 °C, este, a baja tensión superficial presenta mayor facilidad de adherirse al metal. Si se desea restringir el flujo de metal de aporte, se emplean bloqueadores, por lo general son suspensiones de óxido de aluminio, cromo, titanio o magnesio en agua.

3.11.3. COLOCACIÓN DEL METAL DE APORTE

La mayor frecuencia de aportación es hacerlo alimentando a la cara de la unión durante el proceso de soldadura, por ejemplo, al soldar en horno, el metal de aporte se coloca previamente en la unión. Cuando el metal de aporte tiene presentación en polvo, se lo puede aplicar seco en el área de la unión y luego empaparse de aglomerante o bien se pueden mezclar ambas sustancias.

3.11.4. ELIMINACIÓN DEL FUNDENTE

Por lo regular se lo elimina con agua caliente. En casos difíciles puede necesitarse ácido sulfúrico al 10 %; no se debe usar ácido nítrico en aleaciones de cobre y plata. En aplicaciones con metal de aporte de aluminio se necesitará agua por encima de los 82 °C con inmersión posterior en ácido nítrico, ácido clorhídrico o combinación de éstos. Las áreas oxidadas adyacentes a la unión son restaurables mediante limpieza química o métodos mecánicos, como cepillado con alambre o ráfagas limpiadoras.

3.12. INSPECCIÓN DE SOLDADURA FUERTE

Pueden inspeccionarse: probetas o en ensambles terminados y responden a discontinuidades de tres clases (Almeida & Villena, 2009):

a) Requisitos dimensionales.
b) Discontinuidades estructurales de la unión.
c) Asociaciones al metal de soldadura o a la unión.

3.12.1. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

- Inspección Visual.
- Prueba en servicio.
- Prueba de fugas.
- Inspección con líquidos penetrantes.
- Inspección radiográfica.
- Inspección ultrasónica.
- Inspección térmica por transferencia de calor.

3.12.2. MÉTODOS DESTRUCTIVOS

- Inspección metalográfica.
- Pruebas de pelado.
- Pruebas de tensión y corte.
- Pruebas de torsión.

3.13. IMPERFECCIONES EN SOLDADURA FUERTE

Se identifican las siguientes imperfecciones (American Welding Society, 1996):

3.13.1. FALTA DE LLENADO

Resultado de una limpieza inadecuada, separación excesiva, falta de metal de aporte, gas atrapado y mala fijación de las piezas a unirse. La falta de llenado reduce el área que soporta la carga lo que implica una reducción en la resistencia mecánica.

3.13.2. ATRAPAMIENTO DE FUNDENTE

Esta imperfección evita el flujo del metal de aporte al interior de esa área, reduciendo la resistencia mecánica, además puede dar lugar a falsas indicaciones en pruebas de fugas y servicio.

3.13.3. EROSIÓN DEL METAL BASE

Se produce cuando el metal de aporte se alea con el metal base, causando socavamiento. La erosión reduce la resistencia mecánica debido a que altera la

composición de los materiales y reduce el área de sección transversal del metal base.

3.13.4. ASPECTO SUPERFICIAL INSATISFACTORIO

Se trata de aspereza y una extensión excesiva, no solo implica estética. Los defectos de apariencia pueden actuar como concentradores de esfuerzos o lugares de corrosión.

3.13.5. GRIETAS

Reducen la resistencia mecánica y por tanto la vida de servicio ya que actúan como elevadores de esfuerzos causando falla prematura por fatiga; demás se tiene deficiencias producidas por un mojado excesivo, nulo y erosión, resumidas en la siguiente tabla.

Tabla 3.2. Soluciones a los problemas típicos en soldadura fuerte.

Soluciones a los problemas de soldadura fuerte típicos	
PROBLEMA	—No hay flujo, no moja CAUSAS: —Metal de aporte - Lote diferente o equivocado —Baja temperatura - mala técnica, error de termopar/controlador —Tiempo - demasiado corto —Piezas sucias - limpieza inadecuada —Mala atmósfera - muy poco fundente, fundente equivocado, gas o vacío deficiente —Falta de chapeado con Ni - hay oxidación del metal base —Separación excesiva - control de embonamiento deficiente
PROBLEMA	—Exceso de flujo o de mojado - Causa taponado de agujeros, suelda uniones equivocadas CAUSAS: —Temperatura demasiado alta - mala técnica, error de horno —Tiempo - demasiado largo —Demasiado metal de aporte - mala técnica, diferente espesor de separación —Metal de aporte - Lote diferente o equivocado —No se usó bloqueador
PROBLEMA	—Erosión - El metal de aporte de soldadura fuerte carcome el metal original CAUSAS: —Temperatura demasiado alta - mala técnica, error de horno —Tiempo a temperatura demasiado largo - mala técnica, error de controlador —Demasiado metal de aporte - mala técnica, cambio en la separación, piezas en diferente posición relativa —Piezas trabajadas en frío - muy susceptibles - cambio de fabricante de las piezas - no se liberaron las tensiones —Los metales de aporte de soldadura fuerte están demasiado por encima del líquidus o hay una concentración excesiva de depresores del punto de fusión

(American Welding Society, 1996)

3.14. SOLDADURA FUERTE CON LATÓN (LATONADO)

El Tomo II del Manual de Soldadura (American Welding Society, 1996), describe los aspectos relacionados con el proceso de soldadura fuerte con latón especificando el empleo de metal de aporte con temperatura de fusión por encima de 450 °C y por debajo del solidus del metal base.

La diferencia con la soldadura fuerte por capilaridad es que el metal de aporte se aplica a la unión en forma de varilla realizando depósitos de metal sin utilizar la acción capilar.

La adhesión se da entre el metal de aporte y los metales base calentados, no fundidos. Este método originalmente se dio como solución a la reparación de piezas fundidas agrietadas o rotas. La soldadura autógena del hierro colado necesita de un precalentamiento extensivo más un enfriamiento lento, con el fin de minimizar el agrietamiento y cementita dura. Este proceso conlleva menos problemas de expansión y contracción.

3.14.1. VENTAJAS DEL LA SOLDAURA FUERTE CON LATÓN FRENTE A LA SOLDADURA POR FUSIÓN CONVENCIONAL

a) El calor para la adhesión es menor, lo que implica mayor rapidez en el proceso y un ahorro de combustible.
b) Evita problemas con la expansión y contracción térmicas.
c) El metal de aporte depositado es relativamente blando y dúctil, fácil de maquinar y sometido a esfuerzos residuales bajos.
d) Conlleva suficiente resistencia mecánica para varias aplicaciones.
e) El equipo es sencillo y fácil de usar.
f) El hierro colado gris, material duro y frágil, se puede latonar sin un precalentamiento extenso.
g) Propicio para la unión de materiales disímiles; por ejemplo: cobre a hierro colado y acero; además de aleaciones níquel-cobre a hierro colado y acero.

3.14.2. DESVENTAJAS DE LA SOLDADURA FUERTE CON LATÓN

a) La resistencia mecánica no supera a la del metal de aporte.
b) El metal de aporte tiene punto de fusión bajo, lo que implica temperaturas de servicio bajas.
c) Si se usa metal de aporte de aleación de cobre, la temperatura de servicio no podrá ser mayor que 260 °C o incluso menos.
d) Este tipo de unión es propensa a corrosión galvánica y ataque químico diferencial.
e) En cuestiones de estética color del metal de aporte no se asemeja a la del metal base.

3.14.3. EQUIPO PARA SOLDADURA FUERTE

Se realiza con el soplete del proceso oxigas y su equipo asociado, tal como los tanques de gas (combustible y comburente), mangueras, gafas, etc.

3.14.4. MATERIAL DE APORTE

Se usa materiales que contienen aproximadamente: 60 % de cobre y 40 % de cinc. Hay adiciones muy pequeñas de estaño, hierro, manganeso y silicio, con mejores características de flujo y menor volatilización de cinc, eliminan oxígeno e incrementan la fortaleza y dureza de la soldadura.

Tabla 3.3. Composición química de varillas de aporte para soldadura fuerte.

AWS Specification	AWS Specification	Cu	Zn	Sn	Fe	Ni	Mn	Al	Si	Pb	P	Total Other
A5.27	RBCuZn-A	57.0–61.0	Bal.	0.25–1.00	—	—	—	0.01	0.04–0.15	0.05	—	0.50
A5.27	RBCuZn-B	56.0–60.0	Bal.	0.80–1.10	0.25–1.2	0.20–0.80	0.01–0.50	0.01	0.04–0.15	0.05	—	0.50
A5.27	RBCuZn-C	56.0–60.0	Bal.	0.80–1.10	0.25–1.2	—	0.01–0.50	0.01	0.04–0.15	0.05	—	0.50
A5.27	RBCuZn-D	46.0–50.0	Bal.	—	—	9.0–11.0	—	0.01	0.04–0.25	0.05	0.25	0.50

(American National Standar & American Welding Society, 1989)

Tabla 3.4. Propiedades y aplicaciones de material de aporte para soldadura fuerte.

AWS Classification	Room Temperature Tensile Properties Minimum		Liquidus Temperatures		Applications
	Ksi	MPa	°F	°C	
RBCuZn-A	40	275	1650	900	A low fuming bronze used on copper sheet, mild tube steel, deep drawing steel and cast iron (OFW).
RBCuZn-B	50	344	1630	890	Higher strength, used to surface, or braze weld copper, steel, cast iron or wrought iron (OFW).
RBCuZn-C	50	344	1630	890	Better color match with mild steel, cast iron, and wrought iron (OFW).
RBCuZn-D	60	413	1715	935	Nickel silver bronze filler metal providing best strength and color match with cast iron and wrought iron (OFW).

(American National Standar & American Welding Society, 1989)

La resistencia mecánica de la unión será mucho menor cuando la temperatura de servicio supere los 260 °C.

En la tabla 3.3 y 3.4 se presentan la composición química y las propiedades de cuatro varillas de soldadura para latonar según la especificación AWS A 5.27.

3.14.5. FUNDENTES

Están diseñados para usarse a temperaturas más altas que las de soldadura fuerte, permaneciendo activos más tiempo. Se destacan los siguientes fundentes para hierro y acero.

a) Fundente básico para acero y para hierro maleable, limpia el metal base y las franjas de soldadura, ayudando de manera simultánea en el recubrimiento previo del metal base.
b) Fundente de la misma función del tipo de fundente anterior, con la adición de que este suprime la formación de vapores de óxido de cinc.
c) Fundente exclusivo para hierro colado gris o maleable. Contiene óxido de hierro o dióxido de manganeso, los cuales combinados con el carbono libre que se encuentra en la superficie del hierro colado, cumplen con eliminar este último.

El fundente puede estar presente de la siguiente manera:

a) La varilla de aporte caliente puede meterse en el fundente para transferirlo a la unión durante la soldadura.
b) Aplicado con brocha sobre la unión
c) La varilla de aporte puede recubrirse con fundente antes de soldar.
d) El fundente puede introducirse por medio de la llama de gas oxicombustible.

3.14.6. METALURGIA DE LA SOLDADURA FUERTE CON LATÓN

El metal base se calienta hasta una temperatura en la cual se moja con el metal de aporte fundido, produciéndose una difusión entre ambos en una zona angosta de la unión. Se debe tener en cuenta que si no se limpian aceite, óxidos y grasa, se puede incurrir en problemas. Durante el enfriamiento subsiguiente el material de aporte debe fluir plásticamente en la solidificación ya que son aleaciones de gran ductilidad, tolerando fenómenos de contracción.

3.14.7. APLICACIONES DE LA SOLDADURA FUERTE CON LATÓN

La principal aplicación se da en la reparación de hierro colado y piezas de acero rotas, implicando un ahorro de costos considerable. Se utiliza también en tubos de acero dulce de poco espesor, ductos de acero galvanizado. El espesor varía desde láminas delgadas hasta hierro colado muy grueso. Se utilizan soldaduras de surco y filete en uniones a tope, esquina y traslapadas.

Figura 3.7. Varilla de aleación de bronce recubierta de fundente.
(Ultra Weld, 2012)

Tabla 3.5. Procedimiento de la soldadura fuerte con latón.

PROCEDIMIENTO DE LA SOLDADURA FUERTE CON LATÓN		
Fijación	Al reparar grietas en hierro colado no es necesaria fijación si la pieza no se fragmentó	
Preparación de uniones	Más de 3 mm	Para espesores de más de 3 mm, se usan surcos en "V" con un ángulo de 90 a 120 grados proveyendo áreas más extensas entre metal de aporte y base.
	Menos de 3 mm	Se utilizan surcos cuadrados
	En hierro colado, se debe eliminar el grafito remanente calentándolo y cepillando con alambre, si hay residuos de aceite el calentamiento será entre 320 – 650 °C.	
Precalentamiento	Es necesario para evitar agrietamiento por esfuerzos térmicos en piezas de hierro colado. Puede ser general o localizado entre 425 – 480 °C, luego se deben aislar y enfriar lentamente hasta la temperatura ambiente	
Técnica	El metal base es calentado hasta que el metal de aporte derretido lo moje y fluya hacia las caras de la unión. Esta operación avanza por la unión, precalentando las caras y llenando el surco con las pasadas necesarias.	

(American Welding Society, 1996)

3.14.8. TIPOS DE SOLDADURAS

Son empleadas soldaduras de ranura, filete y borde para placas, láminas, tubos, varillas, barras, piezas coladas y forjad (American Society for Metals HandBook Volume 1, 1997)as.

3.15. CONSIDERACIONES TOMADAS AL SOLDAR HIERRO DÚCTIL CON SOLDADURA FUERTE

Las consideraciones descritas a continuación se basan en la Guía para la soldadura de hierro fundido (American Standard For Testing Materials, 2014), añadiendo que algunos aspectos ya han sido mencionados en la sección anterior (Soldadura fuerte con latón), proceso específico con el que se procederá en el capítulo experimental.

3.15.1. DISEÑO DE LA JUNTA Y PREPARACIÓN

El diseño de la junta es similar al usado en los procesos con fusión. Para espesores sobre los 2 mm, juntas simples y dobles en “V” son utilizadas con ángulos entre 90 y 120 grados para proveer áreas amplias de interfaz entre el metal soldado y el metal base. Juntas cuadradas pueden ser utilizadas para espesores menores a los 2 mm.

Si la fundición ha sido muy ensuciada con aceite, esta debe ser calentada entre 370 a 480 °C, evaporando el aceite de la superficie, luego esta misma superficie debe ser limpiada con cepillo de alambre. El hierro dúctil resulta más difícil de soldar en fuerte que el hierro maleable, debido a su alto contenido de grafito en nódulos. El método más efectivo de limpieza para cualquier fundición constituye una inmersión en un baño de sal electrolítica, el cual remueve completamente el grafito libre que se encuentre presente por procesos de maquinado o superficies rotas.

3.15.2. PRECALENTAMIENTO

El precalentamiento depende del tipo de hierro fundido y del tamaño de la pieza a ser soldada, puede aplicarse de forma local o general. Generalmente fluctúa en rangos de 425 a 480 °C. Después que las partes son soldadas en fuerte se requiere recubrirlas con mantas resistentes al calor o vermiculita para un enfriamiento a temperatura ambiente, minimizando de esta forma los esfuerzos térmicos inducidos en el hierro colado.

3.15.3. TÉCNICA DE SOLDADURA FUERTE

El fundente se aplica a la varilla de aporte y a la junta de la superficie a ser unida. El metal base es calentado con llama hasta que el material de aporte moje la superficie del meta base, fluyendo por su superficie. No se debe usar el cono de la llama oxigas dirigida a los metales de aporte ni sobre el metal base al momento de soldar.

3.15.4. MEZCLA COMBUSTIBLE-COMBURENTE ADECUADA

Todos los gases combustibles comerciales requieren de oxígeno para soportar el proceso de combustión. Para una adecuada soldadura, un combustible cuando se quema con oxígeno debe conllevar los siguientes aspectos:

a) Alta temperatura de llama.
b) Alta velocidad de combustión.
c) Adecuado contenido de calor.
d) Mínima reacción química de la llama con los metales de aporte.

De todos los combustibles comercialmente disponibles, el acetileno es el más ampliamente conocido. Otros gases como: el metilacetileno-propadieno, propileno, propano, gas natural, entre otros, tienen una temperatura alta de llama pero exhiben una baja velocidad de propagación. Estas llamas de gas son excesivamente oxidantes a flujos suficientemente altos como para producir tasas de transferencia de calor utilizables con gas oxígeno – combustible. Por esta razón, el acetileno es preferido en la soldadura de hierro fundido. (American National Standar & American Welding Society, 1989).

3.15.5. CALOR DE LA COMBUSTIÓN

Según el Manual de Soldadura, Tomo II (American Welding Society, 1996), el calor calórico de un gas combustible de hidrocarburos cuantifica la suma del calor de las reacciones primarias y secundarias originadas en la llama. El contenido calorífico en la reacción primaria es generado en la llama interior, en este lugar, la combustión se realiza con el oxígeno suministrado por el soplete. La reacción secundaria tiene lugar en la llama exterior, donde el oxígeno sustenta la combustión en los productos de la reacción primaria.

El calor más concentrado de la llama primaria contribuye en gran medida a la capacidad de soldar, siendo esta neutral cuando la ecuación química de la reacción primaria se encuentra balanceada.

En estas condiciones, la atmósfera de la llama primaria no es carburizante ni oxidante. La reacción secundaria depende de los productos finales de la reacción primaria, por lo que el término neutral nos da una referencia para: describir las

razones de combustión y comparar las diversas características térmicas de los distintos gases combustibles.

3.15.6. TEMPERATURA DE LA LLAMA

La temperatura de la llama de un gas combustible varía según la razón oxigeno-combustible, esta temperatura indica la capacidad de calentamiento del gas combustible. Las temperaturas de llama son calculadas, ya que en la actualidad no se cuenta con un método de análisis sencillo para medir físicamente dichos valores.

Las temperaturas de llama que de la siguiente tabla se refieren a la llamada "llama neutra", de la llama primaria. Es factible obtener temperaturas de llama más altas que las citadas, pero el resultado será una llama oxidante, condición indeseable para la soldadura de muchos metales (American Welding Society, 1996).

Tabla 3.6. Características de los gases combustibles comunes.

Gas combustible	Fórmula	Razón volumen-peso ($pies^3$/lb)	Razón de combustión gas-combustible	Temperatura de llama neutra para O_2 (°C)	Calor de combustión total (Btu/$pies^3$)
Acetileno	C_2H_2	14.6	2.5	3087	1470
Propano	C_2H_3	8.7	5	2526	2498
Propileno	C_3H_8	8.9	4.5	2900	2400
Gas natural	CH_4	23.6	2	2538	1000
Hidrógeno	H_2	188.7	0.5	2660	325

(American Welding Society, 1996)

3.15.7. VELOCIDAD DE LA COMBUSTIÓN

Una propiedad característica de un gas combustible es la velocidad de combustión o razón de propagación de la llama. Se refiere a la velocidad con que un frente de llama se desplaza a través del gas no quemado adyacente, influyendo en el tamaño y la temperatura de la llama primaria.

Este factor también afecta la rapidez con que los gases pueden fluir a través de la punta del soplete sin causar retroceso de la llama, dándose cuando la combustión

ocurre a cierta distancia de la punta del soplete, en vez de hacerlo justo en la punta. El retroceso de llama se refiere a la retracción momentánea de la llama al interior de la punta de soldadura, para posteriormente apagarse (American Welding Society, 1996).

3.15.8. INTENSIDAD DE LA COMBUSTIÓN

La temperatura de la llama y el valor calorífico de los combustibles generalmente se usan como criterios para evaluar los gases combustibles. Sin embargo, estos dos factores por sí solos resultan suficientes para hacer una evaluación completa de los gases combustibles. Resulta adecuado usar el concepto: intensidad de combustión o "producción específica de llama" para evaluar las diferentes combinaciones oxígeno-gas combustible.

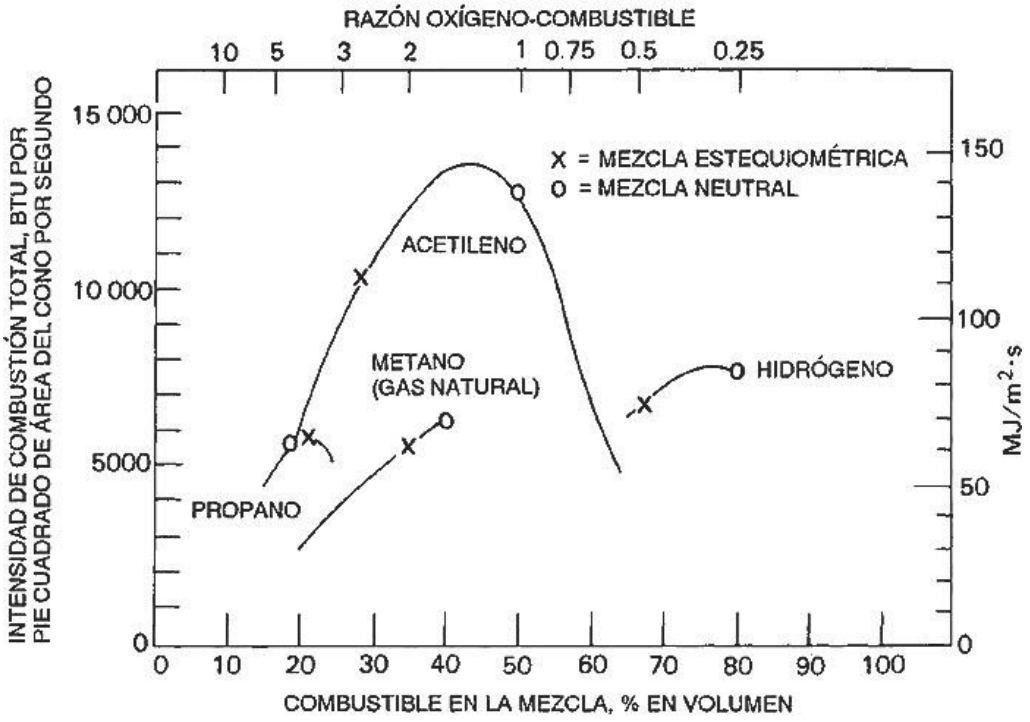


Figura 3.8. Intensidad de combustión total de diversas mezclas oxígeno-combustible. (American Welding Society, 1996)

La intensidad de combustión maneja la velocidad de combustión de la llama, el valor calorífico de la mezcla de oxígeno y gas, y el área del cono de llama que

sale de la punta, agrupa todos los criterios anteriores para tener una valoración global de los gases combustibles.

Por tanto, la intensidad de combustión, es máxima cuando la velocidad de combustión normal de la llama y el valor calorífico de la mezcla de gases es también máximo.

Al igual que el calor de combustión, la intensidad de combustión de puede ser expresado como la suma de las intensidades de combustión de las reacciones primaria y secundaria (American Welding Society, 1996).

Tabla 3.7 Características de tamaños de boquillas vs presión de gases.

Espesor del material	Tamaño de boquilla	Diámetro de boquilla (mm)	Presión O_2 (psi)	Presión C_2H_2 (psi)
0.5-1	1	0.74	14.7	2.84
1-1.5	2	0.93	14.7	2.84
1.5-2	3	1.2	22.04	3.56
2-3	4	1.4	29.39	4.27
3-4	5	1.6	36.73	5.69
4-5	6	1.8	44.08	6.4
5-7	7	2.1	44.08	6.83
7-11	8	2.3	51.43	7.11
11-15	9	2.5	58.77	7.39

(American Welding Society, 1996)

3.15.9. AJUSTE DE LA LLAMA

Es generalmente ejecutado con soplete de oxigas, usando una llama neutra ligeramente oxidante. Este tipo de llama es alcanzado por el incremento del flujo oxígeno-combustible hasta que la pluma desaparece y el cuello se torna angosto. Este tipo de llama remueve el grafito esparcido en las superficies de soldeo (American Welding Society, 1996).

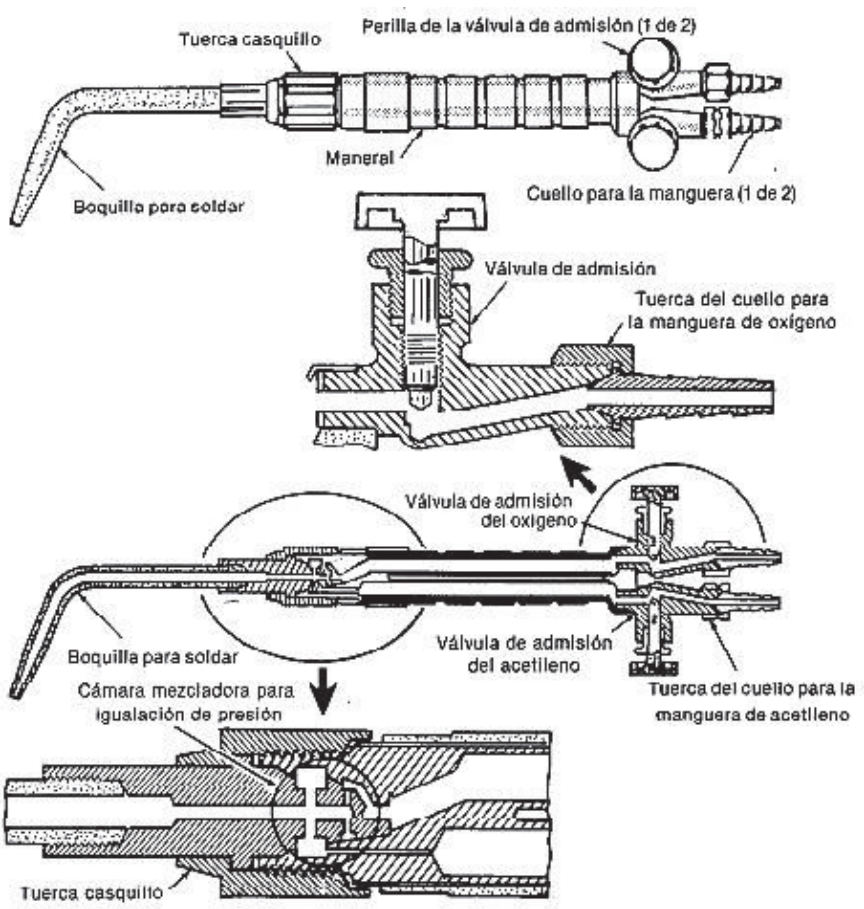


Figura 3.9. Soplete típico usado en la soldadura fuerte.
(Horwitz, 1990)

a) La llama neutra resulta de igual proporción de oxígeno y acetileno, este tipo de llama es la más común usada en soldadura.

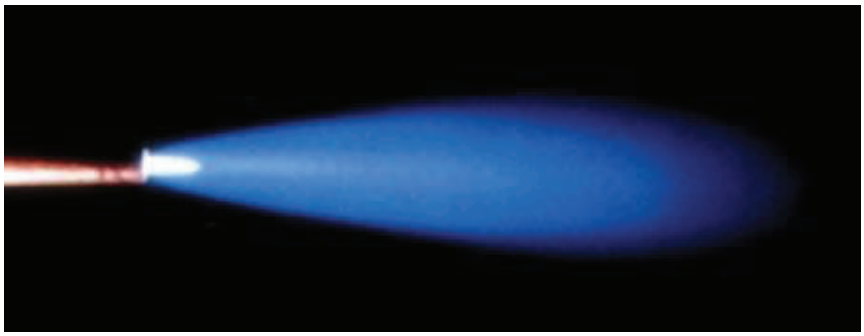


Figura 3.10. Llama neutra.
(Group GCE, s.f.)

b) La llama carburante es resultado de una mezcla con exceso de acetileno, empleándose para agregar carbón al metal de soldadura.

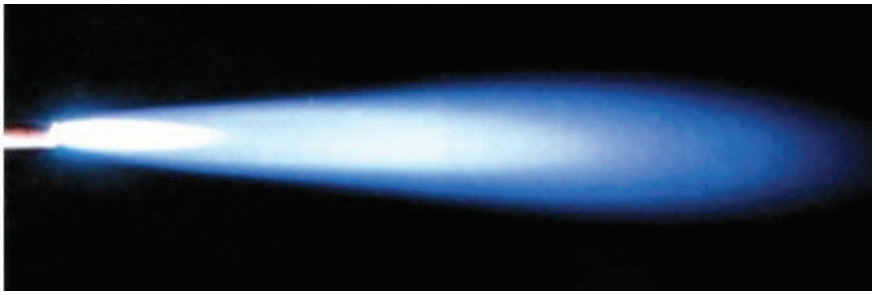


Figura 3.11. Llama carburante.
(Group GCE, s.f.)

c) Una llama oxidante resulta de una mezcla con exceso de oxígeno, es la de mayor temperatura, teniendo en cuenta que el exceso de oxígeno produce oxidación en el metal de soldadura.

Figura 3.12. Llama oxidante.
(Group GCE, s.f.)

CAPÍTULO 4

SOLDABILIDAD EN EL HIERRO FUNDIDO

4.1. INTRODUCCIÓN

Al elevarse el calor, como en el caso de la soldadura, la matriz de la fundición se enriquece localmente de carbono y si se le agrega un enfriamiento rápido en la zona afectada por el calor, se puede llegar a formar fases duras y frágiles, como la cementita, además causando un deterioro significativo tanto en la maquinabilidad y propiedades mecánicas, finalmente resultando en agrietamiento. De acuerdo a estos factores metalúrgicos, los hierros fundidos son más difíciles de soldar que los aceros al carbono, se tiene también que las eficiencias (recuperación de las propiedades mecánicas de las piezas), en las juntas no alcanzan el 100 %. El objetivo es realizar un correcto procedimiento de soldadura que conlleve una exitosa unión de estos materiales, para lo cual se debe contar con un buen procedimiento de soldadura, soldadores con experiencia para desarrollar este tipo de soldadura y una correcta selección de material de aporte.

Se debe tener en cuenta a la metalurgia de la soldadura, la misma que difiere de la metalurgia convencional en ciertos puntos de vista, sin embargo, en términos generales, se puede decir que esta asignatura de la soldadura estudia el comportamiento del metal durante el proceso de soldado y los efectos de este en las propiedades de la pieza soldada, efectos que se verá a continuación (Luddey, Zapata, & Mesa, 2007).

4.2. SOLDABILIDAD EN LAS FUNDICIONES

La microestructura de estos materiales depende de la morfología del grafito precipitado en la solidificación y enfriamiento, todos estos factores implican directamente las diferentes características mecánicas de los hierros fundidos y por ende también su soldabilidad. Fases quebradizas y duras como la martensita o la cementita, dificultan el proceso de soldadura, disminuyendo su eficiencia.

El hierro fundido blanco al tener una matriz metálica libre de grafito, constituida por cementita y otros carburos, es considerado no soldable. De pobre ductilidad, no soporta esfuerzos residuales en el metal base, admitiendo fisuras en la zona afectada por el calor. Las fundiciones grises tienen una relativa buena soldabilidad influenciada por algunos aleantes. Cuando se tienen altos contenidos de fósforo se corre el riesgo de obtener steadita, ocasionando desgarre en caliente. Cuando se trata de fundiciones nodulares, la soldabilidad es mucho mejor que la de las fundiciones grises, debido a sus características de alta ductilidad, obteniéndose resultados excelentes cuando este tipo de hierro colado ha sido recocido.

Las fundiciones maleables, obtenidas en hornos de atmósfera oxidante, tienen una buena soldabilidad, mientras que las obtenidas en hornos de atmósferas reductoras, no son soldables. De forma general se puede decir que las fundiciones nodulares y las maleables, tienen una similar soldabilidad (Luddey, Zapata, & Mesa, 2007).

4.3. INCIDENCIA TÉRMICA EN LA SOLDADURA

Según (Baño, 2008), los gradientes térmicos durante el proceso de soldeo son muy amplios, ocasionando importantes cambios metalúrgicos en las zonas adyacentes al metal de aporte. Por ejemplo en la soldadura por arco eléctrico se tiene tres zonas conocidas como:

- Zona afectada por el calor (ZAC).
- Zona de fusión parcial (ZFP).
- Zona de fusión total (ZFT).

4.3.1. ZONA AFECTADA POR EL CALOR (ZAC)

Se denomina así a la región del metal base adyacente al cordón. La martensita se produce en esta zona a partir de austenita con grandes contenidos de carbono difundido de partículas de grafito precipitado en la matriz, efecto de las altas velocidades de enfriamiento en comparación a la pérdida de temperatura durante la solidificación de la colada. La formación de martensita en el metal base puede aplacarse gracias al precalentamiento, control adecuado de la temperatura entre pases y control de enfriamiento, además de que si es deseable aumentar o

restablecer la ductilidad de la junta después del soldeo, se puede realizar un tratamiento térmico. En el proceso de soldadura de los hierros dúctiles, se minimiza la formación de martensita y cementita, ya que el grafito precipitado se difunde lentamente en la matriz ferrítica.

4.3.2. ZONA PARCIALMENTE FUNDIDA (ZPF)

Se ubica en la zona de fusión total y la zona afectada por el calor, aquí se da una fusión parcial del metal base. Se la constituye como zona crítica debido a las altas velocidades de enfriamiento, la solidificación final es la de una fundición blanca, de alta dureza. De acuerdo a la composición química del metal base, esta región puede desencadenar en distintas microestructuras como: martensita, austenita retenida, carburos primarios y ledeburita. Usar un metal de aporte de bajo punto de fusión puede ayudar a disminuir la temperatura en la zona de fusión parcial. El fisuramiento por la línea de fusión puede darse con poco calor de entrada si se usa una temperatura de precalentamiento demasiado elevada para prevenir la aparición de martensita.

4.3.3. ZONA DE FUSIÓN TOTAL (ZFT)

El tipo de electrodo es el que determina las propiedades y microestructura de esta zona. Esta zona la compone el electrodo fundido y un poco de dilución de metal base. Debido a la turbulencia en la pileta de soldadura, el depósito tiene una composición relativamente uniforme.

4.4. SOLIDIFICACIÓN DEL METAL DE APORTE

La zona de solidificación es influenciada por la composición química de todo el sistema, geometría de la pileta líquida y condiciones térmicas. La presencia de impurezas en el charco de soldadura, turbulencia y variaciones de temperatura en el metal líquido también constituyen otro tipo de factores. En pocas palabras, la solidificación es un proceso dinámico que se relaciona íntimamente con la velocidad de soldadura (De Vedia & Svoboda, 2008).

4.4.1. PARÁMETROS BÁSICOS

Los procesos que controlan la solidificación son:

- Velocidad de crecimiento dendrítico.
- Gradiente de temperatura.
- Sobreenfriamiento constitucional.

4.4.1.1. Velocidad de crecimiento o velocidad de solidificación

Es la rapidez con la que avanza la interfase sólido-líquido o frente de solidificación en la pileta líquida.

4.4.1.2. Gradiente de temperatura

Este factor es función de las propiedades del metal, proceso de soldadura, posición de soldadura y calor de entrada. Aumenta al alejarse de la línea central de la soldadura, siendo máximo en la zona de fusión parcial. Los gradientes de temperatura en el sólido y en el líquido determinan la subestructura de solidificación en la zona de fusión.

4.4.1.3. Sobreenfriamiento constitucional

Corresponde a la diferencia entre la temperatura del liquidus de una aleación en condiciones de equilibrio y la temperatura real. Tiene gran influencia en el desarrollo de la estructura de solidificación. Es originada por el cambio en la temperatura de transformación debido a la variación de la composición química.

4.4.2. NUCLEACIÓN Y CRECIMIENTO

La nucleación se refiere a una fase sólida que puede ser homogénea o heterogénea. La fase homogénea ocurre bajo condiciones controladas de laboratorio, mientras que la nucleación heterogénea es la más común, necesitando agentes de solidificación que disminuyen la energía libre para una formación de núcleo estable.

Los depósitos de soldadura solidifican con crecimiento epitaxial a partir de material parcialmente fundido, por otra parte el gradiente de temperatura provee un crecimiento columnar de acuerdo a la dirección del máximo gradiente de temperatura.

4.4.3. MODOS DE SOLIDIFICACIÓN

De acuerdo a (De Vedia & Svoboda, 2008) las características microestructurales son determinadas por la estabilidad en la interfase sólido-líquido, produciéndose el crecimiento en forma planar, celular o dendrítica.

4.4.3.1. Crecimiento planar

El sobreenfriamiento constitucional debe ser nulo, cualquier inestabilidad producida en la interfase sólido-líquido se encontrará con un líquido de mayor gradiente de temperatura, manteniendo un frente plano. Este tipo de frente planar es difícil de mantener a velocidades de soldadura altas.

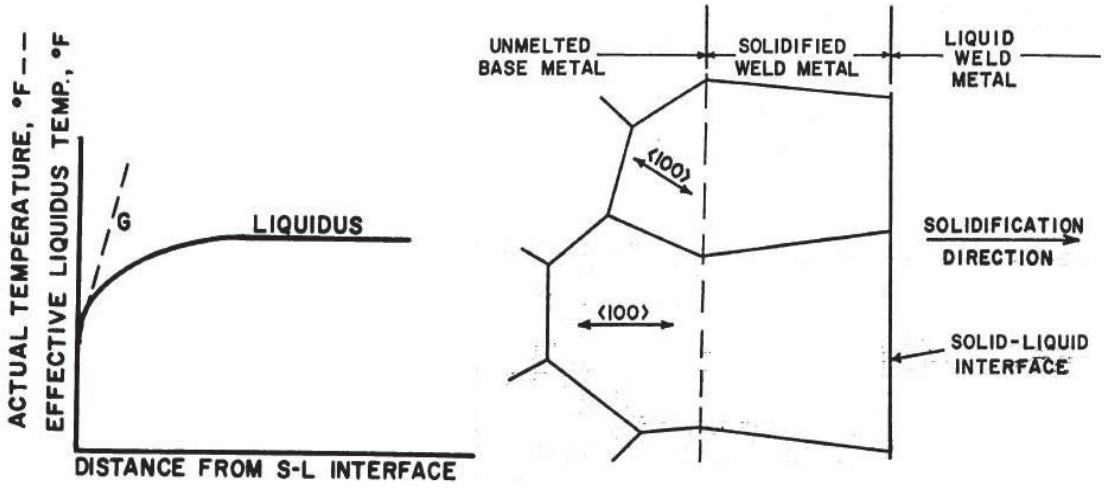


Figura 4.1. Interfase sólido-líquido durante el crecimiento planar.
(De Vedia & Svoboda, 2008)

4.4.3.2. Crecimiento celular

El frente de solidificación es relativamente inestable con bajo grado de sobreenfriamiento constitucional. Se presenta cuando la extensión de la zona sobreenfriada es considerablemente menor que el diámetro del grano. La constitución de esta estructura es de células de sección transversal hexagonal, el crecimiento de las mismas es controlado por las condiciones del flujo de calor aportado, tal como se aprecia en la siguiente figura.

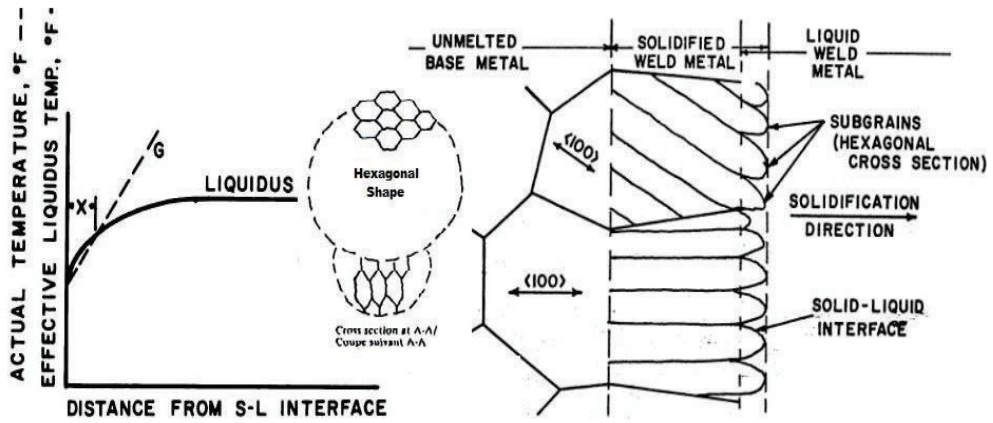


Figura 4.2. Interfase sólido-líquido durante el crecimiento celular.
(De Vedia & Svoboda, 2008)

4.4.3.3. Crecimiento dendrítico o columnar dendrítico

Se necesita que la extensión de la zona sobreenfriada sea mucho mayor que el diámetro del grano para que se produzca este modo de solidificación

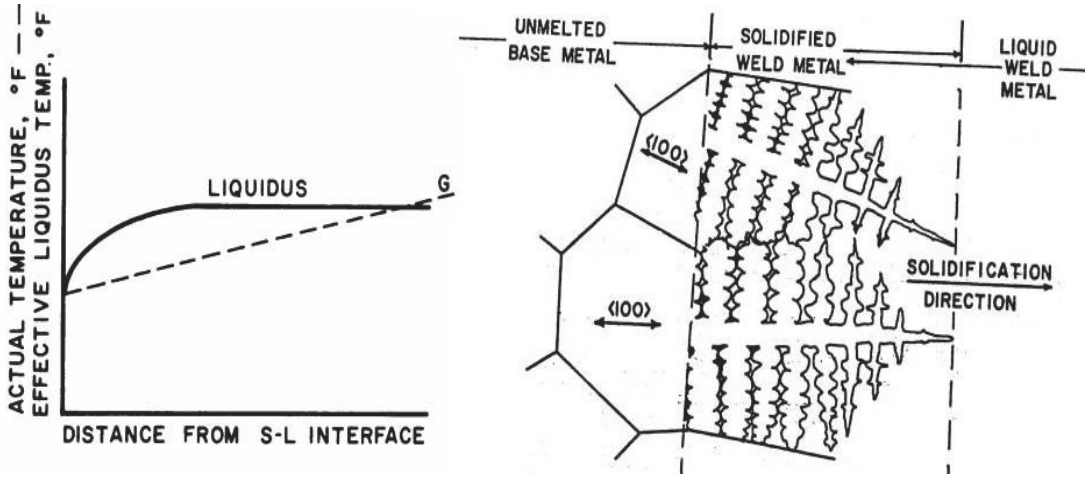


Figura 4.3. Interfase sólido-líquido durante el crecimiento dendrítico.
(De Vedia & Svoboda, 2008)

4.4.3.4. Crecimiento equiaxial dendrítico

Se requieren sobreenfriamientos constitucionales tan grandes, que solo se encuentra en los cráteres del cordón de soldadura. Cuando la velocidad de soldadura es alta puede observarse la transición de estructuras celulares a

dendríticas. También se ha observado la formación de este tipo de frente en la etapa final de la solidificación y con altas velocidades de soldadura.

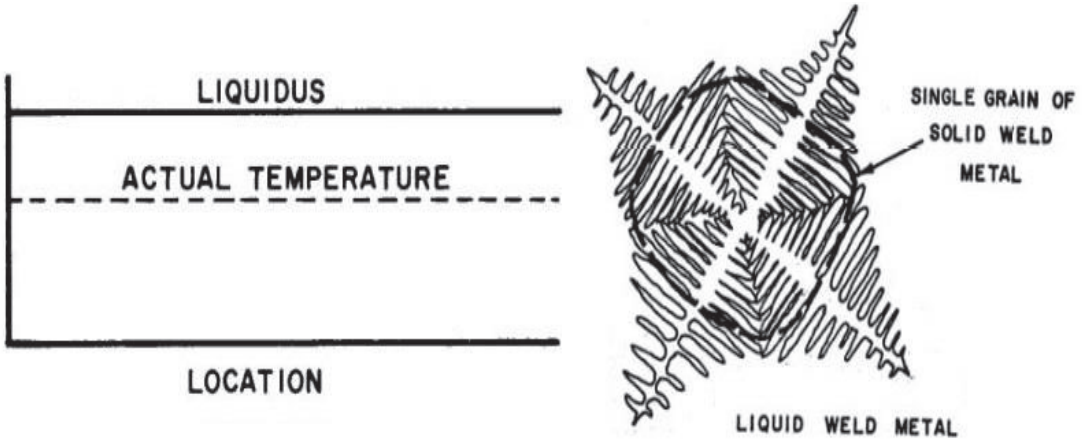


Figura 4.4. Interfase sólido-líquido durante el crecimiento equiaxial dendrítico. (De Vedia & Svoboda, 2008)

4.5. DIAGRAMAS TTT (TRANSFORMACIÓN-TIEMPO-TEMPERATURA)

Este tipo de diagramas consideran a los resultantes del enfriamiento rápido de la austenita hasta por debajo de la temperatura crítica, luego transformada isotérmicamente. En el eje temperatura-tiempo se tienen dos curvas con forma de "S" las mismas que marcan el tiempo de inicio y finalización isotérmica de austenita; así también se tienen curvas paralelas al eje tiempo, que muestran el comienzo y fin de la transformación martensítica (M_S, M_F) respectivamente. Estos productos de transformaciones son: perlita gruesa, perlita fina, martensita y bainita, la última formada en los aceros a temperatura constante entre 250 y 550 °C. En aplicaciones industriales no se efectúan transformaciones isotérmicas, debido a que las piezas van desde la temperatura de austenización hasta la temperatura ambiente mediante enfriamiento continuo; teniéndose microestructuras complejas. Es por esto que esta clase de diagramas son utilizados para seleccionar fases de tratamiento térmico de acuerdo al tipo de fundición. Para mantener una matriz totalmente martensítica se debe tener como objetivo una velocidad de enfriamiento que evite la "nariz" que forman estas

curvas. Cada composición de metal tiene un diagrama TTT único, ya que los límites de las zonas de transformación son influenciados directamente por este factor. Para fundiciones nodulares, resulta de gran utilidad, ya que permite conocer la mejor vía para lograr piezas templadas. Un ejemplo es el diagrama TTT para fundiciones de 2.09 % de silicio (Baño, 2008). Obsérvese la figura 4.5.

4.6. DIFICULTADES EN LA SOLDADURA DE HIERROS FUNDIDOS

Los hierros fundidos son los más difíciles de soldar en el mundo de los metales debido al alto contenido de carbono presente en las fundiciones, su amplia variedad de microestructuras y la composición química, la Guía para la soldadura de hierros fundidos (American National Standar & American Welding Society, 1989), detalla los problemas que se presentan al soldar fundiciones.

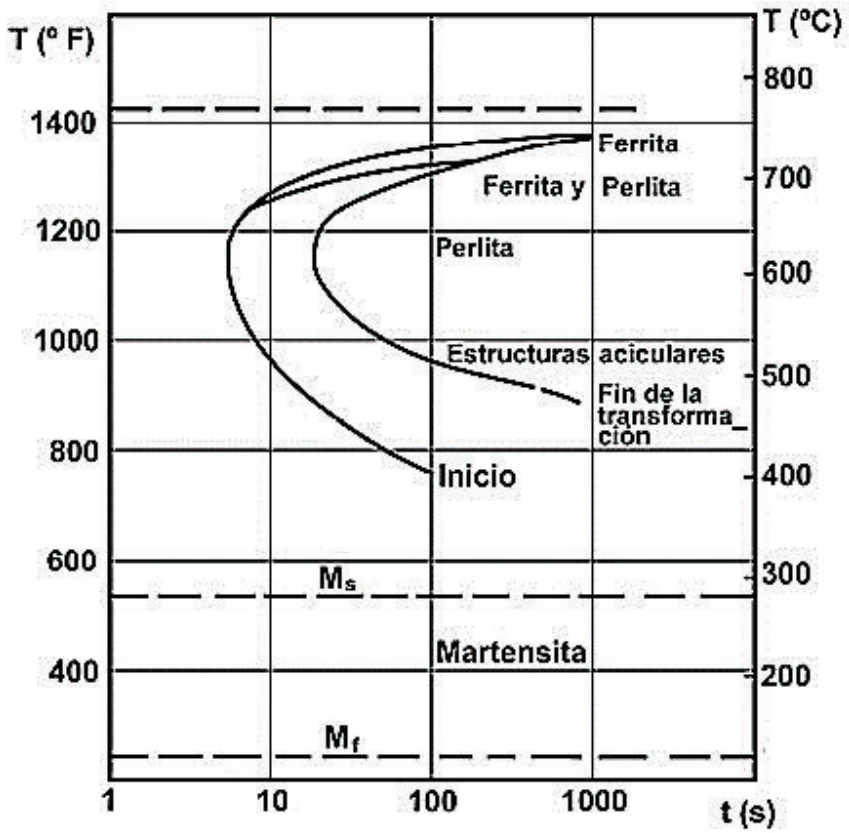


Figura 4.5. Diagrama TTT para una fundición de 3.75 % de C y 2.09 % de Si. (Baño, 2008)

4.6.1. EL METAL DE SOLDADURA

Se trata del metal base, el cual es derretido durante la soldadura, más la suma del metal de aporte. Cuando el hierro fundido es enfriado de forma rápida, el carbono no es rechazado de la masa fundida como grafito, se endurece y forma carburo de hierro quebradizo susceptible a agrietamiento y difícil de maquinar. La cantidad de carburo de hierro formado puede ser reducido con la adición de algunos elementos aleantes y usando el metal de aporte apropiado. Un tratamiento térmico posterior también puede eliminar este compuesto.

4.6.2. ZONA DE FUSIÓN

La formación del carburo puede ser un problema en aquellas regiones donde la mezcla con el metal de aporte no tiene lugar.

4.6.3. ZONA AFECTADA POR EL CALOR

Se trata de la zona del metal base que alcanza una temperatura suficiente alta para efectuar cambios metalúrgicos, pero no tan altos para causar fusión. En esta zona el grafito no es alterado lo suficiente como para causar problemas. Sin embargo la matriz es transformada en una estructura martensítica dura tras un enfriamiento rápido. Esta estructura indeseable puede evitarse aplicando un enfriamiento lento, un postcalentamiento o un tratamiento térmico.

4.6.4. ESFUERZOS EN LA SOLDADURA

La expansión y contracción es asociada con los procesos de soldadura, causando distorsión y esfuerzos residuales en cualquier material. Estos esfuerzos pueden causar agrietamiento en una fundición con poca ductilidad y áreas de poca ductilidad como la zona de fusión. Los esfuerzos residuales pueden ser reducidos con un apropiado precalentamiento, un adecuado proceso de soldadura, martillado y por un postcalentamiento.

4.6.5. POROSIDADES

Los gases emitidos durante la soldadura pueden causar porosidades en el metal depositado. Muchos gases son el resultado de materiales volátiles en las fundiciones, o por reacciones químicas entre el metal de aporte y la atmósfera. El grafito absorbe y retiene lubricantes además de otros líquidos que hacen

permeable toda una sección entera, escapando en forma gaseosa cuando se efectúa la soldadura, quedando atrapados en el metal soldado como porosidad.

La mayoría de problemas de porosidad atribuibles a contaminantes en el metal base pueden ser evitados con una preparación apropiada de la fundición antes del soldeo.

4.7. ENSAYO DE SOLDABILIDAD SEGÚN LA AWS

El Comité para la Soldadura de Hierro Fundido (American National Standar & American Welding Society, 1989) consideró la existencia de pruebas estándar para determinar la soldabilidad como: Varestraint, Cruciform, Lehigh y Houldcroft. Se encontró que estos ensayos tampoco requerían más ductilidad del metal base presente en algunos hierros fundidos, metal de aporte, eran caros y conllevaba un buen tiempo en su preparación. Fue decidido, por lo tanto desarrollar una nueva prueba que sea práctica, simple, repetible y no requiera metal de aporte.

4.7.1. DESARROLLO DEL ENSAYO DE SOLDABILIDAD

Pruebas iniciales consistían en hacer un punto de suelda sobre el metal base con el proceso GTAW e intentar evaluar el grado de agrietamiento en la soldadura. Las pruebas fueron luego mejoradas para incluir el camino de la antorcha de soldadura y la adición de precalentamiento.

El método de prueba finalmente desarrollado consistió de soldadura hecha por una técnica estándar a varias temperaturas de prueba, determinando el mínimo valor (llamada temperatura sin agrietamiento) a la cual no se presentaba agrietamiento en la soldadura. El método de prueba será descrito más adelante.

4.7.2. RESULTADOS DEL ENSAYO DE SOLDABILIDAD

Cuando todas las probetas han sido soldadas y se ha establecido la temperatura a la cual no se produce agrietamiento para cada una de las probetas, se procedió a relacionar estos resultados a alguna otra variable que pudiera ser usada para establecer la temperatura sin agrietamiento independiente de este ensayo. En la siguiente figura se puede observar que la composición química está directamente relacionada con la temperatura a la cual no se produce agrietamiento, y que el tipo de material no tiene una aparente influencia.

4.7.3. FÓRMULA DE CARBONO EQUIVALENTE

La fórmula convencional del carbono equivalente no es aplicable. El Comité para la Soldadura de Hierro Fundido evaluó la composición química de las probetas ensayadas y encontró cantidades significativas de cobre, níquel, cromo y molibdeno, por lo que la fórmula fue modificada tomando en cuenta dichos elementos:

$$\mathbf{CE} = C + 0.3Si + 0.33P + 0.45S - 0.028Mn + Mo + Cr - 0.02Ni - 0.01Cu$$

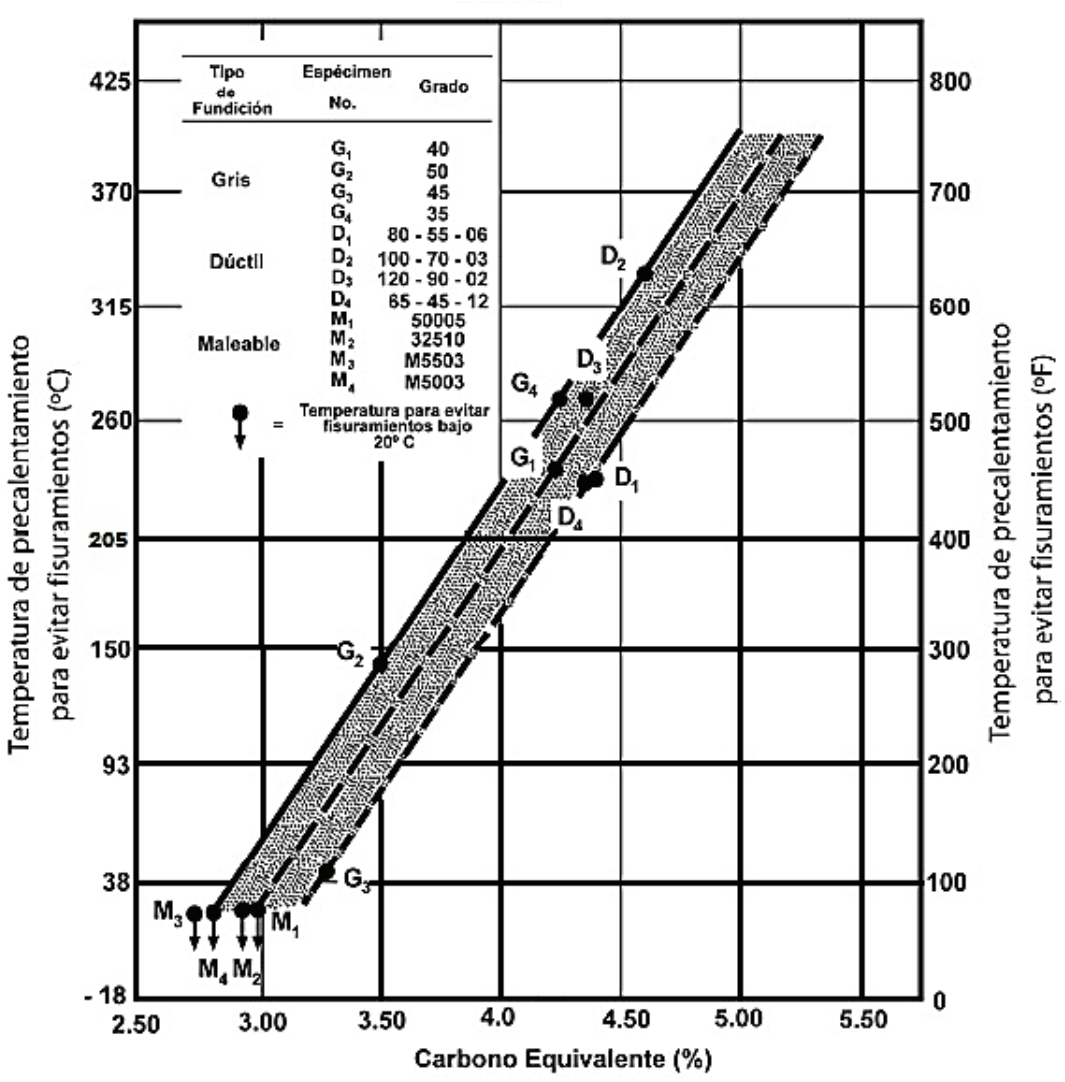


Figura 4.6. Relación entre el carbono equivalente y la temperatura sin agrietamiento. (American National Standar & American Welding Society, 1989)

4.8. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO DE SOLDABILIDAD

El ensayo para cada tipo o grado de material de fundición requiere un mínimo de 8 y un máximo de 12 probetas con dos superficies de prueba. Tres series separadas de ensayos son conducidas con al menos 24 horas entre cada serie, siendo la secuencia de las series la siguiente (American National Standar & American Welding Society, 1989):

4.8.1. PRIMERA SERIE

Cinco probetas son requeridas con una suelda en cada una. Las temperaturas de ensayo son: la temperatura ambiente, 121 °C, 260 °C, 400 °C y 540 °C. Después de 24 horas evaluar por sección con los pasos del 11 al 14 del procedimiento de prueba (sección 4.8.4), determinando la más alta temperatura a la cual el agrietamiento todavía se presenta. Está temperatura se denominará “X”.

4.8.2. SEGUNDA SERIE

Cuatro probetas son requeridas incluyendo aquellas de la primera serie con la más alta temperatura “X”, usar la segunda superficie de ensayo de soldadura, y las probetas restantes no soldadas. Las temperaturas son: X+28 °C, X+56 °C, X+83 °C y X+111 °C. Evaluar nuevamente las temperaturas después de 24 horas con los pasos del 11 al 14 y determinar la más alta temperatura a la cual el agrietamiento se presenta. Esta será la temperatura “Y”.

4.8.3. TERCERA SERIE

Cuatro probetas son requeridas incluyendo aquellas de la segunda seria con la temperatura más alta que “Y”, usando la segunda superficie soldada y las probetas no soldadas. Las temperaturas son: “Y+6°C”, “Y+11°C”, “Y+17°C” y “Y+22°C”.

La más baja temperatura a la cual el agrietamiento no ocurre es definida como la temperatura sin agrietamiento.

Tomar en cuenta que en ningún momento la segunda superficie de soldadura de una probeta puede ser usada si implica precalentamiento a una temperatura

(nueva temperatura de prueba más el 20%, como está definida en la sección A4, paso 3) más alta que la temperatura de la primera superficie de soldadura

4.8.4. PROCEDIMIENTO DE PRUEBA

1. Preparar la probeta de prueba como muestra la siguiente figura: por aserrado o fresado en seco.
2. Taladrar 10.193 pulgadas (4,9 mm) de diámetro por 3/4 pulgadas (19 mm) de profundidad en el centro de una cara al extremo de cada probeta.
3. Colocar la probeta sobre o dentro del dispositivo de calentamiento, y calentar a una temperatura alrededor de 20 % por encima de la temperatura de prueba deseada, con la termocupla en el agujero.

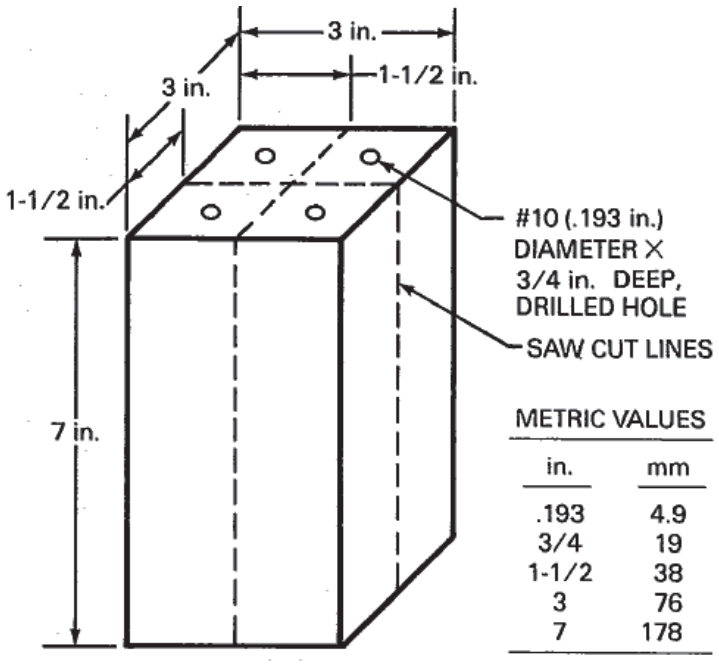


Figura 4.7. Bloque de prueba para hierro dúctil y gris.
(American National Standar & American Welding Society, 1989)

4. Mientras se calienta la probeta, verificar las condiciones de soldadura sobre la probeta.
5. Cuando la probeta alcance la temperatura de prueba, más el 20 %, remover de la fuente de calor y colocar sobre la mesa de soldadura con la termocupla aún unida.

6. Alinear el soplete de soldeo para empezar sobre la 1 pulgada (25 mm) desde el final de la probeta donde la termocupla está localizada. El camino de la soldadura esta sobre la línea de centro de las 7 pulgadas (178 mm) de longitud de la cara maquinada.
7. Con cuidado monitorear la temperatura, el enfriamiento de la probeta e iniciar el arco tan pronto como la temperatura de prueba sea alcanzada.
8. Tan pronto como como el arco se estabilice, iniciar el recorrido y el cordón de soldadura de 4,5 ±0,25 pulgadas (114 mm) de longitud.
9. Detener el arco y el recorrido simultáneamente. El relleno del cráter o el decaimiento del arco controlado no es requerido.
10. Quitar la termocupla y dejar que la probeta (descubierta) se enfríe a temperatura ambiente al menos 24 horas.
11. Después de 24 horas, ligeramente pulir la superficie del cordón de soldadura con lija 240 hasta que la superficie esté brillante y suficientemente lisa para la prueba del líquido penetrante.
12. Aplicar el líquido penetrante y permitir el remojo por al menos 15 minutos.

Nota: Si se van a tomar fotografías, tener la cámara lista antes del procedimiento a los pasos siguientes. Si aparecen indicaciones repentinas, fotografiar 30 segundos después que el revelador seque para obtener mejores resultados.

13. Limpiar el penetrante de la superficie según la recomendación del fabricante y aplicar el revelador.
14. Grabar cualquier indicación transversal o en la línea de centro de la soldadura, sin tener en cuenta todas las indicaciones de la línea de fusión y cualquier indicación en la primera 1/2 pulgada (12.7 mm) inicial de la última 1/2 pulgada (12.7 mm) del cráter del cordón de soldadura. Permitir que el revelador se fije al menos 20 minutos de manera que cualquier indicio salga a la superficie.

4.9. PRIMER NIVEL DE INSPECCIÓN DE LA SOLDADURA

Se realizan ensayos destructivos y no destructivos con el fin de analizar la calidad de la soldadura y cuantificar las características mecánicas que esta presenta,

para la soldadura se tienen tres niveles de inspección según Volumen 6 del Manual para Metales (Metals Handbook Volume 6, 1998). El primer nivel involucra a los ensayos no destructivos como: inspección visual, radiografía industrial, ultrasonido, tintas penetrantes, polvos magnéticos, entre otros.

4.9.1. INSPECCIÓN VISUAL

El sentido de la vista es que opera en este tipo de inspección, pudiéndose utilizar instrumentos de amplificación como lupas o microscopios. Se evalúa el tamaño, forma y ubicación de defectos de tipo superficial.

4.9.1.1. Ventajas de la inspección visual

- La Inspección Visual se puede emplear en cualquier etapa de un proceso productivo o durante las mismas operaciones de mantenimiento.
- Muestra las discontinuidades más notorias, indicando otras que pueden detectarse con más precisión por otros métodos, como son: líquidos penetrantes, partículas magnéticas o electromagnetismo.
- Detectar y ayudar en la eliminación de discontinuidades que podrían convertirse en defectos.
- La Inspección Visual no conlleva costos económicos, pero requiere experiencia para realizarlo correctamente.

4.9.1.2. Desventajas de la inspección visual

- Se necesita de una cierta experiencia y conocimiento del inspector.
- Se limita a la detección de discontinuidades superficiales.
- La calidad de la inspección dependerá de la aptitud visual del inspector.
- Si la limpieza previa a la inspección es deficiente, no se tendrán resultados correctos.

4.9.2. TINTAS PENETRANTES

Llamadas también líquidos penetrantes, su función es detectar e indicar discontinuidades abiertas a la superficie de los materiales examinados. En resumen, se aplica un líquido coloreado o fluorescente a la superficie a examinar, este penetra en las discontinuidades del material gracias al fenómeno de capilaridad. Transcurrido un determinado tiempo, se remueve el exceso de

penetrante y se aplica un revelador, siendo este de forma general, un polvo blanco, encargado de absorber el líquido dentro de la discontinuidad, delineándose sobre este, cualquier indicación detectada.

4.9.2.1. Procedimiento de la inspección por tintas penetrantes

El procedimiento depende del tipo de penetrante que se emplea. Se compone principalmente de una limpieza previa, aplicación del penetrante, remoción del exceso de penetrante, aplicación del revelador y análisis de resultados.

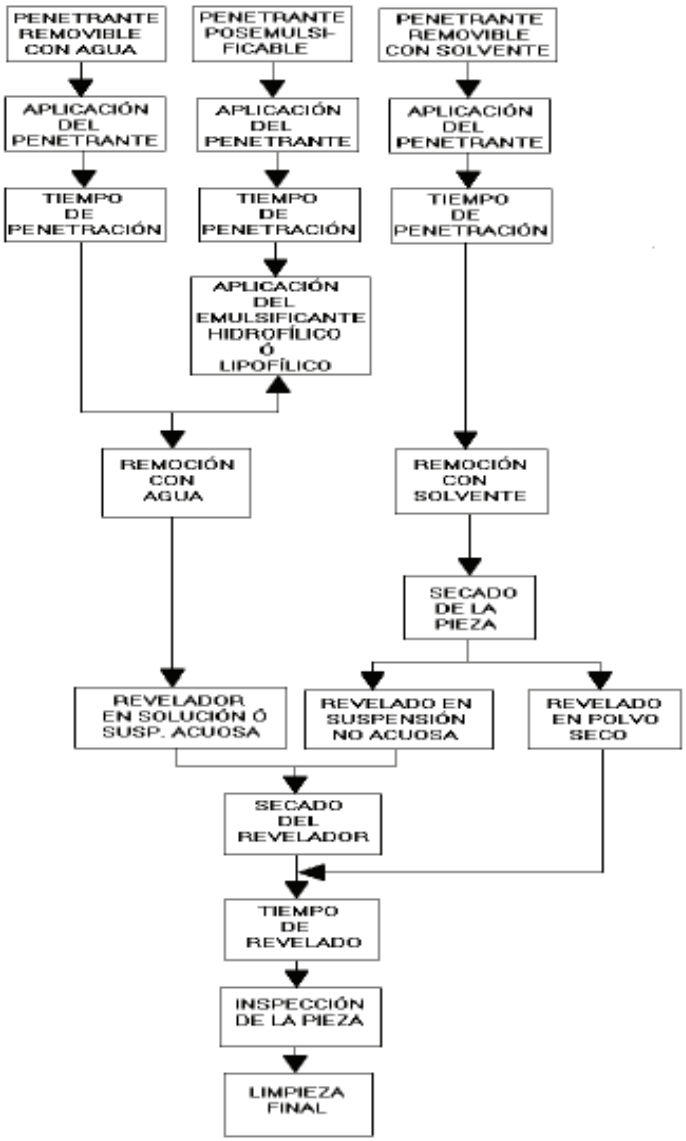


Figura 4.8. Bloques de inspección por líquidos penetrantes.
(Metals Handbook Volume 6, 1998)

4.9.2.2. Ventajas de las tintas penetrantes

- Alta sensibilidad a las discontinuidades abiertas a la superficie.
- La forma de los elementos a inspeccionar no representa un problema para la inspección.
- Técnica relativamente fácil de emplear.
- Rápidos en resultados después de su aplicación, además de que el equipo puede ser portátil y económico.
- Requiere de pocas horas de capacitación para su empleo.

4.9.2.3. Desventajas de las tintas penetrantes

- Aplicable sólo a defectos superficiales y a materiales no porosos.
- No se proporciona un registro permanente de la prueba no destructiva.
- Se requiere de cierta experiencia en el trabajo.
- Una selección incorrecta del revelador en combinación con el penetrante, puede conllevar a errores en el método.

4.9.3. PARTÍCULAS MAGNÉTICAS

Detecta discontinuidades de tipo superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagnéticos. Es aplicado cuando se necesita una inspección más rápida que la obtenida mediante líquidos penetrantes.

El método se basa en la formación de distorsiones del campo magnético o de los polos cuando se genera o se induce éste en un material ferromagnético; o sea, cuando el material analizado presenta una zona en la que existen discontinuidades perpendiculares a las líneas del campo magnético, este campo se deforma o produce polo. Dichas distorsiones atraen a las partículas magnéticas, aplicadas en forma de polvo o suspensión directamente en la superficie a inspeccionar, la acumulación de estas producen las indicaciones que se observan de manera directa, o por incidencia de luz ultravioleta.

4.9.3.1. Ventajas de las partículas magnéticas

- Requiere menor limpieza en comparación a otros métodos.
- Rápido y económico.
- Revela discontinuidades que no abiertas a la superficie.

4.9.3.2. Desventajas de las partículas magnéticas

- Baja penetración.
- Sólo aplicables en materiales ferromagnéticos.
- La operación del equipo en campo puede ser de alto costo.
- Requiere energía eléctrica para su utilización.
- Sólo detecta discontinuidades perpendiculares al campo.

4.9.4. RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL

Da resultados beneficiosos en el desarrollo de mejores técnicas de producción y perfeccionamiento de un producto en particular. Factible en la detección de discontinuidades macroscópicas y variaciones en la estructura interna de un material.

4.9.4.1. Ventajas de la radiografía industrial

- Aplicable a diversos materiales.
- Excelente medio de registro de inspección.
- Se puede visualizar el interior del material.
- Proporciona un registro permanente de la inspección.
- Manifiesta los errores en la fabricación, ayudando a establecer acciones correctivas.

4.9.4.2. Desventajas de la radiografía industrial

- Requiere el cumplimiento de estrictas medidas de seguridad
- No recomendable su uso en piezas de geometría complicada.
- Requiere de personal altamente calificado.
- Requiere de un área de exposición, equipo de seguridad y un cuarto oscuro para el proceso de revelado.

4.9.5. ULTRASONIDO

Es un procedimiento de inspección de tipo no destructivo, que se basa en la impedancia acústica, manifestada como el producto de la velocidad máxima de propagación del sonido entre la densidad de un material.

4.9.5.1. Ventajas del ultrasonido

- Aplicable a una gran variedad de materiales conformados como: chapas, ejes, vías, tubos, varillas, etc.
- Aplicable a procesos de fabricación tales como: soldadura, fundición, laminación, forja, mecanizado, etc.
- La sensibilidad es aumentada al realizar un cambio conveniente de palpador.
- Permite detectar discontinuidades tanto superficiales, subsuperficiales e internas.
- Los equipos pueden ser portátiles y adaptables a un gran número de condiciones.

4.9.5.2. Desventajas del ultrasonido

- Equipo y accesorios de alto costo.
- Deben emplearse varios tipos de palpadores a fin de determinar todas las discontinuidades presentes en la pieza.
- El personal de ensayos debe poseer una amplia experiencia en el manejo de la técnica a emplearse.

4.10. SEGUNDO NIVEL DE INSPECCIÓN DE LA SOLDADURA

Este nivel de inspección involucra al análisis macrográfico, micrográfico o metalográfico y el análisis químico.

4.10.1. ANÁLISIS MACROGRÁFICO

Este examen detecta porosidades, defectos de raíz, escoria atrapada, falta de fusión, fisuraciones y curvatura de la sobremonta. Puede detectar el número de pases, luego de aplicado el ataque químico con el reactivo correspondiente al material analizado, además de la penetración, zonas segregadas, cristalización y zona afectada por el calor. Se lo hace con ayuda del microscopio y dependiendo del fin, se pueden realizar mediciones de los defectos encontrados, longitud de la sobremonta, zona afectada por el calor, etc.

4.10.2. ANÁLISIS METALOGRÁFICO

Se efectúa en probetas que deben ser exhaustivamente preparadas, la muestra extraída para su análisis debe pasar por una serie de desbastes y pulidos para su posterior análisis en el microscopio, cada etapa conlleva un minucioso cuidado, hasta terminar con un acabado tipo “espejo” el cual indica que la probeta está lista para su examinación.

Este ensayo determina el tipo de microestructura, homogeneidad, tamaño del grano del cordón de soldadura, zona de fusión parcial, zona afectada por el calor, así también los fenómenos de difusión y microfisuras. El procedimiento de ensayo ha sido detallado en la norma ASTM E 3, la cual determina la selección de la zona de análisis, extracción de la muestra, su preparación, hasta la observación microscópica. Se recomienda que la superficie de la probeta sea de una pulgada cuadrada y debe mantenerse enfriada durante la extracción y preparación. Para la preparación de la probeta se siguió los siguientes pasos de acuerdo a (Gordillo, 2010):

4.10.2.1. Desbaste grueso

Permite la remoción de restos de material cortante que puede herir al operador, así también el óxido que pudo haberse acumulado. Se logra pasando uniformemente la probeta sobre una desbastadora de disco provista de lija número 60, 80, 100 y 120 (granos por pulgada lineal).

4.10.2.2. Desbaste fino

En esta etapa se remueve la zona deformada causada por los procesos anteriores. Utilizando lijas de números: 240, 320, 400, 600 (granos/pulgada) de forma secuencial. Cada paso por los diferentes números de lija forma zonas de deformación que cada vez irán decreciendo con el uso de las lijas de mayor número de granos.

4.10.2.3. Pulido grueso

Se utilizan pulidoras de paño utilizando como abrasivo alúmina de 1 micrón en suspensión en agua, con la finalidad de remover mediante abrasión, las zonas de material deformado dejado por el desbaste fino.

4.10.2.4. Pulido fino

Se utiliza alúmina de 0.3 micrones en suspensión en agua, el efecto abrasivo se reduce de tal forma que la posibilidad de causar deformaciones sobre la superficie metalográfica es mínima, bajo estas condiciones la superficie quedará lista para la observación de la microestructura.

4.10.2.5. Ataque químico

El ataque químico mediante una reacción química selectiva sobre uno de los elementos presentes en el material, de esta forma, la microestructura se hace visible. Se prepara nital o picral (ambos en forma líquida), reactivos que harán visibles las microestructuras de las fundiciones, para el caso de metal de aporte de níquel se usará una solución de agua regia, que se trata de ácido nítrico concentrado y ácido clorhídrico concentrado en la proporción de una a tres partes en volumen.

4.10.3. ANÁLISIS QUÍMICO

Este procedimiento analiza elementos metálicos en muestras sólidas. Se utiliza una muestra que es destruida durante el análisis. Por la muestra actúa un arco eléctrico o chispa, elevando la temperatura para excitar los átomos, mismos que emiten luz en varias longitudes de onda, detectables mediante métodos espectroscópicos comunes. Los resultados finales son cuantitativos en cuanto a los elementos que conforman el metal analizado.

4.11. TERCER NIVEL DE INSPECCIÓN

Este nivel es constituido por ensayos destructivos, lo mismos que informan cuantitativamente las características mecánicas de elemento analizado.

4.11.1. ENSAYO DE TRACCIÓN

Se trata de someter a esfuerzos uniaxiales de tracción a probetas normalizadas, hasta que se fracturen.

4.11.1.1. Deformación elástica y deformación plástica

Al aplicar una fuerza a la probeta, los enlaces entre los átomos se estiran y el material se alarga. Cuando la fuerza cesa, los enlaces regresan a su longitud

original y consigo la probeta vuelve a su tamaño inicial. La deformación del metal en esta porción elástica de la curva esfuerzo deformación no es permanente.

Si las fuerzas son mayores el material se comporta de una manera plástica. Cuando se incrementa el esfuerzo, se producen dislocaciones; ocurre el deslizamiento y el material comienza a deformarse plásticamente. El esfuerzo en que se inicia el deslizamiento es el punto que delimita los comportamientos elástico y plástico (Smith & Javad, 2004).

4.11.1.2. Esfuerzo de fluencia

El esfuerzo de fluencia es aquel en que el deslizamiento se hace notorio e importante. En el diseño de componentes que deban soportar una fuerza durante su uso, debe asegurarse que no se deforme plásticamente es decir que no sobre pase el punto de fluencia.

En algunos materiales, el esfuerzo al cual cambian de comportamiento elástico a comportamiento plástico no se detecta con facilidad. En este caso se determina un esfuerzo de fluencia convencional (a partir de la gráfica esfuerzo deformación). Se establece una deformación permanente, como la permisible sin alterar el comportamiento del componente. Se traza una recta paralela a la porción inicial de la curva esfuerzo-deformación. El esfuerzo de fluencia permanente es aquel donde la recta de desplazamiento corta con la curva esfuerzo-deformación (Smith & Javad, 2004).

4.11.1.3. Resistencia a la tensión

La resistencia a la tensión es el esfuerzo resultante de la mayor fuerza aplicada, por ello es el esfuerzo máximo que ocurre en la curva esfuerzo-deformación.

En materiales dúctiles, la deformación no suele permanecer uniforme. En cierto punto una región se deforma más que en otras áreas y ocurre una reducción en la sección transversal. Las resistencias a la tensión se encuentran con frecuencia en manuales, ya que son fáciles de medir, además son de utilidad para comparar el comportamiento de los materiales y permiten estimar otras propiedades que son más difíciles de evaluar (Smith & Javad, 2004).

4.11.1.4. Resistencia a la tracción de las fundiciones de hierro dúctil

La resistencia es de aproximadamente 414 MPa (60 ksi) para fundiciones nodulares ferríticas y sobre los 1380 MPa (200 ksi) para fundiciones de matriz perlítica. El esfuerzo de fluencia es de alrededor de 275 MPa (40 ksi) para las fundiciones nodulares ferríticas y de 620 MPa (90 ksi) para fundiciones con matriz martensítica.

La elongación, este valor es una indicación de la ductilidad; normalmente es cercano al 25 % en las fundiciones nodulares de matriz ferrítica (Ductile Iron Society, 2013).

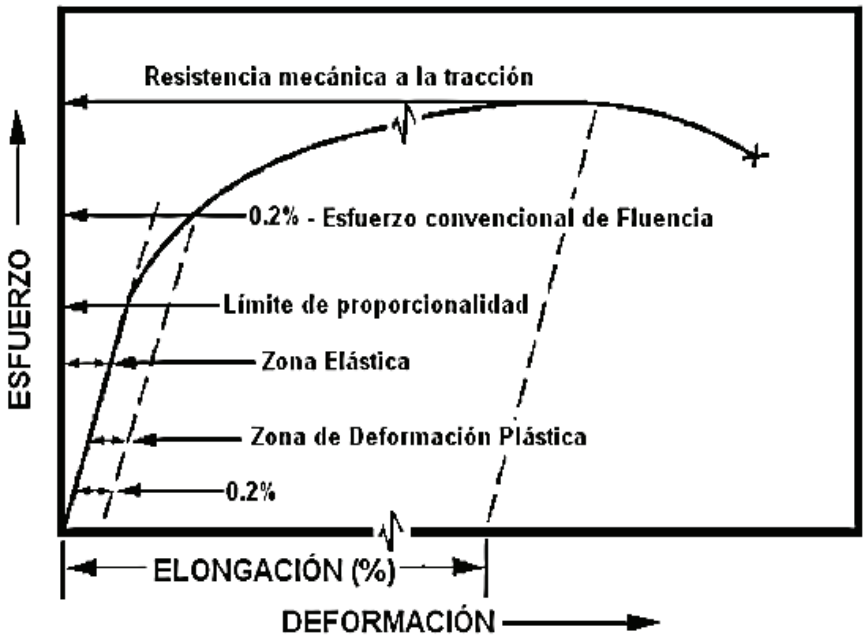
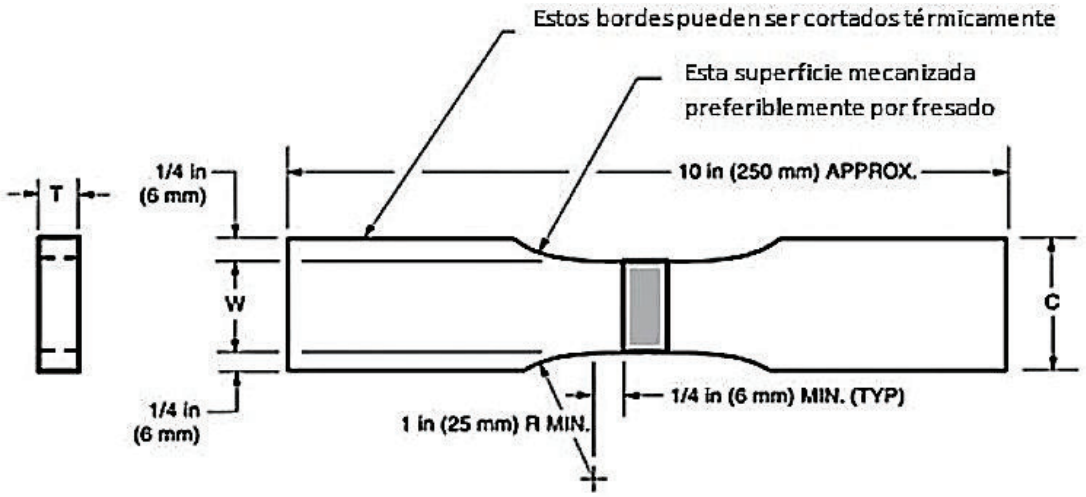


Figura 4.9. Curva esfuerzo deformación de hierro dúctil.
(Ductile Iron Society, 2013)

El 90 % de las fundiciones con una dureza de 150 HB, tienen una resistencia mecánica entre 40 y 50 kp/mm2 (57 – 71 ksi) y un porcentaje de elongación de 13 a 24 %; de la misma manera las fundiciones de 250 HB podrían tener una resistencia entre 66-87 kp/mm2 (94 -124 ksi) y una elongación en el rango del 2.5 a 8.5 % (Ductile Iron Society, 2013).

Las probetas soldadas para el ensayo de tracción deben tener las siguientes características geométricas según la norma AWS B4.0 (American Welding Society, 1997)



T	W
<1 in (25 mm)	1.50 in ± 0.01 in (38 mm ± 0.25 mm)
≥1 in (25 mm)	1.00 in ± 0.01 in (25 mm ± 0.25 mm)

Figura 4.10. Probeta rectangular para tracción de soldaduras.
(American Welding Society, 1997)

4.11.2. ENSAYO DE DOBLADO

Se lo practica para conocer la ductilidad del material, determinando el radio más pequeño a la cual las probetas pueden doblarse hasta que aparezcan las primeras fisuras en la superficie externa. El límite que se alcanzase lo conoce como radio mínimo de doblado, el cual se expresa en múltiplos del espesor de la probeta, por lo que se puede decir que un material es más dúctil cuando menor sea el multiplicador para un espesor determinado. Las medidas del jig usado son A=45 mm, B=60 mm, y C=50mm, tal como se observa en la figura 4.11.

4.11.3. ENSAYO DE DUREZA

El ensayo de dureza muestra el cambio de la microestructura del material, junto al ensayo metalográfico, permite determinar el cambio metalúrgico que ha sufrido el material por cada tratamiento térmico que se ha aplicado. Este ensayo mide la

resistencia a la penetración sobre la superficie de un material, efectuada por un objeto duro. Existen diversas pruebas de dureza, pero las comúnmente usadas son el ensayo Rockwell y Brinell.

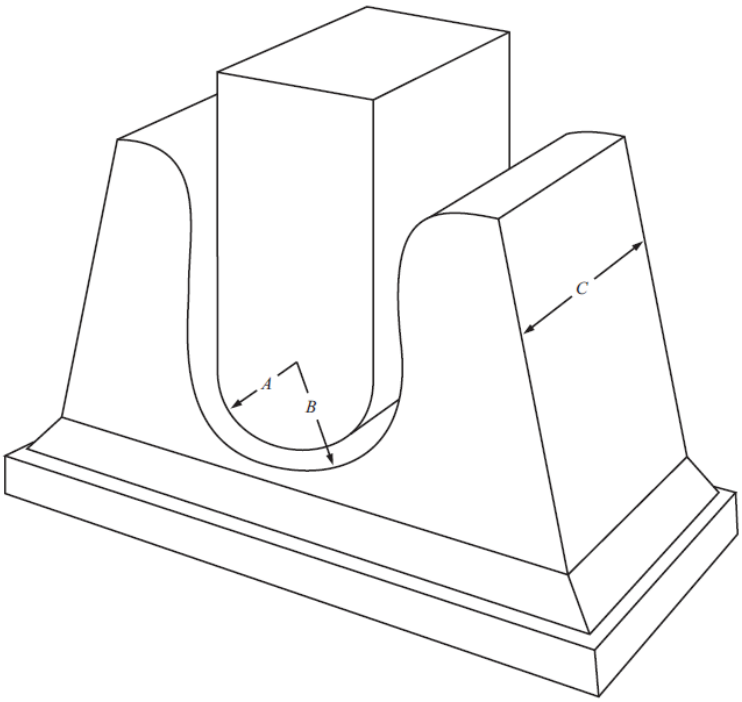


Figura 4.11. Jig para ensayos de doblado.
(American Welding Society, 1997)

En el ensayo de dureza Brinell, una esfera de acero duro, normalmente de 10 mm de diámetro, se presiona sobre la superficie del material. Se mide el diámetro de la marca producida en la superficie y se calcula el índice de dureza Brinell (BHN, de Brinell Hardness Number) mediante la siguiente ecuación:

$$\mathrm{BHN} = \frac{\mathrm{F}}{\left(\frac{\pi}{2}\right)\mathrm{D}(\mathrm{D} - \sqrt{\mathrm{D}^2 - \mathrm{D_i}^2})}$$

Donde F es la carga aplicada en kilogramos fuerza, D es el diámetro del penetrador en milímetros, Di es el diámetro de la marca en milímetros. El ensayo de dureza Rockwell utiliza una esfera de acero de diámetro pequeño para materiales suave, y un cono de diamante (Brale) para materiales más duros, la

profundidad de la penetración la mide automáticamente el instrumento de prueba, y es convertida al índice de dureza Rockwell (HR) (Askeland, 1998).

Tabla 4.1. Comparación de los ensayos de dureza típicos.

Prueba	Penetrador	Carga	Aplicación
Brinell	Esfera con 10 mm	3000 kg	Hierro colado y acero
Brinell	Esfera con 10 mm	500 kg	Aleciones no ferrosas
Rockwell *A*	Cono	60 kg	Materiales muy duros
Rockwell *B*	Esfera de 1/16 pulg	100 kg	Latón, acero de baja resistencia
Rockwell *C*	Cono	150 kg	Acero de alta resistencia
Rockwell *D*	Cono	100 kg	Acero de alta resistencia
Rockwell *E*	Esfera de 1/8 pulg	100 kg	Materiales muy blandos
Rockwell *F*	Esfera de 1/16 pulg	60 kg	Aluminio, materiales suaves
Vickers	Pirámide de diamante	10 kg	Todos los materiales
Knoop	Pirámide de diamante	500 g	Todos los materiales

(Askeland, 1998)

4.11.4. ENSAYO DE IMPACTO

En la selección de un material resistente a choques o golpes intensos y repentinos, debe medirse su resistencia a la ruptura mediante una prueba de impacto. Se han diseñado varios procedimientos de ensayo, incluyendo el ensayo Charpy. La probeta puede tener muescas, o no; las probetas con muesca en V miden de mejor manera la resistencia del material a la propagación de la fractura.

Las muescas provocadas por un maquinado, fabricación o diseño deficientes, ocasionan concentración de esfuerzos, reduciendo la tenacidad del material. La sensibilidad a las muescas de un material puede evaluarse comparando las energías absorbidas por probetas con muesca o sin ella.

Las energías absorbidas por probetas con muesca son mucho menores si el material es sensible a las muescas. Este ensayo de impacto es más utilizado para la comparación y selección de los materiales, que para obtener criterios de diseño (Gordillo, 2010).

Figura 4.12. Probetas resultantes del ensayo Charpy.
(Gordillo, 2010)

CAPÍTULO 5

PROCESO EXPERIMENTAL

5.1. INTRODUCCIÓN

Conocer la soldabilidad que presentan los hierros fundidos dúctiles es la finalidad del presente estudio, para lo cual se seleccionó dos procesos de soldadura compatibles con este material. Se realizará la comparación con soldadura por arco de metal protegido (SMAW) y soldadura fuerte con soplete (TB). El alto contenido de carbono es el determinante que dificulta la soldabilidad en este tipo de metal, además del ciclo térmico inherente del proceso de soldadura, el cual destruye el grafito, dando lugar a estructuras no deseables de alta dureza, afectando las propiedades mecánicas resultantes, estructuras que se detallaron en el capítulo 1. Antes de proceder a la soldadura como tal, se hará el ensayo de soldabilidad, detallado por la Guía para la soldadura de hierros fundidos (American National Standar & American Welding Society, 1989), con la cual se establece la soldabilidad de distintos tipos de fundiciones de acuerdo a la temperatura con la que son precalentadas. Establecida la temperatura a la cual no se produce agrietamiento se procede a realizar el proceso de soldeo en los cupones de soldadura que se detallarán más adelante.

5.2. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

5.2.1. DIMENSIONES

Tal como establece: AWS/ANSI D 11.2 – 89, Guía para la soldadura de hierro fundido, las dimensiones de las probetas son de 7 pulgadas de longitud por una sección de 3 pulgadas cuadradas. Estos bloques de fundición fueron cortados mediante una sierra de vaivén con cortes en seco. Se taladró un agujero de 4.9 mm de diámetro y 19 mm de profundidad, además de un maquinado en dos caras opuestas, las mismas que se catalogaron como primera y segunda superficie de soldadura, resultando en un total de 12 probetas por proceso de soldadura.

Tabla 5.1. Dimensiones del metal base para el proceso de soldadura.

	Bloque	Placa
Longitud	177,8 mm	250 mm
Ancho	381 mm	150 mm
Espesor	381 mm	7 mm
Diámetro del agujero	4,9 mm (3/4 de profundidad)	-

(Alex Alvarez)

Figura 5.1. Bloques de ensayo para soldabilidad.

(Alex Alvarez)

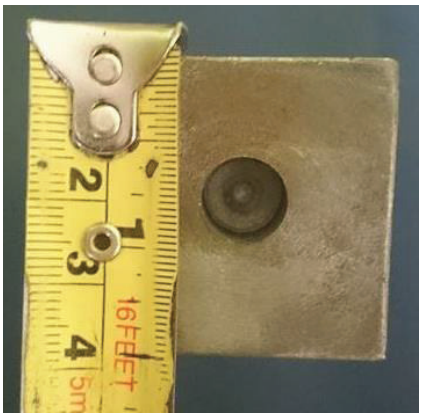


Figura 5.2. Extremo donde va ubicado la termocupla en el bloque de ensayo.

(Alex Alvarez)

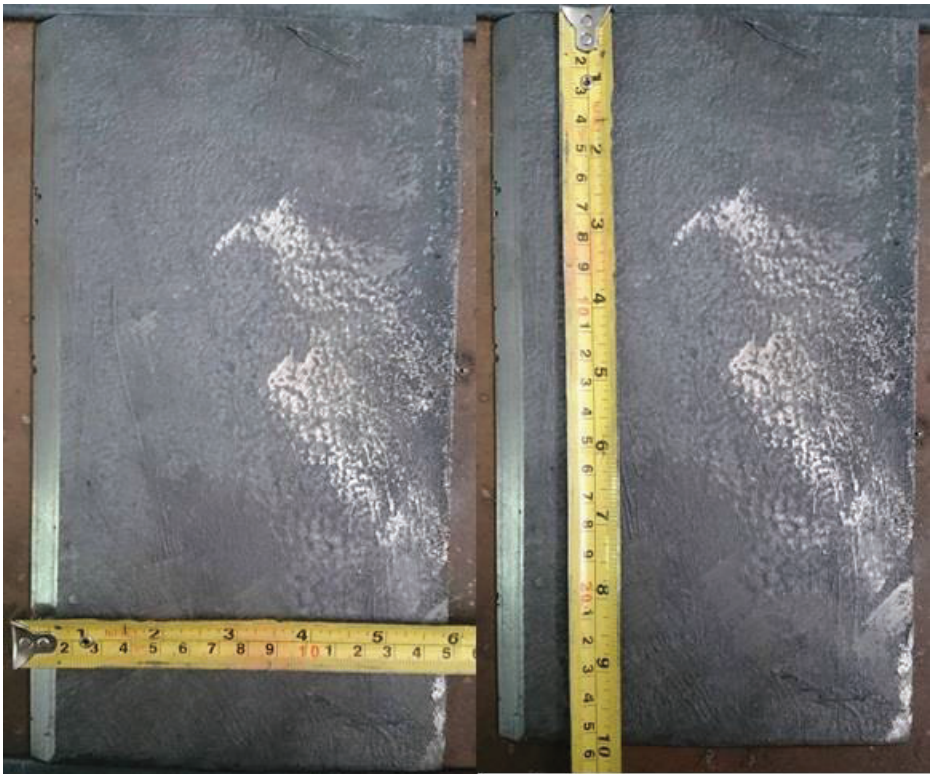


Figura 5.3. Placas biseladas de hierro dúctil.

(Alex Alvarez)

5.2.2. ENSAYO DE DUREZA

Este ensayo fue realizado en el Laboratorio de Metalografía de la Escuela Politécnica Nacional y según los parámetros de la norma ASTM E 18 (American Society for Testing Materials, 2001), se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 5.2. Resultados del ensayo de dureza del metal base.

Número	Rockwell B (HRB)	Brinell (HB)
1	70	125
2	74	135
3	68	121
4	76	139
5	72	130
Promedio	72	130

(Alex Alvarez)

Este ensayo fue realizado con la escala Rockwell B y la esfera de 1/16 pulg de cargas 10-50 Kgf, marca Hardrocker.

Este durómetro posee en la escala Rockwell B tiene un error de ± 27, por lo que el valor obtenido está dentro del rango de la dureza de las fundiciones nodulares de 150 Brinell.

5.2.3. ANÁLISIS QUÍMICO

Se realizó el análisis por espectrometría de chispa, descrito en la sección 4.9.3, en las instalaciones del departamento de Metalurgia Extractiva (DEMEX) de la Escuela Politécnica Nacional.

La cuantificación de los elementos presentes en la muestra de hierro fundido se realizó mediante el empleo del Espectrómetro Bruker, modelo Q4TASMAN, visible en el Anexo 1. Los resultados son los siguientes.

Figura 5.4. Espectrómetro de chispa Bruker, modelo Q4TASMAN.
(Alex Alvarez)

Tabla 5.3. Resultados del análisis químico al metal base.

Metales	Porcentaje (%)
Carbono (C)	5,40
Silicio (Si)	2,32
Manganeso (Mn)	0,32
Fósforo (P)	0,01
Azufre (S)	0,17
Cromo (Cr)	0,02
Magnesio (Mg)	0,15
Níquel (Ni)	0,04
Cobre (Cu)	0,13
Aluminio (Al)	0,03
Cerio (Ce)	0,12
Zinc (Zn)	0,04
Plomo (Pb)	0,04
Antimonio (Sb)	0,18
Hierro (Fe)	90,90

(Alex Alvarez)

Ya que el porcentaje de carbono es muy elevado y no se ajusta al rango de porcentajes en peso para fundiciones nodulares de propiedades mecánicas y estructuras similares; se procederá a su estimación mediante el diagrama de Heinbauer de la siguiente figura, el cual relaciona espesor del material y carbono equivalente a través de la dureza (Gordillo, 2010).

Luego de determinado el carbono equivalente, se calcula el porcentaje de carbono de acuerdo a la ecuación de la sección 4.6.3.

$$\mathbf{CE} = C + 0.3Si + 0.33P + 0.45S - 0.028Mn + Mo + Cr - 0.02Ni - 0.01Cu$$

Entonces se tiene:

$$\mathbf{\%\ C} = CE - 0.3Si - 0.33P - 0.45S + 0.028Mn - Mo - Cr + 0.02Ni + 0.01Cu$$

$$\%\mathbf{C_{estimado}} = 3.52$$

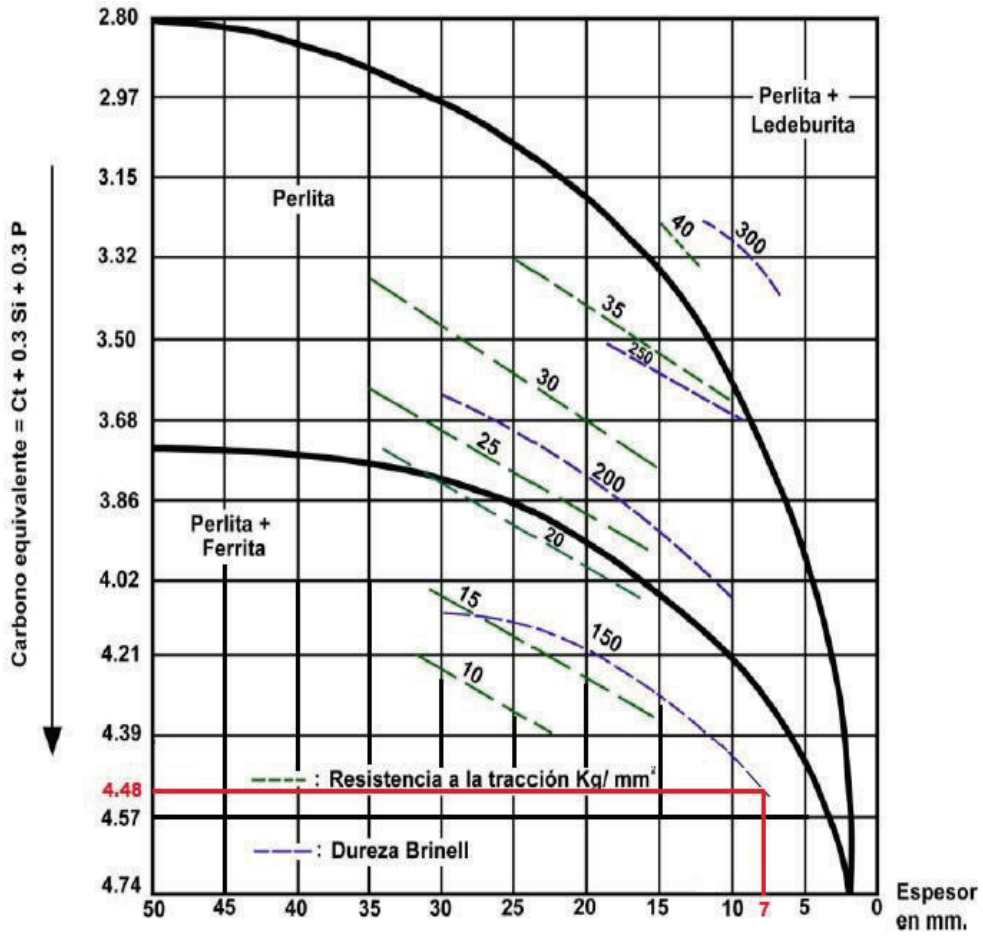


Figura 5.5. Diagrama de Heinbauer.
(Gordillo, 2010)

Calculando el grado de saturación S_C, se obtiene como valor la unidad, por lo que se presenta grafito primario en la estructura (Gordillo, 2010).

$$S_C = \frac{3.52}{4.3 - \frac{1}{3}(2.32 + 0.01)} = 1.007$$

5.2.4. ANÁLISIS METALOGRÁFICO

Se extrajeron dos muestras del material base, luego de la respectiva preparación se procedió a realizar el análisis bajo el microscopio de acuerdo a la norma ASTM

A 247 (American Standard For Testing Materials, 1998). El estudio se realizó en el Laboratorio de Metalografía de la Escuela Politécnica Nacional.

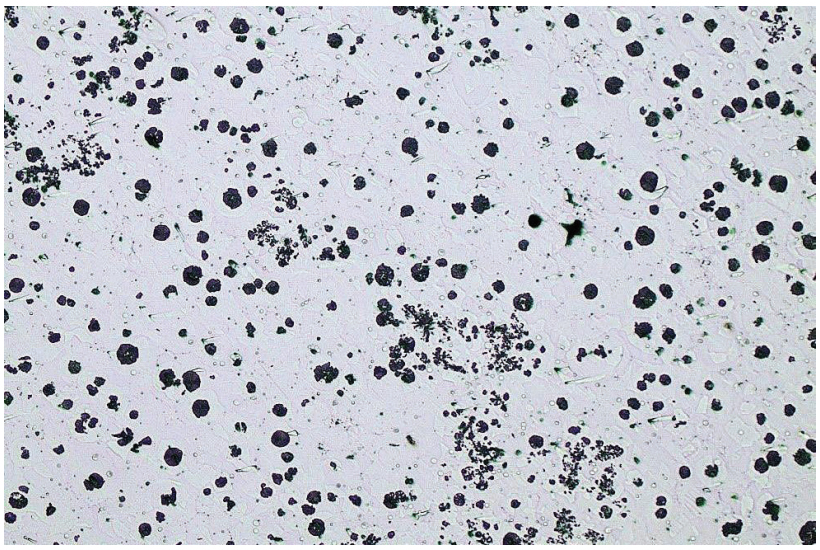


Figura 5.6. Microestructura para grafito nodular de forma I y V, tamaño 6 y 7, 100x.
(Alex Alvarez)

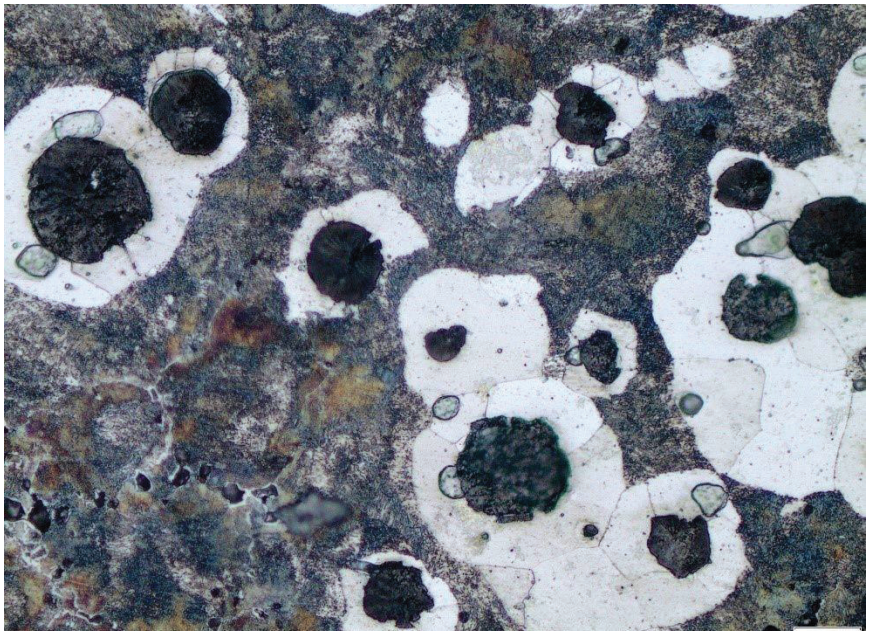


Figura 5.7. Microestructura para grafito nodular de matriz ferrítica-perlítica, atacado con picral, 1000x.
(Alex Alvarez)

5.2.5. ENSAYO DE TRACCIÓN

El ensayo de tracción fue realizado de acuerdo a la norma ASTM E 8, garantizando rigidez de la sujeción por medio de mordazas planas en la máquina universal de ensayos de la empresa ILPM, el registro respectivo se encuentra en el Anexo 2. La curva esfuerzo vs deformación se puede apreciar en la figura 5.9.

Los datos obtenidos del ensayo de tracción son los siguientes:

Tabla 5.4. Propiedades mecánicas del metal base

Límite de Rotura Sut		Límite de fluencia Sy		Elongación en 50 mm
Ksi	MPa	Ksi	MPa	%
75,88	523	51,4	354	21,16

(Alex Alvarez)

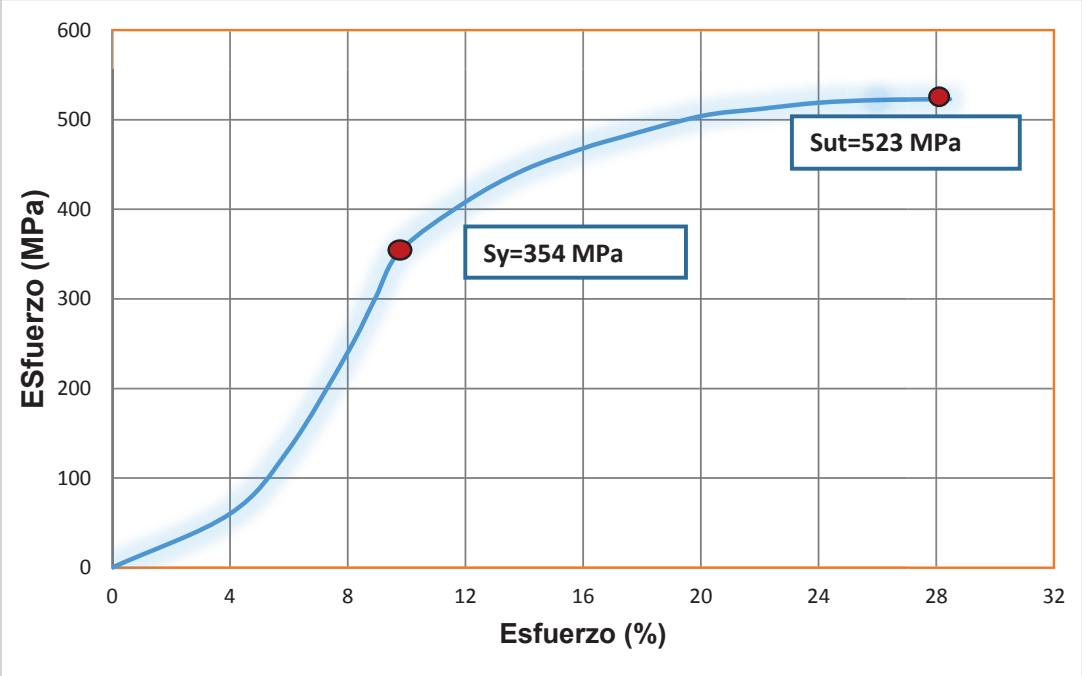


Figura 5.8. Curva esfuerzo-deformación para el metal base.

(Alex Alvarez)

5.2.6. DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL

Según la ASTM A 536, se trata de un hierro dúctil de grado 65-45-12, de las siguientes características.

Tabla 5.5. Características del metal base.

Tipo de matriz	Ferrítica-perlítica
Porcentaje de carbono equivalente	4,48
Porcentaje de carbono total	3,52
Dureza Brinell	112
Forma del grafito según ASTM A 247	Forma I y V,
Tamaño del grafito según ASTM A 247	6 y 7

(Alex Alvarez)

5.3. DISEÑO DEL CUPÓN DE SOLDAURA

Según (Baño, 2008), el diseño del cupón se toman en cuenta aspectos como:

- Factibilidad de preparación y manipulación, antes, durante y después del proceso de soldadura.
- Geometría de la junta, tratando de que esté dentro de alcances de una norma.
- Consecuencias del calor en el proceso de soldeo y tratamientos térmicos.
- Tipo de ensayos a practicarse.
- Fijación de las piezas a soldar.
- Enfriamiento del material después de ser soldado.
- Viabilidad económica.

Teniendo en cuenta los aspectos descritos, se ha elaborado un cupón de soldadura, el mismo que será empleado para los dos procesos que son objeto de investigación (SMAW Y TB).

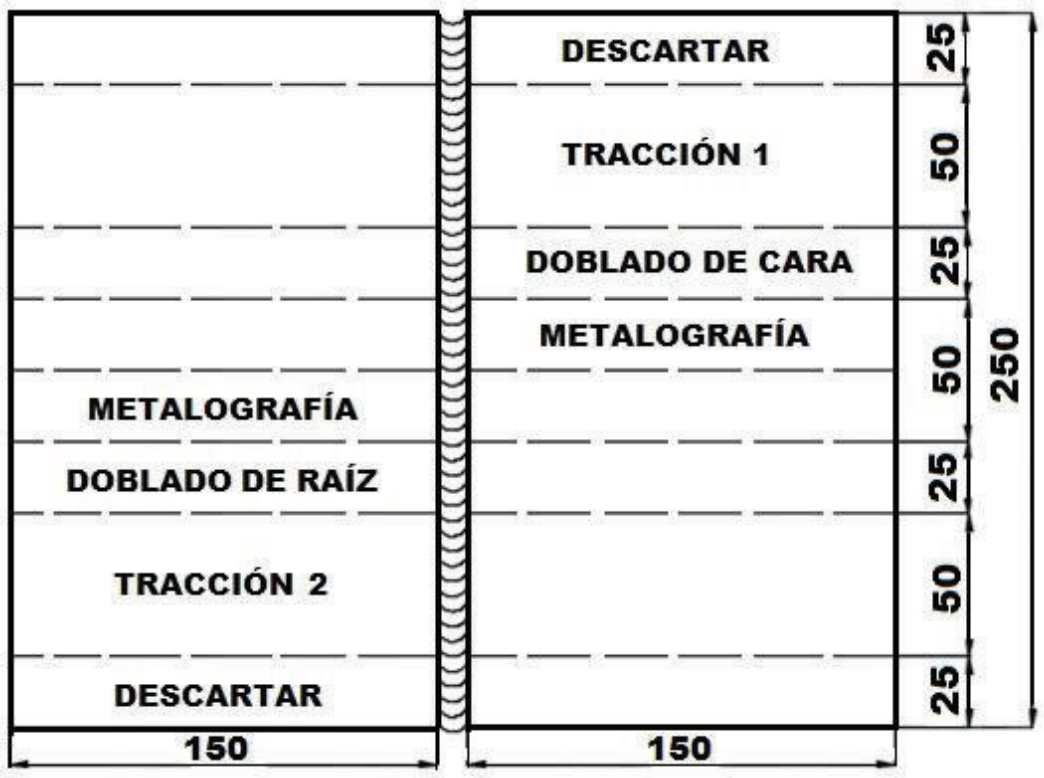


Figura 5.9. Diseño del cupón de soldadura.
(Alex Alvarez)

La ubicación de las probetas para los diferentes ensayos puede ser variable de acuerdo a las discontinuidades que se encuentren después de la respectiva soldadura, así mismo su elaboración es de acuerdo a lo manifestado en la sección 4.8.

5.4. TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO

Como ya se mencionó en la sección 4.6.3, la Guía para la soldadura de hierro fundido (American National Standar & American Welding Society, 1989) elaboró un gráfico donde se muestra la relación de la fórmula modificada del carbono equivalente versus la temperatura de precalentamiento que obtuvo realizando ensayos de soldabilidad para diferentes tipos de hierros fundidos.

La temperatura según el gráfico anterior provee un valor de 251 °C, valor que se constatará al realizar el ensayo de soldabilidad.

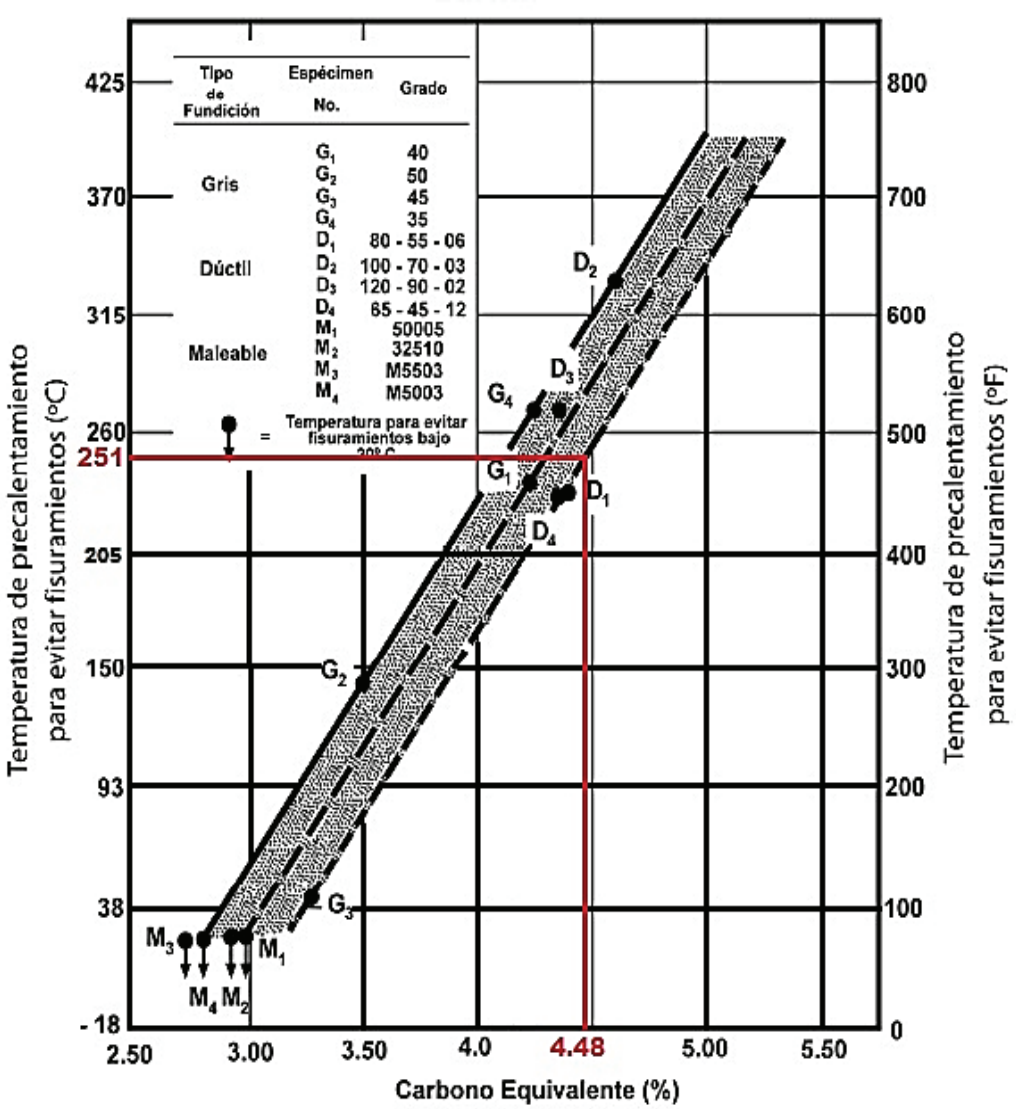


Figura 5.10. Determinación de la temperatura de precalentamiento para hierro dúctil según la ANSI/AWS D 11.2.

(American National Standar & American Welding Society, 1989)

De acuerdo al diagrama TTT para hierros fundidos con 3.75 % de carbono y 2.09 % de silicio, composición aproximada al metal base analizado, se puede observar que el rango de transformación martensítica está debajo de 290 °C, recalcando que se trata de una microestructura no deseable de alta dureza y alta fragilidad.

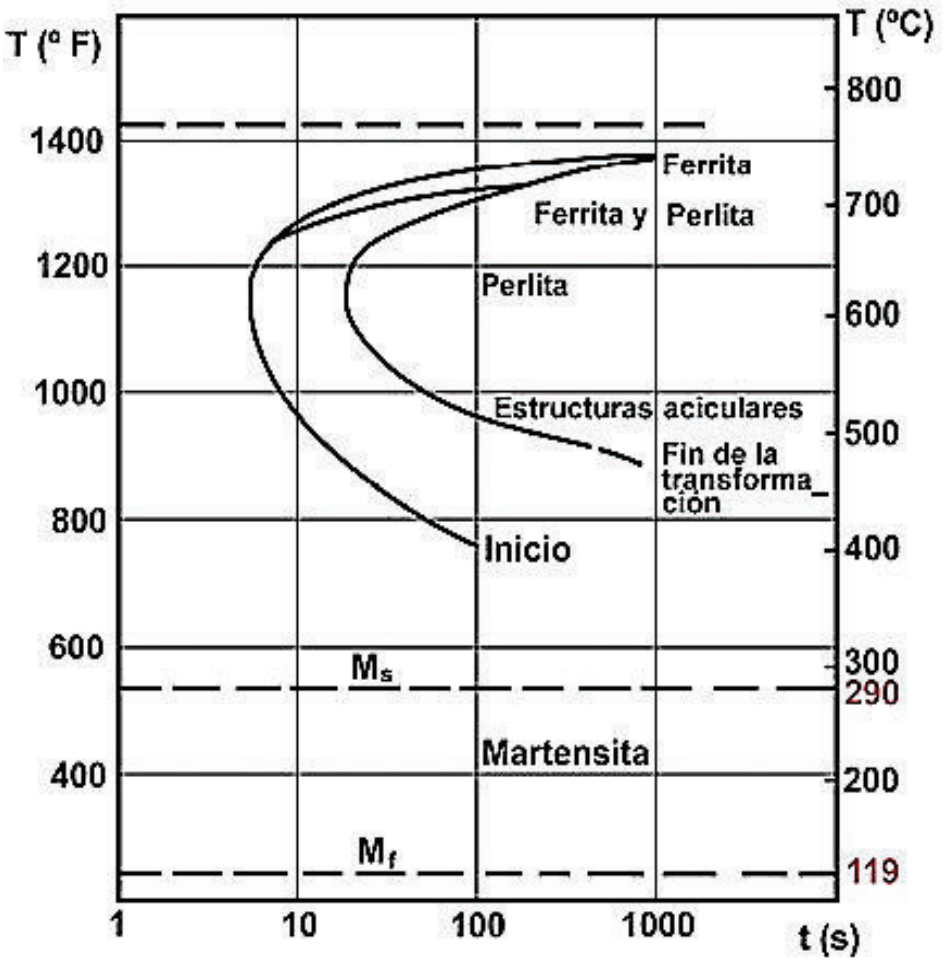


Figura 5.11. Determinación del rango de temperaturas de transformación martensítica. (Baño, 2008)

En el precalentamiento no se descenderá de 300 °C para evitar la microestructura ya mencionada; mediante un quemador a gas se elevará la temperatura entre pases.

5.4.1. MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA

Para la medición de la temperatura se usará un termómetro marca Fluke 77, con una termocupla tipo K de rango de operación de -200 a 1100 °C, la misma que será introducida en el agujero de los bloques de ensayo de soldabilidad.

Figura 5.12. Termómetro Fluke.
(Alex Alvarez)

Tabla 5.6. Especificaciones termómetro Fluke 54 II.

Fluke 54 II	**Rango de temperatura**	
	Para tipo K	200 °C a +1372 °C
	Exactitud	
	Para tipo K	± [0,05 % de la lectura + 0,3 °C]
	Resolución	
	0,1 °C (0,1 °F)	
	Coeficiente de Temperatura	
	Para temperaturas fuera del rango	
	001 % de la temperatura + 0,03 °C por °C	
	Normas aplicables	
	NIST-175	
	Temperatura de operación	
	0 °C a 50 °C (32 °F a 120 °F)	

(Fluke 51-54 Series II, 2009)

Adicionalmente se cuenta con un pirómetro laser marca Fluke 68 que será usado después de establecida la temperatura de precalentamiento para SMAW Y TB.

Figura 5.13. Pirómetro Fluke 68.

(Alex Alvarez)

Tabla 5.7. Especificaciones pirómetro Fluke 68.

Fluke 68	**Rango de temperatura**	
	- 32 °C a 760 °C (- 25 °F a 1400 °F)	
	Exactitud	
	23 °C a 510 °C	± 1% de la lectura o ± 1 °C (± 2 °F)
	Resolución	
	0,1 °C (0,1 °F)	
	Relación distancia a punto de exploración	
	50:1	
	Emisividad	
	Ajustable digitalmente de 0,10 a 1,0	
	Tiempo de respuesta	
	500 milisegundos	
	Temperatura de operación	
	0 °C a 50 °C (32 °F a 120 °F)	

(Fluke 63/66/68, 2009)

La emisividad según el catálogo (Fluke 63/66/68, 2009) es de 0.92 para el hierro fundido, se harán mediciones con el pirómetro en los puntos señalados en la siguiente figura, cada punto será equidistante en su longitud a 60 mm y con una separación de una pulgada de la soldadura. La medición se hará en cada placa.

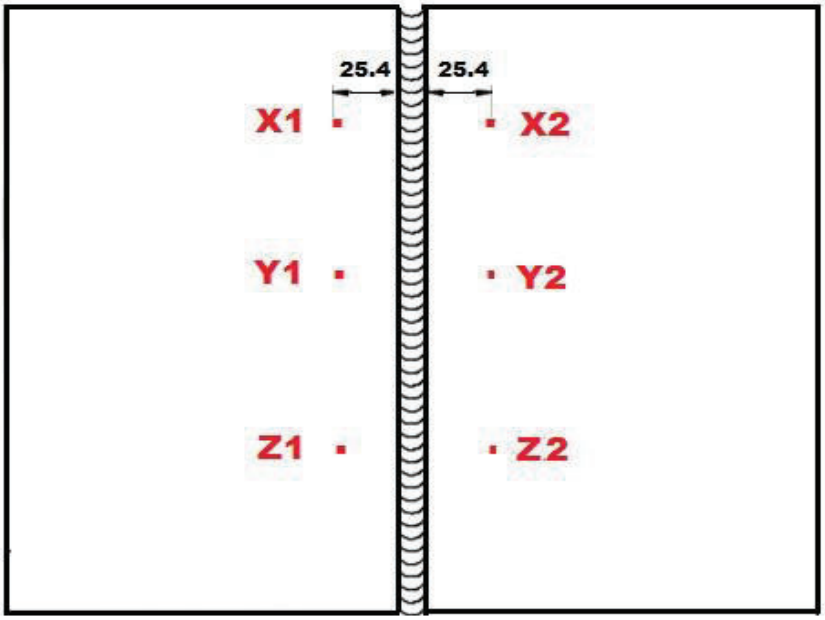


Figura 5.14. Ubicación de los puntos de medición de las temperaturas entre pases. (Alex Alvarez)

5.4.2. DISPOSITIVOS DE CALENTAMIENTO

5.4.2.1. Calentamiento general en horno

Se realizará el precalentamiento en un horno marca Linderberg con velocidad de calentamiento máxima de 8 °C/min, el cual tarda aproximadamente una hora en alcanzar la temperatura de calentamiento, posteriormente el tiempo de permanencia de la pieza en el horno será de 45 minutos (Baño, 2008). La interfaz gráfica para el control del horno usado en el precalentamiento se encuentra en el Anexo 3.

5.4.2.2. Calentamiento parcial mediante oxigas

Mediante la llama neutra y soplete se procederá a calentar la superficie donde se aplicarán los cordones de soldadura con SMAW Y TB, para este propósito se utilizará un tanque de gas licuado de petróleo, que actuará como combustible y la adición de oxígeno actuante como comburente. Cuando se proceda al soldeo en fuerte con soplete, se va a usar acetileno, ya que este combustible es el recomendado (American National Standar & American Welding Society, 1989) en

este proceso, debido a su alta intensidad de combustión alcanzada al combinarse con oxígeno.

5.5. DISEÑO DEL TIPO DE JUNTA

El tipo de junta elegido es que estipula la Guía para la soldadura de hierros fundidos (American National Standar & American Welding Society, 1989), donde considera que para espesores menores a media pulgada, se debe establecer un ángulo de bisel de 70 °C, con un talón de 1.5 mm y una separación entre placas de 3.2 mm, tal como se puede apreciar en la figura siguiente.

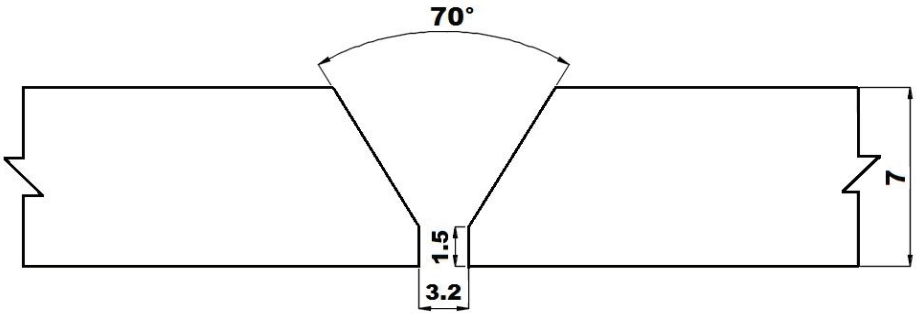


Figura 5.15. Diseño de junta elegida.
(American National Standar & American Welding Society, 1989)

5.6. MATERIALES DE APORTE

5.6.1. SMAW

Para este proceso se seguirá lo establecido en la sección 2.10 del capítulo de SMAW, donde la selección de los electrodos corresponde a la norma AWS A 5.15, tratándose de electrodos de base níquel y níquel-hierro. Se tomó como proveedor a la marca MESSER que provee material para soldadura de alta calidad en el mundo. Las especificaciones de estos electrodos se encuentran en el Anexo 4.

5.6.2. TB

De acuerdo a la sección 3.14, la varilla de aporte para soldadura fuerte con soplete es el especificado por la norma AWS A 5.27, de clasificación RBCuZn, entre 46-50 % de cobre, el resto zinc más otros elementos, además de poseer

alta resistencia, de la misma manera que el material de aporte para SMAW, se escogió a la marca MESSER como proveedora. Las especificaciones de estas varillas se encuentran en el Anexo 9.

5.7. ENSAYO DE SOLDABILIDAD PARA SMAW

Después de la preparación de las probetas a ensayar de acuerdo a la Guía para la soldadura de hierro fundido (American National Standar & American Welding Society, 1989) se tomó en cuenta los siguientes aspectos para el control de la temperatura de la probeta:

- El precalentamiento debe ser lo más uniforme posible sobre toda la pieza y debe mantenerse la temperatura hasta que se completa la soldadura.
- El enfriamiento debe darse a temperatura ambiente en lugar donde no hayan corrientes de viento.
- Seguir las especificaciones de los electrodos al efectuar la soldadura.
- En la última serie de soldadura tomar los parámetros a seguir en la soldadura de placas biseladas.
- Seguir los pasos del 1-14 según lo estipulado en la sección 4.7.4.
- Las probetas deben estar limpias, libres de grasa, óxido o aceite.
- Antes de soldar, marcar la longitud del cordón de 4.5 pulgadas.
- La AWS D 11.2 (American National Standar & American Welding Society, 1989) especifica que no se tome en cuenta las discontinuidades de la línea de fusión, ni la media pulgada de longitud del cráter de soldadura.

5.7.1. PRIMERA SERIE DE PRUEBA

Las temperaturas de prueba para esta serie son: la temperatura ambiente, 121 °C, 260 °C, 400 °C y 540 °C. Después de 24 horas se realiza una inspección visual con un amplificador de lupa previa a la inspección por tintas penetrantes, la finalidad será encontrar fisuras determinando la temperatura de prueba “X”. Se debe tener cuidado con las falsas indicaciones por ello es importante realizar una correcta inspección visual.

Figura 5.16. Precalentamiento de las probetas de soldabilidad.

(Alex Alvarez)

5.7.1.1. Resultados a temperatura ambiente

La temperatura ambiente fue de 19 °C. Después de aplicar el cordón de soldadura, se efectúo la inspección visual que determinó porosidades, más no cualquier tipo de fisura en el material.

En la inspección por tintas penetrantes no se encontró ningún indicio de fisuras en la superficie del cordón según las secciones que determina sean analizadas la norma AWS D11.2.

Tabla 5.8. Inspección en el ensayo de soldabilidad en SMAW para 19 °C.

Tipo de Inspección	**Discontinuidades y defectos encontrados**				
	Porosidades	Fisuras	Chisporroteo	Estabilidad del arco	Uniformidad del cordón
Inspección Visual	Agrupadas	Ninguna	Excesivo	Regular	Regular
Tintas Penetrantes	Agrupadas	Ninguna	Excesivo	Regular	

(Alex Alvarez)

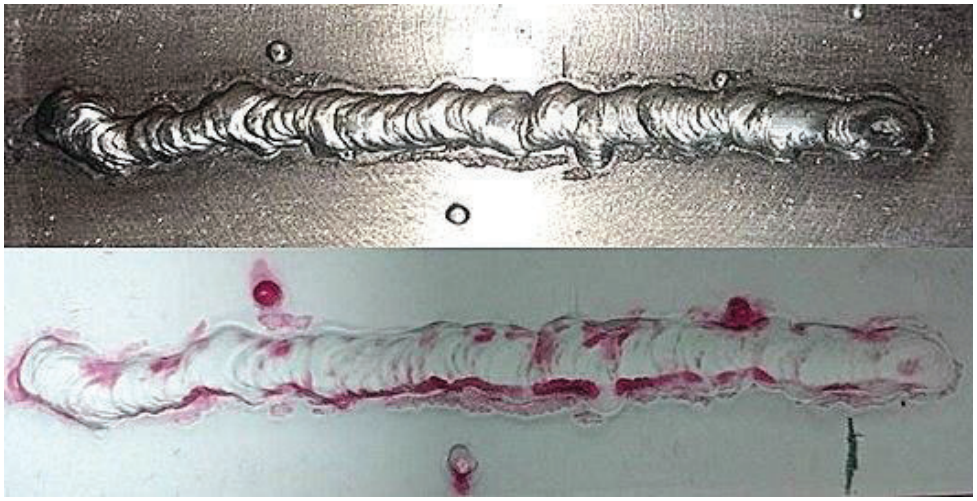


Figura 5.17. Resultados del ensayo de soldabilidad a temperatura ambiente.

(Alex Alvarez)

5.7.1.2. Resultados a 121 °C

Tabla 5.9. Inspección en el ensayo de soldabilidad en SMAW para 121 °C.

Tipo de Inspección	Discontinuidades y defectos encontrados				
	Porosidades	Fisuras	Chisporroteo	Estabilidad del arco	Uniformidad del cordón
Inspección Visual	Agrupadas	Ninguna	Excesivo	Regular	Regular
Tintas Penetrantes	Agrupadas	Ninguna	Excesivo	Regular	

(Alex Alvarez)

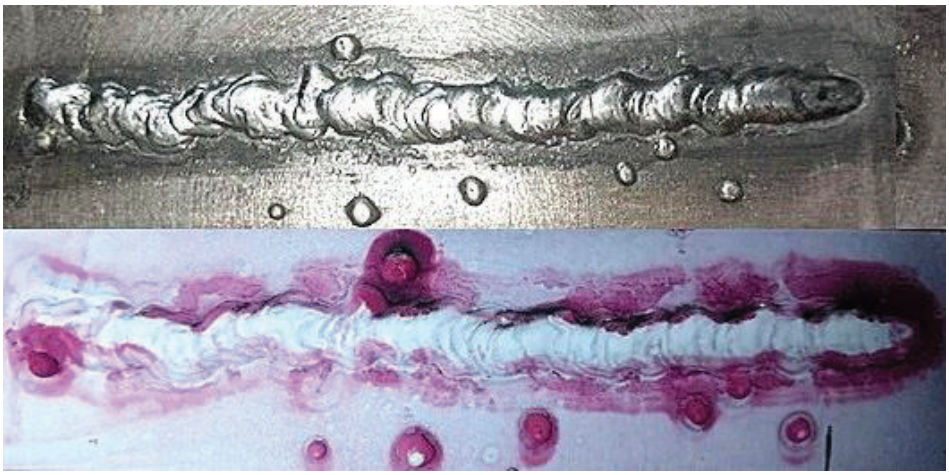


Figura 5.18. Resultados del ensayo de soldabilidad a 121 °C.

(Alex Alvarez)

5.7.1.3. Resultados a 260 °C

En la zona media se usó un nuevo electrodo del mismo tipo ENiFe-Cl.

Tabla 5.10. Inspección en el ensayo de soldabilidad en SMAW para 260 °C.

Tipo de Inspección	Discontinuidades y defectos encontrados				
	Porosidades	Fisuras	Chisporroteo	Estabilidad del arco	Uniformidad del cordón
Inspección Visual	Dispersas	Ninguna	Leve	Estable	Media
Tintas Penetrantes	Dispersas	Ninguna	Leve	Estable	

(Alex Alvarez)

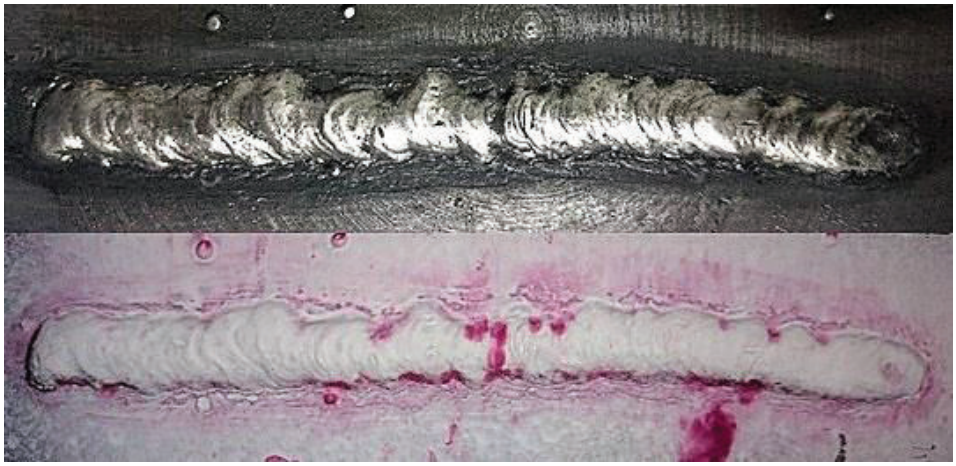


Figura 5.19. Resultados del ensayo de soldabilidad a 260 °C.

(Alex Alvarez)

5.7.1.4. Resultados a 400 °C

Las tintas penetrantes no mostraron discontinuidades. El chisporroteo disminuyó de forma significativa, con un cordón muy uniforme y un arco estable.

Tabla 5.11. Inspección en el ensayo de soldabilidad en SMAW para 400 °C.

Tipo de Inspección	Discontinuidades y defectos encontrados				
	Porosidades	Fisuras	Chisporroteo	Estabilidad del arco	Uniformidad del cordón
Inspección Visual	Escasas	Ninguna	Leve	Estable	Muy buena
Tintas Penetrantes	Escasas	Ninguna	Leve	Estable	

(Alex Alvarez)

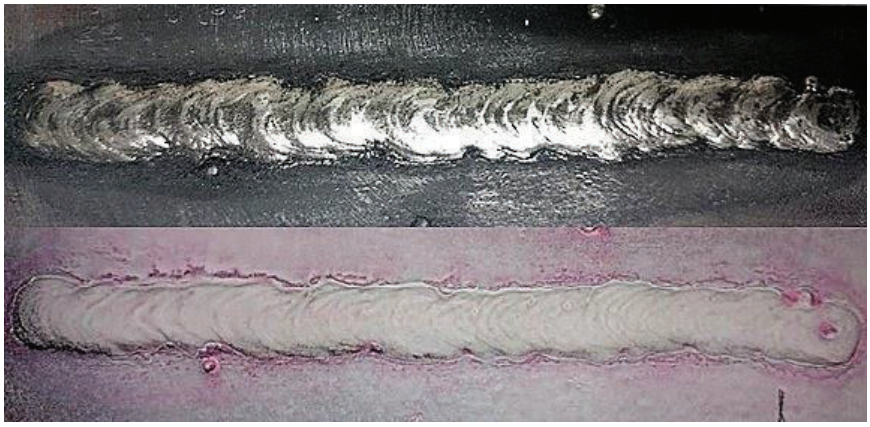


Figura 5.20. Resultados del ensayo de soldabilidad a 400 °C.

(Alex Alvarez)

5.7.1.5. Resultados a 540 °C

No se presentaron indicaciones en la inspección visual. Las tintas penetrantes no mostraron discontinuidades. Se produjo un significativo chisporroteo, con un cordón muy uniforme y un arco estable.

Tabla 5.12. Inspección en el ensayo de soldabilidad en SMAW para 540 °C.

Tipo de Inspección	Discontinuidades y defectos encontrados				
	Porosidades	Fisuras	Chisporroteo	Estabilidad del arco	Uniformidad del cordón
Inspección Visual	Escasas	Ninguna	Leve	Estable	Buena
Tintas Penetrantes	Escasas	Ninguna	Leve	Estable	

(Alex Alvarez)

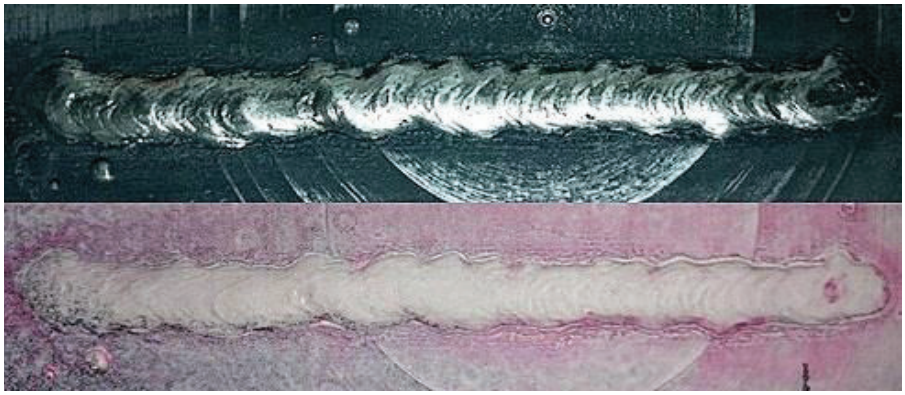


Figura 5.21. Resultados del ensayo de soldabilidad a 540 °C.

(Alex Alvarez)

5.7.1.6. Resultados finales de la primera serie

El criterio de selección de la siguiente temperatura de prueba indica que se determine la más alta temperatura a la cual el agrietamiento todavía se presenta. Al no presentarse agrietamientos en ninguna superficie, se procede a tomar el criterio de estabilidad del arco y uniformidad del cordón, por lo que la temperatura "X" es de 260 °C. En esta temperatura se evidenció una notable mejoría del proceso de soldadura, con menor chisporroteo, mejorando la estabilidad del arco y la uniformidad del cordón.

5.7.2. SEGUNDA SERIE DE PRUEBA

Las nuevas temperaturas de prueba para esta serie son: 288 °C, 316 °C, 343 °C y 471 °C, de entre ellas se determinará la temperatura "Y" para la siguiente serie.

5.7.2.1. Resultados a 288 °C

Tabla 5.13. Inspección en el ensayo de soldabilidad en SMAW para 288°C.

Tipo de Inspección	Discontinuidades y defectos encontrados				
	Porosidades	Fisuras	Chisporroteo	Estabilidad del arco	Uniformidad del cordón
Inspección Visual	Escasas	Ninguna	Medio	Media	Regular
Tintas Penetrantes	Escasas	Ninguna	Medio	Media	

(Alex Alvarez)

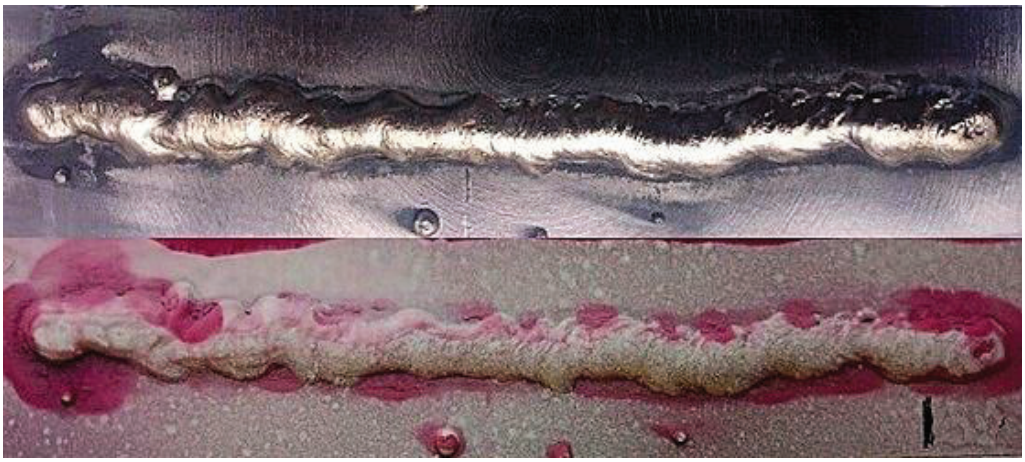


Figura 5.22. Resultados del ensayo de soldabilidad a 288 °C.

(Alex Alvarez)

5.7.2.2. Resultados a 316 °C.

Se tuvo la mejor uniformidad del arco de toda la serie.

Tabla 5.14. Inspección en el ensayo de soldabilidad en SMAW para 316 °C.

Tipo de Inspección	Discontinuidades y defectos encontrados				
	Porosidades	Fisuras	Chisporroteo	Estabilidad del arco	Uniformidad del cordón
Inspección Visual	Ninguna	Ninguna	Ninguno	Alta	Muy buena
Tintas Penetrantes	Ninguna	Ninguna	Ninguno	Alta	

(Alex Alvarez)

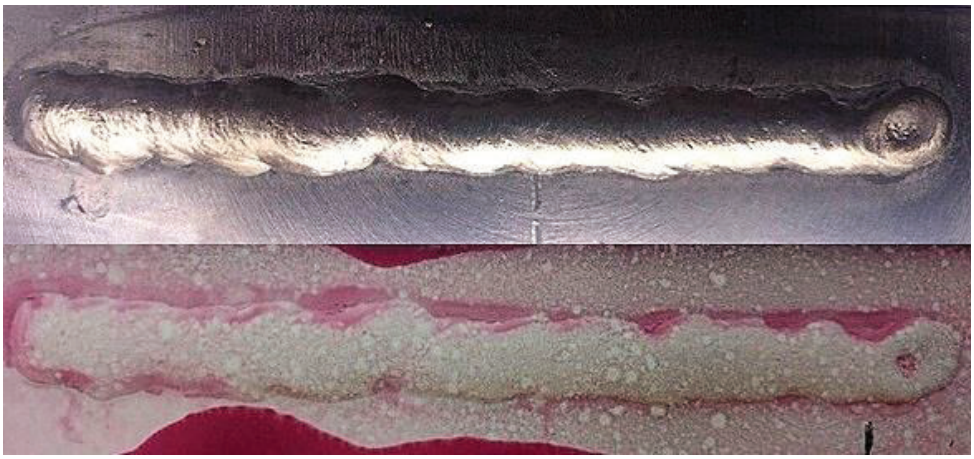


Figura 5.23. Resultados del ensayo de soldabilidad a 316 °C.

(Alex Alvarez)

5.7.2.3. Resultados a 343 °C

Tabla 5.15. Inspección en el ensayo de soldabilidad en SMAW para 343 °C.

Tipo de Inspección	Discontinuidades y defectos encontrados				
	Porosidades	Fisuras	Chisporroteo	Estabilidad del arco	Uniformidad del cordón
Inspección Visual	Ninguna	Ninguna	Leve	Alta	Muy buena
Tintas Penetrantes	Ninguna	Ninguna	Leve	Alta	

(Alex Alvarez)

Figura 5.24. Resultados del ensayo de soldabilidad a 343 °C.

(Alex Alvarez)

5.7.2.4. Resultados a 471 °C

Las indicaciones de la superficie del cordón en la inspección visual se deben al cincelado que se dio para quitar la escoria.

Tabla 5.16. Inspección en el ensayo de soldabilidad en SMAW para 471 °C.

Tipo de Inspección	Discontinuidades y defectos encontrados				
	Porosidades	Fisuras	Chisporroteo	Estabilidad del arco	Uniformidad del cordón
Inspección Visual	Ninguna	Ninguna	Leve	Estable	Buena
Tintas Penetrantes	Ninguna	Ninguna	Leve	Estable	

(Alex Alvarez)

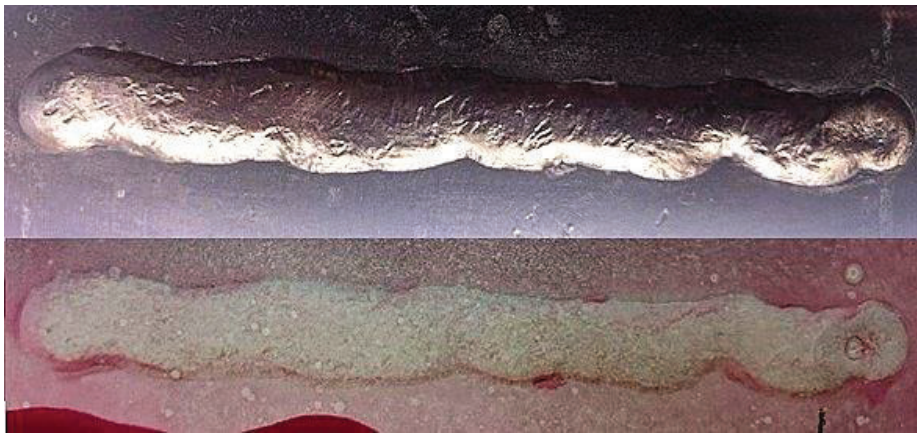


Figura 5.25. Resultados del ensayo de soldabilidad a 471 °C.

(Alex Alvarez)

5.7.2.5. Resultados finales de la segunda serie

Al no presentarse agrietamientos en ninguna superficie, se procedió como en el caso anterior, a tomar el criterio de estabilidad del arco y uniformidad del cordón, por lo que la temperatura “Y” es de 316 °C. En esta temperatura se evidenció una un nulo chisporroteo, con un arco muy estable y una muy buena uniformidad del cordón de soldadura.

5.7.3. TERCERA SERIE DE PRUEBA

Las nuevas temperaturas de prueba para esta serie son: 322 °C, 327 °C, 333 °C y 338 °C, de entre ellas se determinará la temperatura “Z” temperatura a la cual el hierro fundido dúctil tiene su punto óptimo de soldabilidad.

5.7.3.1. Resultados a 322 °C

Se produjo alto chisporroteo, se tuvo un cordón soldado de mediana uniformidad y un medianamente arco estable.

Tabla 5.17. Inspección en el ensayo de soldabilidad en SMAW para 322 °C.

Tipo de Inspección	Discontinuidades y defectos encontrados				
	Porosidades	Fisuras	Chisporroteo	Estabilidad del arco	Uniformidad del cordón
Inspección Visual	Agrupadas	Ninguna	Excesivo	Estable	Media
Tintas Penetrantes	Agrupadas	Ninguna	Excesivo	Estable	

(Alex Alvarez)

Figura 5.26. Resultados del ensayo de soldabilidad a 322 °C.

(Alex Alvarez)

5.7.3.2. Resultados a 327 °C

No se presentaron indicaciones de discontinuidades en la inspección visual. Las tintas penetrantes no mostraron discontinuidades en el cordón de soldadura. Se produjo un chisporroteo excesivo, se tuvo un cordón soldado de mediana uniformidad y un arco poco estable.

Tabla 5.18. Inspección en el ensayo de soldabilidad en SMAW para 327 °C.

Tipo de Inspección	Discontinuidades y defectos encontrados				
	Porosidades	Fisuras	Chisporroteo	Estabilidad del arco	Uniformidad del cordón
Inspección Visual	Agrupadas	Ninguna	Excesivo	Media	Regular
Tintas Penetrantes	Agrupadas	Ninguna	Excesivo	Media	

(Alex Alvarez)

Figura 5.27. Resultados del ensayo de soldabilidad a 327 °C.

(Alex Alvarez)

5.7.3.3. Resultados a 333 °C

No se presentaron indicaciones de discontinuidades en la inspección visual. Las tintas penetrantes no mostraron discontinuidades en el cordón de soldadura. Se produjo mediano chisporroteo, se tuvo un cordón soldado uniforme y un arco estable.

Tabla 5.19. Inspección en el ensayo de soldabilidad en SMAW para 333 °C.

Tipo de Inspección	Discontinuidades y defectos encontrados				
	Porosidades	Fisuras	Chisporroteo	Estabilidad del arco	Uniformidad del cordón
Inspección Visual	Escasas	Ninguna	Leve	Estable	Buena
Tintas Penetrantes	Escasas	Ninguna	Leve	Estable	

(Alex Alvarez)

Figura 5.28. Resultados del ensayo de soldabilidad a 333 °C.

(Alex Alvarez)

5.7.3.4. Resultados a 338 °C

Las tintas penetrantes no mostraron discontinuidades en el cordón de soldadura. Se produjo alto chisporroteo, se tuvo un cordón soldado de uniformidad media y un arco medianamente estable.

Tabla 5.20. Inspección en el ensayo de soldabilidad en SMAW para 338 °C.

Tipo de Inspección	Discontinuidades y defectos encontrados				
	Porosidades	Fisuras	Chisporroteo	Estabilidad del arco	Uniformidad del cordón
Inspección Visual	Escasas	Ninguna	Excesivo	Media	Media
Tintas Penetrantes	Escasas	Ninguna	Excesivo	Media	

(Alex Alvarez)

Figura 5.29. Resultados del ensayo de soldabilidad a 338 °C.

(Alex Alvarez)

5.7.3.5. Resultados finales de la tercera serie

Al no presentarse agrietamientos en ninguna superficie, se procedió, como en el caso anterior, a tomar el criterio de estabilidad del arco y uniformidad del cordón, por lo que la temperatura a la cual el hierro fundido dúctil es soldable mediante SMAW es de 333 °C.

Tabla 5.21. Resultados de ensayo a la temperatura de soldabilidad encontrada.

Evaluación	Inspección Visual	Tintas Penetrantes
Discontinuidad detectada	Ninguna	Ninguna
Fisuras	Ninguna	Ninguna
Chisporroteo	Medio	-
Uniformidad del cordón	Alto	-
Estabilidad del arco de soldadura	Alto	-
Inspector	Ing. Gabriel Velasteguí	Ing. Gabriel Velasteguí

(Alex Alvarez)

Tal como se ve en la tabla anterior, no se han detectado discontinuidades, en ninguno de los dos ensayos nos destructivos, por lo que la calidad final de la soldadura se ve asegurada en esta temperatura.

Tabla 5.22. Parámetros de soldadura en la tercera serie de prueba.

Temperatura de precalentamiento (°C)	Intensidad (A)	Voltaje (V)	Tiempo de soldadura (min)	Velocidad (cm/min)
322	90-110	13-19	1,03	11,07
327	98-105	15-20	1,10	10,36
333	95-100	14-20	1,15	9,91
338	100-110	15-20	1,22	9,34

(Alex Alvarez)

5.8. PROCESO DE SOLDADURA CON SMAW

Un punto clave al realizar la soldadura es mantener la temperatura por sobre los 290 °C para evitar la transformación martensítica, por lo que se requiere un adecuado control de temperatura en cada pase de soldadura. Posteriormente se procederá a realizar un enfriamiento lento dentro del mismo horno de calentamiento, desde la temperatura de 400 °C hasta la temperatura ambiente.

5.8.1. SECADO DE ELECTRODOS

Un excesivo contenido de humedad en los electrodos puede ocasionar en problemas operativos, por ejemplo, salpicaduras excesivas, cortes de arco. En lo referente a electrodos básicos, resulta importante que estén secos con el fin de garantizar las propiedades de dichos electrodos en soldaduras de gran responsabilidad.

Los electrodos revestidos de cualquier tipo captarán humedad muy lentamente si son almacenados bajo las siguientes condiciones climáticas:

Tabla 5.23. Temperatura para el secado de electrodos.

Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)
5 a 15	60 máximo
15 a 25	50 máximo
Superior a 25	40 máximo

(Indura, 2007)

En invierno, es posible mantener la humedad relativa en valores bajos si se mantiene la temperatura del depósito o almacén 10 °C por encima de la temperatura ambiente exterior (Indura, 2007).

Figura 5.30. Secado de electrodos.

(Alex Alvarez)

5.8.2. CONTROL DE TEMPERATURA

Se mantuvo el calor de las placas al sacarse del horno, mediante una hornilla industrial alimentada por un cilindro de gas licuado de petróleo, se utilizó como base un acero al carbono para conducir el calor de la llama.

Figura 5.31. Mantención del calor en la soldadura.

(Alex Alvarez)

Se utilizó además, un flameador con gas licuado de petróleo para aumentar la temperatura de la soldadura entre pases. Se usaron playos de presión para sujetar las placas de hierro fundido dúctil a la plancha de acero que hacía de base, todo esto con el objetivo de evitar la distorsión generada durante el soldeo.

Figura 5.32. Mantención del calor con flameador.
(Alex Alvarez)

Figura 5.33. Control de distorsiones.
(Alex Alvarez)

El registro de las mediciones de temperaturas entre pases, tomando todas las precauciones mencionadas, se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 5.24. Registro del control de temperatura durante la soldadura con SMAW.

Ubicación	Control de temperaturas (°C)					
	Extremo 1		Mitad		Extremo 2	
Pase	X1	X2	Y1	Y2	Z1	Z2
1	400	400	390	390	385	380
2	390	380	380	370	380	370
3	380	360	360	360	350	330
4	380	330	360	330	320	310
5	370	330	400	360	350	310
6	360	340	320	330	340	330

(Alex Alvarez)

5.9. INSPECCIÓN VISUAL

Al siguiente día de realizado el proceso de soldadura, se limpió el cupón mediante cepillo y se procedió a inspeccionar de manera visual mediante un amplificador visual (lupa) obteniendo los siguientes resultados:

Figura 5.34. Cupón de soldadura después de la limpieza.

(Alex Alvarez)

La sobremonta y raíz son de 1 hasta 1.5 milímetros, medidas dentro de los parámetros normales de soldadura. Se detectaron mordeduras en el cordón, la medición de estas discontinuidades no fueron mayores a un milímetro.

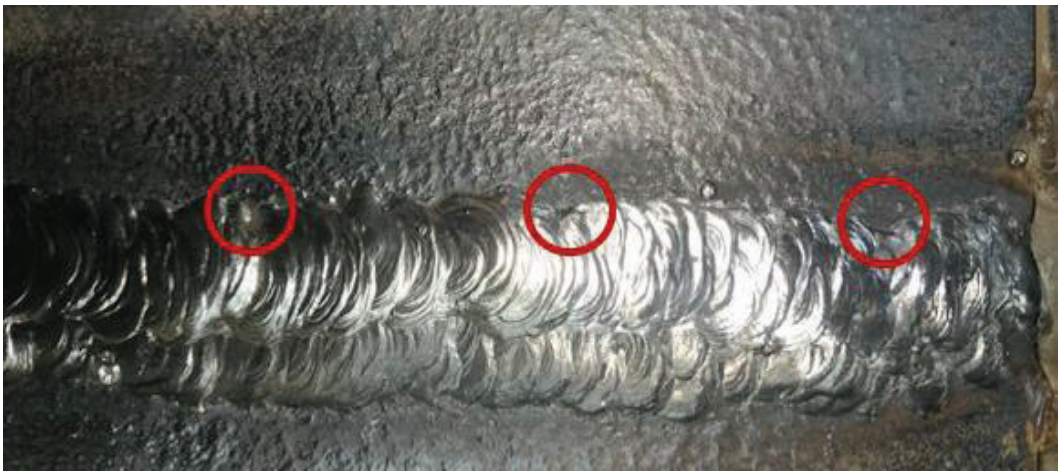


Figura 5.35. Detección de mordeduras en el cupón de soldadura.
(Alex Alvarez)

5.10. MACROGRAFÍAS

5.10.1. PROBETA M1

Se observa claramente la zona afectada por el calor, el área medida es de 42.84 mm^2, además la medición de la sobremonta y la raíz. No se ven defectos aparentes.

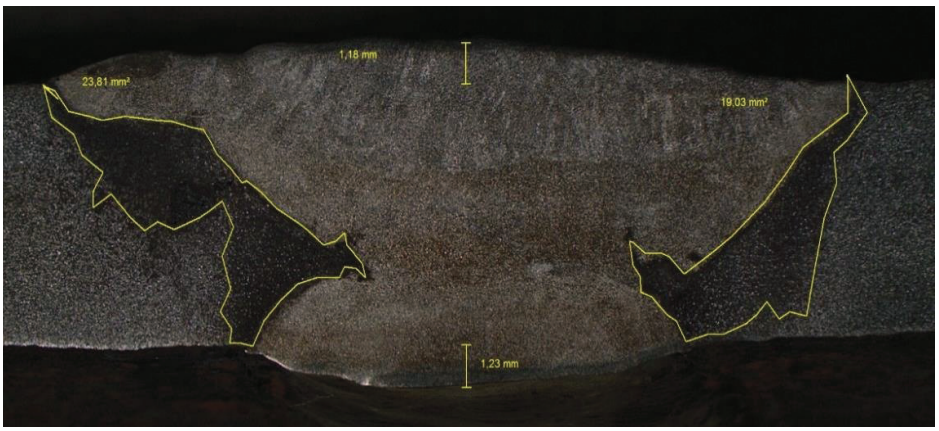


Figura 5.36. Cordón de soldadura y zona afectada por el calor, 40x.
(Alex Alvarez)

5.10.2. PROBETA M2

El área medida de la zona afectada por el calor es de 47.08 mm^2. Se puede evidenciar claramente los pases de soldadura. En el metal base se observa una porosidad. La zona de la soldadura no presenta discontinuidades.

Figura 5.37. Pases de soldadura y la ZAC, 40x.
(Alex Alvarez)

5.11. MICROGRAFÍAS

Las muestras observadas bajo el microscopio fueron atacadas con picral para el metal base y agua regia para el metal de aporte de níquel-hierro. Se analizó un total de 2 muestras que fueron extraídas de acuerdo al diseño del cupón de soldadura.

5.11.1. PROBETA M1

Se observa en la siguiente figura en la zona de fusión parcial, la microestructura del metal de aporte (níquel-hierro) sin atacar, en la línea de fusión se tiene ledeburita secundaria, formada por cementita y perlita. Se observan nódulos de grafito en el aporte, ya que el níquel provoca una acción grafitizante reagrupando los nódulos de grafito libremente esparcidos (Unfried & Tabares, 2004).

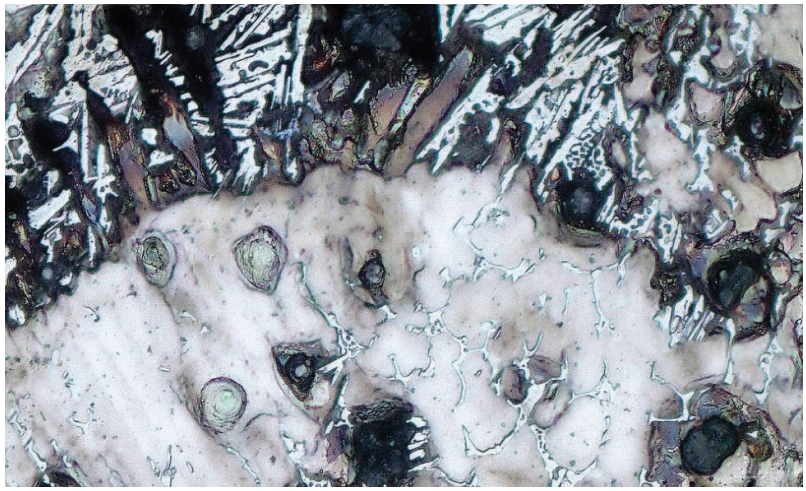


Figura 5.38. Zona de fusión parcial, 500x
(Alex Alvarez)

En la figura 5.39 se puede evidenciar el crecimiento de tipo dendrítico hacia el máximo gradiente de temperatura dirigido en la dirección del metal de aporte (sin atacar). Además de los nódulos de grafito en su matriz ferrítica-perlítica.

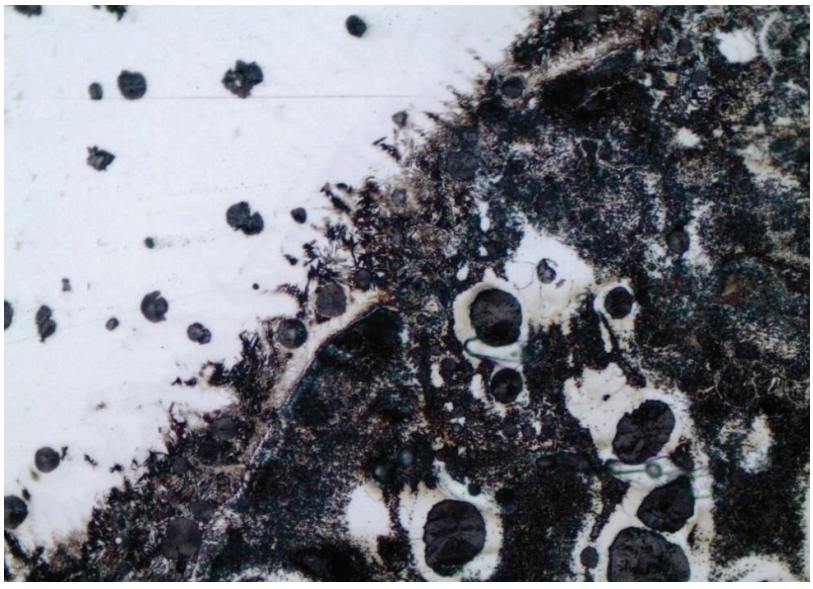


Figura 5.39. Crecimiento dendrítico hacia el máximo gradiente de temperatura, 500x
(Alex Alvarez)

En la figura 5.40 se observa claramente la microestructura tipo dendrítica del metal de aporte níquel-hierro atacado con agua regia.

Figura 5.40. Crecimiento columnar dendrítico en el metal de aporte, 100x.
(Alex Alvarez)

5.11.2. PROBETA M2

Se detecta ledeburita secundaria en toda la zona de fusión parcial, además de nódulos de grafito en los espacios interdendríticos de las agujas de cementita.

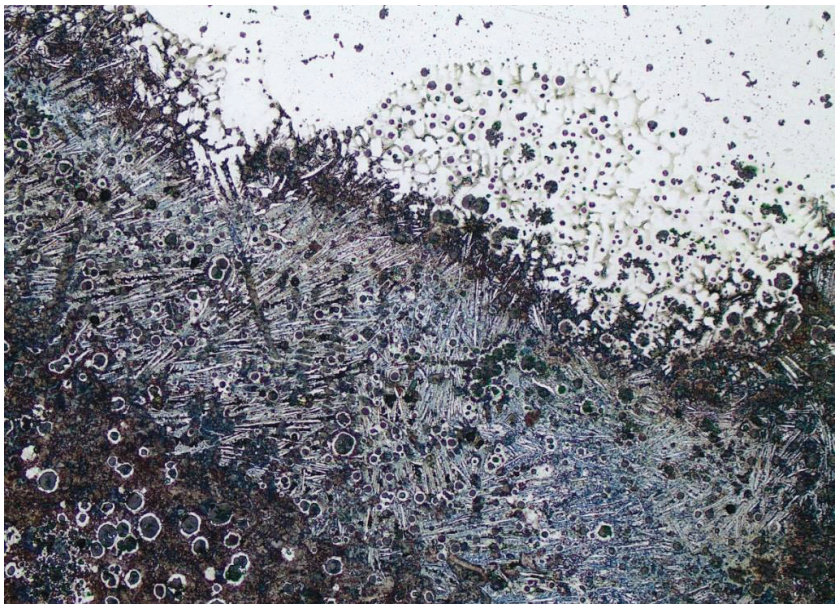


Figura 5.41. Zona de fusión parcial, 100x
(Alex Alvarez)

En la siguiente figura se observa la presencia de la ledeburita se hace más evidente, claramente se distinguen las agujas de cementita, mayor microconstituyente de la ledeburita, mientras que en la figura 5.43 la perlita se observa como pequeñas manchas de “leopardo”.

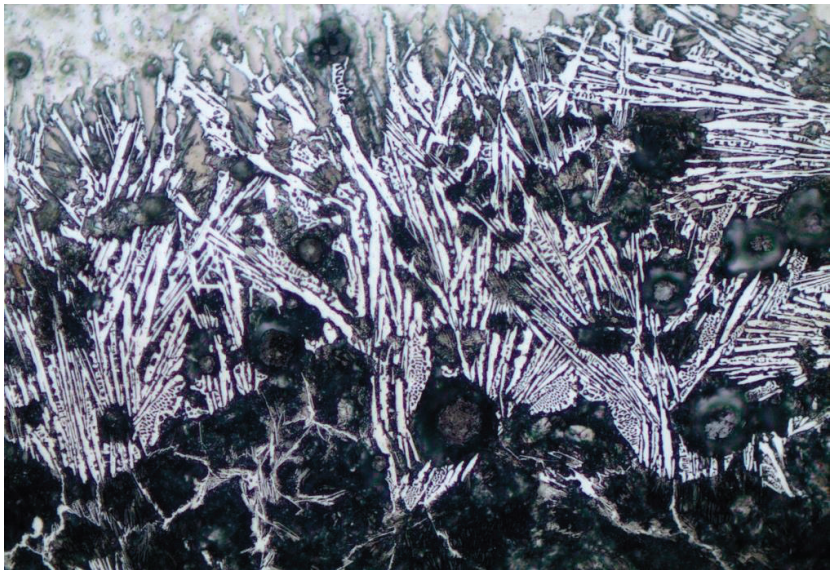


Figura 5.42. Agujas de cementita en la zona de fusión parcial, 500x.
(Alex Alvarez)

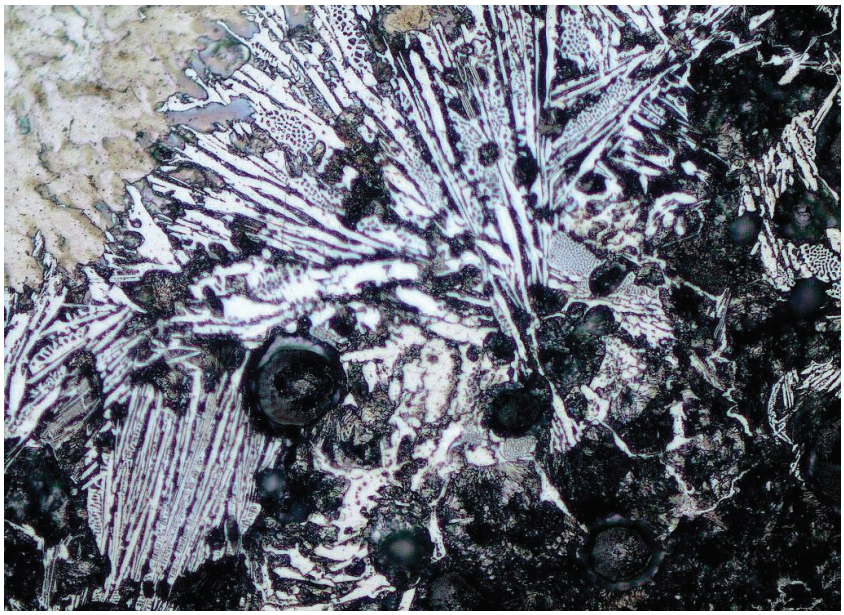


Figura 5.43. Microestructura de perlita en la zona de fusión parcial, 500x.
(Alex Alvarez)

5.12. ENSAYO DE DUREZA

La distribución de los puntos de medida fue de acuerdo a la zona afectada por el calor, los dos primeros en el metal base, los segundos en el ZAC y los restantes en el metal de aporte.

La separación entre cada punto fue de 3 mm excepto en la línea de fusión donde fue de 2 mm. Cada línea de barrido tiene una separación de 2 mm respecto a los bordes superior e inferior. Los resultados fueron los siguientes.

5.12.1. PROBETA M1

En la zona afectada por el calor, la dureza aumenta considerablemente en las dos líneas de medición, algo que concuerda con la microestructura presentada en esta zona (cementita y perlita).

En el lado izquierdo de la unión, se evidencia una mayor magnitud en las mediciones de dureza, algo que se puede observar en la macrografía de esta probeta, al tener una superficie de 23.81 mm^2.

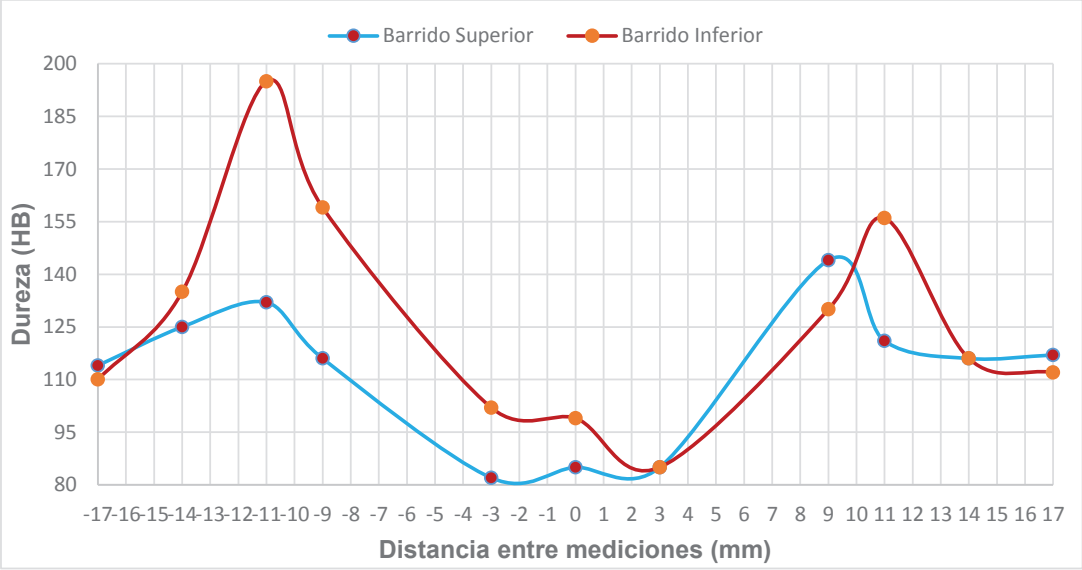


Figura 5.44. Barrido de dureza para la probeta M1.

(Alex Alvarez)

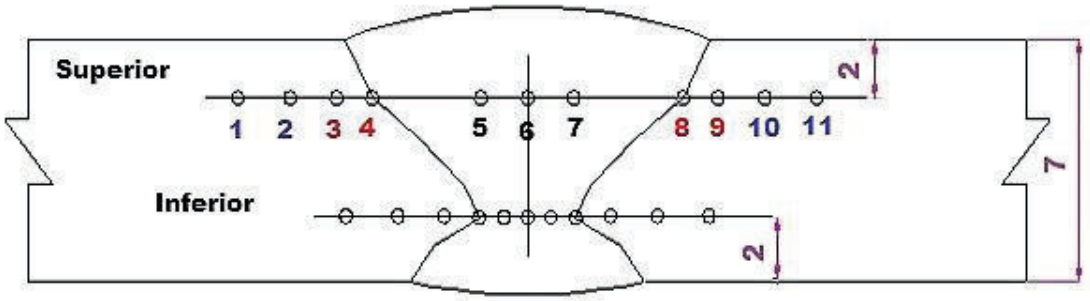


Figura 5.45. Esquema del barrido de dureza para las probetas M1 y M2.

(Alex Alvarez)

5.12.2. PROBETA M2

El mayor valor de dureza corresponde a la zona afectada por el calor de la placa izquierda, junto con el análisis de la probeta M1 se puede afirmar que el gradiente de temperatura fue mayor en la placa izquierda de la junta soldada debido a que al momento de elaborar los pases de soldadura, estos no fueron depositados simétricamente respecto al eje longitudinal de la junta.

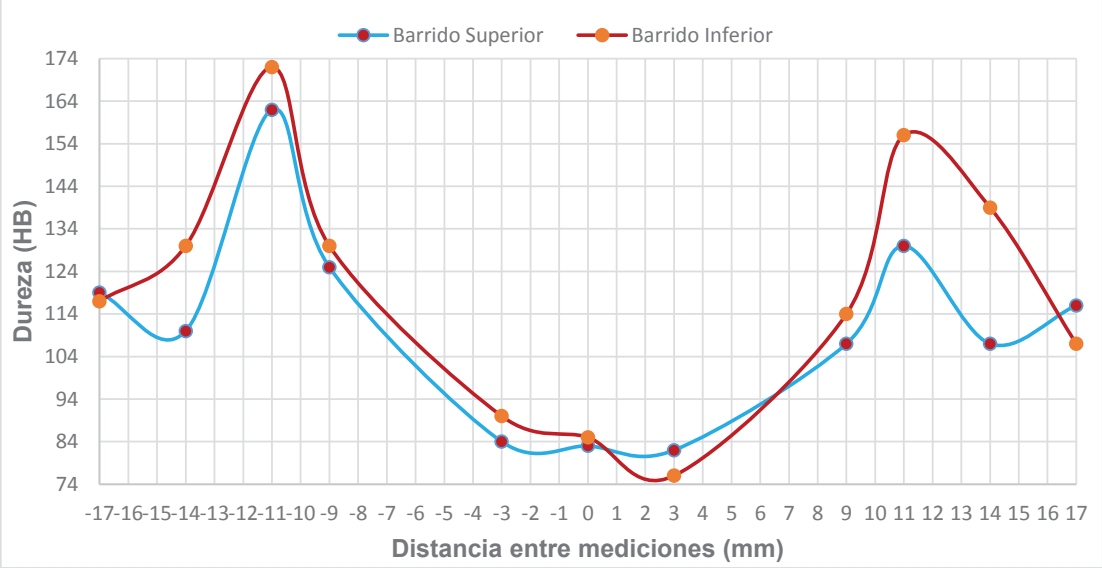


Figura 5.46. Barrido de dureza para la probeta M2.

(Alex Alvarez)

5.13. ENSAYO DE TRACCIÓN

Los registros de los ensayos en las probetas del ensayo de tracción se encuentran detalladas en los anexos 7 y 8. En la siguiente figura se muestra la curva esfuerzo vs deformación para el metal base y las probetas soldadas.

La siguiente gráfica muestra el comportamiento de las probetas soldadas a la temperatura a la que el hierro dúctil es soldable (333 °C) y el material base, frente a fuerzas de tracción

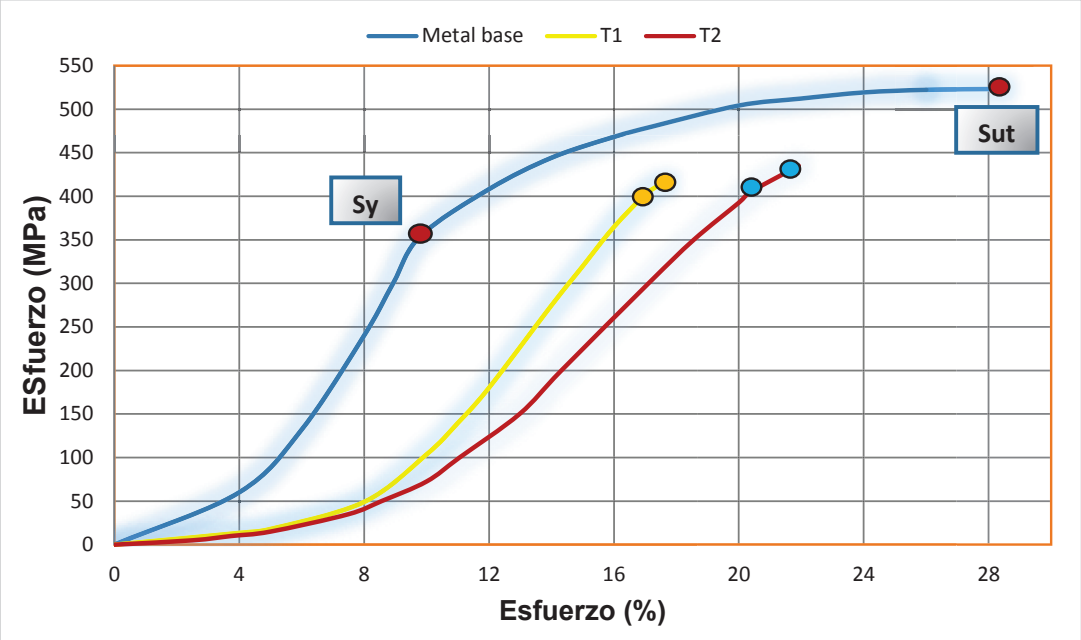


Figura 5.47. Curva esfuerzo vs deformación para el material base y las probetas T1 y T2. (Alex Alvarez)

5.13.1. PROBETA T1

Esta probeta muestra una resistencia a la tracción que está dentro de la resistencia del material de aporte (397-482 MPa), la falla se produce en la junta, se supera en 4.7 % el valor mínimo de resistencia a la tensión del material de aporte. También se detectó la presencia de dos poros, de longitudes de 1.85 mm y 1.50 mm, la profundidad fue de 0.8 y 0.6 mm respectivamente. El registro del ensayo de tracción para esta probeta se encuentra en el Anexo 7.

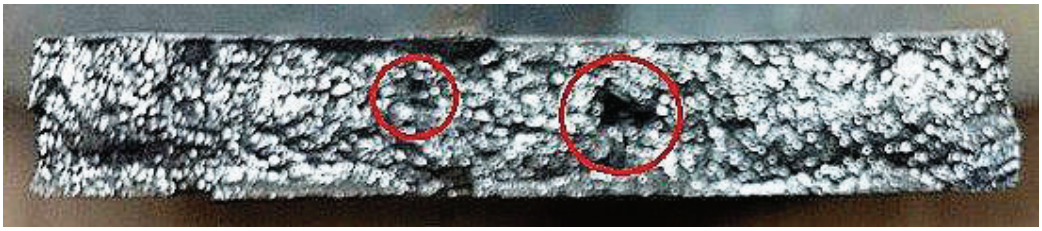


Figura 5.48. Presencia de dos poros en la probeta T1.

(Alex Alvarez)

5.13.2. PROBETA T2

La resistencia a la tracción es mayor que la probeta anterior, la fractura se da en la zona afectada por el calor, algo comprensible ya que en esta zona se presenta cementita. El valor de resistencia mecánica está en los valores del metal de aporte siendo 9.7 % mayor a la de este. El registro para el ensayo de tracción de esta probeta se encuentra detallado en el Anexo 8.

5.14. ENSAYO DE DOBLADO

Este ensayo se realizó en el Laboratorio de Soldadura. Con este tipo de metal base, el ensayo de doblez carece de interés tecnológico debido a la poca ductilidad exhibida en el ensayo de tracción. El interés en dicho ensayo está en observar el comportamiento cualitativo de la forma de la rotura de las fallas de ensayo. Los resultados fueron los siguientes.

Figura 5.49. Jig para el ensayo de dobaldo.

(Alex Alvarez)

Tabla 5.25. Resultados del ensayo de doblado.

Probeta	Tipo de Doblado	Zona de rotura	Observación
Probeta 1	Cara	Entre metal base y aporte	No soportó el ángulo de doblez. Fractura en la zona de fusión parcial
	Raíz	Entre metal base y aporte	No soportó el ángulo de doblez. Fractura en la zona de fusión parcial

(Alex Alvarez)

La especificación del procedimiento de soldadura (WPS) para el proceso de soldadura SMAW, y el registro de la calificación del procedimiento de soldadura (PQR), se encuentran en los anexos 5 y 6, respectivamente.

5.15. ENSAYO DE SOLDABILIDAD PARA TB

Se siguieron las mismas consideraciones que se aplicó en la soldabilidad con SMAW (sección 5.7), adicionando dos observaciones (Giachino, 2001).

- Esmerilar las superficies donde se asentará el cordón de soldadura, sobre la superficie de las piezas y a lo largo de cada borde, la finalidad es eliminar la capa superficial llamada también “costra de fundición”. Dicha capa superficial contiene impurezas acumuladas por el contacto con las paredes del molde de arena.
- Limpiar la suciedad, óxido, pintura, aceite o grasa, ya que estas sustancias pueden provocar inclusiones o sopladuras que debilitan la soldadura. Para este propósito se puede utilizar un cepillo de alambre y si hay grasa o aceite, se pueden eliminar con disolvente.
- El ensayo no empezará por la temperatura ambiente, ya que el rango de trabajo del metal de aporte es de 900 °C aproximadamente.
- Para establecer las temperaturas de prueba iniciales, se tomará en cuenta lo establecido según el Manual de soldadura, Tomo II (American Welding Society, 1996), el cual dice que los hierros colados dúctiles y maleables deben soldarse en fuerte por debajo de los 760 °C.

5.15.1. DETERMINACIÓN DE LA MEZCLA DE GAS ADECUADA

Existen varias mezclas de gases combustibles de preparación comercial que pueden servir para soldar. La mezcla más común utilizada en talleres es la de glp-oxigeno, debido a su relativo alto costo/beneficio en la reparación y mantenimiento de componentes mecánicos. Esta mezcla se probó en el inicio del ensayo de soldabilidad, obteniéndose resultados bastante contraproducentes.

Figura 5.50. Resultados al usar glp-oxígeno en TB.
(Alex Alvarez)

Tal como indica la siguiente figura, se tiene una pobre fluidez del metal de aporte con una nula adhesión al metal base. Los tiempos de soldadura, desde el precalentamiento hasta la finalización del cordón no eran menores a 20 minutos.

Figura 5.51. Uso de glp-oxígeno en soldadura fuerte a diferentes temperaturas.
(Alex Alvarez)

En la figura 5.51, se aprecia de mejor manera los inconvenientes presentados al usar esta mezcla a diferentes temperaturas: 340 °C, 400 °C, 540 °C, 600 °C. Resulta imposible obtener un cordón con una mínima uniformidad, obteniéndose una soldadura de calidad pobre, llena de porosidades, mala fluidez y variable adhesión.

De acuerdo a la Guía para la soldadura de hierro fundido (American National Standar & American Welding Society, 1989), la mezcla adecuada para este tipo de proceso es de acetileno-oxígeno; por lo que se procede a utilizar esta mezcla en el ensayo de soldabilidad, realizando una prueba previa para constatar lo expuesto en la norma, obteniéndose mejores resultados que los anteriores.

Figura 5.52. Cilindro de acetileno (rojo); oxígeno (verde) y soplete usados en el ensayo de soldabilidad para TB.

(Alex Alvarez)

Tabla 5.26. Resultados de prueba previa al ensayo de soldabilidad para TB con acetileno-oxígeno.

Temperatura (°C)	Presión C_2H_2 (psi)	Presión O_2 (psi)	Longitud del cono (mm)	Boquilla	Fluidez del aporte	Adhesión del aporte
400	6	20	15	6	Baja	Bueno
600	7	20	12	7	Muy alta	Muy Buena
550	8	20	10	9	Muy alta	Muy buena

(Alex Alvarez)

5.15.2. PRIMERA SERIE DE PRUEBA

Las temperaturas de prueba para esta serie son: 300 °C, 400 °C, 500 °C y 600 °C. Después de 24 horas se realiza una inspección visual con un amplificador de lupa previa a la inspección por tintas penetrantes, la finalidad conforme la AWS D11.2 (American National Standar & American Welding Society, 1989), será constatar fisuras, determinando las próximas temperaturas de prueba.

Figura 5.53. Precalentamiento de probetas para ensayo de soldadura con TB.

(Alex Alvarez)

5.15.2.1. Resultados a 300 °C

Las tintas penetrantes revelaron falta de llenado a 2 pulgadas del inicio de la soldadura

Tabla 5.27. Inspección en el ensayo de soldabilidad en TB para 300 °C.

Tipo de Inspección	Discontinuidades y defectos encontrados			
	Porosidades	Fisuras	Falta de llenado	Uniformidad del cordón
Inspección Visual	Agrupadas	Ninguna	Final del cordón	Muy buena
Tintas Penetrantes	Dispersas	Ninguna	En medio y al final	

(Alex Alvarez)

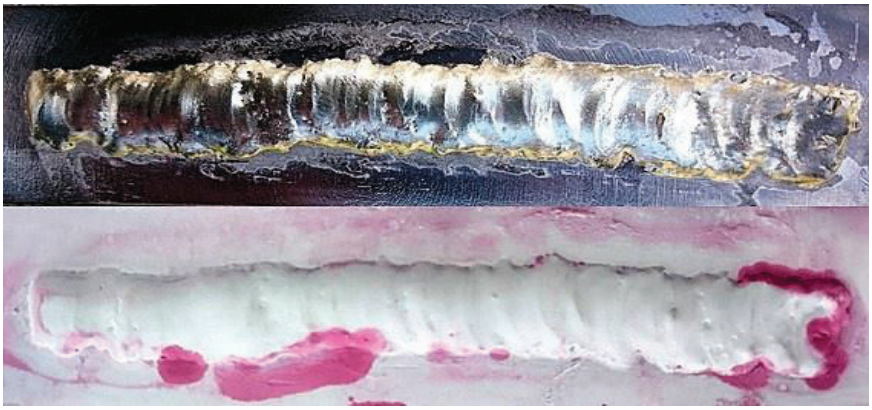


Figura 5.54. Resultados del ensayo de soldabilidad a 300 °C.

(Alex Alvarez)

5.15.2.2. Resultados a 400 °C

Para efectos de selección de la temperatura a la cual es soldable el material, no se tomará en cuenta la primera 1/2 pulgada del inicio del cordón, debido a que la presión del acetileno varió y se tuvo que reajustarla a 8.5 psi.

Tabla 5.28. Inspección en el ensayo de soldabilidad en TB para 400 °C.

Tipo de Inspección	Discontinuidades y defectos encontrados			
	Porosidades	Fisuras	Falta de llenado	Uniformidad del cordón
Inspección Visual	Dispersas	Ninguna	Inicio del cordón	Buena
Tintas Penetrantes	Dispersas	Ninguna	Inicio y al final	

(Alex Alvarez)

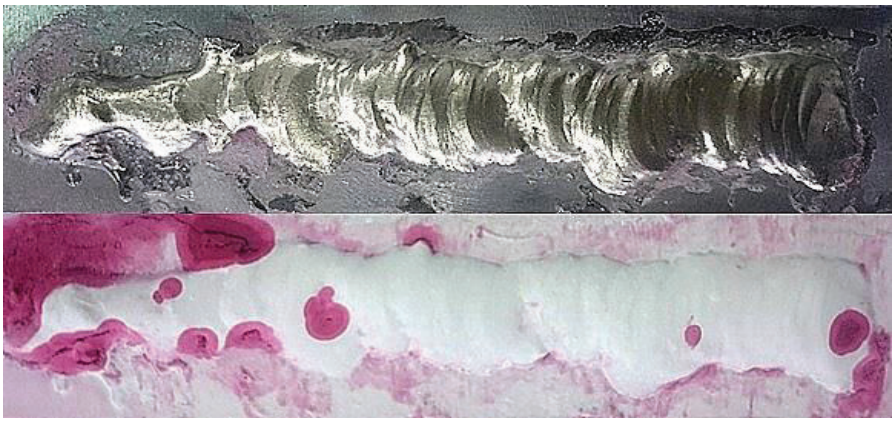


Figura 5.55. Resultados del ensayo de soldabilidad a 400 °C.

(Alex Alvarez)

5.15.2.3. Resultados a 500 °C

Se tuvo falta de llenado a 3 pulgadas del inicio de la soldadura debido a que se cambió la varilla de aporte a esa distancia.

Tabla 5.29. Inspección en el ensayo de soldabilidad en TB para 500 °C.

Tipo de Inspección	Discontinuidades y defectos encontrados			
	Porosidades	Fisuras	Falta de llenado	Uniformidad del cordón
Inspección Visual	Dispersas	Ninguna	Inicio del cordón	Buena
Tintas Penetrantes	Dispersas	Ninguna	Inicio y al final	

(Alex Alvarez)

Figura 5.56. Resultados del ensayo de soldabilidad a 500 °C.

(Alex Alvarez)

5.15.2.4. Resultados a 600 °C

Se tuvo poca porosidad, registrándose al inicio de la soldadura y al final.

Tabla 5.30. Inspección en el ensayo de soldabilidad en TB para 600 °C.

Tipo de Inspección	Discontinuidades y defectos encontrados			
	Porosidades	Fisuras	Falta de llenado	Uniformidad del cordón
Inspección Visual	Dispersa	Ninguna	Leve al final	Buena
Tintas Penetrantes	Inicio y final	Ninguna	Final de la soldadura	

(Alex Alvarez)

Figura 5.57. Resultados del ensayo de soldabilidad a 600 °C.

(Alex Alvarez)

5.15.2.5. Resultados finales de la primera serie

Todo el proceso se efectúo con la boquilla número 7, que en pruebas preliminares fue con la que se obtuvo mejor resultado al soldar. La mejor fluidez del aporte en conjunto con una muy buena adhesión se tuvo en el rango de entre 400 y 500 °C, por lo que la temperatura de prueba inicial para la segunda serie será de 400 °C.

Tabla 5.31. Parámetros de soldadura en la primera serie de prueba en TB.

Temperatura (°C)	Presión C_2H_2 (psi)	Presión O_2 (psi)	Longitud del cono (mm)	Tiempo de soldadura (min)	Fluidez del aporte	Adhesión del aporte
300	8,5	20	5-7	9.23	Buena	Bueno
400	8,5	20	8-11	6	Muy Buena	Muy Buena
500	8,5	20	8-10	7.1	Muy Buena	Muy Buena
600	8,5	20	8-10	6	Alta	Muy Buena

(Alex Alvarez)

5.15.3. SEGUNDA SERIE DE PRUEBA

Las temperaturas de prueba para esta serie son: 420 °C, 440 °C, 460 °C y 480 °C. Al igual que la serie anterior, después de 24 horas se realiza una

inspección visual previa a la inspección por tintas penetrantes para constatar fisuras, determinando la temperatura final del ensayo.

5.15.3.1. Resultados a 420 °C

Se tuvo poca porosidad, pero la falta de llenado se localizó en todo el cordón.

Tabla 5.32. Inspección en el ensayo de soldabilidad en TB para 420 °C.

Tipo de Inspección	Discontinuidades y defectos encontrados			
	Porosidades	Fisuras	Falta de llenado	Uniformidad del cordón
Inspección Visual	Poca	Ninguna	Inicio y final	Buena
Tintas Penetrantes	Ninguna	Ninguna	Toda la extensión	

(Alex Alvarez)

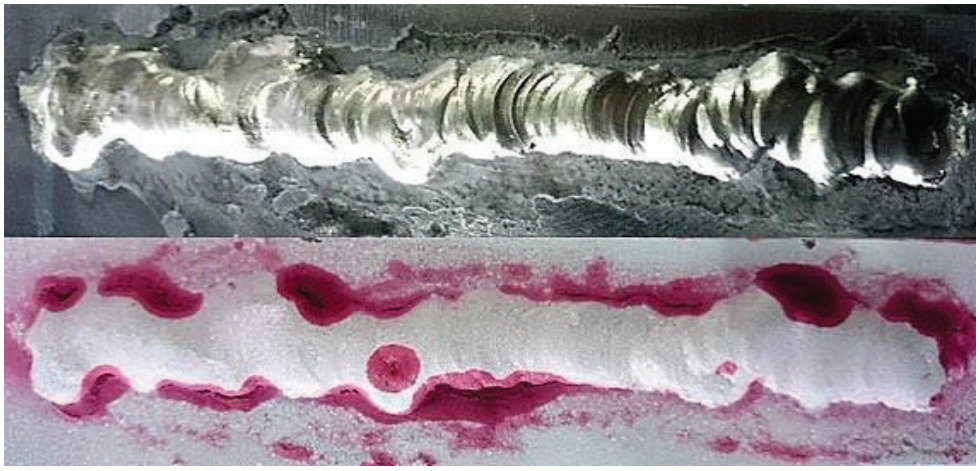


Figura 5.58. Resultados del ensayo de soldabilidad a 420 °C.

(Alex Alvarez)

5.15.3.2. Resultados a 440 °C

Falta de llenado se localizó mayormente en la pulgada final del cordón.

Tabla 5.33. Inspección en el ensayo de soldabilidad en TB para 420 °C.

Tipo de Inspección	Discontinuidades y defectos encontrados			
	Porosidades	Fisuras	Falta de llenado	Uniformidad del cordón
Inspección Visual	Agrupada	Ninguna	Final del cordón	Buena
Tintas Penetrantes	Al final	Ninguna	Inicio y final	

(Alex Alvarez)

Figura 5.59. Resultados del ensayo de soldabilidad a 440 °C.

(Alex Alvarez)

5.15.3.3. Resultados a 460 °C

Se cambió la varilla de aporte a una pulgada del final de la soldadura, por lo que no se tomará en cuenta las indicaciones de aquella zona.

Tabla 5.34. Inspección en el ensayo de soldabilidad en TB para 460 °C.

Tipo de Inspección	Discontinuidades y defectos encontrados			
	Porosidades	Fisuras	Falta de llenado	Uniformidad del cordón
Inspección Visual	Dispersa	Ninguna	Leve	Buena
Tintas Penetrantes	Al final	Ninguna	Leve	

(Alex Alvarez)

Figura 5.60. Resultados del ensayo de soldabilidad a 460 °C.

(Alex Alvarez)

5.15.3.4. Resultados a 480 °C

Se tiene una uniformidad media en el cordón con una apreciable falta de llenado en la parte al inicio y todo el tramo final del cordón de soldadura.

Tabla 5.35. Inspección en el ensayo de soldabilidad en TB para 480 °C.

Tipo de Inspección	Discontinuidades y defectos encontrados			
	Porosidades	Fisuras	Falta de llenado	Uniformidad del cordón
Inspección Visual	Dispersa	Ninguna	Al final	Media
Tintas Penetrantes	Inicio y final	Ninguna	Último tramo	

(Alex Alvarez)

Figura 5.61. Resultados del ensayo de soldabilidad a 480 °C.

(Alex Alvarez)

5.15.3.5. Resultados finales de la segunda serie

La mejor fluidez del aporte en conjunto con una muy buena adhesión se tuvo con la temperatura de 460 °C, misma temperatura donde se obtuvo la menor cantidad de discontinuidades y el cordón de mejor uniformidad; por lo tanto la temperatura a la que el hierro fundido dúctil presenta una adecuada soldabilidad se da a 460 °C.

Tabla 5.36. Parámetros de soldadura en la segunda serie de prueba en TB.

Temperatura (°C)	Presión C_2H_2 (psi)	Presión O_2 (psi)	Longitud del cono (mm)	Tiempo de soldadura (min)	Fluidez del aporte	Adhesión del aporte
420	8,5	20	8-12	5.2	Buena	Buena
440	8,5	20	8-12	5	Muy Buena	Muy Buena
460	8,5	20	8-12	5	Muy Buena	Muy Buena
480	8,5	20	8-12	5.1	Buena	Buena

(Alex Alvarez)

5.16. PROCESO DE SOLDADURA CON TB

En el proceso de soldeo, no se debe permitir que la temperatura baje de 320 °C, ya que por debajo de este valor ya no existe fluencia del material de aporte ni adhesión al metal base. Como se estableció en el estudio de soldabilidad, la temperatura óptima a la cual el hierro fundido dúctil es soldable mediante soldadura fuerte con soplete es de 460 °C. Al igual que en la soldadura con SMAW, después de la soldadura el enfriamiento será lento dentro del horno hasta el siguiente día.

5.16.1. PRECALENTAMIENTO EN HORNO REALIZADO PARA SMAW Y TB

El precalentamiento es clave para la soldadura de hierro fundido, como se revisó en capítulos anteriores, puede ser local o general. Para este estudio se eligió hacerlo de forma general en un horno tipo mufla ubicado en el Laboratorio de Tratamientos Térmicos de la Escuela Politécnica Nacional, el objetivo es que el precalentamiento sea uniforme en toda la superficie de las placas a soldar. Las siguientes figuras muestran la interfaz del software que maneja el horno al realizar un tratamiento térmico, en este caso, un precalentamiento.

5.16.2. OBSERVACIONES AL SOLDAR CON TB

En el momento que se realizaba el proceso de soldadura, uno de los puntos de las placas de sujeción sufrió una fisuración, provocando desalineación en la longitud del cupón, y un desfase de 4 mm entere placas. Se procedió a colocar

rápidamente las placas soldadas dentro del horno para su posterior enfriamiento, tratando de que el desalineamiento no avance.

Una de las ventajas de la soldadura fuerte es que su finalidad es la reparación de materiales; la falta de llenado, agrietamiento y otros defectos pueden ser corregidos mediante la nueva adición de metal de aporte, por lo que se aprovechó esta ventaja y al siguiente día se corrigió este defecto haciendo un precalentamiento local, rellenando la longitud distorsionada con el metal de aporte; posteriormente enfriando en arena.

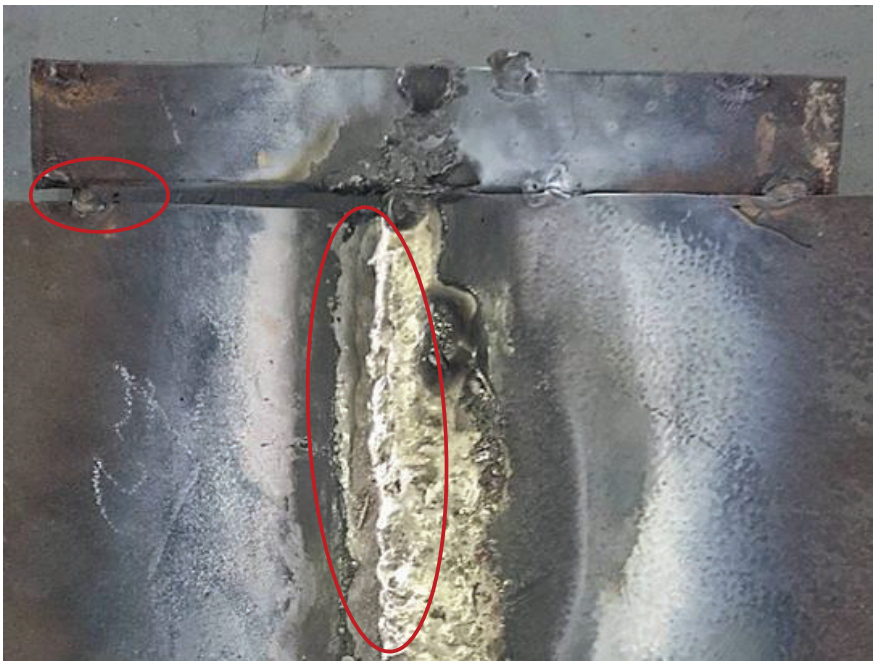


Figura 5.62. Agrietamiento de un punto se sujeción y desalineamiento en soldadura con TB.
(Alex Alvarez)

5.16.2.1. Resultados de esta prueba

Transcurridas 24 horas, se comprobó que el desfase entre placas había aumentado gradualmente; lo mismo había sucedido con la desalineación. Se resolvió realizar una nueva prueba de soldeo tomando las precauciones necesarias.

5.16.3. SEGUNDA PRUEBA DE SOLDADURA CON TB

Para evitar el desalineamiento, se contó con prensas que sujeten toda la longitud de las placas, además de realizar dos puntos de soldadura en la sujeción por cada placa, más uno entre ambas placas. La especificación del procedimiento de soldadura fuerte (BPS), se encuentra detallado en el Anexo 10.

Figura 5.63. Prensas y puntos de soldadura para evitar el desalineamiento entre placas.
(Alex Alvarez)

Terminado el proceso de soldeo, se colocó un puente para evitar distorsiones transversales entre placas.

Figura 5.64. Puente entre placas para evitar distorsión.
(Alex Alvarez)

Figura 5.65. Proceso de soldadura con TB.

(Alex Alvarez)

5.16.4. INSPECCIÓN VISUAL

Se observó falta de llenado en secciones no contiguas del cordón, de un solo lado; además de aparentes fisuras en los bordes del cupón, las mismas que se ubican en zona de descarte.

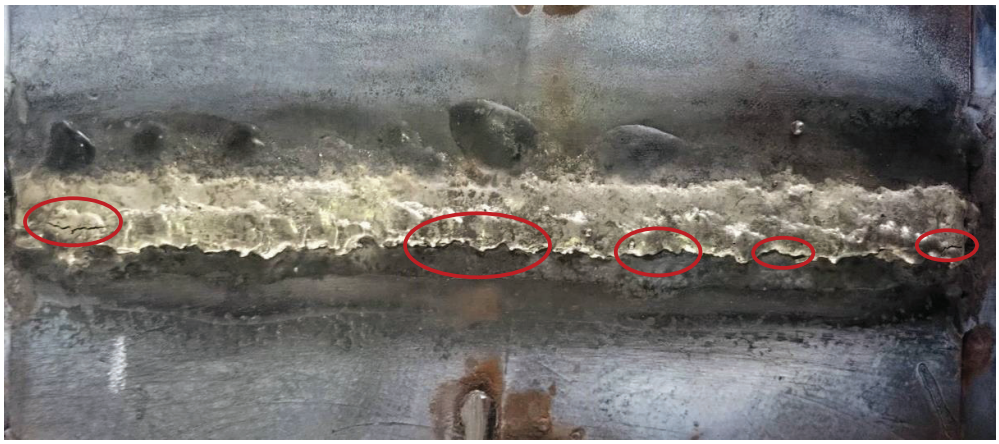


Figura 5.66. Defectos en el cupón de soldadura.

(Alex Alvarez)

Se desbastaron las zonas donde se tuvo aparentes fisuras, constatándose de que en realidad se trataban de pequeñas secciones que exhibían falta de llenado en la junta.

Figura 5.67. Falta de llenado en la zona de descarte superior.
(Alex Alvarez)

Figura 5.68. Falta de llenado en la zona de descarte inferior.
(Alex Alvarez)

5.16.5. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

5.16.5.1. Micrografías

Se realizó un ensayo macrográfico de la zona del cupón donde se produjo separación entre placas, se puede distinguir claramente la falta de llenado en la intercara derecha de la figura, mientras que del lado izquierdo existe una total adhesión

Figura 5.69. Falta de llenado en una placa, 40x.
(Alex Alvarez)

Según se muestra en la siguiente figura, la distancia entre el metal de aporte y el bisel de la junta es de 0.64 mm, en la parte inferior, el aporte y el metal base se ha separado 0.47 mm.

En la raíz existe 0.21 mm de separación. Se puede evidenciar también de manera leve, la microestructura del cobre en la parte media del aporte (cu-zn), el cual fue atacado con ácido férrico, se evidencia una estructura en forma de dendritas.

Figura 5.70. Medición de la falta de llenado, 80x.

(Alex Alvarez)

5.16.6. ENSAYOS DESTRUCTIVOS

Al cortar el cupón de soldadura para elaborar probetas, las placas se separaron, tal como se observa en la siguiente figura.

Figura 5.71. Separación del cupón de soldadura.

(Alex Alvarez)

Al analizar la zona donde ocurrió la separación, se observaron porosidades en el material de aporte y la intercara de soldadura.

Figura 5.72. Porosidades en el metal de aporte y la intercara.
(Alex Alvarez)

5.17. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La temperatura teórica según la gráfica presentada por la Guía para la soldadura de hierros fundidos (American National Standar & American Welding Society, 1989) fue de 251 °C, en el proceso experimental se encontró que está temperatura es óptima a la medida de 333 °C, según los mismos parámetros establecidos por la AWS, recalcando que puede ser aún mayor para porcentajes de carbono y espesores más altos.

En el ensayo realizado de tintas penetrantes se tienen varias indicaciones falsas, que podrían haber determinado errores en el establecimiento de la temperatura de precalentamiento, por lo que es imprescindible realizar una correcta inspección visual antes de proceder con este ensayo, el fin, claramente es detectar estas posibles indicaciones y no incurrir en errores.

El ensayo de soldabilidad para SMAW mostró que: la estabilidad del arco y la uniformidad del cordón de soldadura, aumentan gradualmente conforme se eleve la temperatura de precalentamiento.

Los ensayos de tracción exhiben propiedades mecánicas menores a las del metal base, situándose dentro de la resistencia del metal de aporte (397-482 MPa), valores que pueden perfectamente explicarse debido a la formación de microestructuras de transición duras tales como la ledeburita, formada por cementita y perlita.

Estas microestructuras de carácter frágil y duro fueron detectadas en las probetas M1 y M2, de los ensayos micrográficos, siendo consecuentes con los valores de durezas obtenidos alrededor de 200 HB correspondiente a la dureza de la perlita. La cementita ocupa mayoritariamente la zona parcialmente fundida; lugar donde se efectúo la rotura en la probeta T2, del ensayo de tracción, mismo lugar donde se localizó la rotura en el ensayo de doblado.

Con un porcentaje de elongación del 0% y una dureza aproximadamente de 800 HB, la cementita constituye una transformación microestructural sumamente perjudicial para los materiales, en este estudio, es la causante de que la zona dúctil presentada en las curvas esfuerzo vs deformación, sea prácticamente inexistente debido a su nula elongación.

Las discontinuidades para este proceso fueron mínimas, limitándose a la presencia de pequeñas cantidades de porosidad, detectadas en la zona de fractura de la probeta T2 y mordeduras en el cordón de soldadura no mayores a 1.5 mm; la distorsión entre placas fue menor a 1 °.

La soldabilidad con TB requiere una mayor temperatura de precalentamiento que con SMAW, debido a que el material de aporte RBCu-Zn tiene una temperatura de trabajo entre 760 y 955 °C, por lo que la gráfica para determinar la temperatura a la cual no hay agrietamiento, establecida por la Guía para la soldadura de hierro fundido no puede aplicarse.

En el ensayo de soldabilidad realizado, la temperatura de precalentamiento óptima para el proceso TB aplicado al hierro fundido dúctil es de 460 °C, valores consecuentes con las recomendaciones de la AWS D11.2 (American National

Standar & American Welding Society, 1989) de entre 425 a 480 °C; al Manual de Soldadura, Tomo II (American Welding Society, 1996), que recomienda temperaturas menores a 760 °C.

Valores muy altos de temperaturas de precalentamiento hacen que el material presente una fluidez muy alta, siendo apropiado para la unión por efecto capilar, por otro lado, valores bajos de temperaturas hacen que el aporte no moje la superficie del metal base, aún menos provee adhesión.

Con TB no se garantiza por completo la mojabilidad de las placas en el momento de soldeo, a pesar de que en el proceso realizado, el precalentamiento en horno garantiza una temperatura uniforme para las dos placas; se esmeriló la zona de la junta donde se hizo el cordón de depósito garantizando que no se rechace el material de aporte.

De forma cualitativa, la soldadura fuerte aplicada a los hierros dúctiles produce uniones muy débiles, sin admitir defectos, además hay que tener claro que el modo de soldeo es por difusión.

El bajo ciclo térmico debido a la naturaleza de este tipo de proceso, no alcanza para obtener microestructuras de transición, ya que la fusión entre el metal base y el metal de aporte no se efectúa.

Los preparativos y consideraciones al soldar hierro dúctil con soldadura fuerte deben ser mucho más meticulosos que al aplicar soldadura por arco con electrodo revestido; factores como la habilidad del soldador, preparación del material base y sujeción de las piezas durante el soldeo; constituyen factores decisivos al aplicar este tipo de unión por difusión (TB).

Resultó sumamente importante para unir hierro fundido mediante TB, quitar la capa superficial acentuada debido al proceso de fundición, de otra manera el aporte no moja la superficie, resultando en uniones con falta de llenado y erosión.

En la siguiente tabla se enlistan defectos registrados con TB, así como la acción a implementar para prevenirlos.

Tabla 5.37. Acciones correctoras en el proceso TB.

Defecto	Posible Causa	Acción Correctora
Falta de llenado	Separación excesiva entre placas	Reducción de la separación de la junta.
	Movimiento de placas en la junta.	Utilizar playos de presión o prensar para asegurar la sujeción.
Desalineamiento	Falla de sujeción entre piezas.	Colocar mínimo dos puntos de suelda en placas de sujeción
	Ajuste excesivo de las herramientas de sujeción.	El ajuste debe efectuarse en la medida entre que solo se restrinja el movimiento de las piezas a soldarse
Porosidades	Alto flujo de gas	Reducción del flujo de gases
	Mangueras de gas contaminadas o dañadas.	Revisar mangueras antes de la soldadura, cambiarlas periódicamente.

(Alex Alvarez)

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- El hierro fundido es soldable con SMAW mediante el empleo de electrodos de níquel que proveen depósitos maquinables de alta ductilidad; electrodos de níquel-hierro de aproximadamente una cantidad igual de contenido de sus componentes, providentes de alta resistencia mecánica, exitosos para hierros colados de alto contenido de fósforo; y por último electrodos de níquel-cobre propicios para juntas con características resistentes al desgaste.
- La temperatura a la cual el hierro fundido dúctil es soldable con SMAW es de 333°C, pudiéndose está temperatura elevarse si el material a soldar se encuentra cubierto con aceite o grasa, hasta los 400°C, esto garantizará que estas sustancias sean retiradas antes de proceder a la soldadura.
- En el ensayo de soldabilidad por arco eléctrico con electrodo revestido, cuánto más elevada es la temperatura de precalentamiento en el metal base, mejor es la presentación del cordón de soldadura, así mismo aumenta la estabilidad del arco.
- La transformación martensítica puede ser evitada al soldar con arco eléctrico y electrodo revestido, empleando una adecuada temperatura de precalentamiento, control efectivo de la temperatura entre pases y atenuación de los esfuerzos residuales mediante el enfriamiento lento posterior; sin embargo es inevitable la aparición de microestructuras de transición de características duras y frágiles como: ledeburita, constituida de cementita y perlita.
- La temperatura óptima de soldadura con TB para hierros fundidos dúctiles es de 460 °C, pudiéndose efectuar en el rango de 425 a 480 °C; fuera de

estos límites las propiedades de mojado, adhesión y fluidez del metal de aporte pueden ser sustancialmente afectadas, dando resultados negativos.

- En el ensayo de soldabilidad con soldadura fuerte, temperaturas de precalentamiento menores a 300 °C resultaban en una nula fluidez del metal de aporte, provocando que el metal base rechace su adición. En temperaturas mayores a 600 °C, el metal de aporte presentaba una fluidez demasiado alta, resultando imposible la formación de un cordón uniforme, temperaturas de precalentamiento mayores a esta son adecuadas cuando se quiere unir por soldadura fuerte usando el principio de capilaridad.
- La soldadura fuerte con soplete no es adecuada para soldar hierro dúctil, tratándose de uniones en espesores de 7 mm, con junta en “V”, y una longitud de 250 mm. Las ventajas inherentes de este proceso se pueden aprovechar en mejor medida limitándolo a la reparación en piezas de hierro colado agrietadas o rotas, inclusive de acero; siendo la longitud de reparación no mayor a 30 mm y menor a 7 mm de espesor.
- Si se quiere realizar una reparación, o en el mantenimiento de determinado componente, la soldadura SMAW resulta más conveniente si quiere una mayor resistencia en servicio dado el caso que la naturaleza de su unión es la fusión entre metales. Si se requiere una reparación rápida, económica y fácil de realizar, se puede optar por hacerlo con TB, teniendo claro que este proceso tiene su desventaja en el menor valor de resistencia mecánica de sus depósitos, susceptibles a fallas en servicio debido a que la esencia de este proceso es la unión por difusión y bajo punto de fusión de sus materiales de aporte.

6.2. RECOMENDACIONES

- Electrodos de acero inoxidable son inadecuados en la soldadura de hierros fundidos debido a su tendencia de formar a precipitados de carburos de cromo en los límites de grano dando como resultado, juntas altamente propensas al agrietamiento.
- Es necesario tener presente el factor humano, por lo que se debe emplear la mínima temperatura de precalentamiento posible en el proceso de soldadura, precautelando así, la integridad física del soldador.
- La ergonomía se debe tener en cuenta al soldar con SMAW, ya que este proceso puede llegar hasta los 5500 °C, por lo que el soldador debería tomar descansos de al menos 5 minutos para hidratarse.
- Las consecuencias de la formación de cementita y perlita pueden ser disminuidas con la aplicación de un revenido de alivio de esfuerzos a alta temperatura, con el fin de disminuir la dureza de estas microestructuras así también las tensiones residuales provocadas por los altos ciclos térmicos en la soldadura por arco.
- Es importante, al soldar hierro fundido dúctil, mediante soldadura fuerte con soplete, hacerlo con la mezcla combustible-comburente apropiada, en este estudio se comprobó que la combinación acetileno-oxígeno provee la suficiente intensidad de combustión que garantiza una unión eficaz.
- Cuando se habla de uniformidad del cordón en soldadura fuerte, resulta importante la habilidad del soldador, el fundente en el aporte es derretido antes que el aporte, por lo que hay que saber conducir la varilla de forma que esta al derretirse forme una unión más homogénea posible dejando de lado el fundente para su solidificación y evitando que este quede atrapado en la unión.
- Cuando se utilice soldadura fuerte para reparación se debe tener presente que si se usa un metal de aporte de aleación de cobre, la temperatura en servicio no puede ser mayor que 260°C incluso menos, debido al bajo punto de fusión del metal de aporte.

- Evaluar el costo/beneficio al momento de elegir un determinado proceso de soldadura, entre SMAW Y TB, el primero proveerá mayores características mecánicas a mayor costo económico y tiempo de trabajo, mientras que el segundo conllevará un ahorro económico pero con menores resultados positivos en términos de fortaleza de la unión.
- Precalentar el material en el horno o dispositivo de calentamiento a una temperatura superior de +60 °C a la temperatura de precalentamiento previamente establecida, con el objetivo de que las pérdidas de calor en el trayecto de la ubicación y sujeción de las placas en el lugar de soldeo, sean minimizadas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Almeida, S., & Villena, C. (2009). *Soldadura Fuerte de Acero Inoxidable Autenítico.* Quito.
2. American National Standar & American Welding Society. (1989). *Guide for welding cast irons.* (D 11.2).
3. American Society for Metals HandBook Volume 1. (1997). *Properties and Selection: Iron, Steels and High Performance Alloys.* USA.
4. American Society for Testing Materials. (2001). *Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials.* (E 18-03).
5. American Standard For Testing Materials. (1998). *Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings.* (A 247).
6. American Standard For Testing Materials. (2014). *Standard Specification for Ductile Iron Castings.* (A 534).
7. American Welding Society. (1996). *Manual de Soldadura Tomo I.* México: Prentice Hall.
8. American Welding Society. (1996). *Manual de Soldadura Tomo II.* Prentice Hall.
9. American Welding Society. (1997). *Standard methods for mechanical testing of welds.* (B 4.0).
10. Apraiz, J. (1971). *Fundiciones.* Madrid: Dossat.
11. Askeland, D. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales.* México.
12. Avner, S. (1992). *Introducción a la Metalurgía Física.* New York: McGraw Hill.
13. Baño, D. (2008). *Estudio de la Soldabilidad por Arco Eléctrico de la Fundición de Hierro Dúctil.* Quito.

14. Berner. (2002). *Técnología de soldadura*. Obtenido de Berner: https://shop.berner.eu/berner/es/category/621255

15. Callister, W. (2002). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales.* Barcelona: Reverté.

16. De la Vega, C. A. (1988). *Interpretación de radiografías para el control de la calidad en la soldadura industrial.* México: Marcombo.

17. De Vedia, L. A., & Svoboda, H. G. (2008). *Introducción a la Metalurgia de la Soldadura.*

18. Ductile Iron Society. (2013). *Ductile Iron Data*. Obtenido de Ductile Iron Society: http://www.ductile.org

19. *Electrodos de soldadura*. (2014). Obtenido de Teminsa: http://www.teminsa.com/blog/electrodosoldadura

20. Fluke 51-54 Series II. (2009). *Descripción del producto*. Obtenido de Thermometer: http://assets.fluke.com/manuals/5154____pospa0200.pdf

21. Fluke 63/66/68. (2009). *Manual de Uso*. Obtenido de http://www.testequipmentdepot.com/fluke/pdf/63_66_68.pdf

22. Giachino, J. (2001). *Técnica y Práctica de la Soldadura.* Barcelona: Reverté.

23. Gordillo, S. (2010). *Estudio de los Tratamientos Térmicos de Templado y Revenido en la Fundición de Herro Dúctil con Matriz Fetálica Ferrítica.* Quito.

24. Group GCE. (s.f.). *Welding Torches*. Obtenido de Security in Action: http://www.gcegroup.com/es/

25. Horwitz, H. (1990). *Soldadura Aplicaciones y Práctica.* México, D.F.: Alfaomega.

26. Indura. (2007). Manual de Sistemas y Materiales de Soldadura. *Manual de Soldadura*, 13-26.

27. Ingeniare. (2012). State of the art in structural integrity of welded joints and crack models for structures life management. *Revista Chilena de Ingeniería*, 279-292.

28. Kobel Steel. (2015). Weld imperfections and preventive measures. *Kobelco Welding*, 9-17.

29. Luddey, J., Zapata, A., & Mesa, D. (2007). Recuperación y Soldabiliad de Piezas de Fundición de Hierro. *Scientia Et Technica*, 237-242.

30. Metals Handbook Volume 6. (1998). *Welding, Brazing and Soldering.* USA.

31. Oerlikon. (1995). Catálogo de productos. *Manual de soldadura* , 24.

32. Smith, W., & Javad, H. (2004). *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales.* México: McGraw-Hill.

33. *Soldaduras Zelecta* . (2004). Obtenido de Soldaduras Zelecta S.A.: http://soldaduraszelecta.com/productos/soldadura-zelecta-724-p-182.html

34. Ultra Weld. (2012). *Welding Rods*. Obtenido de http://ultraweldusa.com/

35. Unfried, J., & Tabares, E. (2004). Soldabilidad de Fundiciones Grises con Materiales de Aporte Tipo RBCuZn, ERCuAl y ERNiFe-Cl. *Red de Revistas Científicas de America Latina, el Caribe, España y Portugal*, 75-78.

36. Universidad Politécnica de Valencia. (2013). *Materiales*. Obtenido de Estructuras de investigación: http://www.upv.es/index-es.html

37. Vanilla, Manuel. (s.f.). *Elementos amovibles y fijos no estructurables*. Obtenido de manuelvallina.blogspot.com

ANEXOS

ANEXO 1

Análisis de espectrometría de chispa para el metal base

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA

Resultados de análisis por Espectrometría de Chispa

Solicitante	:	Sr. Alex Álvarez
No. Referencia	:	RM - 8340
Fecha	:	29 - 09 - 2015
Muestras recibidas	:	Una muestra de hierro dúctil 65-45-12

La cuantificación de los metales presentes en la muestra se realizó empleando el Espectrómetro de Chispa marca BRUKER modelo Q4TASMAN. A continuación los resultados obtenidos:

Metales	Placa (%)
Carbono (C)	5,40
Silicio (Si)	2,32
Manganeso (Mn)	0,32
Fósforo (P)	0,01
Azufre (S)	0,17
Cromo (Cr)	0,02
Magnesio (Mg)	0,15
Níquel (Ni)	0,04
Cobre (Cu)	0,13
Aluminio (Al)	0,03
Cerio (Ce)	0,12
Zinc (Zn)	0,04
Plomo (Pb)	0,04
Antimonio (Sb)	0,18
Hierro (Fe)	90,90

Ing. Ernesto de la Torre C., PhD.
Jefe de Departamento

MSc. Evelyn Criollo
Jefe de Laboratorio

ANEXO 2

Registro del ensayo de tracción para el metal base

ILPM ENGINEERING CIA LTDA
Ingeniería Líder en Proyectos y Materiales

Informe No.
ILPM 2015 - 256 - T

REGISTRO DE ENSAYOS DE TRACCIÓN
NORMAS: ASTM A370 / ASTM E8

Cliente:	FUNDIRECICLAR S.A	Fecha de Ensayo:	05/08/2015
Solicitado Por:	Michael Moreno	Fiscalización:	Sin fiscalización
Material:	INEN 2499 65-45-12	Probeta elaborada por	FUNDIRECICLAR S.A
Temperatura	22°C	Humedad Relativa	54%

Objetivo de ensayo:

Control de Calidad de Material	x	Control de Soldadura	

Probeta #	Diametro Promedio	Ancho Promedio	Longitud Inicial	Longitud Final
	mm.	mm.	mm.	mm.
B-093-3-14	13,2	NA	50	60,58

Probeta #	Area	Carga de Fluencia	Limite de Fluencia Sy		Carga de Rotura	Limite de Rotura SUT		Elongación 50mm	Localización de Rotura
	mm2.	kN	KSI	MPa	kN	KSI	MPa	%	
B-093-3-14	136,85	48,50	51,40	354	71,60	75,88	523	21,16	NA

Observaciones:

Para Juntas Soldadas: FJS Falla Junta Soldada
FMB Falla en Material Base

Notas:

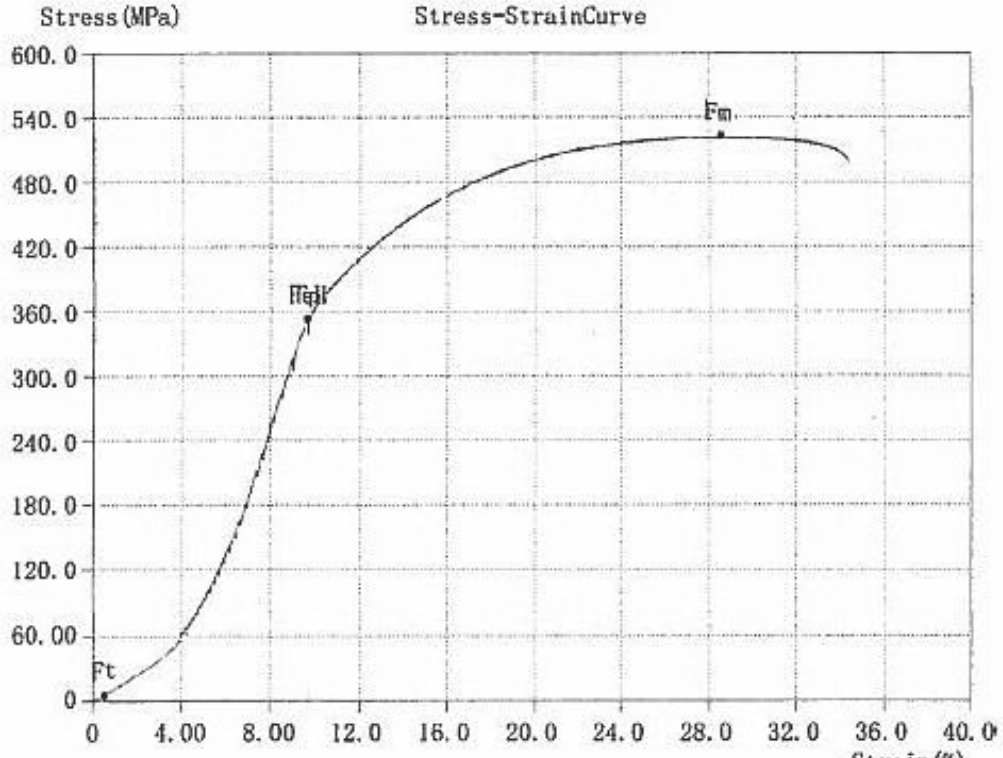
Anexo Curvas de Ensayo
El presente Informe NO debe ser reproducido parcialmente.
Certificamos que los ensayos realizados se han realizado bajo las indicaciones de ASTM E8.

Realizado por:	Aprobado por:	Cliente / Fiscalización:
Jeferson Carvajal ILPM Engineering	REVISADO Mec. Patricio Estupiñán Jefe de Laboratorio	FUNDIRECICLAR S.A

ILPM CIA LTDA

REGISTRO DE ENSAYO DE TRACCION

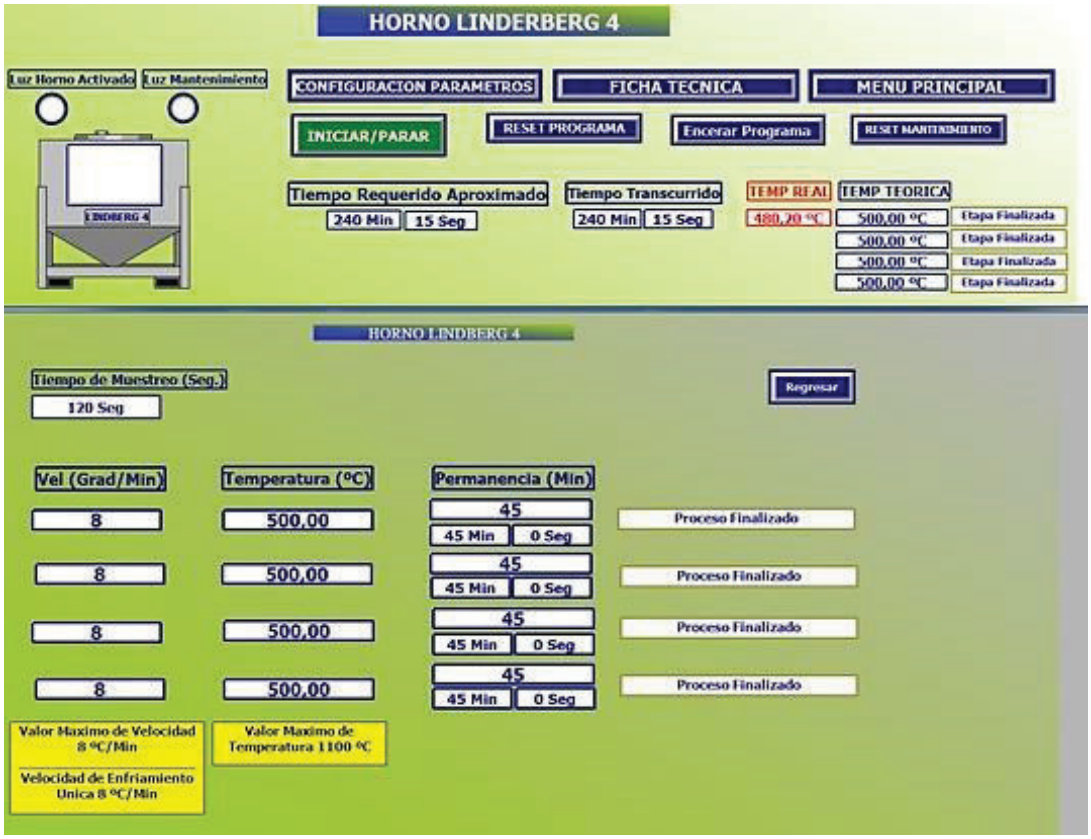
Customer	FUNDIRECICLAR S.A	TestDate	8/5/2015
Coil No/Packet No	B-093-3-14	Type	Circle
Size(mm)	13.20	So(mm^2)	136.85
Lo(mm)	50	Lu(mm)	60.58
Fm(kN)	71.60	Rm(MPa)	523
FeL(kN)	48.50	ReL(MPa)	354



ILPM CIA. LTDA
REVISADO

ANEXO 3

Software controlador del horno Linderberg usado en el precalentamiento



ANEXO 4

Especificaciones del electrodo usado para SMAW

MG 220

An electrode for difficult-to-weld cast iron

MESSER
MG Welding Products

GENERAL CHARACTERISTICS:

An inexpensive electrode that can be used in all positions to repair castings that do not require machining after welding. Deposits have close color match to cast iron and if exposed to the atmosphere will rust like the original casting. Best choice for highly contaminated casting or cast irons where nickel alloys fail to adhere.

APPLICATIONS:

Welding of castings that are saturated with oil, grease, chemicals and other contaminants that make welding with other rods almost impossible. Often used to repair burned furnace grates and to join problem cast irons to steel. This electrode is also used as the first pass or as a covering for the cast iron; final passes are put in with one of the MG machinable electrodes. Commonly used to weld cracked machine bases, housings and for build-up of worn areas subjected to abrasion.

TECHNICAL DATA:

Typical Tensile Strength	Up to 60,000 psi (414 N/mm^2)
Hardness	Approx. 286 HB
Color Match	Good
Polarity	AC or DC reverse (electrode +)

Diameter	Amperage
3/32" (2.4mm)	45-70
1/8" (3.2mm)	75-110
5/32" (4.0mm)	100-150

PROCEDURE:

Clean weld area if possible. Remove surface contaminants and all sharp edges. Bevel joint to form a "U" groove. A bead hole must be welded at right angles to each end of all cracks to prevent spreading during welding. Use low amperage and maintain a short arc. Short stringer beads or narrow weave beads should be used to prevent excessive heat build-up. When breaking the arc always fill the crater and drag rod back over the weld deposit. Peening while still hot will help reduce stresses. When restriking the arc start on previously deposited weld metal, not on the base material. Allow part to cool slowly.

ANEXO 5

Especificación del procedimiento de soldadura (WPS) para SMAW

ESCUELA POLITÉNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)

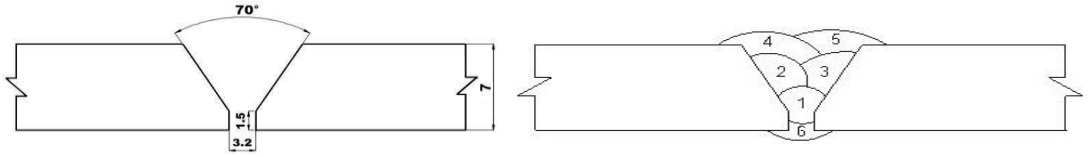
Compañía: EPN	**Identificación:** EPN-01
WPS N°: EPN-01	**Fecha:** 02/10/2015
Revisión: 2	**Organización:** Escuela Politécnica Nacional
PQR soporte N°: EPN-PQR-01	

ARTÍCULO I. JUNTA UTILIZADA		**ARTÍCULO II. TÉCNICA DE SOLDADURA:**	
Tipo de Junta:	A tope	**Proceso:**	SMAW
Preparación de la Junta:	En ranura	**Tipo:**	Manual [X] Semiautomática [ ] Automática [
Método:	Amoladora	**Soldadura a:**	Un lado [X] Dos lados [ ]
Configuración del Bisel:	En "V"	**Cordón de respaldo:**	SI [X] NO [ ]
Ángulo de Ranura:	70°	**Tiempo entre pases:**	5 minutos
Apertura de Raíz:	3.2 mm	**Electrodo:**	Simple [X] Múltiple [ ]
Placa de Respaldo:	SI [X] NO [ ]	**Control de Distorsión:**	Playos de presión
ARTÍCULO III. METAL BASE:		**Sujeción:**	SI [X] NO [ ]
Tipo	Hierro fundido Dúctil	**Limpieza:**	Eliminación de carburos a 400 °C
Grado:	65-45-12	**Pase de Raíz:**	Amoladora (Disco de corte)
Espesor Nominal:	7 mm	**Pases subsiguientes:**	Cepillo y grata
Medidas Aproximadas:	250 x 150 mm		

ARTÍCULO IV. METAL DE APORTE:		**ARTÍCULO V. POSICIÓN DE SOLDADURA:**	
Especificación o Norma:	AWS 5.15	**Posición de soldadura:**	1G
Clasificación:	ENiFe-Cl	**Progresión:**	De derecha a izquierda
Diámetro:	3.2 mm	**Técnica:**	Un pase [ ] Varios pases [X]
Casa Comercial:	MESSER		
Designación Comercial:	MG ENiFe		

ARTÍCULO VI. TRATAMIENTO TÉRMICO:	**ARTÍCULO VII. NOTAS:**
Precalentamiento: 400 °C	
Tiempo de Precalentamient 45 minutos	Verificar la alineación de las partes
Técnica de calentamiento: Horno	Limpieza de bisel posterior al calentamiento para la
Técnica de Mantención de Temperatura:	eliminación de carbono.
Quemador a gas en la parte inferior a la	Limpieza entre pases.
soldadura y flameo entre pases.	Control exhaustivo de temperaturas entre pases.
Post-Soldadura:	Flamear el cordón de soldadura entre pases.
Enfriamiento lento en horno.	Enfriamiento lento posterior a la soldadura.

DETALLE DE LA JUNTA:



Número de Pase	Metal de Aporte		Corriente		Tensión de Trabajo (V)	Velocidad de Avance (cm/min)	Técnica de Soldadura	
	Clase	Ø	Tipo y Polaridad	Intensidad (A)			Oscilado	Recto
1	ENiFe-Cl	3.2	AC	62-65	16-20	2,63		X
2	ENiFe-Cl	3.2	AC	75-80	17-24	6,25	X	
3	ENiFe-Cl	3.2	AC	84-88	17-20	5,56	X	
4	ENiFe-Cl	3.2	AC	87-90	17-21	4,39	X	
5	ENiFe-Cl	3.2	AC	90-92	17-26	4,55	X	
6	ENiFe-Cl	3.2	AC	90-92	17-24	7,31	X	

Realizado por:	**Examinador o Entidad de Aprobación:**
Alex Alvarez	Ing. Gabriel Velasteguí

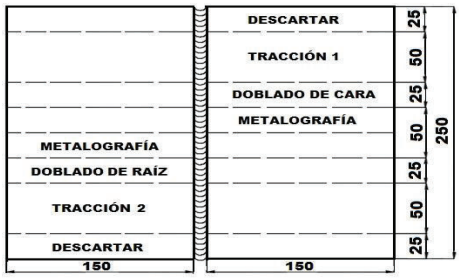
ANEXO 6

Registro de la calificación del procedimiento (PQR) para SMAW

ESCUELA POLITÉNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA
REGISTRO DE LA CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO (PQR)

Compañía: EPN
Fecha: 03/10/2015
WPS N°: EPN-PQR-01
Revisión: 2
PQR soporte N°: EPN-01

ESQUEMA:



ARTÍCULO III. METAL BASE:

Tipo	Hierro fundido Dúctil
Grado:	65-45-12
Espesor Nominal:	7 mm
Medidas Aproximadas:	250 x 150 mm

ARTÍCULO IV. METAL DE APORTE:

Especificación o Norma:	AWS 5.15
Clasificación:	ENiFe-Cl
Diámetro:	3.2 mm
Casa Comercial:	MESSER
Designación Comercial:	MG ENiFe

ARTÍCULO II. TÉCNICA DE SOLDADURA:

Proceso: SMAW
Tipo: Manual [X] Semiautomática [ ] Automática [ ]
Soldadura a: Un lado [X] Dos lados [ ]
Cordón de respaldo: SI [X] NO [ ]
Tiempo entre pases: 5 minutos
Electrodo: Simple [X] Múltiple [ ]
Control de Distorsión: Playos de presión
Sujeción: SI [X] NO [ ]
Limpieza: Eliminación de carburos a 400 °C
Pase de Raíz: Amoladora (Disco de corte)
Pases subsiguientes: Cepillo y grata

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS:

Corriente: AC [X] CCEP [ ] CCEN [ ]
Amperaje: 62-92 A **Voltaje:** 16-24 V

ARTÍCULO V. TÉCNICA DE SOLDADURA:

Posición de soldadura: 1G
Progresión: De derecha a izquierda
Técnica: Un pase [ ] Varios pases [X]

ARTÍCULO VI. TRATAMIENTO TÉRMICO:

Precalentamiento: 400 °C
Tiempo de Precalentamiento: 45 minutos
Técnica de calentamiento: Horno
Post-Soldadura: enfriamiento lento en horno

ARTÍCULO VII. NOTAS:

Verificar la alineación de las partes
Limpieza de bisel posterior al calentamiento para la eliminación de carbono.
Limpieza entre pases.
Control exhaustivo de temperaturas entre pases.
Flamear el cordón de soldadura entre pases.
Enfriamiento lento posterior a la soldadura.

EXÁMENES

ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

INSPECCIÓN VISUAL

Mediana Uniformidad del cordón
Mordeduras de longitud máxima 1,5 mm

ENSAYO MACROGRÁFICO

	Observaciones
Probeta M1	6 pases de soldadura No hay presencia de discontinuidades
Probeta M1	6 pases de soldadura No hay presencia de discontinuidades

ENSAYO MICROGRÁFICO

	Zona afectada por el calor	Zona de fusión parcial	Zona de fusión total
Probeta M1	Estructura ferrítica-perlítica	Ledeburita	Crecimiento dendrítico
Probeta M2	Estructura ferrítica-perlítica	Ledeburita	Crecimiento dendrítico

ENSAYOS DESTRUCTIVOS

ENSAYO DE TRACCIÓN

Probeta	Área	Elongación	Límite de fluencia	Limite de rotura	Rotura
T1	250.68 mm2	2.8 %	58.61 ksi	60.35 ksi	Junta soldada
T2	253.23 mm2	3.12 %	58.76 ksi	63.12 ksi	ZAC

ENSAYO DE DOBLADO

Probeta	Tipo de Doblado	Zona de rotura	Observación
D1	Cara	ZFP: Entre metal base y aporte	No soportó el ángulo de doblez.
	Raíz	ZFP: Entre metal base y aporte	No soportó el ángulo de doblez.

Realizado por:
Alex Alvarez

Examinador o Entidad de Aprobación:
Ing. Gabriel Velasteguí

ANEXO 7

Registro del ensayo de tracción para la probeta T1 y T2

ILPM ENGINEERING CIA LTDA
Ingeniería Líder en Proyectos y Materiales

Ministerio de Industrias y Productividad

ID DOCUMENTO
ILPM-RT-16 (Informe)
Revisión hro. 02

REGISTRO DE ENSAYOS DE TRACCIÓN
NORMAS: ASTM A370 / ASTM E8

Informe No.
ILPM 2015 - 354 - T

Cliente:	Alex Alvarez	**Fecha de Ensayo:**	16/10/2015
Solicitado Por:	Alex Alvarez	**Fiscalización:**	Sin Fiscalización
Material:	65-45-12	**Probeta elaborada por**	Alex Alvarez
Temperatura	21°C	**Humedad Relativa**	62%

Objetivo de ensayo:

Control de Calidad de Material		Control de Soldadura	X

Probeta #	Espesor Menor	Ancho Menor	Longitud Inicial	Longitud Final	OBSERVACIONES
	mm.	mm.	mm.	mm.	
T1	6,54	38,33	50	51,40	65-45-12
T2	6,61	38,31	50	51,56	65-45-12

Probeta #	Area	Carga de Fluencia	Límite de Fluencia Sy		Carga de Rotura	Límite de Rotura SUT		Elongación 50mm	Localización de Rotura
	mm2.	kN	KSI	MPa	kN	KSI	MPa	%	
T1	250,68	101,3	58,61	404	104,3	60,35	416	2,80	FIS
T2	253,23	102,6	58,76	405	110,2	63,12	435	3,12	ZAC

Observaciónes:

Para Juntas Soldadas: FIS Falla Junta Soldada
FMB Falla en Material Base
ZAC Zona Afectada Térmica

Notas:

Anexo Curvas de Ensayo
El presente informe NO debe ser reproducido parcialmente.
Certificamos que los ensayos han sido realizados bajo las indicaciones de ASTM E8.

ILPM Cía. Ltda. ha sido evaluado por el Servicio de Acreditación Ecuatoriano (SAE) para la aprobación como organismo designado para la evaluación de la conformidad (OEC) otorgada por el Ministerio de Industrias y Productividad (MIPRO), en base a la resolución 15 232 para la ejecución de ensayos de Tensión.

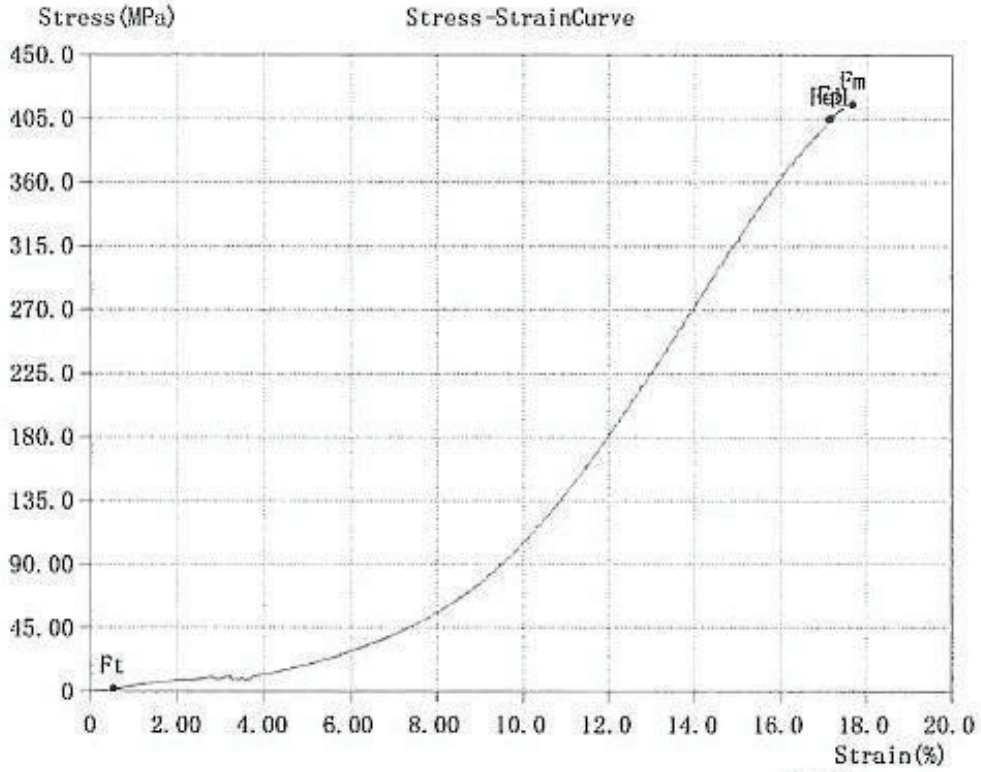
Realizado por:	Aprobado por:	Cliente:	Fiscalización:
Tlgo. Cesar Vizuete ILPM Engineering	Ing. Patricio Estupiñán Jefe de Laboratorio	Alex Alvarez	

ILPM CIA. LTDA. REVISADO

ILPM CIA LTDA

REGISTRO DE ENSAYO DE TRACCION

Customer	ALEX ALVAREZ	TestDate	10/16/2015
Coil No/Packet No	T1	Type	Flat
Size(mm)	6.54*38.33	So(mm^2)	250.68
Lo(mm)	50	Lu(mm)	51.40
Fm(kN)	104.3	Rm(MPa)	416
FeL(kN)	101.3	ReL(MPa)	404



ILPM CIA. LTDA.
REVISADO

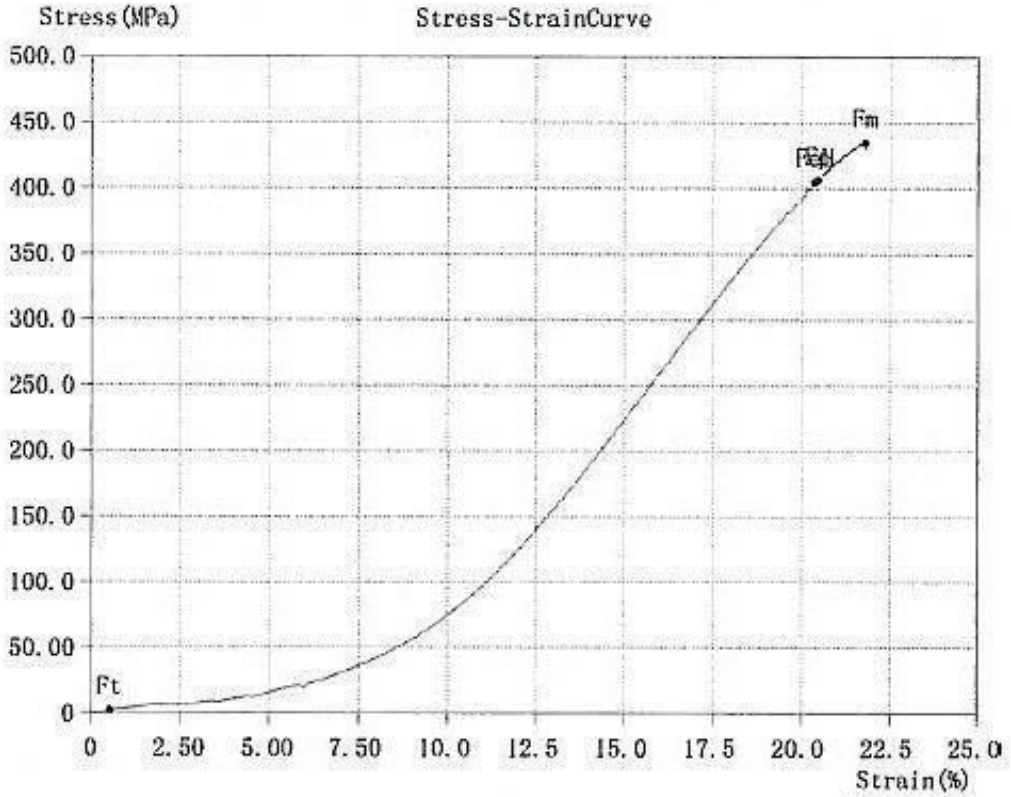
ANEXO 8

Registro del ensayo de tracción para la probeta T2

ILPM CIA LTDA

REGISTRO DE ENSAYO DE TRACCION

Customer	ALEX ALVAREZ	TestDate	10/16/2015
Coil No/Packet No	T2	Type	Flat
Size(mm)	6.61*38.31	So(mm²)	253.23
Lo(mm)	50	Lu(mm)	51.56
Fm(kN)	110.2	Rm(MPa)	435
FeL(kN)	102.6	ReL(MPa)	405



ANEXO 9

Especificaciones de la varilla de aporte para TB

MG 130

Super strong general use brazing rod

MESSER
MG Welding Products

GENERAL CHARACTERISTICS:

Premium alloy available both bare and flux-coated for general maintenance repair with the torch. At 1400°-1600°F the deposit has controlled fluidity which makes it ideal for surfacing and build-up of parts subjected to frictional wear. When the temperature is increased to 1650°-1750°F the alloy becomes very thin flowing and will produce high strength joints with only .001" to .003" clearance.

APPLICATIONS:

1. **Low temperature** - overlaying and build-up of gear teeth, bearings, shafts, valve seats, wedge bars and steering knuckles.

2. **High temperature** - for close fitting joints on broken drills, mill cutters, furniture and bicycle assemblies, attaching carbide cutting tips and many other applications requiring high strengths.

This alloy is designed to build up and join carbon steels, alloy steels, cast iron and many non-ferrous materials to themselves or multiple combinations.

TECHNICAL DATA:

Typical Tensile Strength	Up to 70,000 psi (483 N/mm^2)
Working Temperature	1400°F-1750°F (760°C-955°C)
Remelt Temperature	Approx. 1800°F (980°C)
Hardness	Approx. 120 HB

Diameters Available	1/16" (1.6mm)	3/32" (2.4mm)	1/8" (3.2mm)	3/16" (5.0mm)

PROCEDURE:

Rough grind surfaces to be joined or built up. Paint surfaces to be joined and protected from oxidation with MG 130F flux. When using flux coated rods it is not necessary to use the paint-on flux unless additional protection is required. Always use a neutral flame concentrated on the base metal, not on the molten alloy. Keep torch in constant motion to prevent overheating of local areas. When used as a joining alloy small rods are recommended but for surfacing and build-up the larger diameter rods should be used. Additional passes can be applied without the need of removing flux residue from previous passes. Allow part to cool slowly. Remove flux by chipping and wire brushing.

ANEXO 10

Especificación del procedimiento de soldadura (BPS) para TB

ESCUELA POLITÉNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA FUERTE (BPS)

Compañía: EPN	**Identificación:** EPN-02
WPS N°: EPN-02	**Fecha:** 22/10/2015
Revisión: 2	**Organización:** Escuela Politénica Nacional
PQR soporte N°:	

ARTÍCULO I. JUNTA UTILIZADA

Tipo de Junta:	A tope
Preparación de la Junta:	En ranura
Método:	Amoladora
Configuración del Bisel:	En "V"
Ángulo de Ranura:	70 °
Apertura de Raíz:	3.2 mm
Placa de Reslpaldo:	SI [ ] NO [X]

ARTÍCULO II. TÉCNICA DE SOLDADURA:

Proceso:	Soldadura fuerte con soplete (TB)
Tipo:	Manual [X] Semiautomática [ ] Automática [ ]
Soldadura a:	Un lado [ ] Dos lados [X]
Cordón de respaldo:	SI [X] NO [ ]
Tiempo entre pases:	3 minutos
Varilla:	Simple [X] Múltiple [ ]
Control de Distorsión:	Prensas
Sujeción:	SI [X] NO [ ]
Limpieza:	Eliminación de carburos a 500 °C
Pase de raíz:	Amoladora (Disco de corte)
Pases subsiguientes:	Cepillo y grata

ARTÍCULO III. METAL BASE:

Tipo:	Hierro fundido Dúctil
Grado:	65-45-12
Espesor Nominal:	7 mm
Medidas Aproximadas:	250 x 150 mm

ARTÍCULO IV. METAL DE APORTE:

Especificación o Norma:	AWS 5.27
Clasificación:	RBCu-Zn
Diámetro:	3.2 mm
Casa Comercial:	MESSER
Designación Comercial:	MG 130 FC

ARTÍCULO V. POSICIÓN DE SOLDADURA:

Posición de soldadura: 1G
Progresión: De derecha a izquierda
Técnica: Un pase [ ] Varios pases [X]

ARTÍCULO VI. GASES DE LLAMA:

Presión de Oxígeno: 8.5 psi
Presión de Oxígeno: 20 psi
Tipo de llama: Neutra, ligeramente oxidante
Tamaño de boquilla: 7 (2.1 mm)

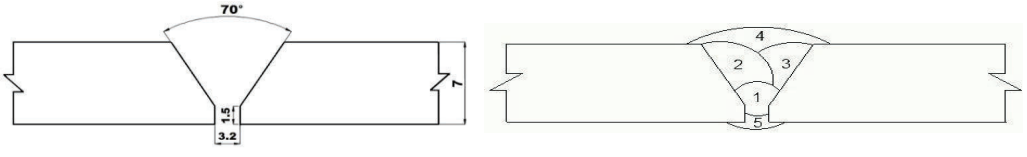
ARTÍCULO VII. TRATAMIENTO TÉRMICO:

Precalentamiento: 500 °C
Tiempo de Precalentamiento: 45 minutos
Técnica de calentamiento: Horno
Técnica de Mantención de Temperatura:
Quemador a gas en la parte inferior a la soldadura y flameo entre pases.
Post-Soldadura:
Enfriamiento lento en horno.

ARTÍCULO VIII. NOTAS:

Limpieza de bisel posterior al calentamiento para la eliminación de carbono.
Verificar la alineación de las partes
Limpieza entre pases.
Control exhaustivo de temperaturas entre pases.
Flamear el cordón de soldadura entre pases.
Enfriamiento lento posterior a la soldadura.

DETALLE DE LA JUNTA:



Número de Pase	Metal de Aporte		Velocidad de avance	Técnica de Soldadura	
	Clase	ø	cm/min	Oscilado	Recto
1	RBCu-Zn	3.2	3,91		X
2	RBCu-Zn	3.2	2,95	X	
3	RBCu-Zn	3.2	3,09	X	
4	RBCu-Zn	3.2	4,55	X	
5	RBCu-Zn	3.2	4,90	X	

Realizado por:	**Examinador o Entidad de Aprobación:**
Alex Alvarez	Ing. Gabriel Velasteguí