

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **ANÁLISIS DE LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR EN ACEROS HIPOEUTECTOIDES**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO  
MECÁNICO**

**DANIEL ALEJANDRO AYALA OCHOA  
GALO EDUARDO MOSQUERA RECALDE**

**DIRECTOR: ING. HOMERO BARRAGÁN Msc.**

**Quito, Febrero 2011**

## DECLARACIÓN

Nosotros, Daniel Alejandro Ayala Ochoa y Galo Eduardo Mosquera Recalde, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

**Daniel Alejandro Ayala Ochoa**

---

**Galo Eduardo Mosquera Recalde**

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Daniel Alejandro Ayala Ochoa y Galo Eduardo Mosquera Recalde, bajo mi supervisión.

---

**ING. HOMERO BARRAGÁN, M.Sc.**

**DIRECTOR DEL PROYECTO**

## AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios por guiarnos en este arduo camino y llenarnos de sabiduría.

A nuestras familias por su amor, comprensión y apoyo incondicional.

A los ingenieros Homero Barragán y Gabriel Velasteguí que han sido el pilar fundamental para el desarrollo de este proyecto y artífices de un cambio profundo en nuestras vidas a través de la enseñanza.

A los amigos que colaboraron de manera desinteresada en el desarrollo exitoso de este trabajo: Andrés Guanuchi, Cesar Arguello, a los amigos del Laboratorio de Soldadura y del Laboratorio de Metalografía.

***Daniel***

***Galo***

## DEDICATORIA

A Dios y a mis padres que me han acompañado a través de la vida en las buenas y en las malas circunstancias.

A Denisse y Eduardo que aparecieron en mi vida en el momento indicado para mejorarla y darle un rumbo.

A mis hermanos, que con su apoyo incondicional, he llevado a cabo gran parte de mis objetivos.

***Galo***

***Daniel***

## INDICE DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN .....	i
CERTIFICACIÓN .....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
INDICE DE CONTENIDOS .....	v
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xiv
ÍNDICE DE TABLAS .....	xx
INDICE GRÁFICOS .....	xxii
RESUMEN .....	xxiii
PRESENTACIÓN .....	xxv
CAPÍTULO 1 .....	1
1. PROCESOS DE SOLDADURA .....	1
1.1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE SOLDADURA .....	1
1.1.1. DEFINICIÓN DE SOLDADURA .....	1
1.1.2. POSICIONES DE SOLDADURA.....	1
1.1.3. JUNTA Y TIPOS DE JUNTAS.....	1
1.1.4. CORDÓN Y TIPOS DE CORDONES.....	2
1.1.4.1. TIPOS DE CORDÓN.....	2
1.1.5. BISELES Y CONFIGURACIONES DE BISELES .....	3
1.1.5.1. ELECCIÓN DEL TIPO DE BISEL:.....	3
1.1.6. CLASIFICACIÓN AWS DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA .	4
1.1.7. DOCUMENTACIÓN DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL .....	5
1.1.7.1. WPS: ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA.....	6
1.1.7.2. PQR: REGISTRO DEL PROCEDIMIENTO DE CALIFICACIÓN .....	6
1.1.7.3. WPQ: CALIFICACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL SOLDADOR ..	6
1.1.8. FUENTE DE CALOR EN SOLDADURA .....	6
1.2. PROCESO SMAW .....	8
1.2.1. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	8

1.2.2.	ELECTRODOS O CONSUMIBLES DEL PROCESO .....	8
1.2.2.1.	ELECTRODOS CON REVESTIMIENTOS BÁSICOS .....	9
1.2.2.2.	ELECTRODOS CON REVESTIMIENTO RUTÍLICO .....	9
1.2.2.3.	ELECTRODOS CON REVESTIMIENTO CELULÓSICO.....	10
1.2.3.	FUNCIONES DEL REVESTIMIENTO DE LOS ELECTRODOS .	10
1.2.4.	VENTAJAS Y USOS PRINCIPALES.....	11
1.2.5.	LIMITACIONES DEL PROCESO .....	11
1.2.6.	CIRCUITOS DE SOLDADURA .....	12
1.2.7.	VARIABLES PRINCIPALES DEL PROCESO SMAW.....	13
1.2.7.1.	CORRIENTE DE SOLDADURA .....	13
1.2.7.2.	VOLTAJE EN EL ARCO (V).....	13
1.2.7.3.	VELOCIDAD DE SOLDADURA (S).....	14
1.2.8.	FUENTE DE ENERGÍA.....	14
1.2.9.	CLASIFICACIÓN DE ELECTRODOS SEGÚN AWS .....	15
1.2.9.1.	CLASIFICACIÓN AWS DE LOS ELECTRODOS REVESTIDOS PARA ACEROS DE BAJO CARBONO (AWS A5.1) .....	15
1.3.	PROCESO GMAW .....	16
1.3.1.	FUNDAMENTO TEÓRICO.....	16
1.3.2.	MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DEL METAL.....	16
1.3.2.1.	TRANSFERENCIA POR CORTOCIRCUITO .....	16
1.3.2.2.	TRANSFERENCIA GLOBULAR.....	17
1.3.2.3.	TRANSFERENCIA POR ASPERSIÓN O SPRAY.....	18
1.3.3.	VENTAJAS Y USOS PRINCIPALES.....	19
1.3.4.	LIMITACIONES DEL PROCESO .....	20
1.3.5.	CIRCUITO DE SOLDADURA.....	20
1.3.6.	VARIABLES DE SOLDADURA DEL PROCESO GMAW.....	20
1.3.6.1.	CORRIENTE DE SOLDADURA Y POLARIDAD .....	21
1.3.6.2.	VOLTAJE .....	21
1.3.6.3.	VELOCIDAD DE SOLDADURA .....	22
1.3.7.	FUENTES DE ENERGÍA.....	22
1.3.8.	ESPECIFICACIÓN DE ELECTRODOS .....	22
1.3.9.	GASES DE PROTECCIÓN .....	23

1.3.9.1. PROPIEDADES DE LOS GASES .....	24
1.3.9.2. ARGÓN .....	25
1.3.9.3. HELIO.....	25
1.3.9.4. DIÓXIDO DE CARBONO .....	26
1.4. PROCESO SAW .....	26
1.4.1. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	26
1.4.2. VENTAJAS Y USOS PRICIPALES.....	26
1.4.3. CIRCUITO DE SOLDADURA.....	27
1.4.4. LIMITACIONES .....	28
1.4.5. VARIABLES DE SOLDADURA DEL PROCESO SAW .....	28
1.4.5.1. AMPERAJE DE SOLDADURA.....	28
1.4.5.2. VOLTAJE DE SOLDADURA .....	28
1.4.5.3. VELOCIDAD DE AVANCE .....	29
1.4.6. FUENTES DE ENERGÍA.....	29
1.4.7. CLASIFICACIÓN DE ELECTRODOS Y FUNDENTES .....	30
1.4.8. FUNDENTES .....	30
CAPÍTULO 2 .....	32
ACEROS AL CARBONO Y DIAGRAMA DE FASES.....	32
2.1. EL ACERO.....	32
2.1.1. INTRODUCCIÓN. ....	32
2.1.2. PROPIEDADES DE LOS METALES DE IMPORTANCIA PARA SOLDAR.....	34
2.1.2.1. RESISTENCIA .....	34
2.1.2.2. ELASTICIDAD .....	35
2.1.2.3. DUCTILIDAD .....	35
2.1.2.4. FRAGILIDAD .....	35
2.1.2.5. DUREZA.....	35
2.1.2.6. TENACIDAD.....	38
2.1.2.7. FATIGA .....	38
2.1.2.8. PROPIEDADES QUÍMICAS .....	38
2.1.2.9. PROPIEDADES ELÉCTRICAS .....	39
2.1.2.10. PROPIEDADES TÉRMICAS .....	39

2.1.3.	INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS ALEANTES EN EL ACERO.....	39
2.1.4.	CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS Y FUNDICIONES.....	42
2.1.4.1.	ACERO AL CARBONO SIMPLE .....	43
2.1.4.2.	ACEROS DE ALTA ALEACIÓN .....	43
2.1.4.3.	ACEROS DE BAJA ALEACIÓN .....	44
2.1.4.4.	FUNDICIÓN GRIS.....	44
2.1.4.5.	FUNDICIÓN BLANCA .....	44
2.1.4.6.	FUNDICIÓN MALEABLE.....	45
2.1.4.7.	FUNDICIÓN NODULAR.....	45
2.2.	ACEROS AL CARBONO SIMPLE .....	45
2.3.	DIAGRAMA DE FASES FE - C.....	47
2.3.1.	INTRODUCCIÓN .....	47
2.3.2.	DIAGRAMA DE HIERRO – CARBURO DE HIERRO.....	48
2.3.3.	FASES PRESENTES EN EL DIAGRAMA DE HIERRO CARBURO DE HIERRO .....	49
2.3.3.1.	CEMENTITA O CARBURO DE HIERRO .....	49
2.3.3.2.	FERRITA O HIERRO B.C.C. DE BAJA TEMPERATURA.....	50
2.3.3.3.	HIERRO DELTA O SOLUCIÓN SÓLIDA DELTA.....	51
2.3.3.4.	AUSTENITA O HIERRO F.C.C. ....	51
2.3.3.5.	MARTENSITA. ....	51
2.3.3.6.	TROOSTITA.....	52
2.3.3.7.	SORBITA.....	52
2.3.3.8.	BAINITA. ....	53
2.3.4.	REACCIONES Y TRANSFORMACIONES PRESENTES EN EL DIAGRAMA HIERRO CARBURO DE HIERRO .....	53
2.3.4.1.	REACCIÓN PERITÉCTICA.....	53
2.3.4.2.	REACCIÓN EUTÉCTICA. LEDEBURITA.....	54
2.3.4.3.	REACCIÓN EUTECTOIDE PERLITA.....	54
2.3.5	ZONAS PRESENTES EN EL DIAGRAMA Fe-C.....	55
2.3.5.1.	ACEROS HIPOEUCTECTOIDES .....	56
2.3.6	DIAGRAMA HIERRO – CARBURO DE HIERRO Y LA SOLDADURA.....	59

2.4. DIAGRAMA TTT .....	60
2.4.1. INTRODUCCIÓN .....	60
2.4.2. DIAGRAMAS DE TRANSFORMACIÓN ISOTÉRMICA (DIAGRAMAS TTT).....	61
2.4.3. EFECTO DE LOS ELEMENTOS ALEANTES EN EL DIAGRAMA HIERRO – CARBONO .....	63
2.4.4. EFECTO DE LOS ELEMENTOS ALEANTES EN LAS CURVAS TTT.....	64
2.4.5. TRANSFORMACIONES DURANTE ENFRIAMIENTO CONTINUO (CCT) .....	65
2.4.6. MICROESTRUCTURAS DEL ACERO SEGÚN EL ENFRIAMIENTO .....	67
2.4.7. TRATAMIENTOS TÉRMICOS DEL ACERO.....	68
2.4.7.1. TEMPLE .....	69
2.4.7.2. REVENIDO.....	69
2.4.7.3. RECOCIDO .....	70
2.4.7.4. NORMALIZADO .....	71
2.4.8. TRANSFORMACIÓN EN LOS ACEROS HIPOEUTECTOIDES .	72
2.5. APLICACIONES DEL ACERO.....	73
CAPÍTULO 3 .....	75
SOLDABILIDAD Y METALURGIA DE LA SOLDADURA .....	75
3.1. SOLDABILIDAD DE UN MATERIAL.....	75
3.1.1. LA SOLDABILIDAD OPERATORIA .....	75
3.1.2. LA SOLDABILIDAD METALÚRGICA.....	75
3.1.3. LA SOLDABILIDAD CONSTRUCTIVA O GLOBAL.....	75
3.2. SOLDABILIDAD EN PROCESOS POR FUSIÓN .....	76
3.2.1. EL CARBONO EQUIVALENTE.....	78
3.3. METALURGIA DE LA SOLDADURA .....	82
3.3.1. INTRODUCCIÓN .....	82
3.3.2. VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO.....	83
3.3.3. TEMPERATURA PICO .....	86
3.3.4. TIEMPO DE SOLIDIFICACIÓN.....	87
3.3.5. REACCIONES DURANTE Y DESPUÉS DE SOLDADURA.....	88

3.3.6.	SOLIDIFICACIÓN .....	89
3.3.6.1.	PARÁMETROS BÁSICOS .....	89
3.3.6.2.	MODOS DE SOLIDIFICACIÓN .....	89
3.3.7.	SEGREGACIÓN.....	93
3.3.8.	NUCLEACIÓN Y CRECIMIENTO .....	96
3.3.8.1.	NUCLEACIÓN HOMOGÉNEA .....	99
3.3.8.2.	NUCLEACIÓN HETEROGÉNEA .....	100
3.3.9.	TRANSFORMACIONES EN ESTADO SÓLIDO .....	100
3.3.10.	DESCOMPOSICIÓN DE LA AUSTENITA.....	101
3.3.10.1.	FERRITA ALIOTROMÓRFICA .....	103
3.3.10.2.	FERRITA WIDMANSTATTEN.....	103
3.3.10.3.	FERRITA ACICULAR .....	105
3.3.10.4.	BAINITA.....	108
3.3.10.5.	ROL DE LAS INCLUSIONES NO METÁLICAS.....	109
3.3.10.6.	MARTENSITA .....	109
3.3.11.	EFFECTOS DE LOS ELEMENTOS ALEANTES.....	110
3.4.	ZONA AFECTADA POR EL CALOR .....	113
3.4.1.	INFORMACIÓN REQUERIDA.....	113
3.4.1.1.	RECRISTALIZACIÓN.....	113
3.4.1.2.	CRECIMIENTO DE GRANO .....	114
3.4.1.3.	INFLUENCIA DEL CARBONO EN LAS PROPIEDADES Y MICROESTRUCTURA.....	116
3.4.1.4.	LO QUE OCURRE EN LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR.....	117
	CAPÍTULO 4 .....	121
	PRUEBAS .....	121
4.1.	MICROESTRUCTURA, COMPOSICIÓN Y CONDICIÓN INICIAL DEL MATERIAL BASE.....	123
4.1.1.	ACERO ASTM A 36 .....	123
4.1.2.	ACERO ASTM A 588 .....	125
4.1.3.	ACERO ASTM A 131 .....	127
4.1.4.	ACERO AISI 1045.....	129

4.2. PROCESOS DE SOLDADURA UTILIZADOS Y ESPECIFICACIONES DEL ELECTRODO.....	131
4.2.1. SMAW .....	131
4.2.1.1. ELECTRODO E7018.....	131
4.2.1.2. MICROGRAFÍA .....	132
4.2.1.3. ELECTRODO 6011: .....	133
4.2.1.4. MICROGRAFÍA .....	134
4.2.2. GMAW.....	135
4.2.2.1. ELECTRODO ER 70 S – 6:.....	135
4.2.2.2. MICROGRAFÍA .....	136
4.2.3. SAW .....	137
4.2.3.1. ELECTRODO ENi1K Y FUNDENTE F8A2 <sup>ANEXO 4</sup> .....	137
4.2.3.2. MICROGRAFIA.....	138
4.3. ANALISIS PRÁCTICO DE LAS ZONAS DENTRO DE LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR EN SOLDADURA .....	139
4.3.1. ZONA PARCIALMENTE FUNDIDA (TEMPERATURA DE FUSIÓN – TEMPERATURA DE SOLIDIFICACIÓN).....	139
4.3.2. ZONA DE RECALENTAMIENTO (TEMPERATURA DE SOLIDIFICACIÓN – 1130°C) .....	139
4.3.3. ZONA DE NORMALIZADO (1130 – 900 °C).....	139
4.3.4. ZONA DE RECRISTALIZACION INCOMPLETA (900 – 723 °C).....	140
4.3.5. ZONA DE RECRISTALIZACIÓN (723 – 500 °C).....	140
4.3.6. ZONA DE SENSIBILIDAD AZUL (500 – 200 °C) .....	140
4.4. DUREZAS DE LAS ZONAS DENTRO DE LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR EN SOLDADURA .....	142
4.5. VARIANTES ENTRE PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA.....	143
4.5.1. MATERIALES Y PROCESOS DIFERENTES .....	143
4.5.2. ESPESORES DIFERENTES.....	143
4.5.3. CORRIENTES DIFERENTES .....	144
4.5.4. TRATAMIENTO TÉRMICO POST-SOLDADURA Y PRECALENTAMIENTO .....	144
4.5.4.1. TRATAMIENTO TERMICO POST SOLDADURA .....	144
4.5.4.2. PRECALENTAMIENTO.....	147

4.5.5.	DIFERENTES VELOCIDADES DE SOLDADURA .....	156
4.5.6.	POLARIDAD.....	156
4.5.7.	SOLDADURA VARIOS PASES SIN ESPERA ENTRE CORDONES.....	156
4.5.8.	SOLDADURA VARIOS PASES CON ESPERA ENTRE CORDONES.....	157
4.6.	MACROGRAFÍAS .....	157
4.7	MICROGRAFÍAS.....	163
4.8.	BARRIDO DE DUREZAS.....	179
4.8.1.	DUREZAS EN DIFERENTES PROCESOS DE SOLDADURA Y MATERIALES BASE .....	180
4.8.2.	DUREZAS EN DIFERENTES ESPEORES DE PLACA.....	182
4.8.3.	DUREZAS EN DIFERENTES CORRIENTES DE SOLDADURA .....	182
4.8.4.	DUREZAS EN PROBETAS CON Y SIN PRECALENTAMIENTO Y TRATAMIENTO TÉRMICO POST-SOLDADURA.....	183
4.8.5.	DUREZAS PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE SOLDADURA .....	183
CAPÍTULO 5 .....		186
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		186
5.1.	ANÁLISIS DE LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR PARA DIFERENTES ACEROS Y CON DIFERENTES PROCESOS.....	186
5.2.	ANÁLISIS DE LA ZONA AFECTADA PARA DIFERENTES ESPEORES DE PLACA .....	189
5.3.	ANÁLISIS DE LA ZONA AFECTADA PARA DIFERENTES CORRIENTES DE SOLDADURA .....	192
5.4.	ANÁLISIS DE LA ZONA AFECTADA CON Y SIN PRECALENTAMIENTO Y TRATAMIENTO TÉRMICO.....	194
5.5.	ANÁLISIS DE LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE SOLDADURA.....	195
5.6.	ANÁLISIS DE LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR PARA DIFERENTES POLARIDADES DE CORRIENTE .....	197
5.7.	ANÁLISIS DE LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR EN JUNTAS SOLDADAS CON CORDONES CON Y SIN ESPERA ENTRE PASES.....	199

5.8. LAS MEJORES CONDICIONES PARA LA ZAC .....	200
CAPÍTULO 6 .....	202
CONCLUSIONES.....	202
RECOMENDACIONES .....	205
ANEXOS .....	206
ANEXO 1.....	207
FOTOGAFÍAS DE LAS ZONAS AFECTADAS POR EL CALOR EN LA PROBETA SOLDADA CON ALTA CORRIENTE.....	207
ANEXO 2.....	211
PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA .....	211
WPS VARIACIÓN DE PROCESOS Y MATERIALES .....	230
WPS VARIACIÓN DE PROCESOS Y MATERIALES .....	231
WPS VARIACIÓN DE NIVELES DE CORRIENTE .....	231
WPS VARIACIÓN DE PRECALENTAMIENTO Y TRATAMIENTO TÉRMICO .....	232
WPS VARIACIÓN DE POLARIDAD DE CORRIENTE.....	232
WPS VARIACIÓN DE VELOCIDAD DE SOLDADURA.....	232
WPS CON ESPERA ENTRE PASES.....	233
ANEXO 3.....	234
PROPIEDADES TÉRMICAS DE ALGUNAS ALEACIOENS .....	234
ANEXO 4.....	236
TABLA DE COMPOSICIÓN DEL ELECTRODO PARA SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO.....	236
BIBLIOGRAFÍA .....	238

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.- Posiciones de Soldadura <sup>2</sup> .....	1
Figura 1.2.- Tipos de cordones de soldadura <sup>2y4</sup> .....	2
Figura 1.3.- Configuración de Biseles .....	4
Figura 1.4.- Clasificación de los procesos de soldadura de acuerdo a la AWS <sup>4</sup> .....	5
Figura 1.5.- Circuito de Soldadura para el proceso SMAW <sup>6</sup> .....	12
Figura 1.6.- Denominación de los electrodos revestidos según la AWS <sup>7</sup> .....	15
Figura 1.7.- Transferencia de metal por cortocircuito .....	16
Figura 1.8.- Transferencia globular <sup>3</sup> .....	17
Figura 1.9.- Transferencia Spray <sup>3</sup> .....	18
Figura 1.10.- Equipos para el proceso GMAW <sup>6</sup> .....	20
Figura 1.11.- Denominación de los electrodos sólidos para GMAW según la AWS <sup>9</sup> .....	23
Figura 1.12.- Clasificación de los gases de protección. ....	24
Figura 1.13.- Equipos para el proceso SAW <sup>6</sup> .....	27
Figura 1.14.- Denominación de los electrodos sólidos y fundentes para SAW según la AWS <sup>10</sup> .....	30
Figura 2.1.- Proceso de obtención del acero <sup>31</sup> .....	33
Figura 2.2.- Proceso de laminado del acero <sup>32</sup> .....	34
Figura 2.3.- Estructura Cristalina del Hierro (B.C.C) <sup>14</sup> .....	42
Figura 2.4.- Cambio de estructura reticular del hierro con respecto al tiempo y temperatura <sup>14</sup> .....	47
Figura 2.5.- Diagrama de Equilibrio Hierro – Carburo de Hierro <sup>14</sup> .....	49
Figura 2.6.- Microestructura del acero 1%C, red blanca de cementita .....	50
Figura 2.7.- Microestructura del acero al carbono, cristales blancos de ferrita 400X.....	50
Figura 2.8.- Microestructura de la austenita a 325X.....	51
Figura 2.9.- Microestructura de la martensita.....	52
Figura 2.10.- Ledeburita .....	54
Figura 2.11.- Microestructura del acero al carbono, cristales oscuros de perlita, 500X. ....	55

Figura 2.12.- Acero Hipoeutectoide mostrando $\alpha$ primario (blanco) y Perlita 400X.....	57
Figura 2.13.- Transformación en el acero hipoeutectoide <sup>19</sup> .....	58
Figura 2.14.- Nucleación y Crecimiento de la perlita <sup>14</sup> .....	59
Figura 2.15.- Diagrama de hierro – Carbono adaptado a la soldadura. <sup>4</sup> .....	60
Figura 2.16.- Transformación Isotérmica de materiales. Del punto 1 al 2 se congela la austenita, al transcurrir el tiempo comienza a transformarse en 3 y termina su transformación en 4. <sup>19</sup> .....	61
Figura 2.17.- Diagrama TTT para un acero al Carbono eutectoide. <sup>14</sup> .....	62
Figura 2.18.- Influencia de los elementos de aleación el diagrama Fe-Fe <sub>3</sub> C: (a) Alfágenos (b) Ganmágenos. <sup>19</sup> .....	64
Figura 2.19.- Diagramas TTT de algunos aceros con diferentes elementos aleantes. <sup>14</sup> .....	65
Figura 2.20.- Representación esquemática de enfriamientos continuos a tres velocidades <sup>19</sup> .....	66
Figura 2.21.- Diagramas TTT y CCT <sup>19</sup> .....	67
Figura 2.22.- Variación de la microestructura en función de la velocidad de enfriamiento para un acero eutectoide <sup>14</sup> .....	68
Figura 2.23.- Temperatura Vs Tiempo de los Tratamientos térmicos <sup>14</sup> .....	69
Figura 2.24.- Temperaturas de tratamientos térmicos en la Región Eutectoide <sup>19</sup> .....	71
Figura 2.25.- Acero con 0,25% de C - Recocido. 100X.....	71
Figura 2.26.- Acero con 0,25% de C – Normalizado 200X.....	72
Figura 2.27.- Herramientas de Acero.....	73
Figura 2.28.- Estructuras de Acero.....	73
Figura 2.29.- Acero de Refuerzo.....	74
Figura 3.1.- Variación del coeficiente de soldabilidad S en función de la concentración de carbono en el acero <sup>21</sup> .....	76
Figura 3.2.- Esquema del procedimiento de soldadura por fusión. ....	77
Figura 3.3.- Susceptibilidad de la ZAC al agrietamiento en función del contenido de carbono y del equivalente de carbono en aceros de alta resistencia. [3].....	80

Figura 3.4.- La sensibilidad al agrietamiento aumenta con el contenido de carbono de la martensita frágil en el acero. ....	81
Figura 3.5.- Flujo de calor de la soldadura .....	85
Figura 3.6.- Curva Temperatura – Tiempo Típica .....	86
Figura 3.7.- Gradiente térmico y velocidad de solidificación Vs concentración de soluto .....	91
Figura 3.8.- Interfase Sólido – líquido durante el crecimiento planar.....	91
Figura 3.9.- Interfase Sólido – líquido durante el crecimiento celular.....	92
Figura 3.10.- Interfase Sólido – líquido durante el crecimiento celular dendrítico.....	93
Figura 3.11.- Interfase Sólido – líquido durante el crecimiento dendrítico.....	93
Figura 3.12.- Esquema de segregación en borde de grano por acumulación de soluto en las juntas.....	94
Figura 3.13.- Esquema de segregación en borde grano por atrapado de soluto entre dos interfases .....	95
Figura 3.14.- Esquema del crecimiento epitaxial, fuerzas interfaciales y del ángulo de mojado .....	97
Figura 3.15.- Energía libre en la nucleación homogénea, heterogénea y epitaxial .....	97
Figura 3.16.- Esquema de la secuencia de solidificación desde ferrita delta en aceros.....	98
Figura 3.17.- Esquema de las diferentes formas de los precipitados: a- alotriomorfos de límite de grano, b- idiomorfos y c-placas laterales Widmanstatten .....	101
Figura 3.18.- Variación de la velocidad de crecimiento de la ferrita Widmanstatten con el contenido de carbono.....	104
Figura 3.19.- Esquema que ilustra el desarrollo de la ferrita Widmanstatten a través del grano austenítico para bajo y alto contenido de aleación.....	105
Figura 3.20.- Ilustración esquemática del efecto del tamaño de grano en la descomposición de la austenita.....	107
Figura 3.21.- Zonas dentro de la ZAC <sup>22</sup> .....	113

Figura 3.22.- Crecimiento de celdas en un contenedor plano. Los números indican el tiempo de crecimiento en minutos.....	115
Figura 3.23.- Influencia del contenido de Carbono en a) Microestructuras b) Propiedades .....	117
Figura 3.24.- Efecto del calor de la soldadura en dureza y microestructura de una placa de acero con 0,25% C <sup>24</sup> .....	118
Figura 3.25.- Solidificación progresiva del metal fundido en un pocillo de soldadura. a) Curva de enfriamiento, con expresión de las diferentes estructuras, b) vista superior del pocillo de soldadura (W) y líneas isotermas en torno al pocillo. [5] .....	120
Figura 4.1.- Microestructura del material ASTM A 36 tomada a 100X. ....	124
Figura 4.2.- Microestructura del material ASTM A 36 tomada a 500X .....	124
Figura 4.3.- Microestructura del material ASTM A 588 tomada a 100X. ....	126
Figura 4.4.- Microestructura del material ASTM A 588 tomada a 500X. ....	126
Figura 4.5.- Microestructura del material ASTM A 131 tomada a 100X. ....	128
Figura 4.6.- Microestructura del material ASTM A 131 tomada a 500X. ....	128
Figura 4.7.- Microestructura del material AISI 1045 tomada a 100X. ....	130
Figura 4.8.- Microestructura del material AISI 1045 tomada a 500X. ....	130
Figura 4.9.- Microestructura del cordón de soldadura SMAW E7018 a 100X.....	132
Figura 4.10.- Microestructura del cordón de soldadura SMAW E6011 a 100X.....	134
Figura 4.11.- Microestructura del cordón de soldadura GMAW a 100X. ....	136
Figura 4.12.- Microestructura del cordón de soldadura SAW 100X.....	138
Figura 4.13.- Zonas dentro de la zona afectada por el calor.....	141
Figura 4.14.- Determinación de la zona para los aceros usados <sup>26</sup> .....	149
Figura 4.15.- Electrodo Vs Nivel de Hidrógeno <sup>30</sup> .....	152
Figura 4.16.- Macrografías para diferentes materiales base y procesos de soldadura.....	158
Figura 4.17.-- Macrografías para diferentes espesores de placa de las probetas soldadas .....	159

Figura 4.18.- a) Macrografías para Corriente alta, normal y baja, b) macrografías con y sin precalentamiento y tratamiento térmico. ....	160
Figura 4.19.- Macrografías para diferentes velocidades de soldadura.....	161
Figura 4.20.- Macrografías para Corriente Alterna y Corriente Continua .....	161
Figura 4.21.- Macrografías de cordones de soldadura: a) Sin espera entre pases, b) Con espera entre pases .....	162
Figura 4.22.- Micrografías para diferentes materiales base y con el proceso SMAW .....	164
Figura 4.23.- Micrografías para diferentes materiales base y con el proceso GMAW .....	165
Figura 4.24.- Micrografías para diferentes materiales base y con el proceso SAW .....	166
Figura 4.25.- Micrografías para el material A-36 en diferentes procesos de soldadura .....	167
Figura 4.26.- Micrografías para el material A-588 en diferentes procesos de soldadura .....	168
Figura 4.27.- Micrografías para el material A-131 en diferentes procesos de soldadura .....	169
Figura 4.28.- Micrografías para el material AISI 1045 en diferentes procesos de soldadura .....	170
Figura 4.29.- Micrografías para diferentes espesores de placa.....	171
Figura 4.30.- Micrografías para diferentes niveles de corriente.....	172
Figura 4.31.- Micrografías con y sin precalentamiento y tratamiento térmico .....	173
Figura 4.32.- Micrografías a diferentes velocidades de soldadura .....	174
Figura 4.33.- Micrografías para diferentes polaridades de corriente .....	175
Figura 4.34.- Micrografías primer cordón con y sin espera entre pases.....	176
Figura 4.35.- Micrografías segundo cordón con y sin espera entre pases. ..	177
Figura 4.36.- Micrografías tercer cordón con y sin espera entre pases.....	178
Figura 4.37.- Medidas de durezas tomadas en la soldadura y zona afectada por el calor.....	179

Figura 4.38.- Medición de las durezas .....	179
Figura 5.1.- Medidas de la ZAC en diferentes procesos. a) Proceso SMAW, b) Proceso GMAW y c) Proceso SAW. Fotos tomadas a 10x.....	187
Figura 5.2.- Medidas en diferentes espesores de placa. a) 12mm, b) 10mm, c) 8mm y d) 6mm. Fotos tomadas a 10X. ....	191
Figura 5.3.- Medidas de ZAC variando niveles de amperaje: a) Mediano amperaje, b) bajo amperaje y c) alto amperaje .....	193
Figura 5.4.- Medidas de ZAC: a) Sin Precalentamiento, b) Con precalentamiento.....	194
Figura 5.5.- Medidas de la ZAC a diferentes velocidades de soldadura: a) Velocidad rápida, b) Velocidad normal y c) Velocidad lenta. Las macrografías están a 10X.....	196
Figura 5.6.- Medidas de la ZAC a diferentes polaridades de soldadura: a) Corriente continua electrodo positivo, b) Corriente altera. Las macrografías están a 10X.....	198
Figura 5.7.- Macrografías de soldaduras: a) sin espera entre pases y b) con espera entre pases. Fotos tomadas a 10X.....	200
Figura A.1.- Zona fundida o de soldadura. Ataque con Nital 2%. 100X. ....	208
Figura A.2.- A) Zona de recalentamiento, B) Zona parcialmente fundida y C) Zona fundida o de soldadura. Ataque con Nital 2%. 100X. ..	208
Figura A.3.- A) Zona de recalentamiento sin crecimiento de grano, B) Zona de recalentamiento con crecimiento de grano y C) Zona fundida o de soldadura. Ataque con Nital 2%. 100X. ..	209
Figura A.4.- A) Zona de normalización de grano y B) Zona de recalentamiento sin crecimiento de grano. Ataque con Nital 2%. 100X.....	209
Figura A.5.- Zona de normalización de grano. Ataque con Nital 2%. 100X..	210
Figura A.6.- A) Material Base, B) Zona de recristalización y C) Zona de normalización de grano. Ataque con Nital 2%. 100X. ....	210

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1.- Tipos de juntas en soldadura <sup>3</sup> .....	2
Tabla 1.2.- Clasificación de los electrodos para el proceso SMAW <sup>3</sup> .....	8
Tabla 1.3.- Metales soldables SMAW <sup>6</sup> .....	12
Tabla 1.4.- Especificación de los electrodos para SMAW según AWS <sup>6</sup> .....	15
Tabla 1.5.- Metales soldables GMAW <sup>6</sup> .....	19
Tabla 1.6.- Metales soldables SAW <sup>6</sup> .....	27
Tabla 2.1.- Escalas Rockwell y características. <sup>12</sup> .....	37
Tabla 2.2.- Elementos aleantes del acero .....	40
Tabla 3.1.- Fórmulas de Carbono equivalente en diferentes grupos .....	78
Tabla 4.1.- Composición y características generales del acero ASTM A36. <sup>25</sup> .....	123
Tabla 4.2.- Composición y características generales del acero ASTM A588 <sup>27</sup> .....	125
Tabla 4.3.- Composición y características generales del acero ASTM A131 <sup>28</sup> .....	127
Tabla 4.4.- Composición y características generales del acero AISI 1045 <sup>29</sup> .....	129
Tabla 4.5.- Parámetros de soldadura para diferentes procesos y materiales.....	143
Tabla 4.6.- Parámetros de soldadura en diferentes espesores de placa .....	144
Tabla 4.7.- Parámetros de soldadura para diferentes corrientes de soldadura.....	144
Tabla 4.8.- Tiempo de permanencia del tratamiento térmico <sup>26</sup> .....	146
Tabla 4.9.- Parámetros del tratamiento térmico .....	147
Tabla 4.10.- Tabla del nivel de hidrógeno según Pcm .....	151
Tabla 4.11.- Temperatura de precalentamiento .....	151
Tabla 4.12.- Tabla Pcm Vs Nivel de Hidrógeno. Práctica.....	154
Tabla 4.13.- Temperatura de precalentamiento. Práctica .....	155
Tabla 4.14.- Parámetros de soldadura con y sin precalentamiento y tratamiento térmico post-soldadura .....	155
Tabla 4.15.- Parámetros de soldadura diferentes velocidades .....	156

Tabla 4.16.- Parámetros de soldadura para diferente polaridad de corriente .....	156
Tabla 4.17.- Parámetros de soldadura de varios pases sin espera entre cordones.....	157
Tabla 4.18.- Parámetros de soldadura de varios pases con espera entre cordones.....	157
Tabla 4.19.- Dureza Vs Distancia para diferentes pasadas con espera .....	185
Tabla 5.1.- Mejores condiciones para la ZAC.....	200
Tabla A.1.- Procedimientos de soldadura variando procesos y materiales ..	230
Tabla A.2.- Procedimiento de soldadura para espesores diferentes. ....	231
Tabla A.3.- Procedimientos de soldadura para diferentes niveles de corriente. ....	231
Tabla A.4.- Procedimientos de soldadura con tratamiento térmico y precalentamiento.....	232
Tabla A.5.- Procedimientos de soldadura para diferentes polaridades de corriente. ....	232
Tabla A.6.- Procedimiento de soldadura para velocidades de soldadura diferentes.....	232
Tabla A.7.- Procedimiento de soldadura para espesores diferentes. ....	233
Tabla A.8.- Propiedades térmicas de algunas aleaciones. <sup>35</sup> .....	235

## INDICE GRÁFICOS

Gráfico 4.1.- Carbono equivalente ASTM A-36 .....	123
Gráfico 4.2.- Carbono equivalente ASTM A588 .....	125
Gráfico 4.3.- Carbono equivalente ASTM A131 .....	127
Gráfico 4.4.- Carbono equivalente AISI 1045.....	129
Gráfico 4.5.- Durezas vs posición en las zonas de la ZAC en el acero A-36 con proceso de soldadura SMAW y altos niveles de energía. ....	142
Gráfico 4.6.- Diagrama del tratamiento térmico alivio de tensiones .....	147
Gráfico 4.7.- Electrodos Vs Nivel de Hidrógeno 26 .....	153
Gráfico 4.8.- Dureza Vs Distancia: a) A-36, b) A-588, c) A-131 y d) AISI 1045; en los diferentes procesos de soldadura.....	180
Gráfico 4.9.- Dureza Vs Distancia: a) SMAW, b) GMAW y c) SAW; en los diferentes materiales base.....	181
Gráfico 4.10.- Dureza Vs Distancia para los diferentes espesores de placa.....	182
Gráfico 4.11.- Dureza Vs Distancia para los corrientes baja, normal y alta..	182
Gráfico 4.12.- Dureza Vs Distancia para probetas con y sin precalentamiento y tratamiento térmico post-soldadura.....	183
Gráfico 4.13.- Dureza Vs Distancia para diferentes velocidades de soldadura .....	183
Gráfico 4.14.- Dureza Vs Distancia para diferentes polaridades de corriente .....	184
Gráfico 4.15.- Dureza Vs Distancia para una junta soldada sin espera entre pases .....	184
Gráfico 4.16.- Dureza Vs Distancia para una junta soldada con espera entre pases .....	185

## RESUMEN

El presente trabajo busca determinar un análisis profundo y detallado de la Zona Afectada por el Calor para cuatro tipos de aceros hipoeutectoides (A36, A588, A131 y AISI 1045) mediante tres tipos de soldadura (SMAW, GMAW y SAW); y realizando variantes en los parámetros de soldadura para el acero A36 y con el proceso de soldadura SMAW, tales como: el espesor de placa, la intensidad y polaridad de corriente de soldadura, la velocidad de soldadura, con y sin tratamiento térmico postsoldadura, con y sin precalentamiento y el tiempo de espera entre cada pase de la junta soldada. El objetivo es determinar los parámetros óptimos para realizar una junta soldada con el menor tamaño de la Zona Afectada por el Calor.

En el primer Capítulo se describen los procesos de soldadura usados para el análisis de la ZAC en el presente proyecto, es decir los procesos SMAW, GMAW y SAW. Además se realiza una breve introducción acerca de la soldadura, en lo que se refiere a los conceptos fundamentales, normas y formatos necesarios para el entendimiento correcto del proceso.

El segundo capítulo corresponde a realizar una descripción necesaria y adecuada en lo concerniente a los aceros al carbono en cuanto a: propiedades, tratamientos térmicos y clasificación; además, es conveniente el estudio y manejo correcto de los diagramas de fases involucrados en los procesos de transformación, tales como el diagrama de equilibrio Hierro – Carbono y el diagrama TTT (Tiempo – Temperatura y Transformación), esto último para entender y determinar la microestructura formada en la ZAC a partir del enfriamiento del material por la entrada de calor debido a la soldadura.

En el tercer Capítulo se describe el método para determinar la soldabilidad de los aceros al Carbono, siendo de gran importancia para realizar una soldadura adecuada para cada uno de los aceros utilizados para el análisis. Por otro lado, se describe también en lo referente a la metalurgia de la soldadura y se finaliza el capítulo con una explicación necesaria de la Zona afectada por el Calor y cada una de las zonas presentes dentro de esta.

En el Capítulo cuarto se presentan las fotos de las micrografías y macrografías tomadas, para cada una de las condiciones planteadas para el análisis de la Zona Afectada por el Calor. Además, los gráficos donde se muestra la relación de la dureza con respecto a la distancia, es decir el barrido de durezas, para cada una de las probetas realizadas para el análisis.

En el capítulo Quinto se presentan el análisis de resultados obtenidos para cada una de las combinaciones y condiciones realizadas para el análisis, comparando una probeta con otra para determinar así las condiciones óptimas de soldadura en lo que se refiere al tamaño de la Zona Afectada por el Calor.

En el sexto Capítulo se finaliza el proyecto mediante las conclusiones y recomendaciones respectivas, obtenidas por el estudio realizado para el análisis de la Zona Afectada por el Calor.

## PRESENTACIÓN

La soldadura ha sido un proceso de gran importancia y en constante desarrollo dentro del área de producción y mantenimiento durante las últimas décadas. Es así que la soldadura actualmente es una rama tecnológica de punta, lo cual establece mayores exigencias en su estudio para continuar su desarrollo. El proyecto propuesto está orientado a profundizar el análisis de la zona crítica dentro de la soldadura, la zona afectada por el calor. Esta zona es determinante para llegar a obtener propiedades adecuadas en la junta soldada y conseguir una unión permanente y segura, ya que debido a sus características y propiedades se presenta como la zona más débil en la junta soldada, la cual sirve de unión entre el material base y la soldadura.

Este estudio se enfocará específicamente en uno de los materiales de mayor uso en el sector industrial, como es el acero al carbono y dentro de este gran grupo, los aceros hipoeutectoides. Este tipo de acero es usado en la fabricación de maquinaria, construcción de estructuras metálicas entre muchas otras aplicaciones, razón por la cual requiere un frecuente uso de la soldadura. Una característica muy importante del acero de bajo carbono dentro de sus propiedades es la soldabilidad que presenta, siendo un requisito necesario para la unión permanente sin alterar significativamente en su microestructura.

La soldadura de aceros al carbono depende de varios factores. Estos factores llamados también variables de soldadura pueden ser por ejemplo el tipo y la intensidad de corriente que se emplea, la velocidad de soldadura, el espesor y tratamientos térmicos del material base, el proceso de unión de la junta, entre otros. Estas variables permiten realizar algunas combinaciones, las cuales generan diferentes resultados en la soldadura, por lo tanto la zona afectada por el calor variará conforme cambien dichos factores.

Por estas razones, se ha propuesto el presente proyecto de titulación que analizará las propiedades y características de la zona afectada por el calor en la junta frente a diferentes cambios en las variables de soldadura. De esta manera se puede brindar información sobre características óptimas referente a dicha zona en la soldadura de aceros al carbono hipoeutectoides con respecto a la combinación de las variables de soldadura.

## CAPÍTULO 1

### 1. PROCESOS DE SOLDADURA

#### 1.1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE SOLDADURA

##### 1.1.1. DEFINICIÓN DE SOLDADURA

Es un proceso de unión por una coalescencia localizada de metales o no metales producida por el calentamiento de los materiales hasta la temperatura de soldadura, con o sin la aplicación de presión solamente, y con el uso o no de material de aporte.<sup>1</sup>

##### 1.1.2. POSICIONES DE SOLDADURA

Las posiciones de soldadura son las diferentes ubicaciones del soldador respecto a la junta soldada.

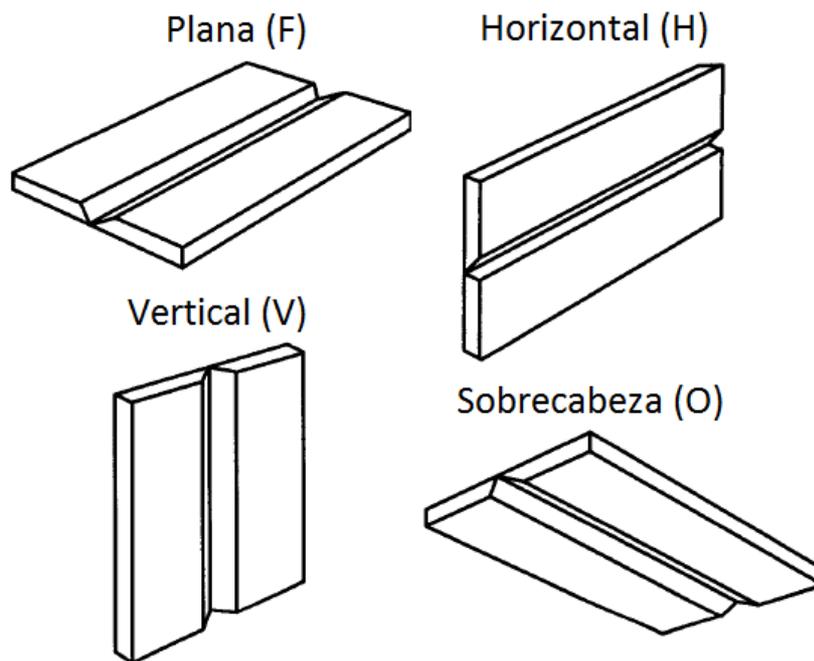


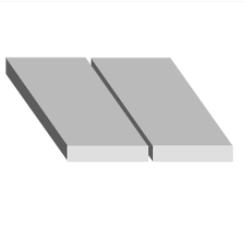
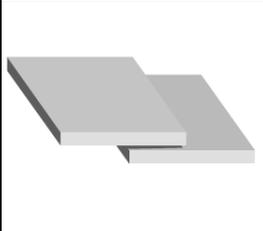
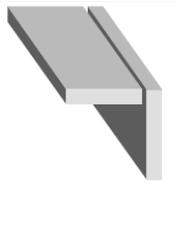
Figura 1.1.- Posiciones de Soldadura <sup>2</sup>

##### 1.1.3. JUNTA Y TIPOS DE JUNTAS

Las juntas son las diferentes disposiciones como se arreglan y orientan las partes a ser soldadas para poder aplicar la soldadura en condiciones de comodidad y seguridad.

Existen cinco estilos básicos de juntas que son:

Tabla 1.1.- Tipos de juntas en soldadura<sup>3</sup>

A tope	A traslape	De esquina	De borde	En T
				

#### 1.1.4. CORDÓN Y TIPOS DE CORDONES

El cordón de soldadura es la parte de la unión que une a las partes soldadas.

##### 1.1.4.1. TIPOS DE CORDÓN

Existen cuatro tipos de cordones que se muestran en la figura 1.2.

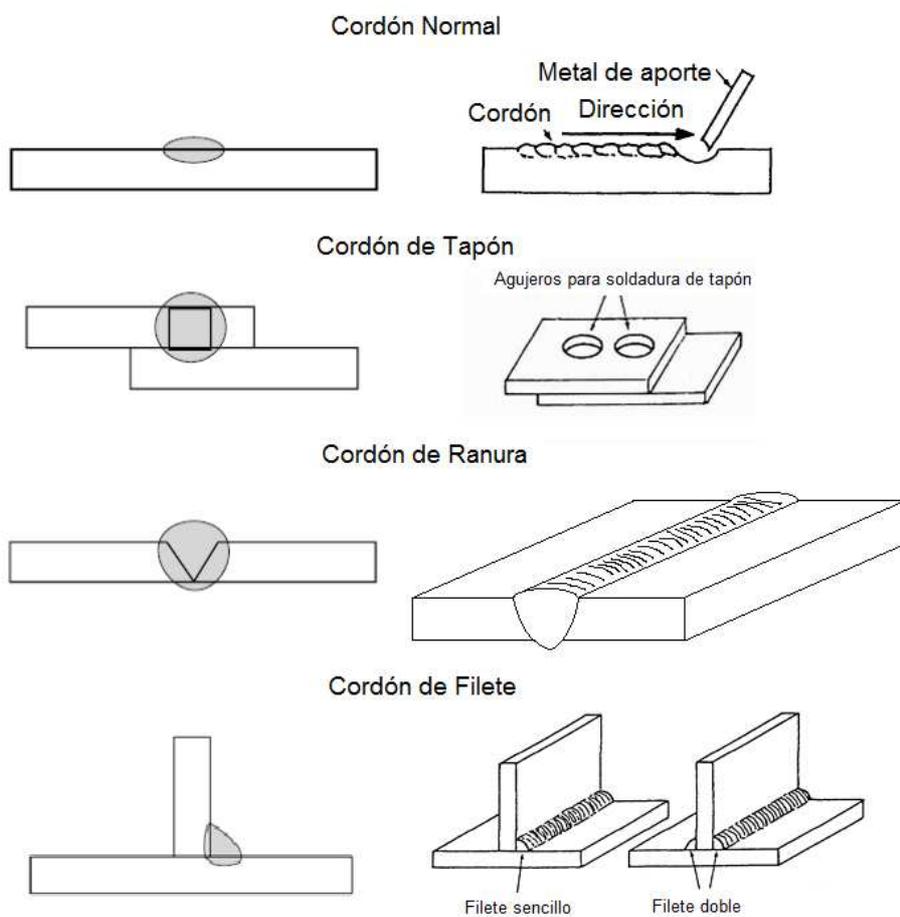


Figura 1.2.- Tipos de cordones de soldadura<sup>2y4</sup>

### 1.1.5. BISELES Y CONFIGURACIONES DE BISELES

Para obtener una soldadura de buenas características, la suciedad, óxido, aceite o pintura deben ser removidas de las superficies que van a ser unidas. Cuando se suelda en metales mal limpiados se produce una soldadura porosa y quebradiza. Si las piezas del metal base que se van a unir son de un espesor considerable habrá que biselar los cantos o aristas de las piezas a soldar como placas, planchas, tuberías, y otras, con una rectificadora de metales en el punto de contacto.

Un bisel es una configuración de las caras de una junta de soldadura. La junta con o sin bisel es la parte a rellenar de metal situada entre 2 o más planchas o piezas, que tienen los bordes convenientemente preparados. La finalidad de la preparación de la junta es asegurar la penetración deseada en la soldadura y facilitar la operación de soldar con miras a obtener una unión de excelente calidad.

#### 1.1.5.1. ELECCIÓN DEL TIPO DE BISEL:

Una cuestión de suma importancia en el trabajo de soldar por arco es la selección del mejor y más adecuado tipo de junta y bisel a utilizar en cada aplicación concreta.

La mejor junta con o sin bisel es la que, con un mínimo costo, satisface todas las condiciones de servicio. Al seleccionar la junta, deben tomarse en cuenta tres factores:

- La carga y sus características, es decir, si la carga es de tracción o de compresión teniendo como factor predominante el espesor del material y si existe alguna combinación de esfuerzos de doblado, fatiga o choque.
- La forma en que la carga es aplicada, o sea si su acción es continua, variable o instantánea.
- El costo de preparación y de la ejecución, propiamente dicha en la soldadura.
- Otros aspectos a tomarse en cuenta son la comodidad del soldador y la uniformidad y apariencia de la soldadura.<sup>36</sup>

En la figura 1.3 se muestran algunos tipos de biseles usados en soldadura comúnmente.

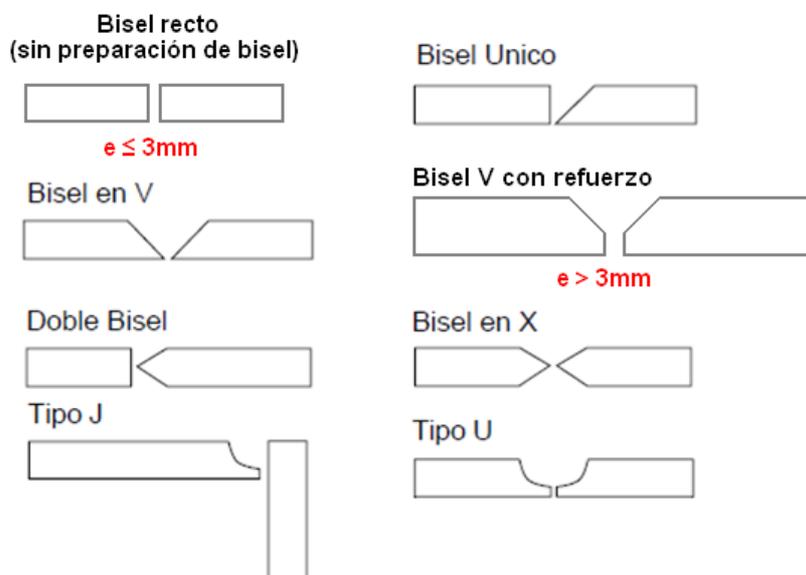
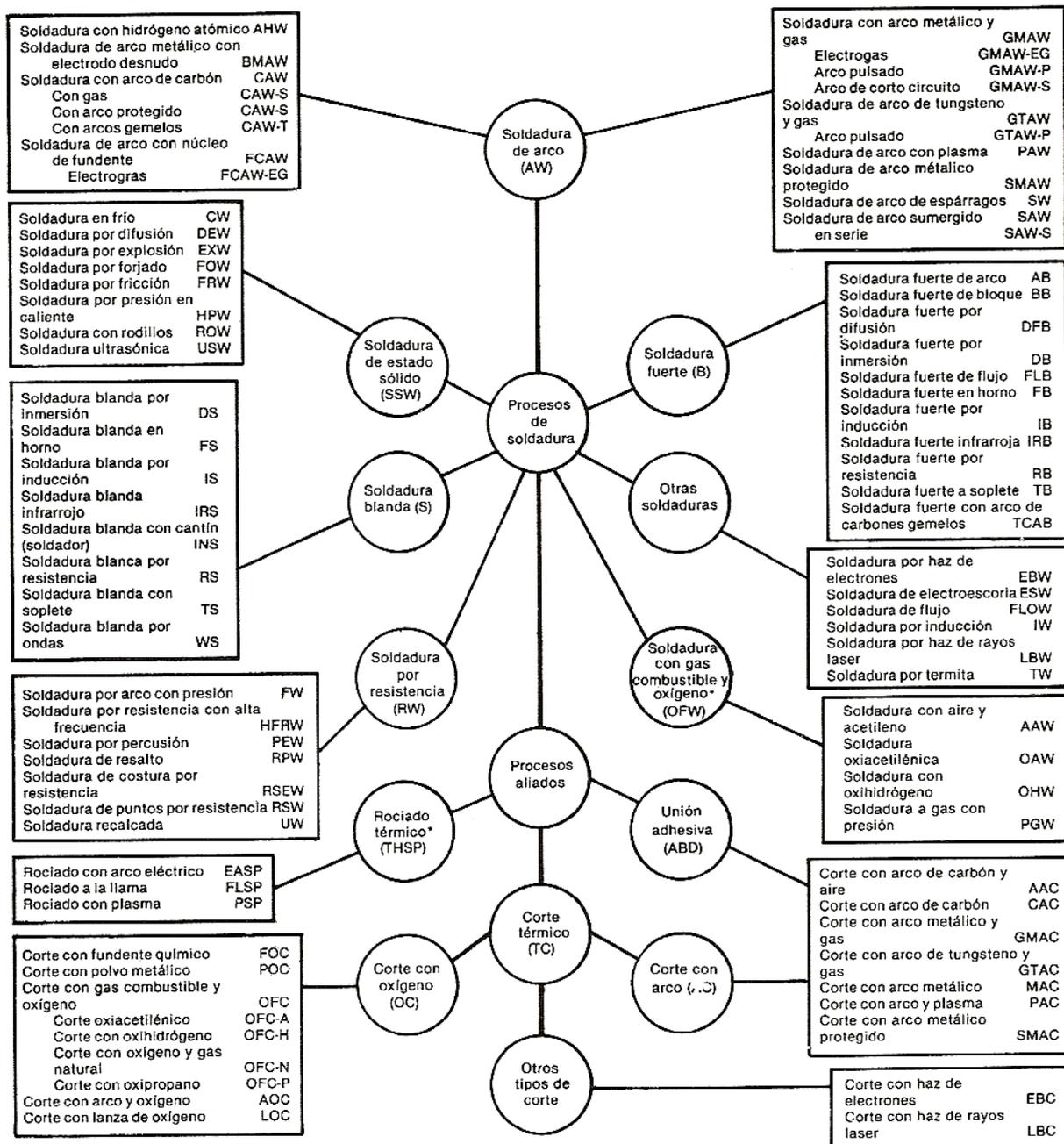


Figura 1.3.- Configuración de Biseles

#### 1.1.6. CLASIFICACIÓN AWS DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA

Los procesos de soldadura utilizados en la manufactura y reparación han ido evolucionando de manera vertiginosa, es así que en la actualidad existen más de un centenar de procesos de soldadura. La AWS (American Welding Society) ha reconocido y clasificado los procesos de soldadura en grandes grupos, así como sus procesos aliados. Esta clasificación se encuentra en la figura 1.4.



\*A veces es un proceso de soldadura.

Figura 1.4.- Clasificación de los procesos de soldadura de acuerdo a la AWS <sup>4</sup>

### 1.1.7. DOCUMENTACIÓN DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL

Existen 3 formatos o documentos técnicos en soldadura: el WPS, el PQR y el WPQ.

#### 1.1.7.1. WPS: ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

El WPS (Welding Procedure Specification) es un documento que provee las variables de soldadura requeridas para una aplicación específica y así asegurar repetitividad por soldadores entrenados apropiadamente y operadores de soldadura.<sup>1</sup>

#### 1.1.7.2. PQR: REGISTRO DEL PROCEDIMIENTO DE CALIFICACIÓN

El PQR (Procedure Qualification Record) es un registro de variables de soldadura usados para producir un espécimen aceptable de soldadura y los resultados de las pruebas dirigidas en la soldadura para calificar un WPS.<sup>1</sup>

#### 1.1.7.3. WPQ: CALIFICACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL SOLDADOR

El WPQ (Welder Performance Qualification) es un formato en el cual se certifica la habilidad de un soldador para producir soldaduras siguiendo estándares establecidos y procedimientos de soldadura.<sup>1</sup>

### 1.1.8. FUENTE DE CALOR EN SOLDADURA

La eficiencia de la fuente de calor  $\eta$  se define como:

$$\eta = \frac{Q \times t_{soldadura}}{Q_{Nominal} \times t_{soldadura}} = \frac{Q}{Q_{Nominal}} \quad (1.1)$$

En donde:

$Q$  es la tasa de transferencia de calor desde la fuente de calor hasta la pieza de trabajo. Es decir, la energía en la unidad de tiempo que se transmite efectivamente desde la fuente de calor hasta la soldadura.

$Q_{Nominal}$  es la potencia nominal de la máquina soldadora

$t_{soldadura}$  es el tiempo de soldadura.

Una porción de la potencia entregada por la fuente de calor es transferida a la pieza de trabajo y la porción restante se pierde en los alrededores. Por lo

tanto  $\eta < 1$ . Si la eficiencia de la fuente es conocida, la tasa de calor transferido a la pieza de trabajo,  $Q$ , puede ser fácilmente obtenida.

En la soldadura por arco eléctrico la fuente de calor es la energía eléctrica que transmite el arco eléctrico. Es así que, con un voltaje constante ( $E$ ) y una corriente constante ( $I$ ), la eficiencia del arco puede ser expresada como:

$$\eta = \frac{Q \times t_{\text{soldadura}}}{E \times I \times t_{\text{soldadura}}} = \frac{Q}{E \times I} \quad (1.2)$$

El término “calor entrante o de entrada” (heat input) frecuentemente se refiere a  $Q_{\text{Nominal}}$  o  $E \times I$  en el caso del arco eléctrico, y el término “calor de entrada por unidad de longitud de la soldadura” (Heat input per unit of length of Weld) se refiere a la energía entregada en la unidad de longitud.

$$\frac{Q_{\text{Nominal}}}{V} \text{ o } \frac{E \times I}{V},$$

donde  $V$  es la velocidad de soldadura. Entonces, las unidades correspondientes al calor de entrada por unidad de longitud de la soldadura serán por ejemplo: J/mm, kJ/mm, J/cm, kJ/cm o cualquier medida de energía sobre longitud.

La característica más importante del calor entrante es que este gobierna la tasa de enfriamiento en soldadura y por lo tanto afecta a la microestructura del metal de soldadura y de la zona afectada por el calor. Un cambio en el microestructura del metal de soldadura afecta directamente a las propiedades mecánicas de la soldadura. Entonces, el control del calor entrante es muy importante en la soldadura por arco eléctrico en términos de control de calidad, por lo que ciertas normas limitan este valor para elaboración de WPS.

## 1.2. PROCESO SMAW

### 1.2.1. FUNDAMENTO TEÓRICO

La soldadura por arco metálico protegido SMAW (Shielded Metal Arc Welding) es un proceso manual que incluye un arco entre un electrodo cubierto y el charco de soldadura. Este proceso se usa con protección de la descomposición de la cobertura del electrodo, sin la aplicación de presión y con metal de aporte proveniente del electrodo.

El arco de soldadura por electrodo consumible es una descarga eléctrica sostenida, de alta corriente y bajo voltaje, a través de un plasma altamente conductivo que produce una energía térmica suficiente.

En todos los procesos de soldadura por arco de electrodo consumible se requiere un arco estable para lograr una operación exitosa. Se obtiene un arco metálico estable y sostenido solo cuando la tasa de fusión (o tasa de quemado, es una relación física entre la corriente y el peso del metal fundido) del electrodo es igual a la tasa de alimentación del electrodo hacia el arco.<sup>6</sup>

### 1.2.2. ELECTRODOS O CONSUMIBLES DEL PROCESO

Los electrodos son varillas metálicas conductoras de corriente eléctrica cubiertos por un revestimiento de fundente extruido y seco. La mecánica del arco protegido varía con el tipo de electrodo. Los tipos de electrodos se muestran en la siguiente tabla con sus respectivas características.

Tabla 1.2.- Clasificación de los electrodos para el proceso SMAW<sup>3</sup>

Clasificación AWS	Tipo de Revestimiento	Corriente y Polaridad	Posición a soldar
E-6010	Celulósico Sódico	CC.EP.	P.V.SC.H.
E-6011	Celulósico Potásico	CA.CC.EP.	P.V.SC.H.
E-6012	Rutílico Sódico	CA.CC.EN.	P.V.SC.H.
E-6013	Rutílico Potásico	CA.CC.AP.	P.V.SC.H.
E-7014	Rutílico H.P.	CA.CC.AP.	P.V.SC.H.
E-7015	Rutílico Sódico B.H.	CC.EP.	P.V.SC.H.
E-7016	Rutílico Potásico B.H.	CA.CC.EP.	P.V.SC.H.
E-7018	Rutílico Potásico B.H.-H.P.	CA.CC.EP.	P.V.SC.H.
E-6020	Oxido de Hierro	CA.CC.AP.	P.H. Filete
E-7024	Rutílico H.P.	CA.CC.AP.	P.H. Filete
E-7027	Oxido de Hierro H.P.	CA.CC.AP.	P.H. Filete
<b>Nomenclatura</b>	CC: Corriente Continua	EP: Electrodo Positivo	P: Plana
HP: Hierro en Polvo	CA: Corriente Alterna	EN: Electrodo Negativo	V: Vertical
BH: Bajo Hidrógeno	AP: Ambas Polaridades	SC: Sobrecabeza	H: Horizontal

#### 1.2.2.1. ELECTRODOS CON REVESTIMIENTOS BÁSICOS

Algunos aceros de mediano y alto carbono, los aceros de baja aleación y, en general, todos los aceros con alto contenido de azufre tienden a agrietarse o bien a presentar zonas frágiles en el depósito de soldadura. El agrietamiento es debido a que el hidrógeno del aire o el hidrógeno proveniente del revestimiento afectan al metal cuando está en estado semi-fluido.

Para contrarrestar ese efecto nocivo del hidrógeno al soldar los aceros arriba mencionados, se fabrican electrodos de bajo hidrógeno, que contienen una mínima proporción de hidrógeno en su revestimiento.

Poseen, además, dos elementos en su revestimiento, que mejoran la calidad de la soldadura. Estos elementos son el carbonato de calcio y la fluorita. El carbonato de calcio, al arder, se descompone en óxido de calcio y gas carbónico. El gas  $\text{CaO}$  se combina con las impurezas, como el fósforo y azufre, perdiéndose en forma de escoria, quedando en consecuencia el metal depositado libre de impurezas. El gas carbónico actúa como protector del metal en fusión. La fluorita se descompone al arder en calcio (Ca) y fluor (F). El fluor se combina con el hidrógeno formando gas fluorhídrico (HF). Este gas de composición química muy estable se escapa y desaparece del acero que se ha soldado, dejando de esta manera un depósito casi libre de hidrógeno. Otra función del carbonato de calcio y de la fluorita es el afinamiento del grano metálico del depósito, quedando de esta manera un depósito de metal más elástico.

Características generales de los electrodos de bajo hidrógeno:

- Penetración mediana.
- Propiedades mecánicas excepcionales.
- Depósitos de muy alta calidad.

#### 1.2.2.2. ELECTRODOS CON REVESTIMIENTO RUTÍLICO

Los elementos rutilicos en el revestimiento permiten un fácil encendido y mantenimiento del arco, siendo estos electrodos los más apropiados para soldadores principiantes u operarios con poca experiencia en soldadura eléctrica. Las características generales de los electrodos rutilicos son:

- Mediana penetración.
- Cordones de buen aspecto.
- Excelente calidad de los depósitos de soldadura.
- Facilidad de encendido y mantenimiento del arco eléctrico.
- Escoria liviana y fácil de desprender.
- Fluidez y rapidez de fusión del electrodo.

#### 1.2.2.3. ELECTRODOS CON REVESTIMIENTO CELULÓSICO

El revestimiento de estos electrodos contiene una adecuada proporción de elementos químicos de naturaleza celulósica. Durante el encendido y mantenimiento del arco, la celulosa se descompone en  $\text{CO}_2$  y vapor de agua, formando de esta manera una gran cantidad de gases que, al buscar rápida salida por el extremo del electrodo, produce un efecto de chorro. La fuerza de los gases excava el material caliente y permite que la mezcla fundida del metal base y del electrodo penetre a una mayor profundidad.

Algunas características de estos electrodos son.

- Penetración profunda
- Arco potente y estable
- Calidad del depósito a prueba de rayos X
- Solidificación rápida de los cordones, lo que permite su empleo eficiente en todas las posiciones de soldadura
- Ideal para posiciones forzadas, aún en materiales sucios y oxidados
- Escoria liviana<sup>36</sup>

#### 1.2.3. FUNCIONES DEL REVESTIMIENTO DE LOS ELECTRODOS

El recubrimiento tiene algunas funciones:

- a) Una es el de proteger el arco al proveer una capa densa e impenetrable de vapor o gas alrededor del metal fundido necesaria para impedir el ingreso de nitruros y óxidos a las soldadura.
- b) Otra es proveer desoxidantes para proteger el charco de soldadura.
- c) Una tercera es proveer un manto de escoria que permite su enfriamiento lento.

- d) Establece las características eléctricas del electrodo.
- e) Provee elementos aleantes para cambiar las propiedades mecánicas del material soldado.<sup>6</sup>

#### **1.2.4. VENTAJAS Y USOS PRINCIPALES**

Es el proceso más popular entre este tipo de procesos. Tiene una flexibilidad máxima y puede soldar muchos metales en todas las posiciones y en cualquier espesor. La inversión del equipo es relativamente pequeña y la mayoría de los soldadores tienen la habilidad necesaria para emplear este proceso. Se utiliza en las operaciones de manufactura y se usa ampliamente en el trabajo de campo para construcción y mantenimiento. Este proceso es idóneo para todas las posiciones así como cualquier corriente y polaridad dependiendo del electrodo.

Este proceso puede usarse para soldar la mayoría de los aceros y algunos de los metales no ferrosos, como se indica en la tabla 1.3. Su principal uso es para unir aceros de todo tipo y para soldar hierro fundido y hierros maleables. Se usa para soldar níquel y sus aleaciones así como el cobre pero en menor grado. Este tipo de soldadura también se usa para recubrimientos.

#### **1.2.5. LIMITACIONES DEL PROCESO**

La principal limitación se encuentra en su característica manual en la cual el soldador debe detenerse, romper la escoria, quitar la colilla del electrodo y colocar un nuevo electrodo. Esto impide que el soldador supere un factor operativo del 25%.

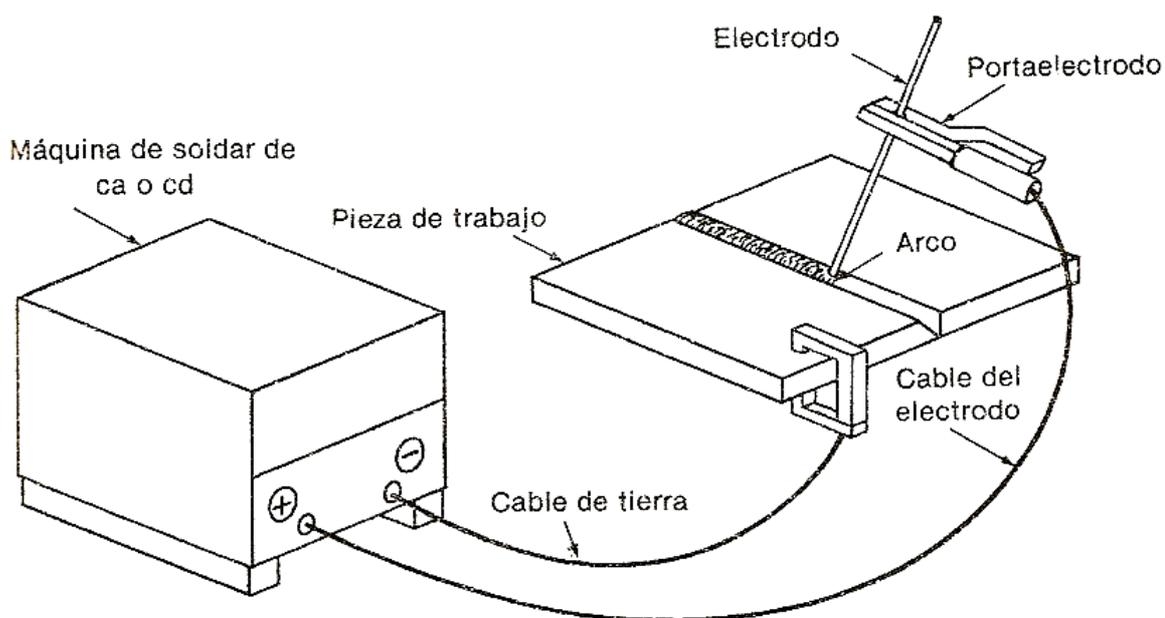
Otra limitación es la pérdida del material de aporte, la cual produce una utilización total del electrodo revestido de aproximadamente 65%.

No se usa para soldar magnesio, metales preciosos y metales refractarios.<sup>6</sup>

Tabla 1.3.- Metales soldables SMAW <sup>6</sup>

Metal Base	Soldabilidad
Aluminios	Posible pero no popular
Bronces	Soldable
Cobres	Posible pero no popular
Cupro – Níquel	Aceptable
Hierro fundido y maleable	Soldable
Hierro Forjado	Soldable
Inconel	Soldable
Níquel	Soldable
Monel	Soldable
Acero de bajo carbono	Soldable
Acero de baja aleación	Soldable
Alto y mediano Carbono	Soldable
Aceros de aleación	Soldable
Aceros inoxidables	Soldable

### 1.2.6. CIRCUITOS DE SOLDADURA

Figura 1.5.- Circuito de Soldadura para el proceso SMAW <sup>6</sup>

### **1.2.7. VARIABLES PRINCIPALES DEL PROCESO SMAW**

Estas variables determinan las características importantes del cordón depositado como son: penetración, forma geométrica y otras de naturaleza metalúrgica.

#### **1.2.7.1. CORRIENTE DE SOLDADURA**

La soldadura por arco de metal protegido puede efectuarse con corriente tanto alterna como continua, siempre que se use el electrodo adecuado. El tipo de corriente de soldadura, la polaridad y los constituyentes de la cobertura del electrodo afectan la rapidez de fusión de todos los electrodos cubiertos. Para un electrodo determinado la rapidez de fusión se relaciona directamente con la energía eléctrica suministrada al arco. Parte de esta energía se destina a fundir una porción del metal base, y la otra parte sirve para fundir el electrodo.

Los electrodos cubiertos de un tamaño y clasificación específicos pueden operar de manera satisfactoria a diversos amperajes dentro de cierto intervalo. Este intervalo varía un poco dependiendo del espesor y la formulación de la cobertura.

Para un tipo y tamaño de electrodo específico, el amperaje óptimo depende de varios factores como la posición de soldadura y el tipo de unión. El amperaje debe ser suficiente para obtener una buena fusión y penetración sin perder el control del charco de soldadura.

#### **1.2.7.2. VOLTAJE EN EL ARCO (V)**

La longitud del arco es la distancia entre la punta derretida del núcleo del electrodo y la superficie del charco de soldadura. La transferencia de metal desde la punta del electrodo hasta el charco de soldadura no es una acción suave y uniforme. El voltaje instantáneo del arco varía al transferirse gotitas de metal fundido a través del arco, incluso cuando la longitud de este se mantiene constante. Para la longitud de arco correcta se requiere una alimentación del electrodo constante y consistente. La longitud de arco

correcta varía de acuerdo a la clasificación del electrodo, diámetro y revestimiento y además varía con el amperaje y la posición de soldadura.

#### 1.2.7.3. VELOCIDAD DE SOLDADURA (S)

La velocidad de soldadura es la tasa a la cual el electrodo se mueve a lo largo de la junta. Una velocidad de soldadura adecuada es aquella que produce un cordón de soldadura de buen perfil y tiene una buena apariencia. La velocidad de soldadura depende de algunos factores como: tipo de corriente y polaridad, amperaje, posición de soldadura, tasa de fusión del electrodo, espesor del material, condición superficial del material base, tipo de junta, entre otros.

La velocidad de soldadura influye en la entrada de calor al metal base. Esto a su vez afecta las estructuras metalúrgicas del metal soldado y la zona afectada por el calor. Bajas velocidades de soldadura incrementan el calor entrante y por lo tanto incrementa el tamaño de la zona afectada por el calor y reduce la tasa de enfriamiento de la soldadura. Altas tasas de enfriamiento pueden incrementar la resistencia y la dureza de la soldadura en un acero endurecible, a menos que un precalentamiento adecuado se realice para evitar endurecimiento.<sup>8</sup>

#### 1.2.8. FUENTE DE ENERGÍA

La fuente de energía para el soldeo debe presentar una característica de caída o de intensidad de corriente constante, para que la corriente de soldadura se vea poco afectada por las variaciones de longitud del arco eléctrico.

Para la soldadura en corriente continua se pueden usar transformadores rectificadores o moto generadores. Para el uso de corriente alterna se utilizarán transformadores.<sup>37</sup>

### 1.2.9. CLASIFICACIÓN DE ELECTRODOS SEGÚN AWS

Los electrodos se clasifican en base a la composición química, propiedades mecánicas o ambas y están dadas por la AWS bajo la tabla 1.4.

Tabla 1.4.- Especificación de los electrodos para SMAW según AWS <sup>6</sup>

AWS ESPECIFICACIONES DE ELECTRODOS REVESTIDOS	
Tipo de electrodo	Especificación AWS
Aceros al carbono	A 5.1
Aceros al carbono de baja aleación	A 5.5
Aceros resistentes a la corrosión	A 5.4
Hierro fundido	A 5.15
Aluminio y aleaciones de aluminio	A 5.3
Cobre y aleaciones de cobre	A 5.6
Níquel y aleaciones de Níquel	A 5.11
Recubrimientos duros o recargues	A 5.13 y A5.21

#### 1.2.9.1. CLASIFICACIÓN AWS DE LOS ELECTRODOS REVESTIDOS PARA ACEROS DE BAJO CARBONO (AWS A5.1)

La codificación para electrodos revestidos de la AWS (American Welding Society) es la siguiente:

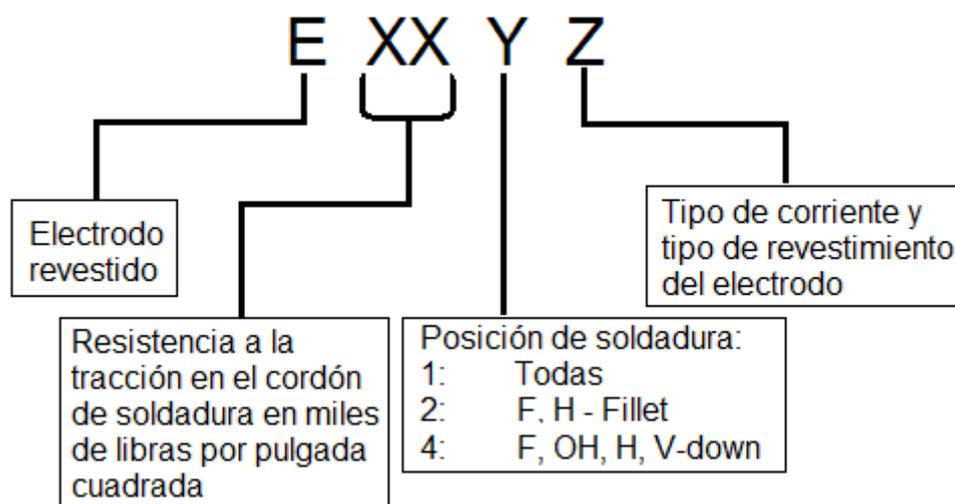


Figura 1.6.- Denominación de los electrodos revestidos según la AWS <sup>7</sup>

### 1.3. PROCESO GMAW

#### 1.3.1. FUNDAMENTO TEÓRICO

La soldadura por arco con gas metálico GMAW (Gas Metal Arc Welding) es un proceso que usa un arco entre un electrodo continuo de metal de aporte y el charco de soldadura. El proceso se lleva a cabo con una protección proveniente de un gas suministrado externamente y sin la aplicación de presión.

El metal que se esté soldando determinará la composición del electrodo y el gas de protección. El gas de protección, la clase y el tamaño del electrodo afectan el tipo de transferencia del metal. El modo de transferencia del metal es una forma de identificar las variantes del proceso.<sup>6</sup>

#### 1.3.2. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DEL METAL

Las características del proceso GMAW son mejor descritas en términos de los tres modos básicos de transferencia de metal desde el electrodo al metal base.<sup>8</sup>

##### 1.3.2.1. TRANSFERENCIA POR CORTOCIRCUITO

El cortocircuito engloba los menores rangos de corriente y diámetros de electrodos asociados con GMAW. El metal se transfiere desde el electrodo al material base solamente durante un periodo en el cual el electrodo está en contacto con el charco de soldadura. No hay transferencia de metal en el intervalo que tiene el arco de soldadura.

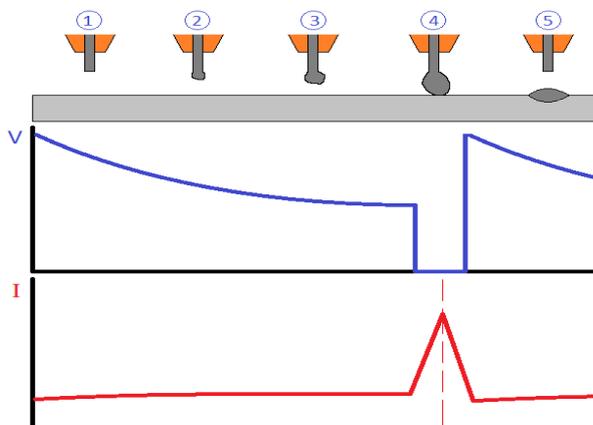


Figura 1.7.- Transferencia de metal por cortocircuito

Aun cuando la transferencia de metal ocurre solamente durante el cortocircuito, la composición del gas de protección tiene un gran efecto en la tensión superficial de la pileta fundida. Un cambio de gas de protección afectará el tamaño de la gota y la duración del cortocircuito. El tipo de gas de protección influencia en las características operacionales del arco y la penetración en el metal base. Para alcanzar una buena soldadura con baja salpicadura y buena penetración son usadas mezclas de argón con CO<sub>2</sub> para soldadura de aceros de bajo carbono y de baja aleación.<sup>8</sup>

#### 1.3.2.2. TRANSFERENCIA GLOBULAR

La transferencia globular se caracteriza por una gota de tamaño mayor al diámetro del electrodo. Por esta propiedad la gota cae por gravedad y una transferencia exitosa se da únicamente en posición plana.

Con corrientes promedio, un poco por encima de las usadas para transferencia por cortocircuito, se produce la transferencia globular dirigida axialmente con protección de gas inerte Helio. Si la longitud de arco es corta puede producirse salpicadura considerable al sobrecalentar las gotas de metal. Por lo tanto, la longitud del arco debe ser lo suficientemente larga para asegurar un desprendimiento de la gota antes de que esta toque el charco de soldadura. El uso de CO<sub>2</sub> como gas de protección produce una transferencia globular dirigida al azar cuando la corriente de soldadura y el voltaje están significativamente por encima de los rangos para transferencia por cortocircuito.<sup>8</sup>

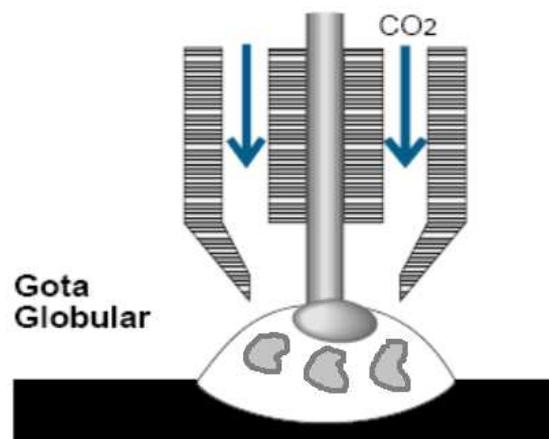


Figura 1.8.- Transferencia globular<sup>3</sup>

### 1.3.2.3. TRANSFERENCIA POR ASPERSIÓN O SPRAY

Con protección gaseosa rica en Argón es posible producir una transferencia tipo spray la cual es muy estable y libre de salpicaduras. Esto requiere el uso de polaridad inversa y un nivel de corriente por encima de los valores críticos llamados corrientes de transición. Por encima de estas corrientes, la transferencia se produce por medio de gotas muy pequeñas que se forman y se separan en el orden de cientos por segundo. Estas gotas se mueven axialmente a través del arco eléctrico.

La corriente de transición, la cual es dependiente de la tensión superficial del metal líquido, es inversamente proporcional al diámetro del electrodo y en menor grado a la longitud libre del electrodo. Esta corriente varía con la temperatura de fusión del metal de aporte y la composición del gas de protección.

Este tipo de transferencia puede darse en cualquier posición debido a que las gotas de metal van hacia el charco a velocidades más grandes que las ocasionadas por el efecto de la gravedad. Adicionalmente, puede ser usada para soldar casi cualquier metal o aleación por el uso de gases inertes. Para soldadura de láminas metálicas delgadas no es apropiado por el alto amperaje utilizado.<sup>8</sup>

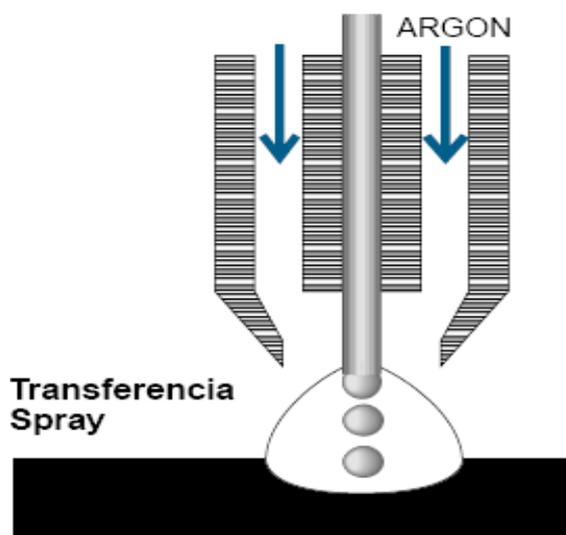


Figura 1.9.- Transferencia Spray<sup>3</sup>

### 1.3.3. VENTAJAS Y USOS PRINCIPALES

El proceso de soldadura GMAW tiene altas tasas de aportación en comparación con la soldadura por arco metálico protegido; además posee un elevado factor de operatividad en comparación con la soldadura SMAW. Alta tasa de utilización del material de aporte, eliminación de escoria y fundentes y reducción de humos y vapores. El nivel de habilidad en el método de aplicación semiautomático es ligeramente menor que el que se requiere para la soldadura manual por arco metálico protegido.

El método más popular es el semiautomático aunque también puede ser automatizado. Se aplica para todas las posiciones, sin embargo depende del tamaño del electrodo y del tipo de transferencia del metal.<sup>6</sup>

Los metales que pueden ser soldados con este proceso se presenta en la tabla 1.5.

Tabla 1.5.- Metales soldables GMAW<sup>6</sup>

Metal base	MODALIDAD DE TRANSFERENCIA DEL METAL			
	Cortocircuito	Rocío	Globular	Pulsación
Aluminios	No	Si	No	Si
Bronces	No	Si	No	Si
Cobre	No	Si	No	Si
Cupro - Níquel	No	Si	No	Si
Hierro fundido	Si	No	No	-
Magnesio	No	Si	No	Si
Inconel	No	Si	No	Si
Níquel	No	Si	No	Si
Monel	No	Si	No	Si
Acero de bajo carbono	Si	Si	Si	-
Acero de baja aleación	Si	Si	Si	-
Acero de carbono medio	Si	Si	Si	-
Acero inoxidable	Si	Si	No	-
Titanio	No	Si	No	-

### 1.3.4. LIMITACIONES DEL PROCESO

Las pistolas de soldadura por arco de metal con gas no son tan flexibles en el manejo como las de electrodo revestido en SMAW. A menudo se presenta la objeción de que a los equipos de costo más elevado es indispensable darles mantenimiento adicional. Tiene problemas con las corrientes de aire que afectan la eficiencia de la envoltura de protección de gas alrededor del área del arco.<sup>6</sup>

### 1.3.5. CIRCUITO DE SOLDADURA

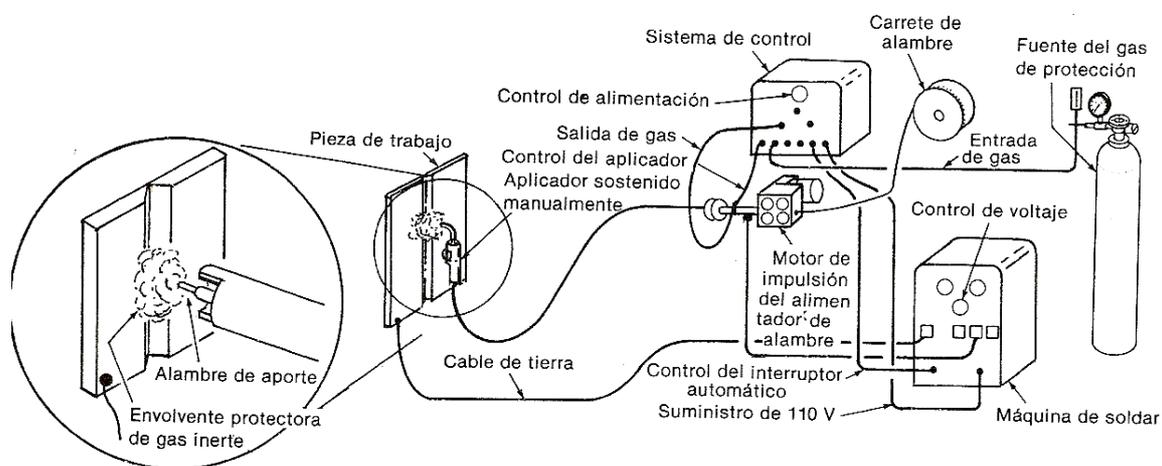


Figura 1.10.- Equipos para el proceso GMAW<sup>6</sup>

### 1.3.6. VARIABLES DE SOLDADURA DEL PROCESO GMAW

Las variables que pueden afectar la penetración, geometría del cordón y calidad de soldadura son:

- Corriente de soldadura (velocidad de alimentación de electrodo)
- Polaridad
- Voltaje
- Velocidad de soldadura
- Longitud libre del electrodo
- Orientación del electrodo
- Posición de soldadura
- Diámetro del electrodo
- Composición del gas de protección y flujo.<sup>8</sup>

### 1.3.6.1. CORRIENTE DE SOLDADURA Y POLARIDAD

La mayoría de aplicaciones para GMAW usa corriente continua polaridad inversa. Esta condición genera un arco estable, buena transferencia de metal, baja salpicadura y buenas características del cordón en penetración.

Si todas las demás variables se mantienen constantes, el amperaje de soldadura varía de manera no lineal con la velocidad de alimentación del electrodo y siguen aproximadamente la siguiente ecuación

$$\omega = aI + bLI^2$$

Ecuación 1.3.- Velocidad de alimentación del electrodo

En donde:

- $\omega$  = velocidad de alimentación del electrodo, [in/min] o [mm/s]
- $a$  = constante de proporcionalidad de calentamiento y enfriamiento del electrodo. Su magnitud depende de la polaridad, composición y otros factores.
- $b$  = constante de proporcionalidad de calentamiento por resistencia eléctrica.
- $L$  = la extensión libre del electrodo (stickout)
- $I$  = Corriente de soldadura

Un incremento de la corriente de soldadura producirá:

- Un incremento en la penetración y ancho del cordón de soldadura
- Un incremento en la tasa de depósito
- Un incremento en el tamaño del cordón de soldadura.<sup>8</sup>

### 1.3.6.2. VOLTAJE

Con GMAW, la longitud de arco es una variable crítica que debe ser controlada. Una longitud muy amplia puede impedir la protección gaseosa, producir salpicaduras así como porosidades e inestabilidad del arco.

El voltaje depende de la longitud de arco así como de otras variables como composición y dimensiones del electrodo, gas de protección, técnica de soldadura. Con todas las demás variables constantes el voltaje está directamente relacionado con la longitud de arco. Un incremento del voltaje

tiende a generar cordones más planos y más anchos. Un voltaje excesivo puede causar porosidades y salpicadura. Con voltajes bajos se obtienen cordones más delgados y más profundos.

#### 1.3.6.3. VELOCIDAD DE SOLDADURA

La velocidad de soldadura es la tasa lineal a la cual el arco se mueve a lo largo de la junta de soldadura. Con otras variables constantes, la penetración es máxima cuando la velocidad de soldadura es intermedia. Cuando la velocidad de soldadura decrece, el depósito de material de aporte por unidad de longitud crece. Cuando la velocidad de soldadura crece, la energía térmica impartida al material base decrece.<sup>8</sup>

#### 1.3.7. FUENTES DE ENERGÍA

La fuente de energía deberá ser capaz de funcionar a elevadas intensidades, generalmente menores de 500A en la soldadura semiautomática y suministrar corriente continua.

La fuente de energía apropiada es una fuente de voltaje constante. Lo que significa que la longitud del arco se mantiene constante a través del fenómeno de autorregulación. Esto es, cuando la fuente suministra la intensidad de corriente necesaria para fundir el alambre a medida que este se suministra, manteniéndose la longitud del arco correspondiente a la regulación del voltaje elegida.<sup>37</sup>

#### 1.3.8. ESPECIFICACIÓN DE ELECTRODOS

La especificación de los electrodos dada por la AWS para electrodos continuos y sólidos se muestra en la figura 1.11. la norma correspondiente a esta especificación es AWS A5.18.

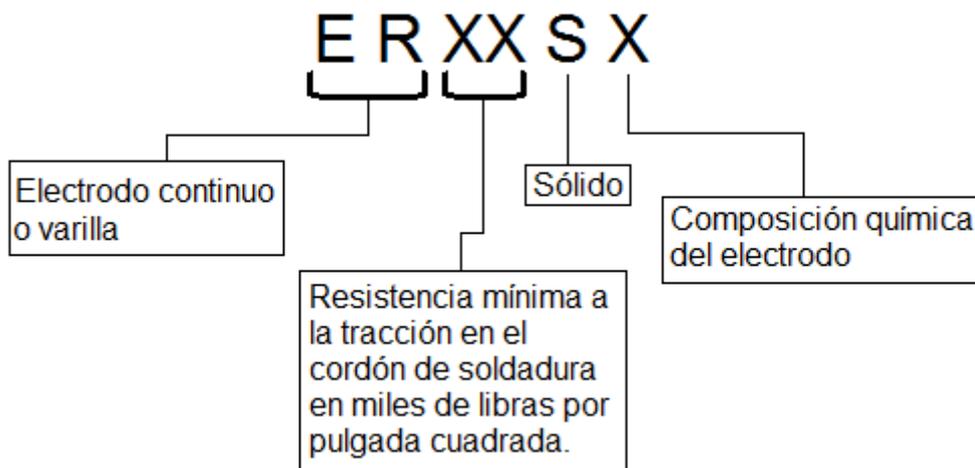


Figura 1.11.- Denominación de los electrodos sólidos para GMAW según la AWS<sup>9</sup>

### 1.3.9. GASES DE PROTECCIÓN

La función primordial de los gases de protección es evitar que el metal a altas temperaturas, el baño de fusión y el electrodo se oxiden o contaminen con impurezas. Si el aire entra en contacto con el metal fundido, el oxígeno del aire reaccionará con el material produciendo óxidos, el nitrógeno puede causar porosidad y la humedad del aire puede también causar porosidad y provocar grietas.

Otra función importante de los gases de protección es la de facilitar la transferencia del material en la soldadura por arco, ionizándose para permitir el establecimiento del arco y la formación de la columna de plasma.

Se utilizan básicamente tres gases como protección durante el soldeo:

- Argón
- Helio
- Dióxido de carbono

Estos tres gases se utilizan tanto separadamente como mezclados entre sí.

Se añaden en algunos casos pequeñas cantidades de:

- Oxígeno
- Hidrógeno
- Nitrógeno

En la figura 1.12 se clasifican los gases en dos grandes grupos: activos e inertes, al lado de cada gas se indica su símbolo o fórmula química.

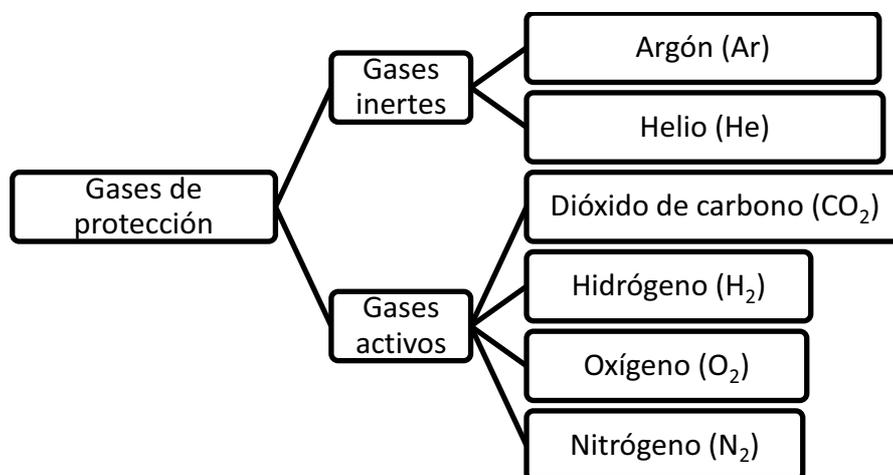


Figura 1.12.- Clasificación de los gases de protección.

Una mezcla de gases es activa siempre que alguno de sus componentes lo sea y solo es inerte si todos sus componentes lo son. Un gas se denomina activo porque reacciona químicamente de alguna forma a la temperatura del arco, al contrario que los inertes que permanecen inalterables en cualquier circunstancia.

#### 1.3.9.1. PROPIEDADES DE LOS GASES

Las propiedades de los gases a tener en cuenta son:

- Energía de ionización
- Densidad
- Conductividad

##### 1.3.9.1.1. ENERGÍA DE IONIZACIÓN:

Cuanto mayor sea la energía de ionización de un gas, más difícil será el establecimiento del arco, dificultad de encendido y menor estabilidad del arco, pero mayor será la energía que aporte a la pieza. La energía para ionizar cualquiera de los gases activos es mayor a la energía de ionización de los gases inertes, consecuentemente, aportarán mayor calor a la pieza.

#### 1.3.9.1.2. DENSIDAD

Cuanto mayor sea la densidad de un gas se requerirá menor caudal para obtener la misma protección, ya que cubrirá más fácilmente la zona de soldeo.

#### 1.3.9.1.3. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

La conductividad térmica es la facilidad para transmitir calor. Cuanto mayor sea la conductividad térmica, la distribución de temperaturas en el arco es más homogénea, dando lugar a cordones más anchos y penetración más uniforme

#### 1.3.9.2. ARGÓN

Las características de este gas son:

- Eficiente protección debido a su alta densidad. Es 1.4 veces más pesado que el aire lo que le permite cubrir bien el área de soldadura en contraposición al Helio, cuya densidad es 10 veces menor a la del argón.
- Buena estabilidad del arco. El argón posee una baja energía de ionización, lo que facilita el arranque y origina arcos estables y tranquilos con pocas proyecciones.
- Económico. El argón es menos costoso que el helio, aunque más caro que el CO<sub>2</sub>
- Forma del cordón y penetración. El argón tiene una conductividad térmica más baja que el helio, por lo que el calor se concentra en la zona central del arco produciendo cordones con buena penetración.

#### 1.3.9.3. HELIO

Las características del helio son:

- Potencial de ionización elevado que permite realizar soldadura a gran velocidad
- Alta conductividad por lo que la columna de plasma es ancha con aporte térmico elevado.

- Muy baja densidad que requiere que el caudal sea muy elevado para una correcta protección, acompañada de menor estabilidad de arco en comparación con argón

#### 1.3.9.4. DIÓXIDO DE CARBONO

Las ventajas importantes son:

- Bajo costo
- Gran penetración
- Alta velocidad de soldeo

Los inconvenientes son:

- Se producen gran cantidad de salpicaduras
- La superficie de los cordones queda ligeramente oxidada

A veces se utiliza mezclado con argón para disminuir los inconvenientes del  $\text{CO}_2$ .<sup>37</sup>

## 1.4. PROCESO SAW

### 1.4.1. FUNDAMENTO TEÓRICO

La soldadura por arco sumergido SAW (Submerged Arc Welding) es un proceso que usa un arco entre un electrodo de metal desnudo y el charco depositado. El arco y el metal fundido están protegidos por una capa de fundente granular sobre las piezas de trabajo.<sup>6</sup>

### 1.4.2. VENTAJAS Y USOS PRINCIPALES

Las principales ventajas del proceso son:

- Alta calidad del metal depositado
- Tasa de deposición y velocidad, extremadamente altas
- Soldadura con un acabado suave y uniforme sin salpicaduras
- Poco o nada de humo
- Ausencia de destellos del arco y por consiguiente mínima necesidad de ropas de protección
- Alta eficiencia en uso del alambre electrodo
- Fácil automatización para el logro de un alto factor operativo

- Habilidades manipulativas normalmente necesarias
- El método de aplicación es el mecanizado en el cual un operador controla toda la operación. También se encuentra el método automático, donde toda operación consiste en oprimir un botón.

Los metales que pueden ser soldados con este proceso se presentan en la tabla 1.6.

Tabla 1.6.- Metales soldables SAW<sup>6</sup>

Material base	Soldabilidad
Fierro forjado	Soldable
Acero de bajo carbono	Soldable
Acero de baja aleación	Soldable
Medio y alto carbono	Posible pero no popular
Acero de aleaciones	Posible pero no popular
Acero inoxidable	Soldable

### 1.4.3. CIRCUITO DE SOLDADURA

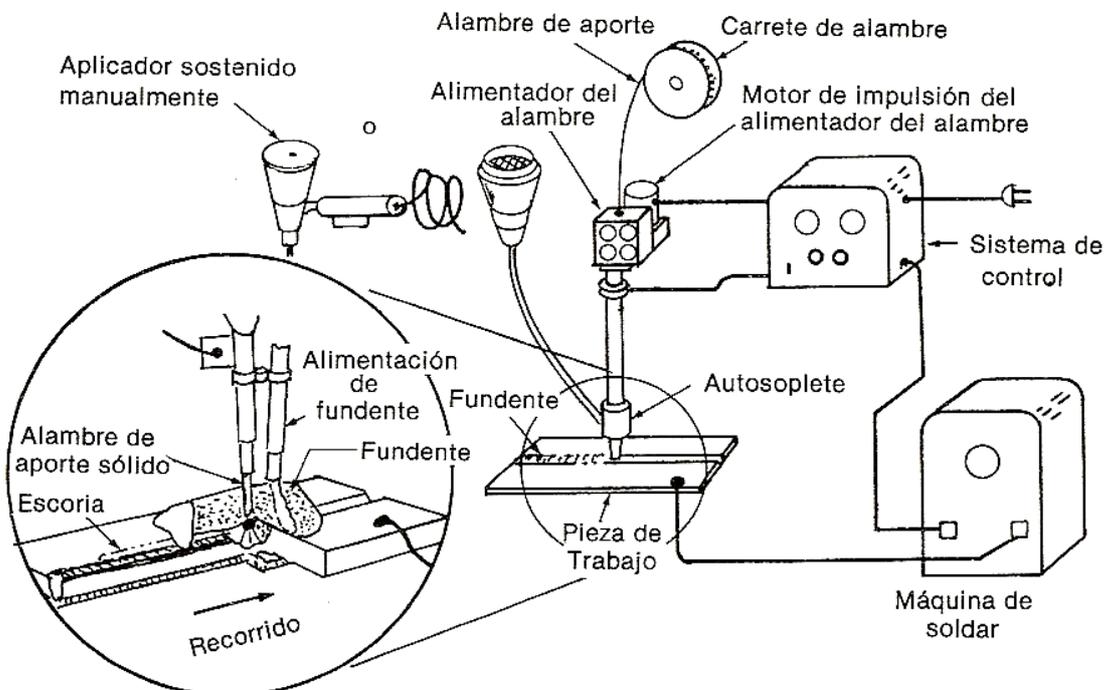


Figura 1.13.- Equipos para el proceso SAW<sup>6</sup>

#### **1.4.4. LIMITACIONES**

Una limitación importante de la soldadura por arco sumergido es su reducida capacidad en cuanto a las posiciones para soldar. La otra limitación es que se usa principalmente para soldar aceros. El consumo de alto calor y el ciclo de enfriamiento lento pueden constituir un problema cuando se sueldan aceros templados o forjados.<sup>6</sup>

#### **1.4.5. VARIABLES DE SOLDADURA DEL PROCESO SAW**

El control de las variables operacionales del proceso SAW es esencial para obtener altas tasas de producción de soldadura y de alta calidad. Estas variables son: amperaje, tipo y distribución del fundente, voltaje, velocidad de avance, tamaño del electrodo, longitud libre del electrodo, tipo de electrodo y ancho y profundidad de la capa de fundente.

##### **1.4.5.1. AMPERAJE DE SOLDADURA**

La corriente de soldadura es la variable que más influye porque controla la tasa a la cual el electrodo es fundido y por lo tanto la tasa de depósito, la profundidad de penetración y la cantidad de material base fundido.

Las siguientes son tres reglas que corresponden a la corriente de soldadura:

- a) Al aumentar la corriente, también aumenta la penetración y la tasa de depósito.
- b) Corriente excesiva produce un arco de demasiada penetración, pudiendo perforar o un cordón alto y delgado.
- c) Muy baja corriente de soldadura produce un arco inestable.<sup>8</sup>

##### **1.4.5.2. VOLTAJE DE SOLDADURA**

El ajuste de voltaje de soldadura varía con el largo del arco entre el electrodo y la pileta de metal de soldadura. El voltaje tiene poco efecto en la tasa de depósito, la cual es determinada por la corriente de soldadura. El voltaje principalmente determina la forma de la sección transversal del cordón de soldadura y su apariencia.

El aumento del voltaje de soldadura con corriente constante y velocidad de soldadura tiene los siguientes efectos:

- a) Producir un cordón más ancho y plano.
- b) Incrementar el consumo de fundente.
- c) Tiende a reducir la porosidad causada por óxidos en el acero.

Un voltaje excesivo puede provocar:

- a) La producción de la forma de un cordón de forma que este sea sujeto a fisuras.
- b) La remoción dificultosa de escoria en soldaduras de ranura.
- c) Producir un cordón cóncavo que puede ser sujeto de fisuras.<sup>8</sup>

#### 1.4.5.3. VELOCIDAD DE AVANCE

Con cualquier combinación de corriente y voltaje de soldadura, los efectos del cambio de velocidad de soldadura siguen un camino general. Si la velocidad de avance crece, el calor entrante por unidad de longitud de soldadura decrece y menor metal de aporte es aplicado por unidad de longitud de soldadura, resultando en soldadura de menor refuerzo.

La penetración de la soldadura es afectada más por la velocidad de avance que por cualquier otra variable que no sea la corriente. Esto es verdad excepto para velocidades de soldadura excesivamente lentas pudiendo causar corte, cordones convexos propensos a fisuras. La velocidad de soldadura está relacionada con la corriente y el tipo de fundente.

#### 1.4.6. FUENTES DE ENERGÍA

Es fundamental en este tipo de soldadura una fuente que sea capaz de suministrar altas intensidades con un factor de operación cercano al 100%. Para este proceso se pueden utilizar: fuentes de corriente continua con característica de voltaje constante, fuentes de corriente continua con característica de corriente constante y fuentes de corriente alterna constituidas por transformadores.

La fuente de energía recomendada para una soldadura común es la que provee corriente continua con una fuente de voltaje constante.

### 1.4.7. CLASIFICACIÓN DE ELECTRODOS Y FUNDENTES

Los alambres electrodos se clasifican de acuerdo a su composición química. Según la AWS A5.17 se ha designado a los electrodos de la siguiente manera:

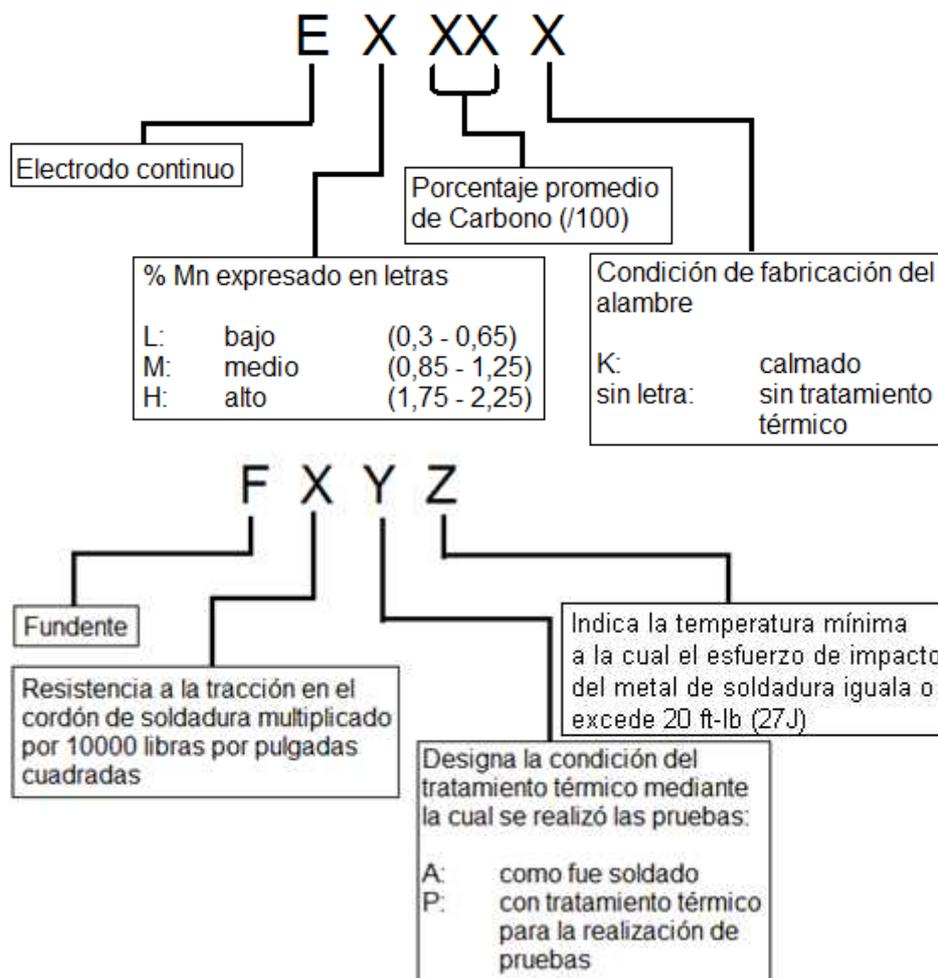


Figura 1.14.- Denominación de los electrodos sólidos y fundentes para SAW según la AWS <sup>10</sup>

### 1.4.8. FUNDENTES

Los fundentes usados en la soldadura por arco sumergido protegen el baño de fusión de la atmósfera cubriendo el metal con escoria (fundente fundido), limpian el baño de fusión, modifican la composición química e influyen en la forma de la soldadura y sus propiedades mecánicas. Son compuestos minerales mezclados de acuerdo con una formulación determinada. Suelen ser óxidos de diferentes sustancias entre los que se encuentran la sílice, la

alúmina, el óxido de sodio, óxido de potasio, óxido de calcio, fluoruro de calcio, rutilo, etc.

Muchos fundentes tienen componentes para variar la composición química del metal depositado, en este caso será muy importante mantener una relación determinada entre el metal depositado y el fundente así como controlar las variables eléctricas.<sup>37</sup>

## **CAPÍTULO 2**

### **ACEROS AL CARBONO Y DIAGRAMA DE FASES**

#### **2.1. EL ACERO.**

##### **2.1.1. INTRODUCCIÓN.**

Uno de los materiales más versátiles y más representativos a nivel industrial en la actualidad es el acero, debido a la facilidad para ser trabajado en diferentes procesos de fabricación y al bajo costo que relativamente representa en los procesos de construcción y montaje. La investigación llevada por la industria ha permitido obtener una amplia variedad de aceros clasificados y distribuidos mediante normas, de modo de satisfacer los requerimientos de uso para el cual va ser destinado.

El acero es una aleación de hierro y carbono que se funde entre los 1400 y 1500°C, y que mediante el porcentaje de otros elementos aleantes e impurezas y tratamientos ya sean térmicos o de conformado mecánico; se le confiere variación en sus propiedades, tales como: la resistencia al desgaste, tenacidad, maquinabilidad, dureza, soldabilidad, entre otras; las cuales van a ser determinantes para el uso del acero en una infinidad de aplicaciones. Se obtiene a partir de la fundición o hierro colado; éste es muy impuro, pues contiene excesiva cantidad de carbono, silicio, fósforo y azufre, elementos que perjudican considerablemente la resistencia del acero.

El acero líquido se elabora a partir del mineral o de chatarras el cual se solidifica por moldeo en una máquina de colada continua. A la salida, se obtienen los semiproductos, que son las piezas en bruto de las formas finales. Por último, las piezas en bruto se transforman en productos terminados mediante el laminado, y algunos de ellos se someten a tratamiento térmico.

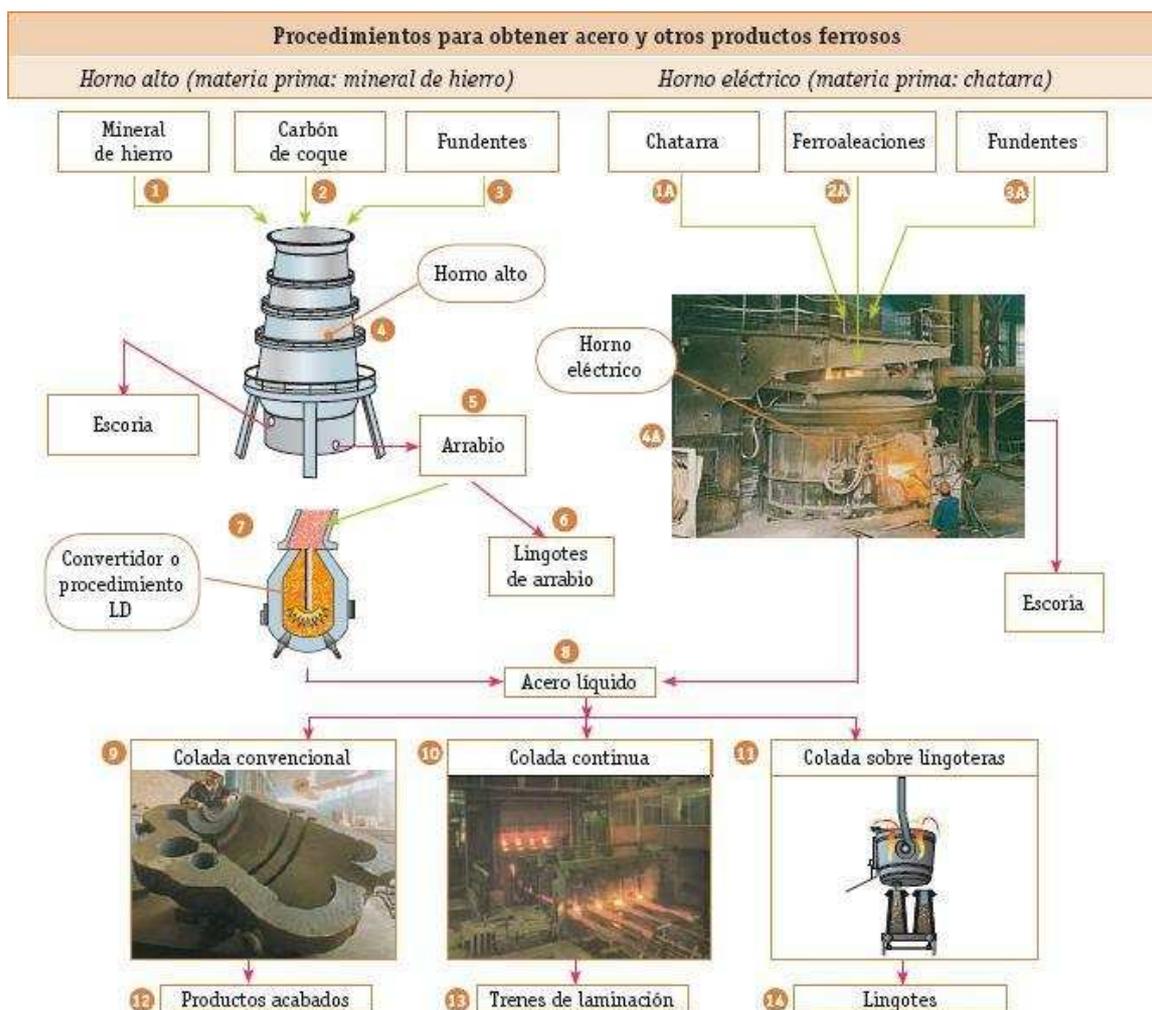


Figura 2.1.- Proceso de obtención del acero <sup>31</sup>

La laminación en frío y en caliente son comúnmente usados en la fabricación de metales y aleaciones. Mediante estos procesos podemos conseguir láminas y planchas de gran longitud y con secciones transversales uniformes. La laminación en caliente consiste en precalentar el material a una alta temperatura y mantenerlo en un horno para que después los lingotes sean extraídos y laminados en caliente en un tren de laminación y desbaste reversible. El laminado continúa hasta que la temperatura de los desbastes planos cae tan baja que hace que muy difícil que la laminación prosiga y hasta que el fleje sea lo suficientemente delgado para enrollarlo. Después del laminado en caliente los rollos se vuelven a calentar en un proceso llamado de recocido de manera que elimine cualquier defecto introducido en el proceso de laminado.

Por otro lado el laminado en frío se efectúa a temperatura ambiente usando trenes de diferentes alturas de desbastación.<sup>11</sup>

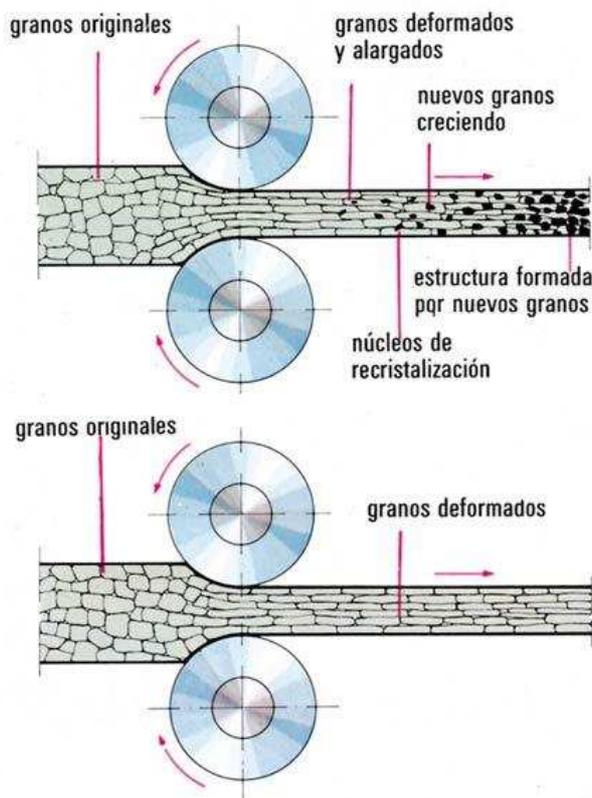


Figura 2.2.- Proceso de laminado del acero<sup>32</sup>

## 2.1.2. PROPIEDADES DE LOS METALES DE IMPORTANCIA PARA SOLDAR.

### 2.1.2.1. RESISTENCIA

La resistencia mecánica es la capacidad de un metal bajo la acción de cargas externas antes de la fractura. El valor de la resistencia indica la fuerza que se requiere para vencer los ligamentos que mantienen unidas las moléculas que forman las estructuras de los cristales. Las cargas externas pueden ser de tracción, compresión, torsión, corte y flexión.

Si el metal vuelve a su posición original cuando la fuerza cesa se dice que ha experimentado una deformación elástica, en cambio, si el material es deformado hasta el extremo en que no puede recuperar completamente sus

dimensiones originales, se dice que ha experimentado un proceso de deformación plástica.<sup>11 y 4</sup>

#### 2.1.2.2. ELASTICIDAD

Al producirse un ensayo de tracción el estiramiento que se produce en la probeta no es de manera uniforme, primero se muestra como un estiramiento elástico, y más tarde un estiramiento permanente.

La pieza experimenta una deformación elástica hasta que el esfuerzo alcance el punto de transición conocido como punto de fluencia o resistencia a la fluencia del metal.<sup>4</sup>

#### 2.1.2.3. DUCTILIDAD

Un material es dúctil cuando puede deformarse permanentemente sin romperse o sin fallar. El hecho de que un metal se doble con facilidad no significa necesariamente que sea dúctil, a menos que tal doblez represente una deformación permanente.<sup>4</sup>

#### 2.1.2.4. FRAGILIDAD

La fragilidad es la propiedad contraria a la ductilidad, son aquellos materiales que fallan sin deformación permanente apreciable, además, un metal frágil también tiene baja resistencia al choque. Un ejemplo de metal frágil es la fundición blanca ordinaria de hierro.<sup>4</sup>

#### 2.1.2.5. DUREZA

La dureza es una medida de la resistencia de un material a la deformación permanente en su superficie. Esta propiedad se mide forzando con un penetrador sobre su superficie.

El valor de dureza sirve como comparación entre materiales y tratamientos, el tratamiento térmico o el trabajo efectuado en una pieza metálica resulta generalmente en un cambio de dureza.

La dureza puede dividirse en tres categorías:

- a) Dureza elástica
- b) Resistencia al corte y abrasión
- c) Resistencia a la indentación

El ensayo de dureza generalmente se realiza imprimiendo un indentador de geometría determinada sobre el material, bajo una carga estática que se aplique directamente o mediante un sistema de palanca. Existen diferentes métodos para determinar la dureza por indentación, entre los cuales tenemos:

- Brinell
- Rockwell
- Vickers

Para objeto de nuestro estudio se prestará mayor énfasis en el método de dureza por indentación Rockwell, ya que mediante este proceso se efectuará las pruebas a las distintas probetas.

#### 2.1.2.5.1. BRINELL

El probador de dureza Brinell generalmente consta de una prensa hidráulica vertical de operación manual, diseñada para forzar un marcador de bola dentro de la muestra. El procedimiento estándar requiere que la prueba se haga con una bola de 10mm de diámetro bajo una carga de 3000kg para metales ferrosos a 500 kg para metales no ferrosos. Para metales ferrosos, la bola bajo presión es presionada dentro de la muestra a prueba por lo menos durante 10 seg; para metales no ferrosos el tiempo es de 30seg.

#### 2.1.2.5.2. ROCKWELL

Se utiliza un procedimiento de lectura directa basado en el principio de medición de profundidad diferencial. La prueba se lleva a cabo al elevar la muestra lentamente contra el marcador hasta que se ha aplicado una carga determinada menor. Luego se aplica la carga mayor a través de un sistema de palanca de carga. Después que la aguja del disco llega al reposo, se quita

la carga mayor, y con la carga menor todavía en acción, el número de dureza Rockwell es leído en el disco medidor.

Existen dos máquinas Rockwell, el probador normal el cual se usa para secciones relativamente gruesas y el probador superficial para secciones delgadas. Las escalas Rockwell empleadas más comúnmente son la B (marcador de bola de 1/16 de pulg. Y 100 kg de carga) y la C (marcador de diamante y 150 kg de carga), ambas obtenidas con el probador normal. Debido a las muchas escalas Rockwell, el número de dureza debe especificarse mediante el símbolo HR seguido de la letra que designa la escala, y precedido de los números de dureza.

Tabla 2.1.- Escalas Rockwell y características.<sup>12</sup>

<i>Escala</i>	<i>Carga mayor kg</i>	<i>Tipo de marcador de muescas</i>	<i>Materiales típicos probados</i>
A	60	Cono de diamante	Materiales duros en extremo, carburos de tungsteno, etc.
B	100	Bola de 1/16"	Materiales de dureza media, aceros al carbono bajos y medios, latón, bronce, etc.
C	150	Cono de diamante	Aceros endurecidos, aleaciones endurecidas y revenidas (tratadas)
D	100	Cono de diamante	Acero superficialmente cementado
E	100	Bola de 1/8"	Hierro fundido, aleaciones de aluminio y magnesio
F	60	Bola de 1/16"	Bronce y cobre recocidos
G	150	Bola de 1/16"	Cobre al berilio, bronce fosfórico, etc.
H	60	Bola de 1/8"	Placa de aluminio
K	150	Bola de 1/8"	Hierro fundido, aleaciones de aluminio
L	60	Bola de 1/4"	Plásticos y metales suaves, como el plomo
M	100	Bola de 1/4"	Igual que la escala L
P	150	Bola de 1/4"	Igual que la escala L
R	60	Bola de 1/2"	Igual que la escala L
S	100	Bola de 1/2"	Igual que la escala L
V	150	Bola de 1/2"	Igual que la escala L

\* Ametek Testing Equipment Systems, East Moline, Ill.

#### 2.1.2.5.3. VICKERS

En esta prueba, el instrumento utilizado es un marcador piramidal de diamante de base cuadrada con un ángulo de 136° entre las caras opuestas.

El intervalo de carga está generalmente entre 1 y 120kg. El probador de dureza Vickers funciona bajo el mismo principio que el probador Brinell, y los números se expresan en términos de carga y de área de la impresión. Como resultado de la impresión sobre la superficie de la muestra será un cuadrado<sup>12</sup>

#### 2.1.2.6. TENACIDAD

Es la propiedad que determina la cantidad de energía que un material absorbe antes de la rotura, también representada como el área bajo la curva esfuerzo - deformación. El valor de esta propiedad no es único ya que depende de la velocidad de aplicación de la carga.

Los materiales se comportan de manera diferente cuando se le aplica una carga progresivamente que cuando se les aplica en forma instantánea (de golpe). El comportamiento frente a cargas instantáneas (impactos) se estudia mediante ensayos los cuales los más usados son: <sup>4</sup>

- Charpi
- Izod

#### 2.1.2.7. FATIGA

Es la propiedad que tiene los materiales para soportar cargas repetitivas o fluctuantes, se determinan mediante pruebas de tipo dinámico, simulando las condiciones de esfuerzo desarrolladas en las partes de una máquina por la vibración que producen. <sup>12</sup>

#### 2.1.2.8. PROPIEDADES QUÍMICAS

La propiedad química más importante en lo referente al proceso de soldadura es la corrosión, siendo esta última la pérdida paulatina de los metales por combinación lenta y gradual con otros elementos y compuestos químicos. La resistencia a la corrosión es la capacidad de un metal para resistir tal ataque. El ataque químico puede ser producido por un gas o un líquido, ya sea en caliente o en frío.

La forma de corrosión más conocida es la que ocurre cuando los metales reaccionan con el oxígeno del aire para formar óxidos, y si este ataque

continúa llegará el momento en que todo el hierro se habrá convertido en óxido de hierro. Los puentes y otras estructuras deben repintarse periódicamente para protegerlos contra la oxidación, porque la pérdida de metal puede debilitar seriamente la estructura. <sup>4</sup>

#### 2.1.2.9. PROPIEDADES ELÉCTRICAS

Las propiedades eléctricas se mucha importancia para el proceso de soldadura son la resistividad eléctrica y su conductividad eléctrica.

Un buen conductor se calienta menos que otro malo cuando se hace pasar la misma cantidad de corriente por cada uno de ellos. Por tanto en la soldadura, el mal conductor requiere menos corriente que el buen conductor, manteniéndose iguales los demás factores.

La resistividad eléctrica depende del contenido de los elementos de aleación. Una solución sólida de dos o más metales tiene siempre mayor resistividad que el metal puro. <sup>4</sup>

#### 2.1.2.10. PROPIEDADES TÉRMICAS

Las propiedades térmicas de importancia en el proceso de soldadura son la conductividad térmica, el coeficiente de dilatación térmica, la fusibilidad, y el calor de fusión.

La conductividad térmica es una medida de la rapidez que la que fluye el calor por el interior de un metal. La cantidad de calor depende del tiempo, el área, de la longitud, la diferencia de temperatura y la conductividad térmica.

La dilatación térmica es el aumento en las dimensiones de un cuerpo debidas a un cambio de su temperatura.

La fusibilidad es una medida de la facilidad de fusión y el calor de fusión es la cantidad de energía necesaria para cambiar un metal de sólido a líquido.

### **2.1.3. INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS ALEANTES EN EL ACERO.**

La tabla 2.2 muestra la influencia que presentan los diferentes elementos aleantes e impurezas en el acero. <sup>13 y 18</sup>

Tabla 2.2.- Elementos aleantes del acero

ELEMENTOS	EFECTOS
Carbono ( C )	Al incrementar la cantidad de Carbono se incrementa la dureza, la resistencia a la tensión y la templabilidad lo que reduce la soldabilidad, ductilidad y maquinabilidad.
Manganeso (Mn)	Adicionando en cantidades hasta el 1,5% incrementa la resistencia y la templabilidad, reduce la soldabilidad, en aceros actúa como recolector para el sulfuro y el oxígeno
Silicio ( Si)	Mejora la resistencia a la oxidación, aumenta la resistencia y la capacidad para endurecer el acero.
Aluminio ( Al )	Actúa como desoxidante, afina el grano para proveer tenacidad
Cromo ( Cr )	En aceros de baja aleación incrementa la resistencia a la oxidación, templabilidad y fatiga a altas temperaturas, además debe ser controlado pues reduce la soldabilidad.
Molibdeno (Mb)	Forma Carburos, se adiciona para incrementar la templabilidad y elevar la resistencia a alta temperatura, generalmente acompañado por el Cr.
Níquel ( Ni )	Por encima del 3,5% es adicionado en aceros de baja aleación para incrementar la dureza y templabilidad. Es el principal formador de austenita, que aumenta la tenacidad y resistencia al impacto. El Níquel se utiliza mucho en los aceros inoxidable, para aumentar la resistencia a la corrosión. El Níquel ofrece propiedades únicas para soldar Fundición.
Azufre ( S )	En cantidades que excedan a 0,05% tiende a causar fragilidad y reduce la soldabilidad. Produce la más alta segregación. Se agrega hasta 0.25%

	para mejorar la maquinabilidad. Los aceros altos en azufre son difíciles de soldar pueden causar porosidad en la soldadura.
Fósforo ( P )	Causa fragilidad cuando se presenta por encima de 0,04%, produce segregación primaria durante la solidificación y secundaria en el estado sólido.
Boro ( B )	Este elemento logra aumentar la capacidad de endurecimiento cuando el acero está totalmente desoxidado. Una pequeña cantidad, (0.001%) tiene un efecto marcado en el endurecimiento del acero, ya que también se combina con el carbono para formar los carburos que dan al acero características de revestimiento duro.
Cobre ( Cu )	El Cobre aumenta la resistencia a la corrosión de aceros al carbono.
Plomo ( Pb )	El Plomo es un ejemplo de elemento casi insoluble en Hierro. Se añade plomo a muchos tipos de acero para mejorar en gran manera su maquinabilidad.
Titanio ( Ti )	Básicamente, el Titanio se utiliza para estabilizar y desoxidar acero, aunque debido a sus propiedades, pocas veces se usa en soldaduras.
Tungsteno ( W )	Se añade para impartir gran resistencia a alta temperatura. El Tungsteno también forma carburos, que son excepcionalmente duros, dando al acero una gran resistencia al desgaste, para aplicaciones de revestimiento duro o en acero para la fabricación de herramientas.

El Carbono es el elemento aleante mas importante y de mayor presencia responsable de impartir la alta resistencia y dureza en el acero, esto debido al ordenamiento que presentan tanto el Hierro como el Carbono. Por otra parte,

el Carbono, por descender el punto de fusión del hierro, hace que se quemen más fácilmente, ocasionándose uniones de soldaduras inadecuadas.

La estructura cristalina del Hierro B.C.C (Cúbica centrada en el cuerpo) y el radio atómico del mismo (doble del tamaño de los átomos de Carbono), permite que en el momento en que la solución se enfríe, se introduzcan los átomos de Carbono en los espacios vacíos o intersticios de la estructura del hierro, razón por la cual se incrementa la resistencia y dureza.

El porcentaje de Carbono en los aceros no debe exceder del 2%; y en caso de que supere esta cantidad, la aleación se denominara fundición. Cuanto mayor es el contenido en carbono de un acero, menor es la cantidad de ferrita y mayor la de perlita. El acero con grandes cantidades de carbono es una mezcla de perlita y cementita.<sup>14</sup>

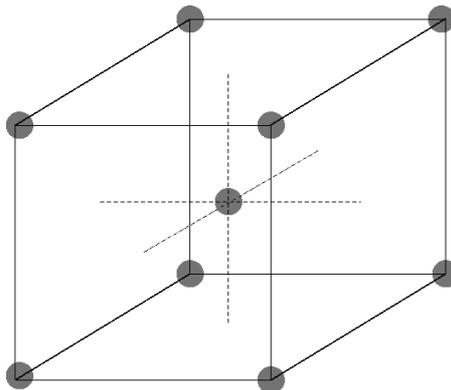


Figura 2.3.- Estructura Cristalina del Hierro (B.C.C)<sup>14</sup>

#### 2.1.4. CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS Y FUNDICIONES

Es muy difícil establecer una clasificación precisa y completa para todos los tipos de acero existentes. Más difícil aún, es establecer una equivalencia exacta entre los aceros de diferentes denominaciones, ya que el ordenamiento de estos materiales en clasificaciones y normas difiere según el país de origen.

En el caso de los aceros al Carbono comunes, los sistemas usuales de clasificación son: SAE, AISI, COPANT, DIN, ASTM, etc.

En el caso de los aceros aleados, la elaboración de sistemas de clasificación es más dificultosa, debido al constante nacimiento de nuevos tipos de acero,

con la presencia de nuevos elementos de aleación. Aún así, para los tipos más comunes de aceros y las cantidades relativamente bajas de elementos aleantes, tanto la SAE, AISI y otras asociaciones técnicas, elaboraron sistemas de clasificación que atienden satisfactoriamente las necesidades de nuestro medio.

Sin embargo, la clasificación comúnmente conocida y de mucha aplicación para el presente proyecto es de acuerdo al porcentaje de Carbono, se dividen fundamentalmente en dos categorías:

- Aceros: Tienen entre 0.05 y 2.0 % en peso de carbono
- Fundiciones: Tienen entre 2 y 4.5 % en peso de carbono.

Los aceros a su vez se dividen en

- Aceros al Carbono
- Aceros de baja aleación
- Aceros de alta aleación

Las fundiciones se dividen en:

- Fundición Blanca
- Fundición Gris
- Fundición Maleable

#### 2.1.4.1. ACERO AL CARBONO SIMPLE

Se trata del tipo básico de acero que contiene menos del 3% de elementos que no son hierro ni carbono, estos constituyen el 90% de los aceros en su totalidad. Estos aceros serán explicados más detalladamente en la sección 2.2.

#### 2.1.4.2. ACEROS DE ALTA ALEACIÓN

Son aquellos que a más de estar constituidos por carbono y porcentajes mayores de 0.5% de silicio, 0.9% de manganeso y 0.1% de fósforo y azufre; contienen otros elementos de aleación, entre los cuales los más frecuentemente usados son: cromo, molibdeno, níquel, vanadio, cobalto,

cobre, titanio, selenio, aluminio, plomo y boro. Estos elementos aleantes deben encontrarse en porcentajes relativamente importantes como para generar cambios en sus propiedades, generalmente la suma de estos elementos debe ser mayor al 5% en peso. Se encuentran entre estos aceros los siguientes:

- a) Aceros inoxidable que requieren la adición de aleantes que aumenten su resistencia a la corrosión, entre los que se cuenta el Cr cuya cantidad puede variar entre 4 y 30% en peso.
- b) Aceros usados en las herramientas que también requieren gran cantidad de aleantes que aumenten su dureza
- c) Superaleaciones, que requieren la adición de elementos aleantes que les proporciona estabilidad en aplicaciones a alta temperatura

#### 2.1.4.3. ACEROS DE BAJA ALEACIÓN

Al igual que los aceros aleados, están constituidos por elementos aleantes pero en menores proporciones, básicamente la suma de estos elementos debe ser menor al 5% en peso. Dentro de este grupo se tiene a los aceros de baja aleación y alta resistencia (HSLA), cuya característica principal es su bajo peso por lo que se usan principalmente en la industria automotriz

#### 2.1.4.4. FUNDICIÓN GRIS

El contenido de carbono varía entre 2.5 y 4 % en peso y el de silicio entre 1 y 3 % en peso. Aquí el grafito existe en forma de hojuelas redondeadas y rodeadas por una matriz de ferrita o de perlita. Debido a las hojuelas de grafito, una superficie de fractura da una apariencia grisacea a la que debe su nombre

#### 2.1.4.5. FUNDICIÓN BLANCA

Para fundiciones bajas en sílice (<1% en peso) y velocidades de enfriamiento rápidas, la mayoría del carbón existe como cementita y no como grafito. Una superficie de fractura de este material, da una apariencia blanca y de allí se deriva su nombre.

Dada la gran cantidad de cementita, esta fundición es muy dura, pero a la vez muy frágil, al punto de que es casi imposible maquinarla. Su uso se limita a aquellas aplicaciones que necesitan un material muy duro, una superficie muy resistente pero un bajo grado de ductilidad tales como los rodillos en algunos molinos.

#### 2.1.4.6. FUNDICIÓN MALEABLE

Calentando la fundición blanca a temperaturas entre 800 y 900°C por un periodo de tiempo prolongado y una atmósfera neutra (para prevenir la oxidación) causa una descomposición de la cementita formando grafito, el cual existe en la forma de clusters o rosetas rodeadas de una matriz perlítica o ferrítica dependiendo de la velocidad de enfriamiento. Genera una estructura nodular.<sup>34</sup>

#### 2.1.4.7. FUNDICIÓN NODULAR

Conocido como hierro dúctil o hierro esferulítico, es hierro fundido en el que el grafito está presente como pequeñas bolas o esferoides. Comparada con el hierro gris presenta mayor resistencia y tenacidad. La fundición nodular difiere del maleable en que generalmente se obtiene como resultado de la solidificación y no requiere tratamiento térmico. Las esferoides son más redondas que los agregados irregulares de carbono revenido encontrados en el hierro maleable.<sup>12</sup>

## 2.2. ACEROS AL CARBONO SIMPLE

Actualmente el acero al carbono en la industria metalmeccánica ecuatoriana representa y cubre un gran campo de aplicaciones, debido al bajo costo y facilidad que representa en la fabricación y montaje de estructuras metálicas de diverso tipo.

Este tipo de aceros contiene menos del 3% de elementos que no son ni hierro ni carbono y constituyen más del 90% de todos los aceros. Los aceros al carbono contienen hasta 1.65% de Manganeso, 0.6% de Silicio y 0.4% de Cobre, estos se clasifican según el porcentaje de Carbono en:

- Aceros Extrasuaves: el contenido de carbono varía entre el 0.1 y el 0.2 %
- Aceros suaves: El contenido de carbono está entre el 0.2 y 0.3 %
- Aceros semisuaves: El contenido de carbono oscila entre 0.3 y el 0.4 %
- Aceros semiduros: El carbono está presente entre 0.4 y 0.5 %
- Aceros duros: la presencia de carbono varía entre 0.5 y 0.6 %
- Aceros extraduros: El contenido de carbono que presentan esta entre el 0.6 y el 07 %

Los requisitos fundamentales que deben cumplir estos aceros, son los siguientes:

- Ductilidad y homogeneidad.
- Valor elevado de la relación resistencia mecánica/límite de fluencia.
- Soldabilidad.
- Apto para ser cortado por llama, sin endurecimiento.
- Resistencia a la corrosión, razonable.

Con excepción de la resistencia a la corrosión, todos los otros requisitos son satisfechos en mayor o menor grado, por los aceros de bajo a medio Carbono, cuyos límites de resistencia varían de 40 a 50 Kgf/mm<sup>2</sup> y alargamientos que están en torno al 20%.

De hecho, un contenido relativamente bajo de Carbono y el trabajado en caliente de laminación de los perfiles estructurales, garantizan la ductilidad necesaria, además de la homogeneidad en todo el producto. La ductilidad de estos aceros garantiza un excelente trabajo en operaciones como el corte, doblado, perforado, etc., sin que se originen fisuras u otros defectos.

La soldabilidad por otra parte, es otra característica muy importante en este tipo de material de construcción, ya que la soldadura de los elementos y piezas en una estructura, es práctica común. Los aceros al Carbono comunes también satisfacen este requisito, pues deben ser soldados sin alterar su microestructura. Del mismo modo, el corte por llama, muy empleado en piezas estructurales, poco afecta a estos aceros, desde el punto de vista de sus alteraciones microestructurales en las proximidades de la zona de corte.

Finalmente, la resistencia a la corrosión sólo es alcanzada por la adición de pequeñas cantidades de cobre, elemento que adicionado en cantidades muy bajas (0,25%) mejora esta propiedad en dos veces en relación al mismo acero sin cobre.

## 2.3. DIAGRAMA DE FASES FE - C.

### 2.3.1. INTRODUCCIÓN

El hierro es un material alotrópico, es decir que cambia su estructura reticular dependiendo de la temperatura, tal como lo muestra en el gráfico 2.1.

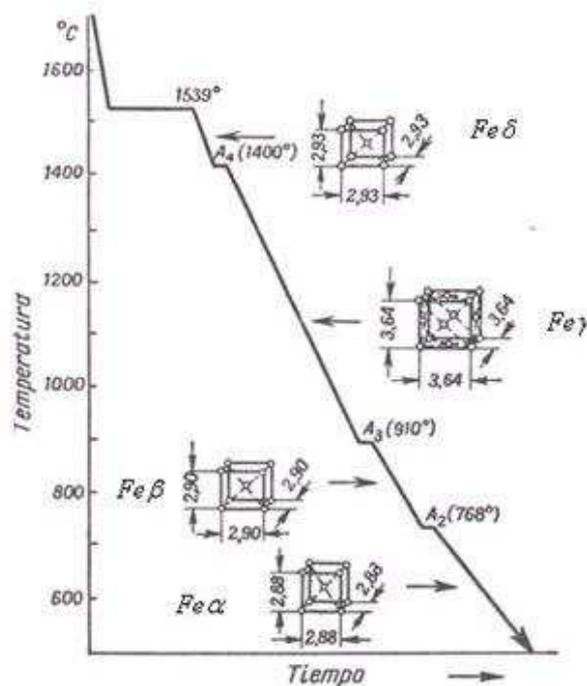


Figura 2.4.- Cambio de estructura reticular del hierro con respecto al tiempo y temperatura <sup>14</sup>

Cuando el Hierro solidifica a 1539°C este se encuentra en la forma b.c.c. es decir cúbica centrada en el cuerpo; si el enfriamiento se retarda cierto tiempo de manera que solidifique a 1400°C, se produce un reacomodo de los átomos de manera que la estructura del hierro será de la forma f.c.c. cúbica centrada en la cara y es no magnético. Si la temperatura de solidificación alcanza los 910°C ocurre otro cambio de fase el cual sigue siendo no magnético y cuya

estructura es la b.c.c. cúbica centrada en el cuerpo, y por último a los 768°C el hierro se hace magnético pero sin cambio reticular. <sup>14</sup>

### **2.3.2. DIAGRAMA DE HIERRO – CARBURO DE HIERRO**

Los cambios reticulares que se presentan en el hierro, se debe básicamente a los elementos aleantes, pero principalmente al carbono. La aleación de hierro-carburo de hierro presenta una porción muy importante dentro del rango entre 0.008% - 6.67% C, en la cual según el porcentaje de cada uno estos dos elementos y el cambio de temperatura de la aleación, se generan diferentes transformaciones, estas se encuentran representadas mediante un diagrama denominado diagrama de equilibrio hierro-carburo de hierro. Muchas propiedades y microestructuras de los hierros colados y los aceros al carbono, pueden ser explicadas si se recurre a dicho diagrama en equilibrio.

Es necesario que se entienda que no es un verdadero diagrama en equilibrio, ya que esto implicaría que no hay cambio de fase con el tiempo. Se sabe que a temperatura ambiente, el carburo de hierro tardaría muchos años en descomponerse en hierro y carbono (grafito) por lo que se considera fase metaestable, razón por la cual técnicamente el diagrama hierro-carburo de hierro representa condiciones metaestables pero puede considerarse que se produzcan cambios y transformaciones en equilibrio, bajo condiciones de enfriamiento y calentamiento relativamente lentos, de modo que los procesos de difusión (homogeneización) tienen tiempo para completarse. <sup>14 y 15</sup>

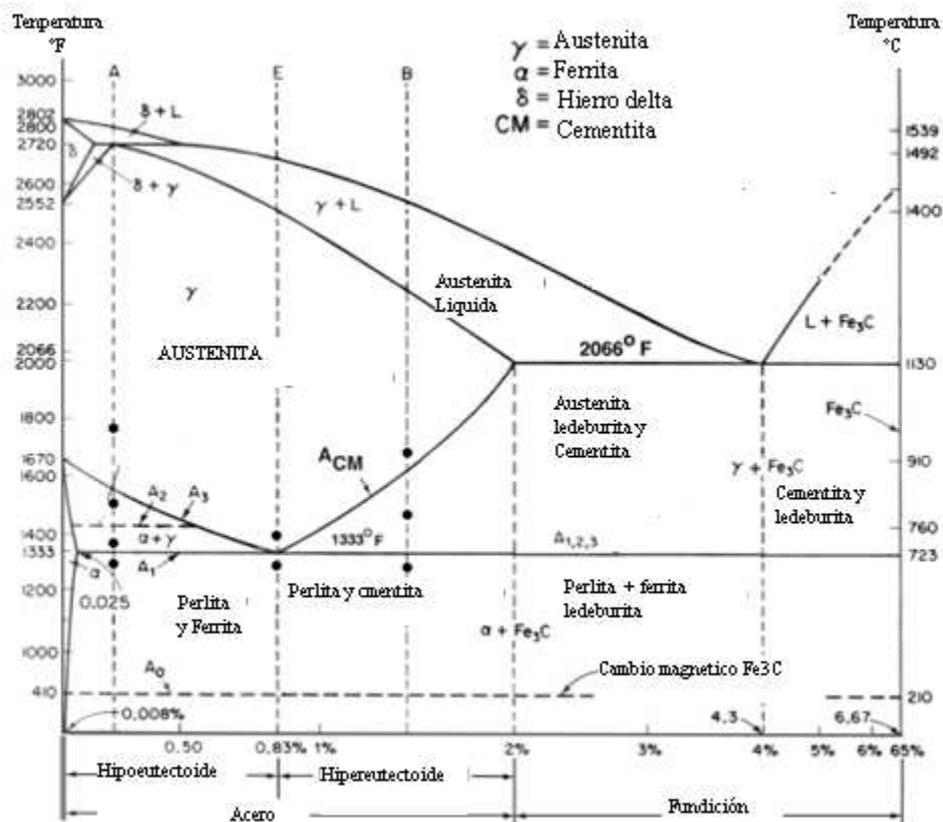


Figura 2.5.- Diagrama de Equilibrio Hierro – Carburo de Hierro <sup>14</sup>

### 2.3.3. FASES PRESENTES EN EL DIAGRAMA DE HIERRO CARBURO DE HIERRO

De manera general, las soluciones sólidas y las reacciones que se presentan en el diagrama hierro – carburo de hierro son identificadas mediante letras griegas, o simplemente mediante nombres específicos asignados para cada una de las reacciones y soluciones generadas.

A continuación se definirán las fases principales presentes en el diagrama hierro-carburo de hierro:

#### 2.3.3.1. CEMENTITA O CARBURO DE HIERRO

Es un compuesto intersticial que contiene 6.67% de C, duro y frágil alcanzando una dureza de 700 Brinnell, de baja resistencia a la tensión pero alta a la compresión. Es la estructura más dura que se presenta en el diagrama.

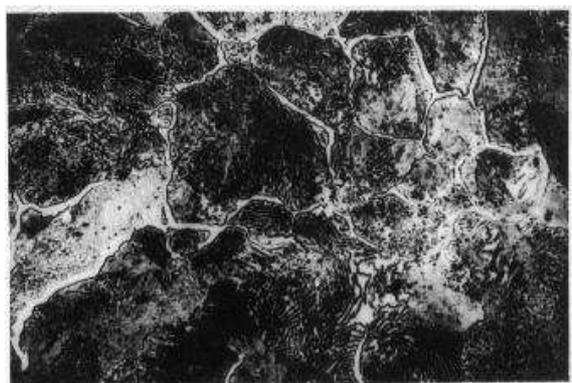


Figura 2.6.- Microestructura del acero 1%C, red blanca de cementita

#### 2.3.3.2. FERRITA O HIERRO B.C.C. DE BAJA TEMPERATURA

Es una solución sólida representada con la letra griega  $\alpha$  con una pequeña cantidad de Carbono disuelto en hierro (máx. 0.008%C), se considera la estructura más suave y dúctil dentro del diagrama. Se considera como hierro puro. Las propiedades promedio son: resistencia a la tensión de 28 kg/mm<sup>2</sup>, una elongación de 40% y un dureza de 90 Brinnell.

La ferrita puede aparecer como cristales mezclados con los de perlita. En los aceros de menos de 0.6%C forman una red o malla que limita los granos de perlita, mientras que en los aceros de 0.6 a 0.85%C en forma de agujas o bandas aciculares orientados en la dirección de los planos cristalográficos de la austenita.

La ferrita también aparece como elemento eutectoide de la perlita formando láminas paralelas separadas por otras láminas de cementita, en los aceros hipoeutectoides templados, puede aparecer mezclada con la martensita cuando el temple no ha sido bien efectuado.

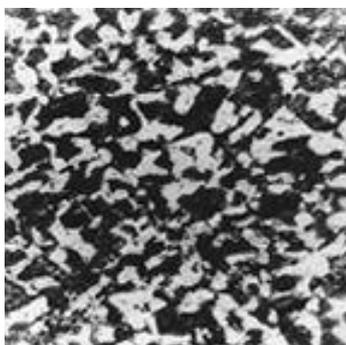


Figura 2.7.- Microestructura del acero al carbono, cristales blancos de ferrita 400X

#### 2.3.3.3. HIERRO DELTA O SOLUCIÓN SÓLIDA DELTA

Posee una estructura cristalina b.c.c. de alta temperatura y una solubilidad máxima de carbono de 0.1%. Ningún tratamiento térmico comercial se hace en esta región, por lo que no habrá razón para referirse a esta porción del gráfico.

#### 2.3.3.4. AUSTENITA O HIERRO F.C.C.

Es la estructura más densa de los aceros, representada por la letra griega  $\gamma$  (gamma), y está formado por una solución sólida por inserción de carbono en hierro gamma. La máxima solubilidad de carbono es del 2%, tiene una resistencia a la tensión de 100 kg/mm<sup>2</sup>, una elongación de 30% y con una dureza de 300 Brinnell, no es magnética. Esta estructura no es estable a temperatura ambiente.

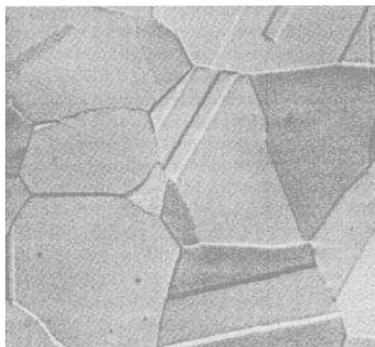


Figura 2.8.- Microestructura de la austenita a 325X.

#### 2.3.3.5. MARTENSITA.

Es el constituyente de los aceros templados, está conformado por una solución sólida sobresaturada de carbono o carburo de hierro en ferrita y se obtiene por enfriamiento rápido de los aceros desde su estado austenítico a altas temperaturas.

El contenido de carbono suele variar desde muy poco carbono hasta el 1% de carbono, sus propiedades físicas varían con su contenido en carbono hasta un máximo de 0.7 %C.



Figura 2.9.- Microestructura de la martensita

La martensita tiene una dureza de 50 a 68 Rc, resistencia a la tracción de 170 a 250 kg/mm<sup>2</sup> y un alargamiento del 0.5 al 2.5 %, muy frágil y presenta un aspecto acicular formando grupos en zigzag con ángulos de 60 grados.

Los aceros templados suelen quedar demasiado duros y frágiles, inconveniente que se corrige por medio del revenido que consiste en calentar el acero a una temperatura inferior a la crítica inferior (727°C), dependiendo de la dureza que se desee obtener, enfriándolo luego al aire o en cualquier medio.

#### 2.3.3.6. TROOSTITA.

Es un agregado muy fino de cementita y ferrita, se produce por un enfriamiento de la austenita con una velocidad de enfriamiento ligeramente inferior a la crítica de temple o por transformación isotérmica de la austenita en el rango de temperatura de 500 a 600°C, o por revenido a 400°C.

Sus propiedades físicas son intermedias entre la martensita y la sorbita, tiene una dureza de 400 a 500 Brinell, una resistencia a la tracción de 140 a 175 kg/mm<sup>2</sup> y un alargamiento del 5 al 10%.

#### 2.3.3.7. SORBITA.

Es también un agregado fino de cementita y ferrita. Se obtiene por enfriamiento de la austenita con una velocidad de enfriamiento bastante inferior a la crítica de temple o por transformación isotérmica de la austenita en la zona de 600 a 650C, o por revenido a la temperatura de 600°C. Su dureza es de 250 a 400 Brinell, su resistencia a la tracción es de 88 a 140 kg/mm<sup>2</sup> con un alargamiento del 10 al 20%.

Tanto la troostita como la sorbita pueden considerarse como perlita de grano muy fino.

#### 2.3.3.8. BAINITA.

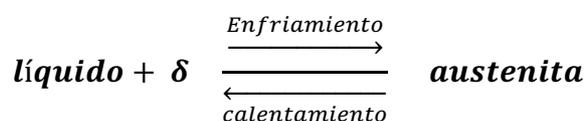
Es el constituyente que se obtiene en la transformación isotérmica de la austenita cuando la temperatura del baño de enfriamiento es de 250 a 500°C. Se diferencian dos tipos de estructuras: la bainita superior de aspecto arborescente formada a 500-580°C, compuesta por una matriz ferrítica conteniendo carburos. Bainita inferior, formada a 250-400°C tiene un aspecto acicular similar a la martensita y constituida por agujas alargadas de ferrita que contienen delgadas placas de carburos.

La bainita tiene una dureza variable de 40 a 60 Rc comprendida entre las correspondientes a la perlita y a la martensita.<sup>17 y 33</sup>

### 2.3.4. REACCIONES Y TRANSFORMACIONES PRESENTES EN EL DIAGRAMA HIERRO CARBURO DE HIERRO

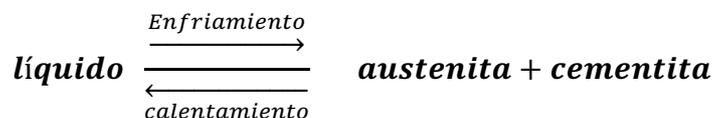
El diagrama se obtiene identificando los puntos críticos, es decir, las temperaturas a las que se producen las sucesivas reacciones y transformaciones isotérmicas, claramente identificadas como los puntos peritético, eutéctico y eutectoide.

#### 2.3.4.1. REACCIÓN PERITÉCTICA



Esta reacción se produce a una temperatura de 1493°C que al enfriarse, representa el principio y el fin del cambio de estructura cristalina por medio de la reacción peritética, a partir de una fase líquida y una fase sólida en otra fase de composición diferente denominada Austenita. La reacción peritética solo altera la solidificación de aceros con menos de 0.55% de Carbono, por lo que tiene poca importancia práctica.

### 2.3.4.2. REACCIÓN EUTÉCTICA. LEDEBURITA



Es la mezcla eutética de austenita y cementita; contiene 4.3% de C y se forma de 1130°C, en la cual el líquido eutético empieza a congelarse en una mezcla de austenita y cementita, conocida como ledeburita. A medida que la temperatura disminuye, la austenita peritética se transforma gradualmente en cementita hasta que alcanza el punto eutectoide, lo que conlleva finalmente a que la austenita residual se convierte en perlita.

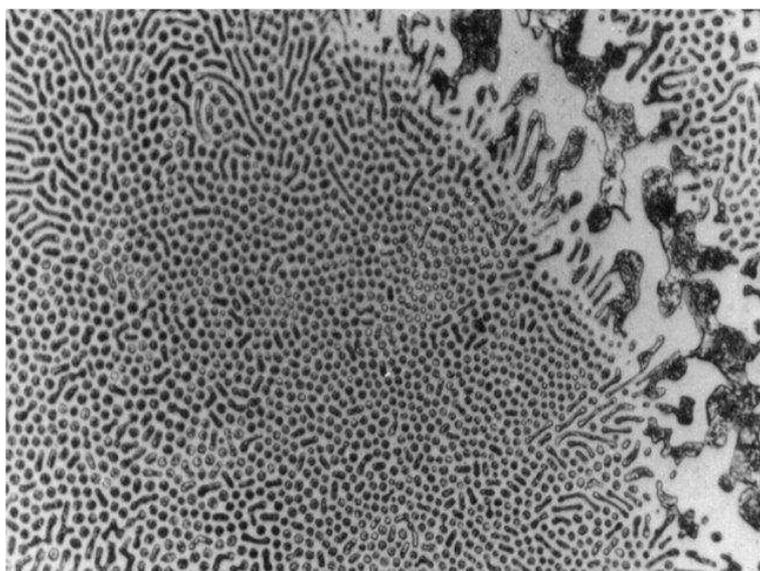
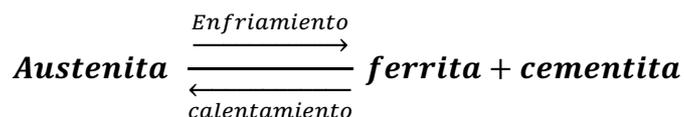


Figura 2.10.- Ledeburita

### 2.3.4.3. REACCIÓN EUTECTOIDE PERLITA



Es la mezcla eutectoide que contiene 0.8% de C y se genera a los 723°C, mediante un enfriamiento muy lento. Mediante esta reacción la Austenita se transformará en Perlita, la cual es una mezcla de ferrita y cementita.

Estas tres fases, Austenita Ferrita y Cementita, existen en equilibrio en el punto eutectoide. Cabe destacar, que mediante la reacción eutectoide se generan las transformaciones más importantes que se presentan en el diagrama de hierro – carburo de Hierro.

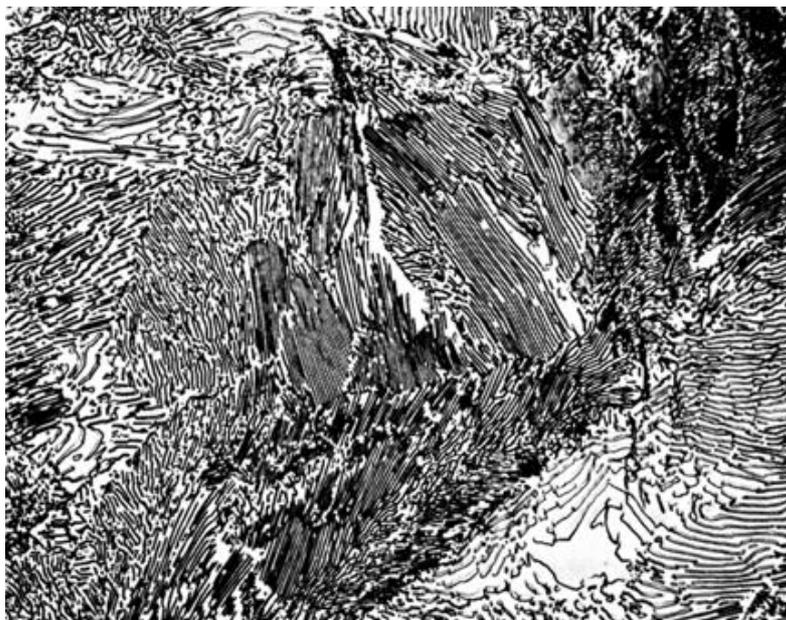


Figura 2.11.- Microestructura del acero al carbono, cristales oscuros de perlita, 500X.

### 2.3.5 ZONAS PRESENTES EN EL DIAGRAMA Fe-C

El diagrama de hierro - carburo de hierro se encuentra dividido según el porcentaje de carbono existente en la aleación, las composiciones que presentan menos del 0.008% de Carbono se conoce como hierro comercialmente puro, las que van desde 0.008 a 2 % de Carbono representa el acero, y las que exceden del 2% de carbono, se consideran como hierro colado (hierro fundido).

Los aceros y los hierros fundidos según su porcentaje de Carbono se subdividen en hipoeutectoides e hipereutectoides. Los aceros hipoeutectoides contienen porcentajes de carbono que varían desde 0.008-0.8 %, mientras que los hipereutectoides se encuentran en rangos limitados entre 0.8 y 2% de Carbono.

Para el caso de los hierros fundidos hipoeutectoides, el porcentaje de carbono se encuentra dentro del rango de 2 – 4.3%, mientras que los hipereutectoides se presentan limitados entre 4.3 – 6.67% de Carbono.

Para objeto de estudio de este proyecto es necesario conocer más detalladamente y a profundidad los cambios y reacciones que se producen dentro de la zona de los aceros, es decir que el porcentaje de Carbono se encuentre dentro del 0.008% y 2%, pero específicamente se prestará mayor énfasis en el estudio de la región limitada por la de los aceros hipoeutectoides, donde el porcentaje de Carbono varía entre el 0.008 - 0.8%.

#### 2.3.5.1. ACEROS HIPOEUCTECTOIDES

La zona Hipoeutectoide contiene tres estructuras claramente visibles como son: hierro delta, austenita ( $\gamma$ ) y ferrita ( $\alpha$ ).

La Austenita que posee una estructura cristalina de f.c.c. (cúbica centrada en la cara), representa un empaquetamiento de átomos mucho más denso que la ferrita, ya que esta última posee una estructura cristalina b.c.c. (cúbica centrada en el cuerpo).

Mediante cálculos basados en el empaquetamiento y el radio atómico del hierro para cada estructura, se puede concluir que el porcentaje de espacio sin llenar para la Austenita es del 25% con un radio máximo de esfera intersticial de  $0.52 \times 10^{-8}$  [cm], mientras que para la Ferrita es del 32% con un radio máximo de esfera intersticial de  $0.36 \times 10^{-8}$  [cm]; siendo el espacio para cada caso, el que deba ocupar el átomo de Carbono el cual posee un radio de  $0.70 \times 10^{-8}$  [cm], lo que conlleva a determinar que la distorsión de la red ferrítica por el átomo de Carbono es mucho más grande que en el caso de la Austenita; por tanto, la solubilidad del Carbono es más restringida para la estructura sólida ferrítica.

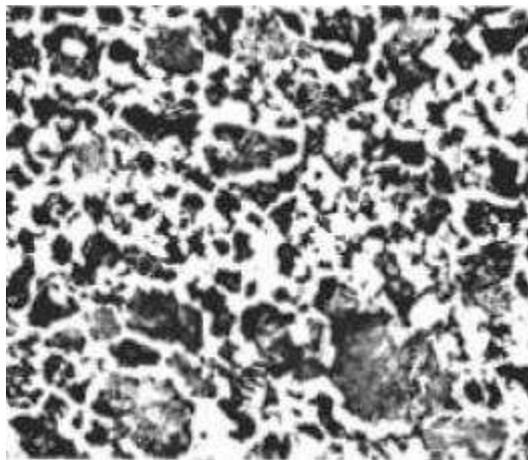


Figura 2.12.- Acero Hipoeutectoide mostrando  $\alpha$  primario (blanco) y Perlita 400X

Entendido claramente la solubilidad que representa el Carbono para cada estructura presente en esta región, se podrá estudiar las diferentes reacciones y transformaciones involucradas en la Zona hipoeutectoide mediante el enfriamiento lento del acero.

En la Figura 2.13, la aleación A contiene 0.40% de Carbono, el punto ubicado dentro de la región de la Austenita, representa una solución sólida intersticial uniforme contenida de carbono disuelto en la estructura reticular de f.c.c. Al enfriarse lentamente cruza la línea representada por A3 y conocida como línea de temperatura crítica superior de lado hipoeutectoide. Al cruzar esta línea, se comienza a formar ferrita en las fronteras del grano de la Austenita, y debido al empaquetamiento que presenta la ferrita, el carbono en exceso se disuelve dentro de la Austenita, y a medida que aumenta el enfriamiento la cantidad de disuelta va a ser mucho mayor, produciéndose que la cantidad restante de austenita se haga más rica en Carbono.

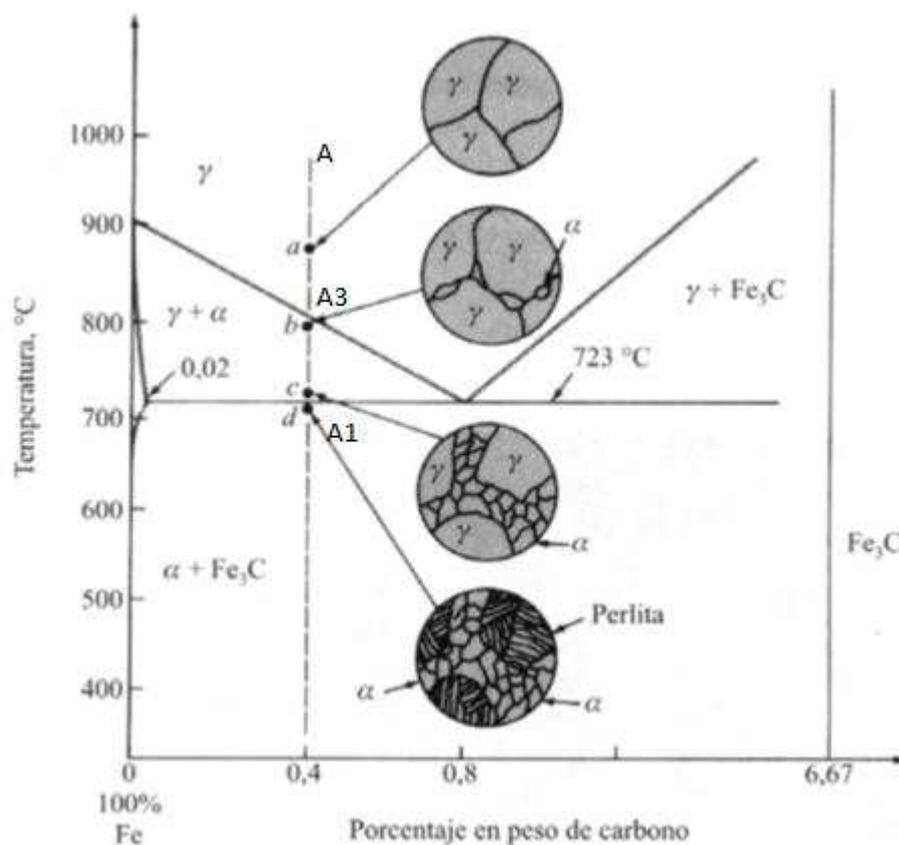


Figura 2.13.- Transformación en el acero hipoeutectoide <sup>19</sup>

El enfriamiento continua alcanzando la línea A1 conocida como línea de temperatura crítica inferior en el lado hipoeutectoide, la cual representa el límite a la que el hierro f.c.c. puede existir en condiciones de equilibrio, en donde la aleación se encuentra formada por 25% de Austenita y 75% de Ferrita. La Austenita restante (25%) contiene 0.8% de C y experimenta la reacción eutectoide, de manera que al completarse la reacción la nueva aleación quedará conformada por 25% de perlita y 75% de ferrita.

Como anteriormente se explicó, la ferrita disuelve muy poco Carbono, de modo que el cambio de estructura cristalina en la reacción eutectoide no puede ocurrir sin antes de que los átomo de Carbono salgan de la solución. Los átomos de Carbono entonces se precipitan, es decir que se produce una nueva fase debido al cambio de solubilidad, en este caso se forman placas de cementita (carburo de hierro), y en el área adyacente a estas placas se forma delgadas capas de ferrita (b.c.c.), el proceso continua de manera que la

mezcla toma una distribución del tipo huella dactilar, más conocida como perlita. Cabe citar que la reacción generalmente empieza en la frontera del grano de la Austenita, de manera que la perlita va creciendo a lo largo de la frontera y dentro del grano.

El proceso concluye hasta llegar a la temperatura ambiente, y debido a que tanto la ferrita como la perlita son estructuras estables en estas condiciones, se llega a obtener una aleación de acero hipoeutectoide constituida de 75% de ferrita y 25% de perlita. Este proceso será igual para cualquier acero hipoeutectoide, variando únicamente en el porcentaje de ferrita y perlita en la aleación.<sup>14</sup>

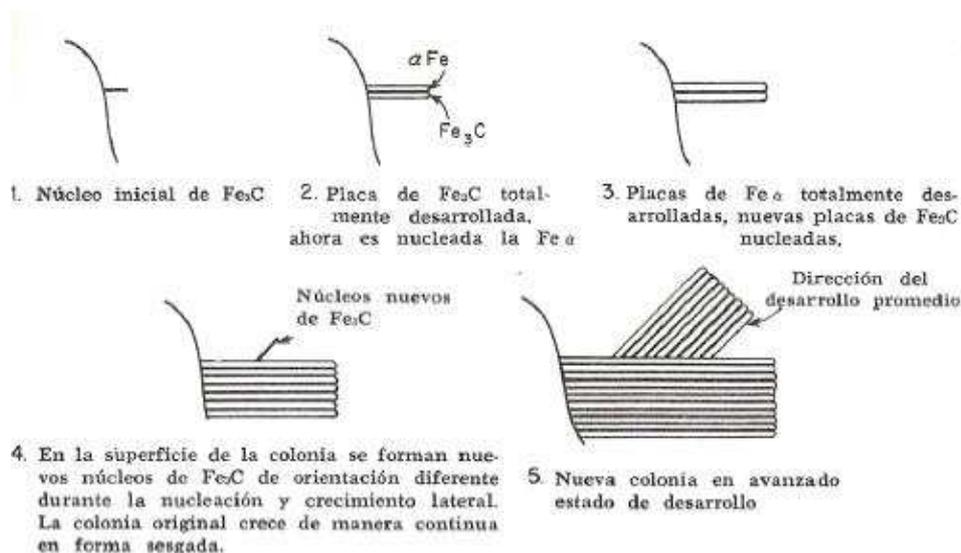


Figura 2.14.- Nucleación y Crecimiento de la perlita<sup>14</sup>

### 2.3.6 DIAGRAMA HIERRO – CARBURO DE HIERRO Y LA SOLDADURA

A continuación se presenta un gráfico que muestra una relación entre el diagrama de equilibrio hierro – carburo de hierro y las diferentes zonas presentes en la soldadura para los aceros hipoeutectoides. Cada una de estas zonas presentes dentro de la zona afectada por el calor serán ampliadas y detalladas en el capítulo 3 sección 3..

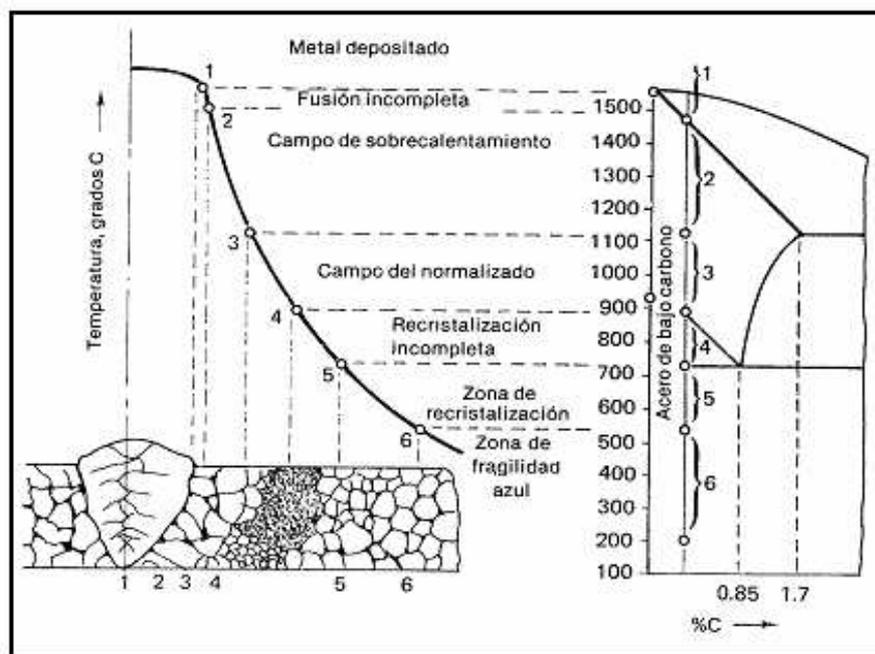


Figura 2.15.- Diagrama de hierro – Carbono adaptado a la soldadura. <sup>4</sup>

## 2.4. DIAGRAMA TTT.

### 2.4.1. INTRODUCCIÓN

Como se explicó anteriormente, en la práctica el equilibrio del diagrama hierro – carburo de hierro rara vez se obtiene, esto debido a que las velocidades de enfriamiento suelen ser mayores a las asignadas para mantener el equilibrio, por ejemplo, a grandes velocidades de enfriamiento en los límites del acero, se puede crear una nueva fase metaestable llamada Martensita. Además, la presencia de ciertos elementos de aleación altera los límites de transformación de varias fases, generando un diagrama completamente nuevo.

Debido al desequilibrio que se produce, se han realizado gráficas complementarias que permiten determinar la transformación de la reacción por medio de una serie de curvas isotérmicas. Las gráficas muestran la fracción transformada de la solución con respecto a diferentes temperaturas, es decir el crecimiento del precipitado mediante la difusión o distribución de los átomos, la cual depende de la temperatura y del gradiente de concentración.

Se puede utilizar una serie de dichas curvas isotérmicas para graficar un diagrama de transformación – temperatura – tiempo, obteniendo una curva resultante conocida como curva de bainite o “S”.<sup>14</sup>

#### 2.4.2. DIAGRAMAS DE TRANSFORMACIÓN ISOTÉRMICA (DIAGRAMAS TTT)

Se realizan experimentos de transformación isotérmica para investigar los cambios de la fase austenita, que es inestable debajo de la temperatura crítica. Esto se realiza mediante muestras austenizadas a una misma temperatura pero enfriadas a distintos baños, obteniendo así gráficas para cada uno de los experimentos tal como se muestra en la Figura 2.16.

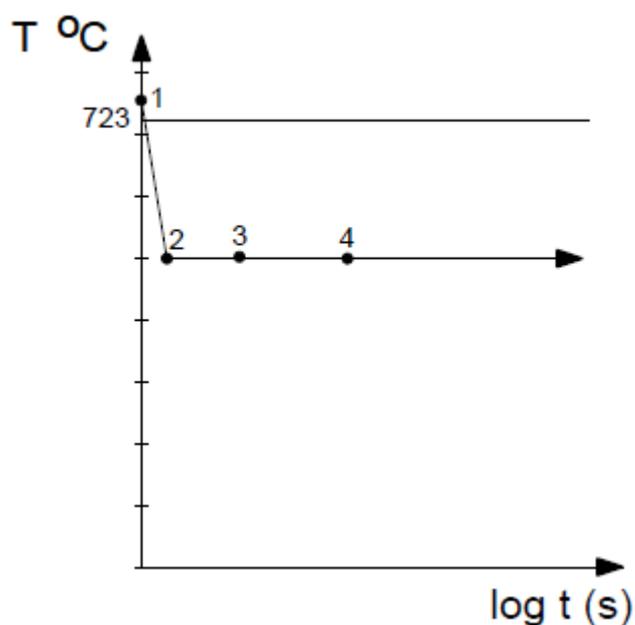


Figura 2.16.- Transformación Isotérmica de materiales. Del punto 1 al 2 se congela la austenita, al transcurrir el tiempo comienza a transformarse en 3 y termina su transformación en 4.<sup>19</sup>

Se une los puntos donde inicia la transformación (Puntos 3) y donde termina la transformación (Puntos 4), obteniendo una curva como la que se muestra en la Grafica 2.6, la cual representa el diagrama TTT (Transformación, Temperatura, Tiempo) o diagrama de transformación isotérmica.

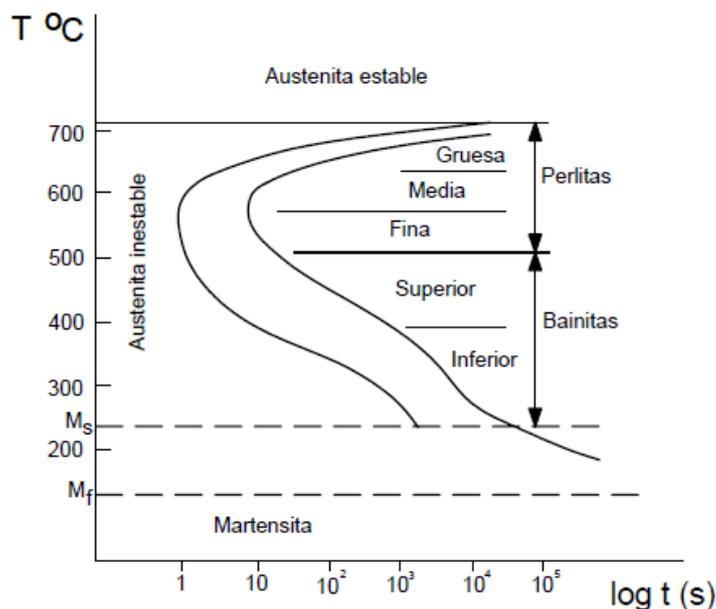


Figura 2.17.- Diagrama TTT para un acero al Carbono eutectoide. <sup>14</sup>

Del diagrama TTT se puede obtener la siguiente información:

- Cuánto tiempo se requiere para comenzar la transformación a una temperatura subcrítica específica,
- Cuánto tiempo se necesita para estar completamente transformada, y
- Cuál será la naturaleza del producto de esta transformación.

Se puede observar claramente en la figura 2.17 de la curva S, el extremo izquierdo más pronunciado corresponde a la mayor velocidad de transformación, y esta última es menor a medida que aumenta o disminuye a partir de dicha temperatura, debido a la estabilidad creciente de la Austenita o lentificación de la difusión atómica, para cada uno de los casos respectivamente.

Dentro del rango de temperaturas correspondientes entre 727 y 535°C, la Austenita se transforma en Perlita, y se produce una nucleación muy lenta, aunque la formación y difusión de núcleos de llevará a cabo a velocidades máximas. A medida que la temperatura disminuya la perlita se vuelve cada vez más fina, dando como resultado la fase conocida con el nombre de Bainita.

La Bainita es generada dentro del rango de 535 y 260°C, está básicamente consiste como la perlita de una matriz de ferrita que contiene las partículas de cementita. La transformación bainítica requiere tiempo, no es atérmica, y en el momento que la temperatura alcanza los 260°C bajo enfriamiento rápido se produce el comienzo de una nueva fase denominada Martensita.

La Martensita es una solución sólida de gran dureza súper saturada de Carbono en la Ferrita y se forma por medio de una transformación sin difusión, cuya reacción termina en el momento que se alcanza la temperatura mínima de transformación de la Martensita, representada en el gráfico mediante líneas horizontales, cuya posición varía con el contenido de carbono.<sup>19</sup>

### **2.4.3. EFECTO DE LOS ELEMENTOS ALEANTES EN EL DIAGRAMA HIERRO – CARBONO**

Los elementos aleantes modifican considerablemente la forma del diagrama de hierro – Carbono, dependiendo del porcentaje y el tipo de elemento presente en el acero. Básicamente se puede distinguir dos grupos: elementos alfégenos y elementos ganmámenos.

Los alfégenos, tales como el Cr y el Mo aumentan el dominio de estabilidad de la ferrita, es decir disminuyen el de la austenita, pudiendo incluso llegar a desaparecer el dominio austenítico. En la Figura 2.18 (a), se observa que a medida que aumenta la proporción de un elemento alfégeno el punto eutectoide pasa de 1 a 2, 3, 4... Y así sucesivamente. A modo de ejemplo un acero de poco carbono y un 13% en Cr solidifica directamente en ferrita (acero, por cierto, inoxidable).

Los elementos ganmámenos aumentan el dominio de la austenita. En la Figura 2.18 (b), se observa como al aumentar el contenido en algún elemento de este tipo el punto eutectoide pasa del punto 1 al 2, 3,... Elementos ganmámenos por excelencia son él Ni y el Mn. Un acero con 13% en Mn es austenítico a temperatura ambiente.<sup>19</sup>

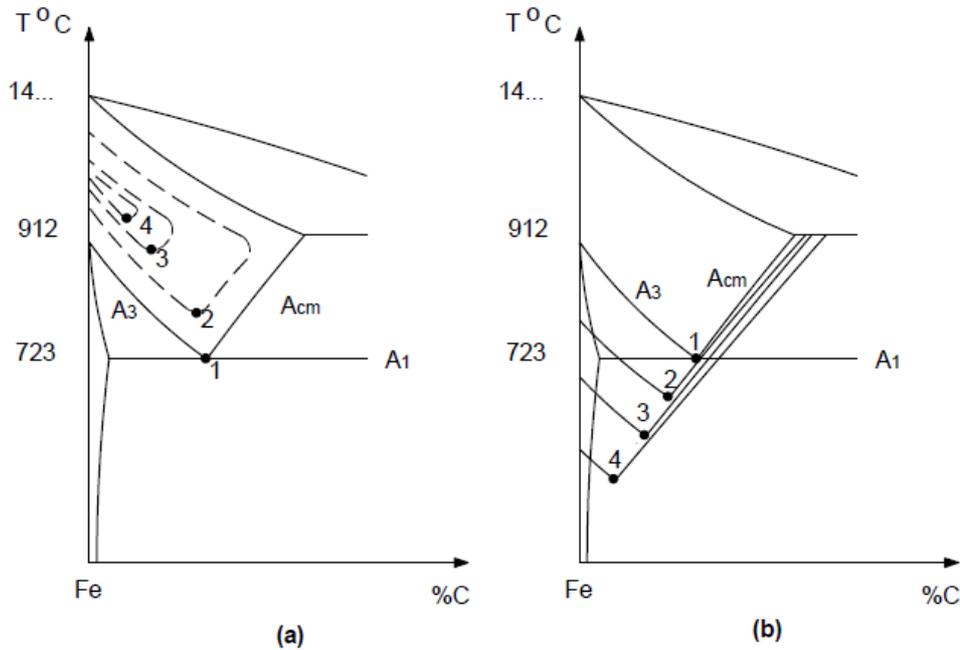
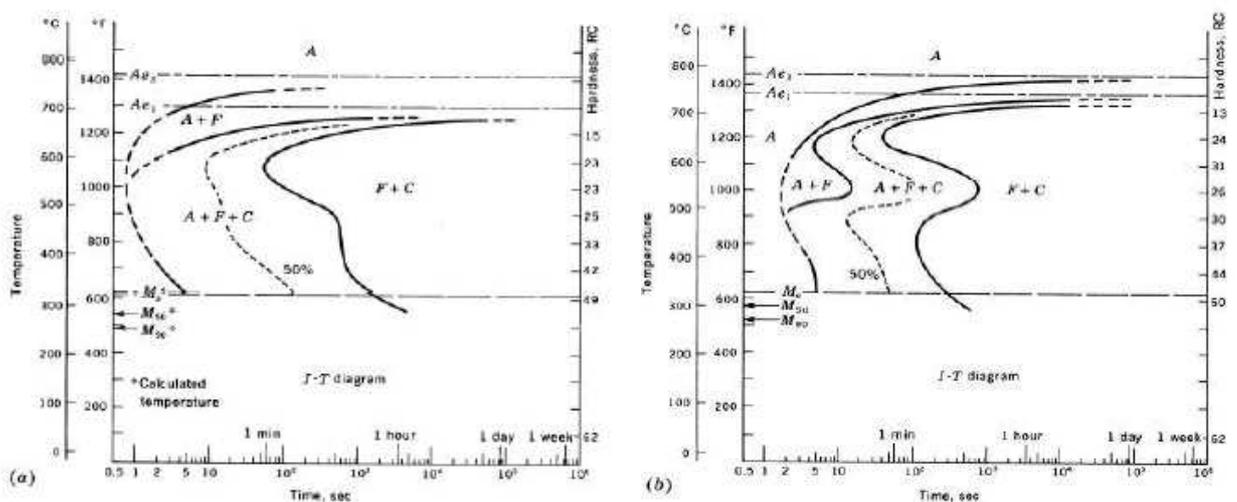


Figura 2.18.- Influencia de los elementos de aleación el diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C: (a) Alfágenos (b) Ganmágenos. <sup>19</sup>

#### 2.4.4. EFECTO DE LOS ELEMENTOS ALEANTES EN LAS CURVAS TTT

Los elementos aleantes mueven las curvas TTT hacia tiempos mayores, ya que ellos antes de producirse la transformación están homogéneamente distribuidos en la austenita, pero cuando ésta se transforma en ferrita, perlita o bainita, éstos deben redistribuirse y desplazarse por difusión, al ser átomos grandes, su difusión es lenta y frenan el avance de la transformación.



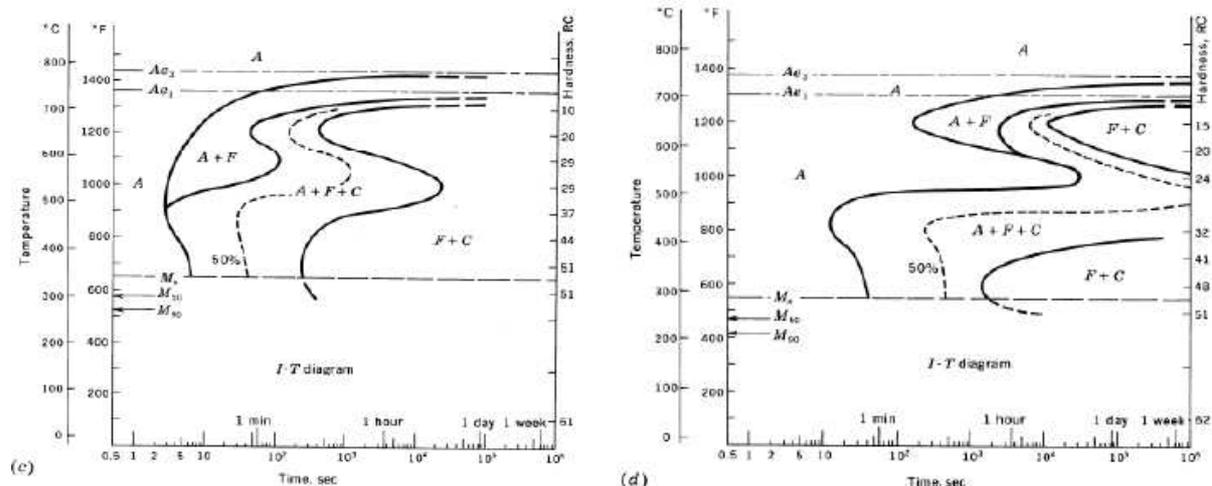


Figura 2.19.- Diagramas TTT de algunos aceros con diferentes elementos aleantes. a) Diagrama TTT acero 0,4 %C, 1 %Mn, b) Diagrama TTT acero 0,4 %C, 0.9 %Mn, c) Diagrama TTT acero 0,4 %C,1 % Cr, 0,2 % Mo y d) Diagrama TTT acero 0,4 %C,0,8 % Cr, 0,3 % Mo, 1,8 %Ni <sup>14</sup>

La figura 2.19 (a) se caracteriza por la coincidencia de las narices de la transformación perlítica y bainítica. El acero eutectoide y la mayor parte de los aceros al carbono forman parte de esta clase. Las estructuras bainitas usualmente suelen desaparecer en las transformaciones anisotérmicas.

La figura 2.19 (b) presenta una cierta igualdad en lo que se refiere al eje de coordenadas del tiempo con respecto a la curva (a), pero no en lo que se refiere a la temperatura. Debido a la disminución de escala de temperaturas, el dominio de esta reacción se ensancha, por lo que la aparición de la estructura bainítica suele ser retrasada.

En la figura 2.19 (c) las transformaciones perlítica y bainítica se pueden distinguir claramente, debido a la temperatura y tiempos de transformación.

Para la figura 2.19 (d), el conseguir la transformación de la estructura bainítica es sumamente fácil. <sup>19</sup>

#### 2.4.5. TRANSFORMACIONES DURANTE ENFRIAMIENTO CONTINUO (CCT)

En los tratamientos térmicos comerciales, se calienta el metal hasta la zona austenítica y se enfría continuamente hasta la temperatura ambiente,

variando la velocidad de enfriamiento con el tipo de tratamiento y con el tamaño y forma de la pieza.

En el enfriamiento continuo de un acero al carbono, la transformación de austenita a perlita tiene lugar a lo largo de un intervalo de temperaturas en lugar de una sola temperatura, es decir no ocurre en forma isotérmica.

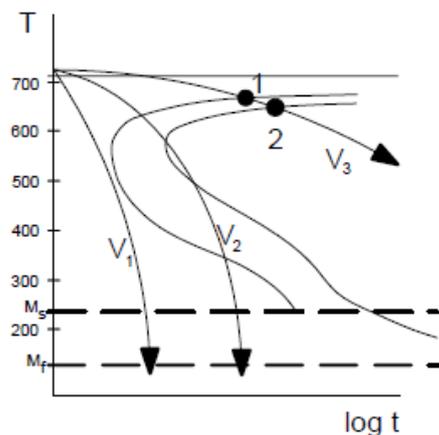


Figura 2.20.- Representación esquemática de enfriamientos continuos a tres velocidades <sup>19</sup>

Estos diagramas son como los TTT pero en vez de producirse a una temperatura constante se producen mediante enfriamientos continuos. En la figura 2.20 se muestra tres enfriamientos continuos a velocidades distintas. El enfriamiento a la velocidad V2 podría ser sacar la probeta del horno y dejarla enfriar al aire (es un tratamiento térmico que se llama Normalizado). La V3 podría ser apagar el horno y dejar enfriar la probeta dentro del horno, enfriamiento muy lento que se llama Recocido, y la V1 podría corresponderse a un enfriamiento muy rápido como introducir la probeta en agua o algún líquido, sería un Temple.

La velocidad mínima de enfriamiento para producir Martensita se conoce como velocidad de enfriamiento crítico, representada en el gráfico por la línea V1. Si la velocidad es mayor que la especificada, se produce una transformación completa de Austenita en Martensita.

Para estas velocidades de enfriamiento habría que anotar cuando empieza la transformación de la austenita y cuando termina. En la figura 2.20 se esquematiza el inicio, punto 1, y el final, punto 2, para el enfriamiento V3. Hecho esto, unimos todos los puntos de inicio, y todos los puntos de final de

transformación, obteniéndose una curvas similares a las TTT, solo que a temperaturas un poco más bajas por arriba de la nariz, tal como se muestra en la figura 2.21. <sup>19</sup>

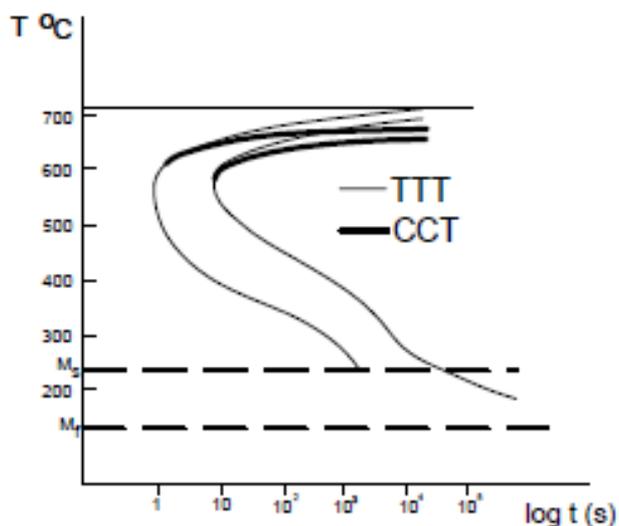


Figura 2.21.- Diagramas TTT y CCT <sup>19</sup>

#### 2.4.6. MICROESTRUCTURAS DEL ACERO SEGÚN EL ENFRIAMIENTO

Según el tipo de enfriamiento de un acero al carbono se tiene diversas microestructuras:

Para enfriamiento muy lento, la microestructura se caracteriza por perlita gruesa y grandes regiones de ferrita.

Para un enfriamiento no tan lento, la estructura es ferrítica y perlítica, siendo ambas finas.

Para enfriamientos moderados, se observa, por primera vez, una cantidad apreciable de martensita en el centro de los granos. Por tanto hay una mezcla de ferrita, bainita, perlita y, por supuesto, martensita.

Para enfriamientos más rápidos, se observa perlita en los bordes de grano, observándose además, martensita en el centro de los granos y ferrita o bainita superior en los bordes.

Para enfriamiento muy rápido, hay un poco de perlita y bainita que crecen en los bordes de grano como una fina banda, si bien, la mayoría es martensita.

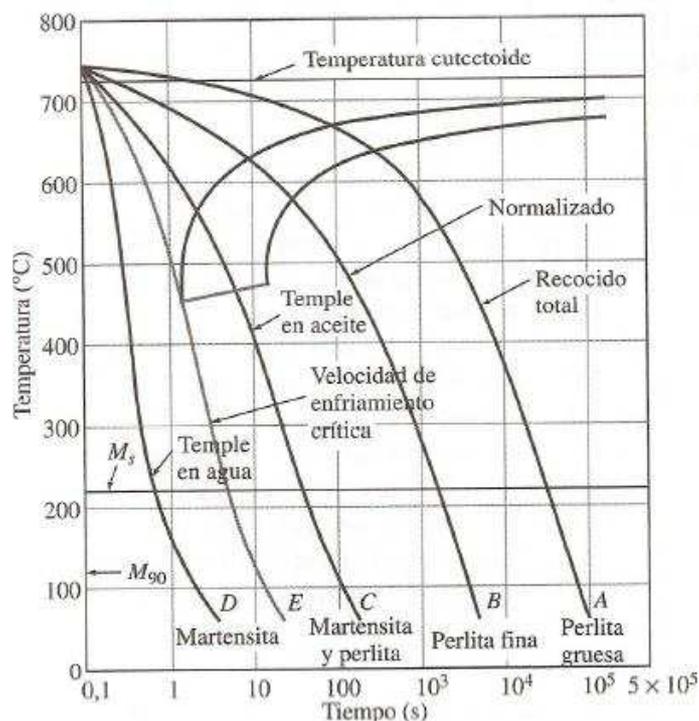


Figura 2.22.- Variación de la microestructura en función de la velocidad de enfriamiento para un acero eutectoide <sup>14</sup>

#### 2.4.7. TRATAMIENTOS TÉRMICOS DEL ACERO

Para modificar significativamente las propiedades del acero pueden ser usados diferentes tipos de tratamientos térmicos, los cuales alteran la microestructura del material que permiten el aumento de la dureza, tenacidad y resistencia mecánica, así como de mejorar la maquinabilidad del acero. Los tratamientos térmicos que pueden ser aplicados al acero son:

- Temple.
- Revenido.
- Recocido.
- Normalizado.

Todos los tratamientos térmicos antes mencionados siguen una misma ruta:

- Calentamiento del acero hasta una temperatura determinada.
- Permanencia a esa temperatura cierto tiempo.
- Enfriamiento más o menos rápido.

Esta ruta varía en cuanto la temperatura y el tiempo durante el cual se expone a estas condiciones así como la velocidad de enfriamiento, dependiendo del tratamiento dado. A continuación en la figura se muestra un gráfico esquemático de cómo se desarrolla el proceso para cada tipo de tratamiento térmico.

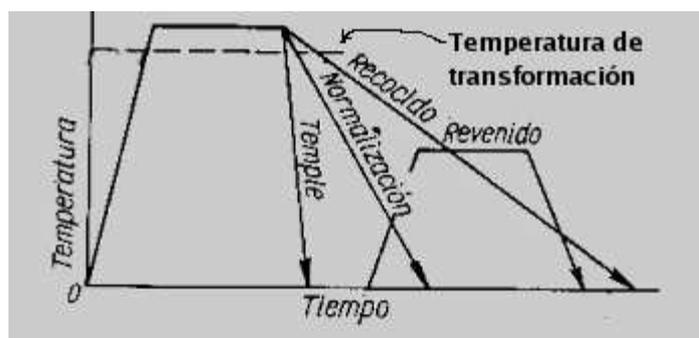


Figura 2.23.- Temperatura Vs Tiempo de los Tratamientos térmicos <sup>14</sup>

#### 2.4.7.1. TEMPLE

Es el tratamiento térmico más importante el cual hace al acero más duro y resistente al desgaste, pero a la vez más frágil, es por eso que es recomendable después de realizado este proceso someter al material a un revenido. Se basa en calentar el acero a una temperatura entre 700°C y 1000°C para luego enfriarla rápidamente controlando el tiempo de calentamiento y enfriamiento, ya que si este último es demasiado rápido las piezas se pueden agrietar. Los medios mas comunes usados para el enfriamiento pueden ser: aire, agua aceite, solución salina. <sup>13</sup>

#### 2.4.7.2. REVENIDO

Este proceso tiene como objetivo aliviar las tensiones internas producidas por el temple o por deformación en frío. Mejora las características mecánicas reduciendo la fragilidad y disminuyendo ligeramente la dureza; esto será más evidenciado cuanto mayor sea la temperatura de revenido. Se basa específicamente en el calentamiento a una temperatura menor a la crítica

manteniéndola en dicho estado para que sea igualada en toda la pieza, para después ser enfriada a temperatura ambiente. <sup>13</sup>

#### 2.4.7.3. RECOCIDO

Se emplea para ablandar metales y ganar tenacidad, obteniéndose así aceros más maquinables. Este tratamiento consiste en calentar el material entre 600 y 700°C para luego ser enfriado lentamente.

El recocido se lleva a cabo para:

- Eliminar tensiones
- Incrementar la plasticidad, la ductilidad y la tenacidad
- Producir una microestructura específica

El proceso de recocido consta de tres etapas:

- Calentamiento a la temperatura prevista
- Mantenimiento o impregnación térmica a esta temperatura
- Enfriamiento generalmente hasta temperatura ambiente

Dependiendo de la geometría y el tamaño de la pieza se producen gradientes de temperatura entre el interior y la superficie de la pieza. El tiempo en el que se produce el recocido debe ser suficientemente largo para permitir la necesaria reacción de transformación.

Durante la aplicación del recocido, se tiene fenómenos de recuperación y recristalización, generalmente se prefiere una estructura de grano fino; por tanto, el tratamiento térmico suele terminar antes de que ocurra un crecimiento de grano apreciable.

La figura 2.24 se muestra la parte del diagrama hierro - carburo de hierro en la región eutectoide e indica el tramo de temperaturas de tratamiento térmico.. La línea A1 corresponde a la temperatura crítica inferior y los límites A3 y Acm corresponden a las temperaturas críticas superiores para los aceros hipo e hipereutectoides. <sup>20</sup>

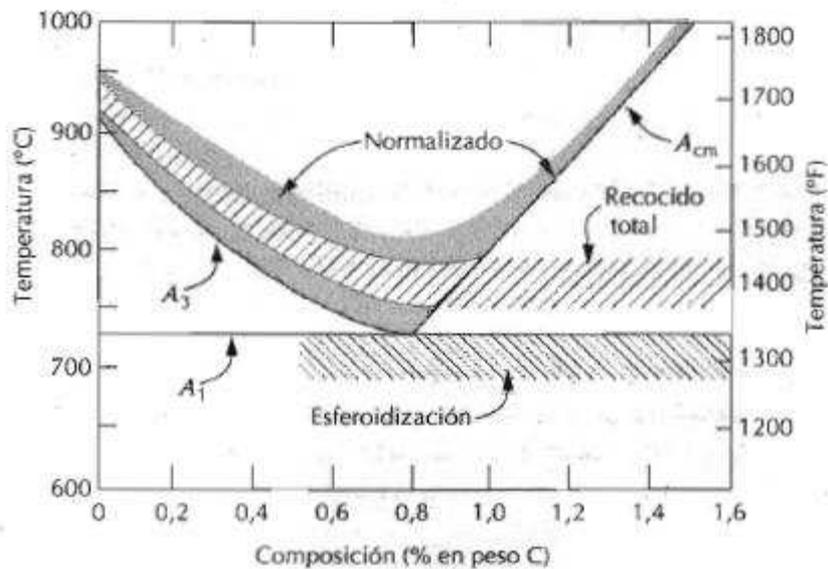


Figura 2.24.- Temperaturas de tratamientos térmicos en la Región Eutectoide<sup>19</sup>

El recocido se aplica para acondicionar los diversos materiales y facilitar los procesos de conformación, bien sea para arranque de viruta o por trabajo en frío.

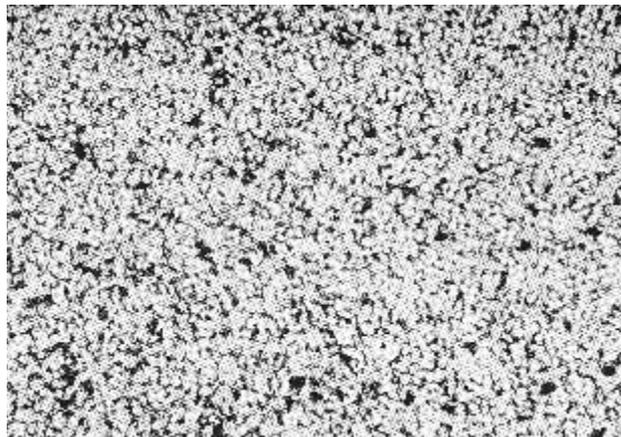


Figura 2.25.- Acero con 0,25% de C - Recocido. 100X

#### 2.4.7.4. NORMALIZADO

El Normalizado se lo realiza para afinar el tamaño del grano y producir una distribución más uniforme. Los aceros perlíticos de grano fino son más tenaces que los de tamaño grande.

El Normalizado se realiza calentando 55 a 85°C por encima de la temperatura crítica superior, que naturalmente depende de la composición, después del tiempo suficiente para conseguir la completa transformación a austenita (procedimiento llamado austenización) el tratamiento termina enfriando al aire. Mediante este proceso se le da al acero características consideradas el estado inicial o natural.<sup>20</sup>

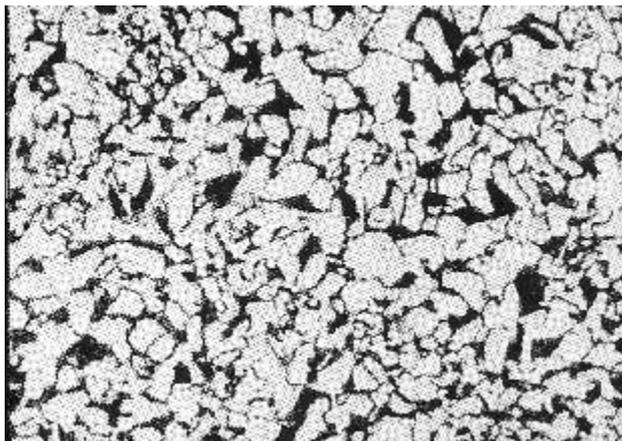


Figura 2.26.- Acero con 0,25% de C – Normalizado 200X

#### **2.4.8. TRANSFORMACIÓN EN LOS ACEROS HIPOEUTECTOIDES**

La transformación en los aceros hipoeutectoides siempre se inicia con la separación de una fase proeutectoide, en este caso de Perlita, en cantidades que depende del contenido de carbono. Esto produce la nucleación de la ferrita proeutectoide en los límites de grano de la Austenita. A mayor enfriamiento la cantidad de ferrita aumenta hasta alcanzar la temperatura eutectoide, y a cualquier enfriamiento ulterior, producirá la transformación de austenita en perlita, dando como resultado una aleación cuya microestructura será de ferrita y perlita proeutectoide.

Se observa claramente que la bainita no se puede contener en cantidades apreciables por el enfriamiento continuo a temperatura ambiente, ya que esta fase únicamente se obtiene con el enfriamiento del acero a partir de la austenita a una temperatura entre 535 y 260°C a una velocidad mayor que la del enfriamiento crítico. La austenita se transformará completamente en perlita antes de que se alcance la temperatura de formación de la bainita.

## 2.5. APLICACIONES DEL ACERO

En la actualidad el acero representa una amplia gama de aplicaciones en la industria debido a la versatilidad que tiene para ser procesado. Según el uso dado el acero se puede clasificar en:

**Acero para herramientas:** posee alta resistencia al desgaste y tenacidad, en general el contenido de carbono debe ser superior a 0.30%, pero en ocasiones también se usan para la fabricación de ciertas herramientas.



Figura 2.27.- Herramientas de Acero

**Acero para la construcción:** se emplea en la industria de la construcción para estructuras de hormigón, metálicas, pero también se usa en cerramientos de chapa de acero o elementos de carpintería de acero.

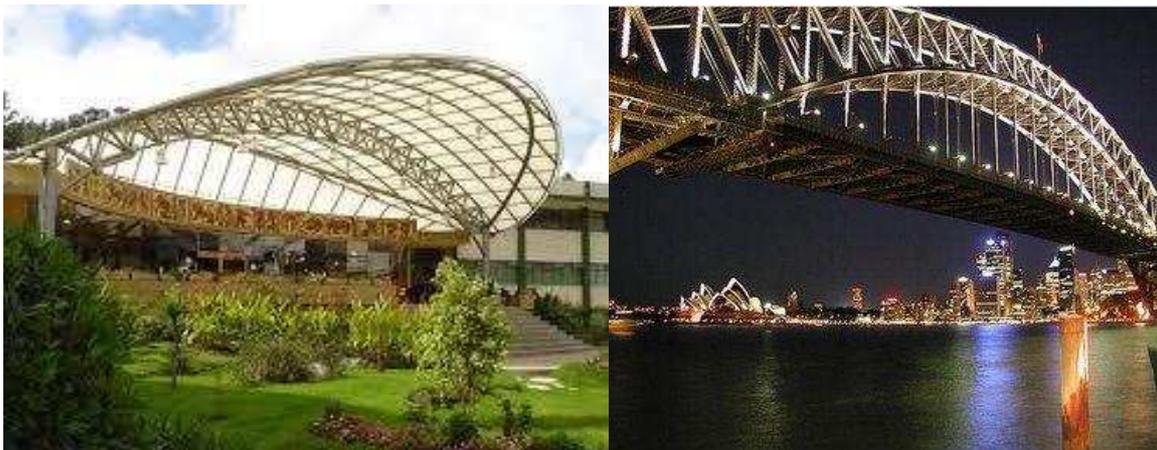


Figura 2.28.- Estructuras de Acero

**Acero Estructural o de refuerzo:** es un importante material para la industria de la construcción el cual, por su importancia en las edificaciones, debe estar

comprobada y estudiada su calidad. Los productos de acero de refuerzo deben cumplir con ciertas normas que exigen sea verificada su resistencia, ductilidad, dimensiones, y límites físicos o químicos de la materia prima utilizada en su fabricación.



Figura 2.29.- Acero de Refuerzo

## **CAPÍTULO 3**

### **SOLDABILIDAD Y METALURGIA DE LA SOLDADURA**

#### **3.1. SOLDABILIDAD DE UN MATERIAL**

La soldabilidad de un material es una medida de la facilidad para formar una unión soldada fuerte y sólida. Una unión sólida significa que la soldadura no tiene defectos ni imperfecciones (grietas, por ejemplo), y una unión fuerte significa que la soldadura debe ser al menos tan resistente como el material de base.

La soldabilidad puede abordarse bajo los tres aspectos siguientes: soldabilidad operatoria, soldabilidad metalúrgica y soldabilidad constructiva. Se dice que un metal o aleación es soldable si satisface a estas tres condiciones.

##### **3.1.1. LA SOLDABILIDAD OPERATORIA**

Relativa a la operación de soldadura, estudia las condiciones de realización de las uniones por fusión o por cualquier otro procedimiento.

##### **3.1.2. LA SOLDABILIDAD METALÚRGICA**

Relativa a las modificaciones físico-químicas resultado de la operación de soldadura. Está ligada a las transformaciones que sufre el metal o aleación durante la unión.

##### **3.1.3. LA SOLDABILIDAD CONSTRUCTIVA O GLOBAL**

Se dedica a definir las propiedades de conjunto de la construcción por la sensibilidad de la unión o la deformación y a la rotura bajo el efecto de las tensiones. Es función de otras propiedades físicas del metal: dilatación – contracción, produciendo deformaciones y creando tensiones que son el origen de grietas que pueden tener su nacimiento en la soldadura.

La figura 3.1 muestra la soldabilidad de los aceros en función de su porcentaje de carbono.

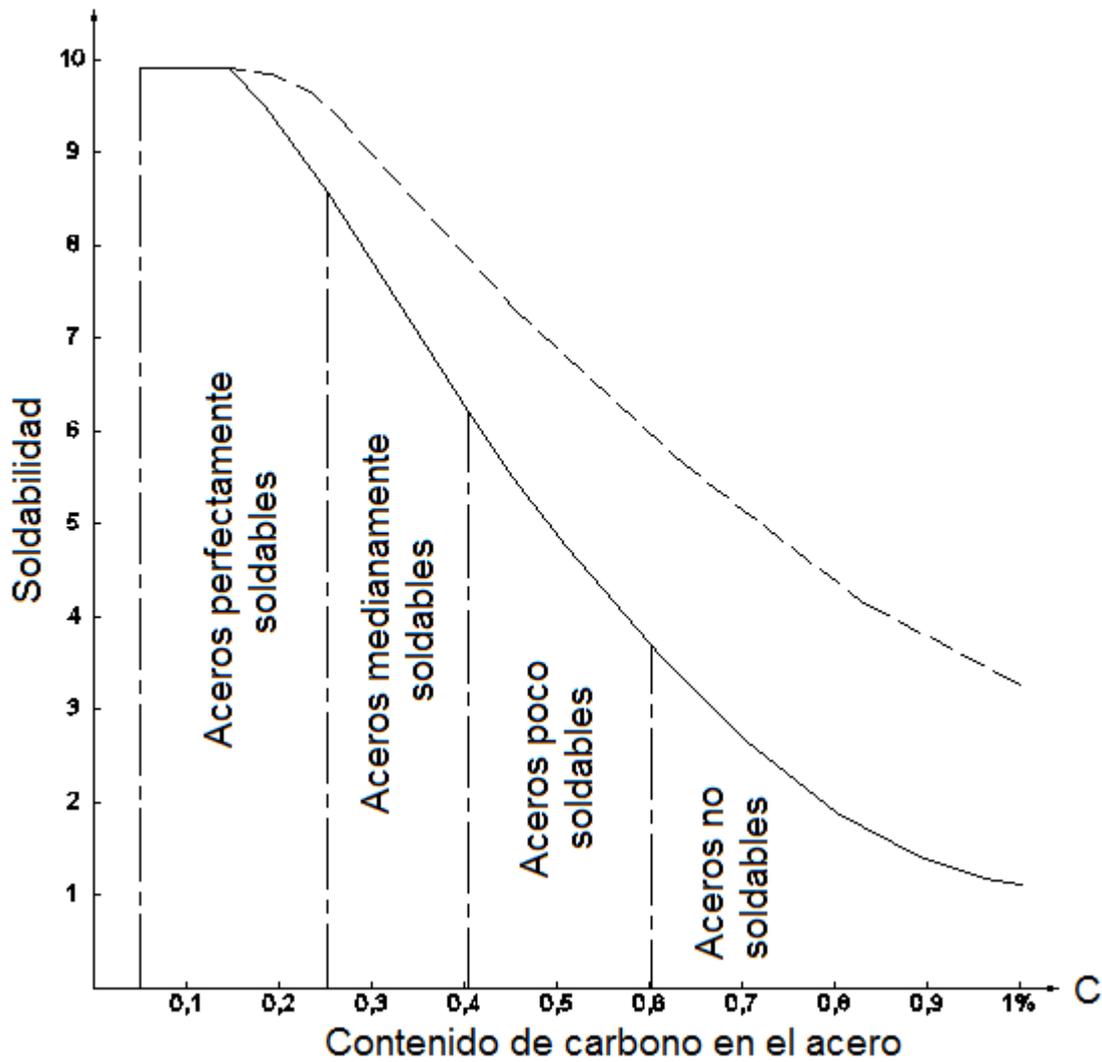


Figura 3.1.- Variación del coeficiente de soldabilidad S en función de la concentración de carbono en el acero<sup>21</sup>

Este gráfico permite indicar que la soldabilidad decrece cuando el contenido en carbono aumenta.

### 3.2. SOLDABILIDAD EN PROCESOS POR FUSIÓN

El procedimiento de unión predominante es la soldadura por fusión, como se ilustra en el esquema de la figura 3.2.

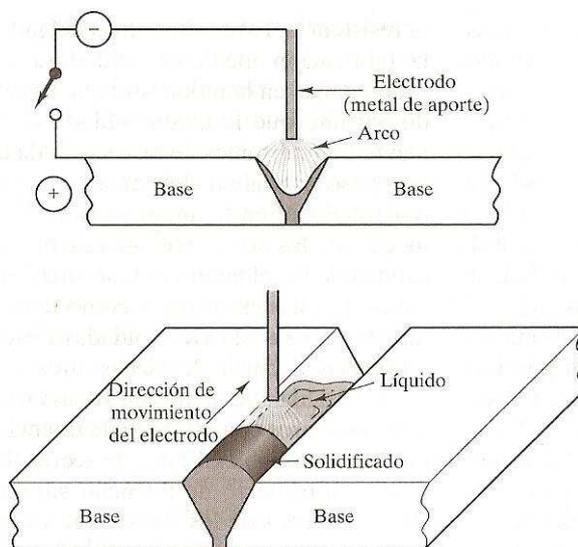


Figura 3.2.- Esquema del procedimiento de soldadura por fusión.

Los bordes de los materiales que se van a unir por soldadura se maquinan de manera que se tenga una depresión para contener el charco de metal líquido que se forma durante el procedimiento. La fusión de los materiales base se consigue mediante el arco eléctrico que se produce cuando se acerca el electrodo a las piezas en elaboración. Los materiales de base y el metal de aporte se funden para formar un charco líquido que después se solidifica para fusionar los materiales de base. El electrodo se desplaza a lo largo de la junta con velocidad uniforme, y los materiales base que están delante de él se funden, al mismo tiempo que se solidifica el charco de metal líquido detrás del electrodo.

La temperatura producida por el arco eléctrico es suficientemente alta para fundir el material de base y el metal de aporte. El calor se transfiere finalmente del metal fundido al material de base, y se produce un perfil de temperatura en el material de base, el cual modificará el tipo de grano y por lo tanto las propiedades del material base. El resultado de este perfil de temperatura en el material de base es la formación de diferentes microestructuras después del enfriamiento.

En la soldabilidad de los aceros influyen principalmente la composición, la aportación de calor y la velocidad de enfriamiento; los tres factores están relacionados con el endurecimiento de la región de la zona afectada por el

calor (ZAC), la más crítica. El endurecimiento depende de la cantidad de carbono y de elementos de aleantes que se disuelven en la austenita durante el calentamiento del material de base. Por lo común, la composición se expresa como el equivalente de carbono CE.

### 3.2.1. EL CARBONO EQUIVALENTE

Un requerimiento esencial de cualquier material estructural a ser soldado es que este tenga una buena soldabilidad. La soldabilidad de los aceros es usualmente expresada en términos del límite de carbono equivalente (Cmax), o el valor máximo. Como regla general un acero es considerado soldable si  $C_{equivalente} < 0,4$ . Su valor está representado en términos de cómo los elementos aleantes presentan afectaciones de características de transformación. En efecto, el Carbono equivalente proporciona una indicación del tipo de microestructura que se espera en la zona afectada por el calor en la soldadura como una función de la tasa de enfriamiento desde la temperatura pico. Específicamente, se espera que este número de una indicación de que si la martensita puede ser formada o no.

Desde que Dearden y O'Neil publicaron el concepto de Carbono equivalente se han propuesto muchos índices de susceptibilidad a fisuración en frío.

La tabla 3.1 Registra tres grupos principales:

- A) Basado en el  $CE_{IIW}$ , el cual fue originado por Dearden y O'Neil
- B) Tipo Pcm, en el cual el Carbono es más importante que en el primer grupo
- C) Tipo CEN, en el cual el efecto del Carbono depende del resto de aleantes.

Tabla 3.1.- Fórmulas de Carbono equivalente en diferentes grupos

Grupo	Fórmula
A	$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu + Ni}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{5}$ $CE_{WES} = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14}$ $CE_{Scout II} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{40} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr}{10} + \frac{Mo}{10}$

B	$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$ $CE_{Graville} = C + \frac{Mn}{16} - \frac{Ni}{50} + \frac{Cr}{23} + \frac{Mo}{7} + \frac{Nb}{8} + \frac{V}{9}$ $CE_{Duren} = C + \frac{Si}{15} + \frac{Mn}{16} + \frac{Cu}{16} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{40} + \frac{V}{15}$
C	$CE_{Scout I} = 1000C \left( \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo}{10} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cu}{40} \right)$ $CEN = C + A(C) \left\{ \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr + Mo + Nb + V}{5} + 5B \right\}$ $\text{Donde } A(C) = 0.75 + 0.25 \tanh\{20[C - 0.12]\}$

La Norma AWS D1.1 sugiere la utilización de la fórmula  $CE_{IIW}$  razón por la cual fue usada para objeto del presente proyecto en los cálculos respectivos, esta fórmula es la siguiente:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V+Cb}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad . \quad (3.1)^{38}$$

Los símbolos del lado derecho de la ecuación representan el contenido en por ciento en peso de los elementos. La facilidad o la dificultad para formar una soldadura sólida se indica en la figura 3.3, la cual muestra las tres regiones de susceptibilidad al agrietamiento de la zona afectada por el calor en una gráfica de equivalente de carbono en función del contenido de carbono.

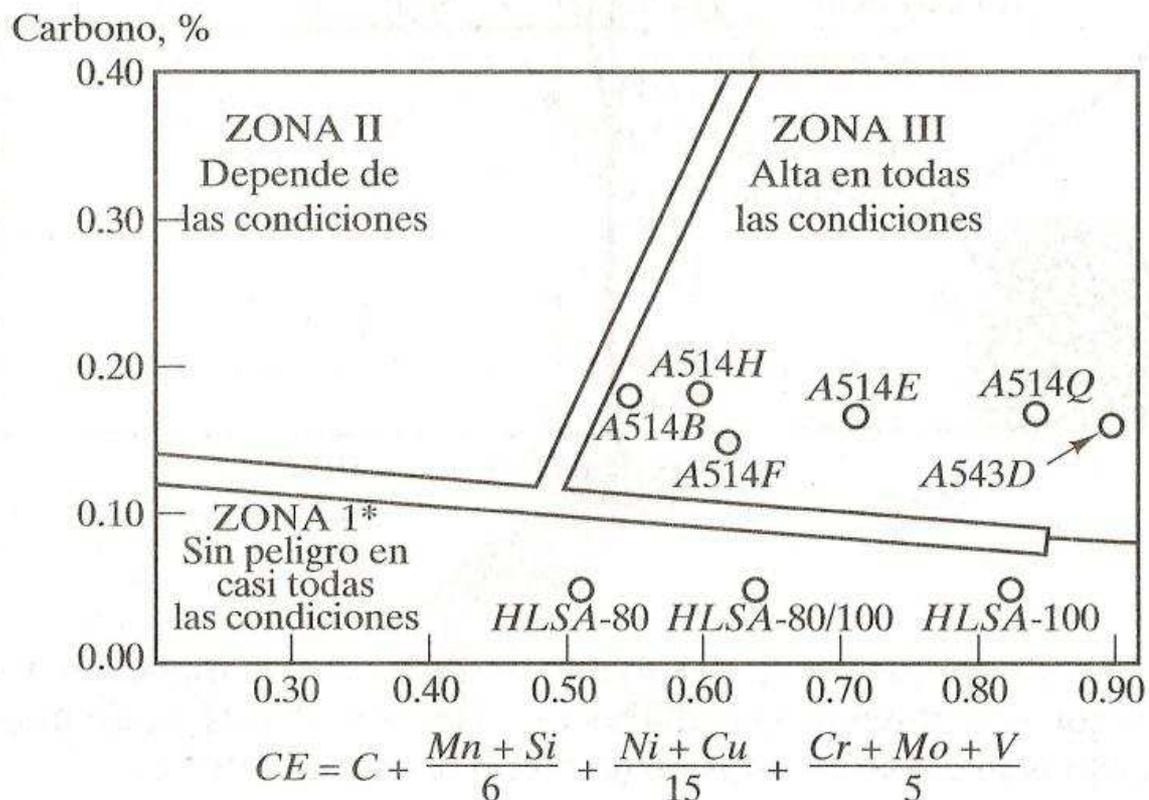


Figura 3.3.- Susceptibilidad de la ZAC al agrietamiento en función del contenido de carbono y del equivalente de carbono en aceros de alta resistencia. <sup>22</sup>

La susceptibilidad de la ZAC al agrietamiento guarda relación con la dureza de la martensita que se forma durante el enfriamiento de la placa. El contenido de carbono de la martensita (al igual que en el caso de la austenita) es el único factor que contribuye a la dureza de la martensita, y la figura 3.4 muestra el efecto del contenido de carbono en la sensibilidad de la soldadura al agrietamiento debido a la formación de martensita frágil.

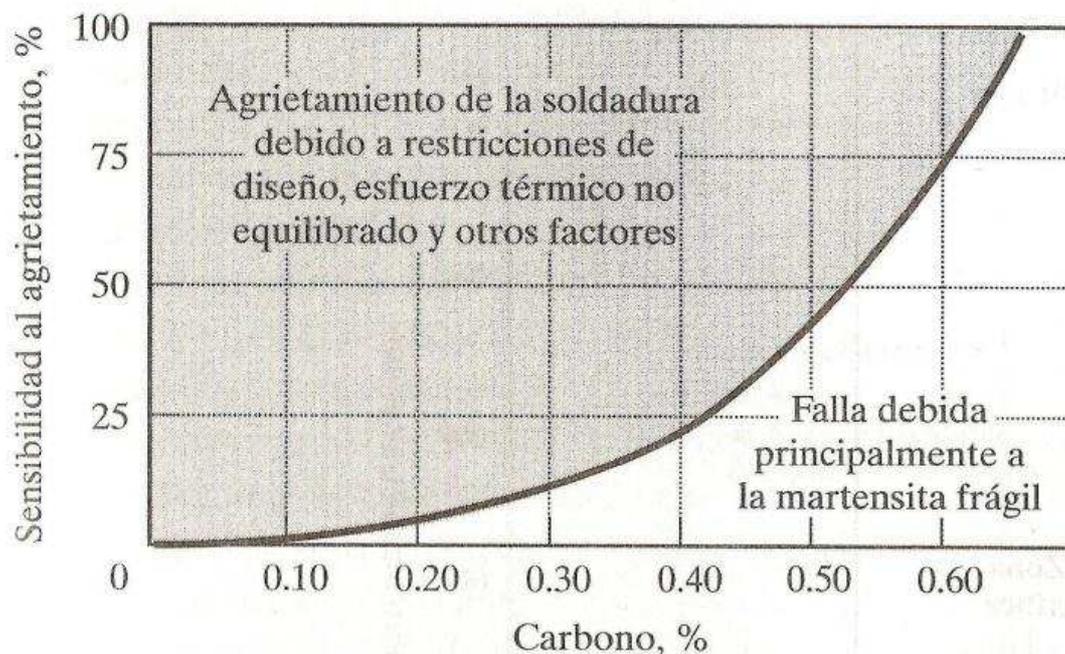


Figura 3.4.- La sensibilidad al agrietamiento aumenta con el contenido de carbono de la martensita frágil en el acero. <sup>22</sup>

La formación de martensita es función tanto de la composición como de la rapidez de enfriamiento. Un alto contenido de carbono o equivalente de carbono facilita la formación de martensita. Al soldar, la rapidez de enfriamiento depende de la aportación de calor y del tamaño de sección (espesor) de los aceros de base. La aportación de calor está dada por:

$$H = \frac{E \times I \times 60}{S} \quad (3.2)^{22}$$

En donde:

H es la aportación de calor en Joules por pulgada,

E es el voltaje de arco en volts,

I es la corriente de arco en amperes y

S es la velocidad de movimiento del arco (electrodo) en pulgadas por minuto.

Una aportación de calor de alta energía significa que la velocidad de enfriamiento de la soldadura es menor para un mismo espesor de acero. Para

una misma aportación de calor, un material más grueso representa la disponibilidad de una masa más grande para extraer el calor, por lo que aumenta la velocidad de enfriamiento. Para evitar el agrietamiento de la zona afectada por el calor, se debe reducir la velocidad de enfriamiento de la soldadura por debajo de la velocidad de enfriamiento crítico para formar la martensita en el acero. La velocidad de enfriamiento de los aceros al bajo carbono y de baja aleación es muy crítica, y estos materiales no forman martensitas duras y frágiles en la zona afectada por el calor; por tanto, no exigen precauciones especiales durante la soldadura, salvo la selección del metal de aporte adecuado para formar una soldadura fuerte. Con un contenido de carbono equivalente de carbono más altos, es más fácil formar martensita, y se debe reducir la velocidad de enfriamiento de la unión soldada por debajo de la velocidad de enfriamiento crítica para evitar la formación de martensita. Se puede reducir la velocidad de enfriamiento precalentando los materiales de base. Cuando el contenido de carbono y el equivalente de carbono son mucho mayores y es inevitable la formación de martensita, puede ser necesario calentar la sección después de soldada para reducir la susceptibilidad de la martensita a sufrir agrietamiento.

Se sabe, en general, que el "eslabón débil" de una estructura soldada es la unión soldada. Por tanto, es importante seleccionar los materiales y el procedimiento correctos para formar una unión sólida y fuerte. [3]

### **3.3. METALURGIA DE LA SOLDADURA**

#### **3.3.1. INTRODUCCIÓN**

La soldadura lleva a grandes calentamiento y flujo de fluido que afectan la distribución de temperaturas en el metal base, la forma y tamaño de la piletta, el proceso de solidificación, velocidad de enfriamiento y las cinéticas de transformación en estado sólido, en el metal de soldadura y la zona afectada por el calor (ZAC).

La variación de temperatura con el tiempo afecta principalmente a la evolución microestructural, las tensiones residuales y la magnitud de las distorsiones en la soldadura. Además, la absorción y la desorción de

hidrógeno, oxígeno y nitrógeno afectan al metal de soldadura tanto en sus propiedades como en su microestructura.

Es necesario tomar en cuenta que la transferencia de calor de la piqueta de soldadura, se da específicamente por conducción y convección, y debido a la complejidad que se presenta detallar el flujo convectivo del charco, el flujo por conductividad es útil y simple para muchos casos.

El calor aportado denota la relación que existe entre la potencia del arco que ingresa a la pieza entre la velocidad de soldadura. El término calor aportado se lo utiliza debido a que no todo el calor generado entra en la pieza, el área donde se da esta relación es relativamente pequeña con respecto a las dimensiones de la pieza, la cual genera una fracción de energía absorbida que es responsable de producir el proceso de soldadura.

### 3.3.2. VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO

La velocidad de enfriamiento en el proceso de soldadura está en función a la velocidad de disipación de la energía, dada por la transferencia de calor hacia el ambiente, el metal base y el material de soldadura. La velocidad de enfriamiento es determinante en la estructura metalúrgica final producida, la cual varía con la temperatura y particularmente importante en aceros tratados térmicamente.

El precalentamiento de la pieza es muy utilizado para conseguir una velocidad de enfriamiento menor, y de manera específica cuando se trata de piezas relativamente gruesas.

Para piezas de espesor grueso la velocidad de enfriamiento se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$V_e = - \frac{2\pi k(T_C - T_O)^2}{H_{net}} \quad (3.3)^{38}$$

Donde:

$V_e$ : Velocidad de enfriamiento [ $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ]

$k$ : Conductividad térmica [ $0.028 \text{ J}/\text{mm s } ^{\circ}\text{C}$ ]

$T_c$ : Temperatura a la que se calcula la velocidad de enfriamiento [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_o$ : Temperatura de precalentamiento

Hnet: Calor Aportado Neto [J/mm]

Para piezas de espesor delgado la velocidad de enfriamiento se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$V_e = -2\pi k\rho C \left(\frac{h}{H_{net}}\right)^2 (T_c - T_o)^3 \quad (3.4)^{38}$$

En donde:

Ve Velocidad de enfriamiento [°C/s]

k Conductividad térmica [0.028 J/mm s °C]

Tc Temperatura a la que se calcula la velocidad de enfriamiento [°C]

To Temperatura de precalentamiento

h espesor del material [mm]

ρ densidad del material [g/mm<sup>3</sup>]

C Calor específico del material [J/g °C]

Hnet Calor Aportado Neto [J/mm]

Los términos referidos a piezas gruesa y delgada, se diferencian debido al flujo de calor que se presenta en cada una de ellas. Las piezas gruesas presentan un flujo de calor de forma tridimensional, mientras que las delgadas se identifican por un flujo en forma bidimensional, tal como se muestra en la figura 3.5:

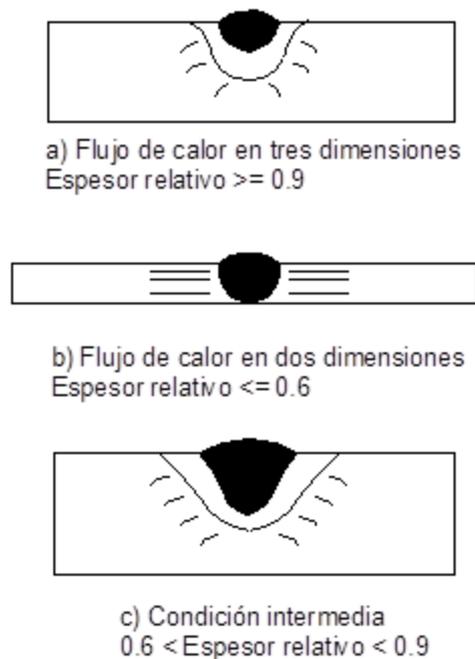


Figura 3.5.- Flujo de calor de la soldadura

El término espesor relativo permite determinar el tipo de pieza en cuanto a la magnitud del espesor, ya que determinar si la placa es gruesa o delgada no es tan obvio como se parece, estos términos son absolutos.

Cuando el espesor relativo es mayor a 0.9, la pieza se considera gruesa; si este se encuentra entre los rangos de 0.6 hasta 0.9 el límite máximo de velocidad de enfriamiento está dada por la ecuación de placa gruesa, mientras que el límite mínimo de velocidad de enfriamiento está dada por la ecuación de placa delgada; por último si el espesor relativo es menor a 0.6, se considera placa delgada.

$$\tau = h \sqrt{\frac{\rho C (T_c - T_o)}{H_{net}}} \quad (3.5)^{38}$$

En donde:

- $\tau$       Espesor relativo
- $T_c$      Temperatura [°C]
- $T_o$      Temperatura de precalentamiento [150°C]
- $h$       espesor del material [mm]
- $\rho$       Densidad del metal base en [g/mm<sup>3</sup>]

C calor específico del material [J/g °C]

Hnet Calor aportado neto [J/mm]

Se pueden determinar de manera experimental las curvas de temperatura Vs el tiempo, a continuación se muestra una curva típica:

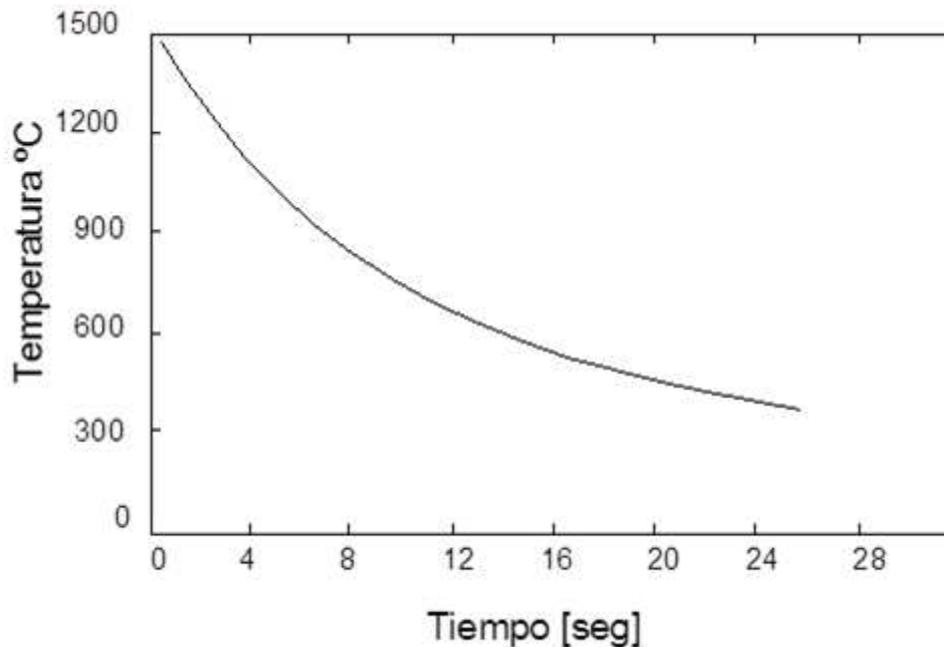


Figura 3.6.- Curva Temperatura – Tiempo Típica

### 3.3.3. TEMPERATURA PICO

Es necesario conocer la temperatura máxima que se produce en el metal adyacente a la zona de soldadura, para predecir los cambios metalúrgicos en dicha zona, esto se realiza mediante la ecuación 3.6:

$$\frac{1}{T_p - T_o} = \frac{\sqrt{2\pi e} \rho C h Y}{H_{net}} + \frac{1}{T_f - T_o} \quad (3.6)^{38}$$

En donde:

$T_p$  Temperatura pico [°C]

$T_f$  Temperatura de fusión [°C]

$T_o$  Temperatura de precalentamiento [150°C]

h espesor del material

$\rho$  densidad del metal base en [g/mm<sup>3</sup>]

C calor específico del material [J/g °C]

Y Distancia desde el borde fusión [mm]

Hnet Calor aportado neto [J/mm]

En el borde de fusión que se produce entre el charco de soldadura y el metal base, la temperatura pico es igual a la temperatura de fusión del material. Cabe citar que esta ecuación es válida únicamente en el caso que se produzca un flujo de calor bidimensional, es decir que se usa cuando se realiza una soldadura de una pasada pero con penetración completa.

La temperatura en el charco de soldadura es mucho mayor que la temperatura de fusión, por lo que se produce una vaporación de elementos de aleación, resultando cambios en el metal de soldadura que pueden afectar directamente a las propiedades de esta zona.

Las propiedades mecánicas de muchos aceros al carbono y de baja aleación no se ven afectadas si la temperatura pico es menor a 730°C.

Con el uso de esta ecuación se puede determinar el ancho de la zona afectada por el calor, observándose claramente que dicha zona va a depender del calor aportado.

### 3.3.4. TIEMPO DE SOLIDIFICACIÓN

El tiempo a la que solidifica el metal tiene profunda influencia en su estructura metalúrgica, propiedades y respuesta del tratamiento térmico; este depende del calor aportado y la temperatura inicial del material.

Además, con la velocidad de evaporación y la composición del metal de soldadura se puede llegar a obtener un importante enfriamiento del metal líquido en la pileta.

La ecuación 3.7 se usa para determinar la temperatura de solidificación para soldaduras con una pasada y penetración completa.

$$T_s = \frac{LH_{net}}{2\pi k\rho C(T_f - T_o)^2} \quad (3.7)^{38}$$

En donde:

Ts Tiempo de solidificación [seg]

L Calor latente de fusión [2J/mm<sup>3</sup>]

$k$	conductividad térmica [0.028 J/mm s °C]
$T_f$	Temperatura de fusión [°C]
$T_o$	Temperatura de precalentamiento [150°C]
$\rho$	densidad del metal base en [g/mm <sup>3</sup> ]
$C$	calor específico del material [J/g °C]
$H_{net}$	Calor aportado neto [J/mm]

La microestructura final del metal de soldadura dependerá de muchos factores, en especial de las siguientes variables:

- Contenido de aleación total
- Concentración, composición química y distribución de tamaños de las inclusiones no metálicas
- Microestructura de solidificación
- Tamaño del grano austenítico primario
- Ciclo térmico

### 3.3.5. REACCIONES DURANTE Y DESPUÉS DE SOLDADURA

En el metal de soldadura líquido puede tener lugar un número importante de reacciones, que en primer lugar, se darán en la gota líquida formada en la punta del electrodo, posteriormente durante la transferencia desde el electrodo a la pileta líquida y por último en la pileta líquida propiamente dicha. Estas reacciones incluyen:

- Solución de gas, causando reacciones gas-metal o reacciones con otros elementos disueltos en el metal líquido.
- Evolución de gas.
- Reacción con la escoria o fundente.

Las reacciones van a depender de las características propias del material y serán relevantes en la evolución microestructural antes y después de la solidificación.

La soldadura comprende dos reacciones importantes, la primera a altas temperaturas comprendida entre gas-metal y escoria-metal, y la segunda, se caracteriza por reacciones de desoxidación como precipitación de inclusiones

no metálicas seguida por la formación partículas hacia la superficie. No existe una frontera definida en la formación de estas dos etapas, incluso pueden actuar de manera simultánea.

La oxidación del acero se encuentra parcialmente presente en el momento de la soldadura, siendo la velocidad para remover las inclusiones formadas en la pileta, un factor importante que controla esta reacción. Durante el enfriamiento, las concentraciones de oxígeno establecidas a altas temperaturas tienden a ajustarse por la precipitación de nuevas fases, dando como resultado una supersaturación de oxígeno con respecto del contenido de reactantes para la desoxidación que provee la nucleación de óxidos.

### **3.3.6. SOLIDIFICACIÓN**

La solidificación se ve influenciada por la composición química del sistema, por la geometría de la pileta líquida, por las condiciones térmicas del lugar, por la presencia de impurezas en la pileta líquida, la existencia de turbulencia, volumen del metal líquido pequeño con respecto al del metal base y la existencia de grandes gradientes de temperatura en el metal líquido; este último se ve afectado con la presencia de precalentamiento.

#### **3.3.6.1. PARÁMETROS BÁSICOS**

Los parámetros básicos que controlan la solidificación son:

- Velocidad de Crecimiento
- Gradiente de temperatura
- Sobre enfriamiento
- Composición de la aleación

#### **3.3.6.2. MODOS DE SOLIDIFICACIÓN**

El crecimiento del sólido tiene lugar por la adición de átomos desde el líquido hacia el sólido, si este se produce en forma planar, celular o dendrítico influirá fuertemente en la forma y la distribución de los granos y en las variaciones composicionales dentro de la soldadura, la cual dependerá de las condiciones en las que se realiza.

Cuando se trata de predecir las microestructuras es necesario tomar en cuenta tanto el gradiente de concentración delante de la interfase sólido-líquido y el cambio de gradiente térmico a través del líquido. Además si la temperatura del líquido está por debajo de la temperatura del liquidus del líquido enriquecido, esta parte del metal fundido estará sobre enfriado constitucionalmente.

En el proceso de soldadura se genera una protuberancia que crece delante de la interfase, esta se funde siempre y cuando la temperatura real en el líquido sea mayor que la temperatura del liquidus, ocasionando que el frente sea de forma planar, es decir que no exista sobre enfriamiento constitucional. De esta manera se puede llegar a definir el gradiente térmico crítico para la existencia de sobre enfriamiento constitucional, en términos de la velocidad de crecimiento de la interfase y las condiciones de soldadura.

El gradiente térmico crítico dependerá del gradiente térmico de solidificación, razón por la cual un frente de solidificación planar será difícil mantenerlo. Cuanto mayor sea el sobre enfriamiento constitucional mayor será la inestabilidad del frente, pasando de planar a celular, celular dendrítico, dendrítico y equiaxial dendrítico. A las velocidades de soldadura normalmente utilizadas se ha observado un gradual aumento de la naturaleza dendrítica al acercarse a la línea central del cordón.

En el siguiente gráfico se puede observar el efecto del gradiente térmico y la velocidad de solidificación en función de la concentración de soluto:

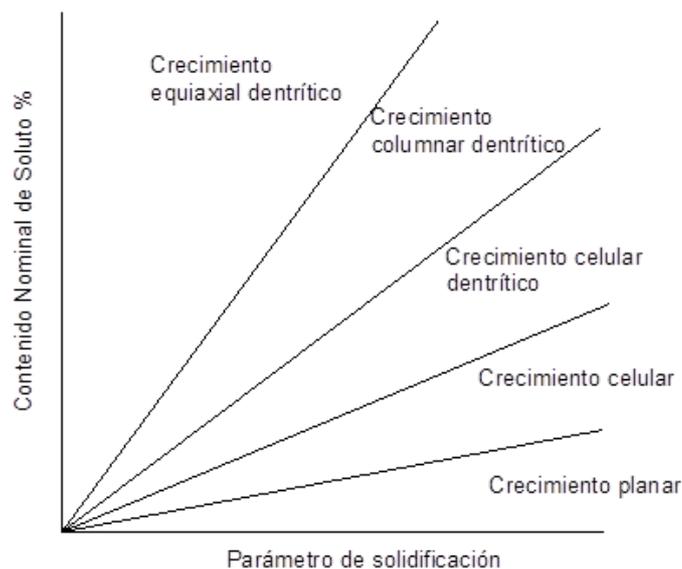


Figura 3.7.- Gradiente térmico y velocidad de solidificación Vs concentración de soluto

Las condiciones en las que el gradiente térmico en el líquido es mayor que el gradiente crítico, se observan para una corta distancia desde la línea de fusión, donde se encuentran el máximo gradiente térmico y las menores velocidades de crecimiento, pero también se puede ver en materiales de alta pureza.

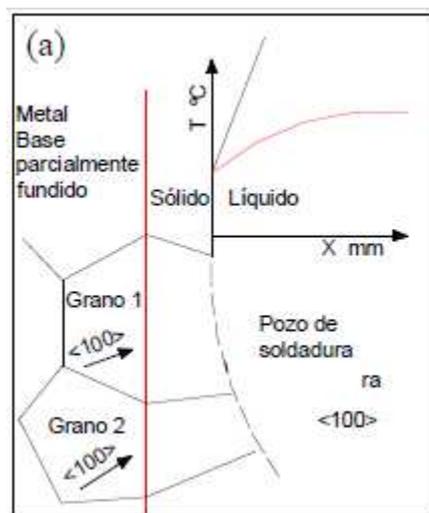


Figura 3.8.- Interfase Sólido – líquido durante el crecimiento planar.

Cuando el sobre enfriamiento constitucional es de menor grado, la estructura de solidificación está constituida por células según la dirección del crecimiento fácil del cristal y controlada por las condiciones del flujo de calor. Este tipo de

crecimiento es conocido como crecimiento celular y se da cuando la extensión de la zona sobre enfriada es menor que el diámetro del grano.

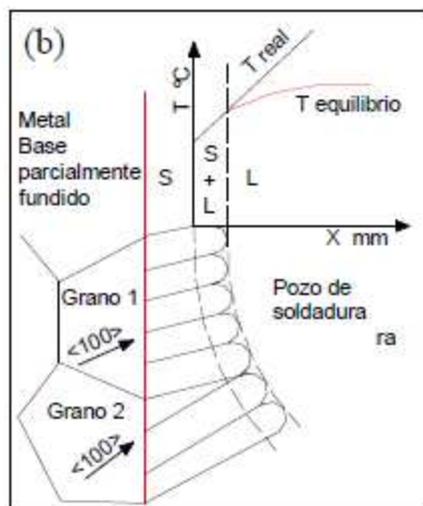


Figura 3.9.- Interfase Sólido – líquido durante el crecimiento celular.

Sin embargo cuando la zona sobre enfriada es lo suficientemente grande como para soportar el crecimiento ramificado según otras direcciones de crecimiento fácil se produce el crecimiento celular dendrítico. Una diferencia claramente observada entre el crecimiento dendrítico y celular es que este último es antiparalelo a la dirección del flujo de calor, pero no es necesariamente paralelo a una dirección de crecimiento fácil.

El metal de soldadura tiene en general granos columnares cuyas subestructuras de solidificación son del tipo celular o celular dendrítico o una mezcla de ambas, sin embargo cuando la soldadura se la realiza en aleaciones con altos niveles de solutos que disminuyen la temperatura del liquidus, se produce una nucleación espontánea cuya zona enfriada es significativamente mayor que el diámetro del grano generándose un crecimiento columnar dendrítico.

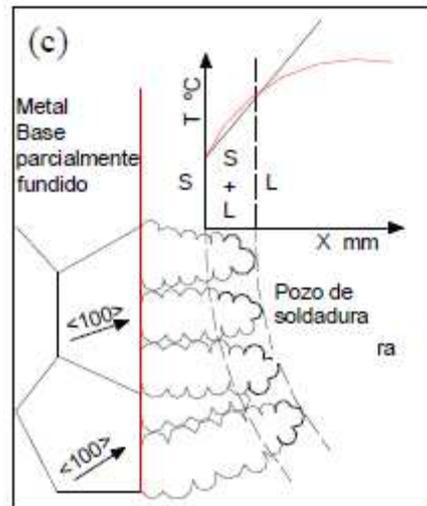


Figura 3.10.- Interfase Sólido – líquido durante el crecimiento celular dendrítico.

Cuando las soldadura son realizadas con altas velocidades se suele observar la transición de estructuras celulares dendríticas denominadas estructuras equiaxiales dendríticas

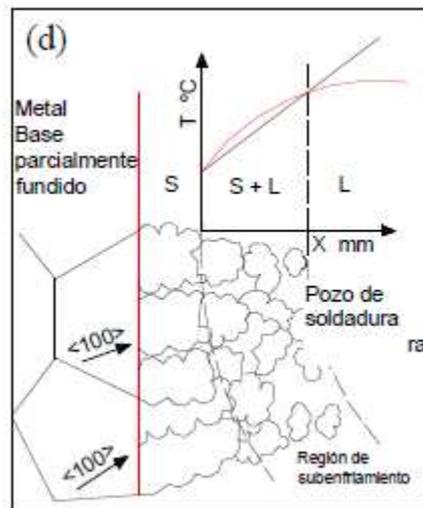


Figura 3.11.- Interfase Sólido – líquido durante el crecimiento dendrítico.

### 3.3.7. SEGREGACIÓN

Se produce por la redistribución del soluto al momento de producirse la solidificación, y puede darse tanto en escala macro como micro. La Macrosegregación existe cuando se extiende sobre más de varios diámetros

de grano, mientras que la microsegregación se efectúa cuando se extiende sobre distancias igual o menor que las del tamaño de grano.

A su vez la microsegregación se subdivide en intercelular, inter dendrítica o del borde del grano.

Los factores más importantes en la determinación de la segregación son:

- Densidad y espaciado de los bordes de la célula
- Coeficiente de partición del soluto  $k$
- La cantidad total del soluto

Otro factor determinante en la segregación es el espaciado celular el cual se encuentra establecido por el tiempo de solidificación local, si este último disminuye, genera una disminución del espaciado celular o dendrítico produciendo un menor nivel de segregación.

La segregación en los bordes de grano se produce por acumulación de soluto en la junta de dos bordes de grano o por atrapado de soluto entre dos interfaces que crecen. Este último puede ser considerado como macrosegregación.

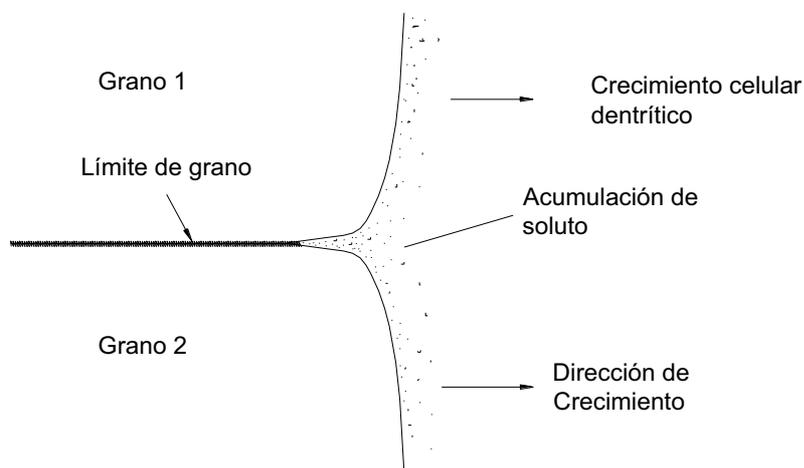


Figura 3.12.- Esquema de segregación en borde de grano por acumulación de soluto en las juntas

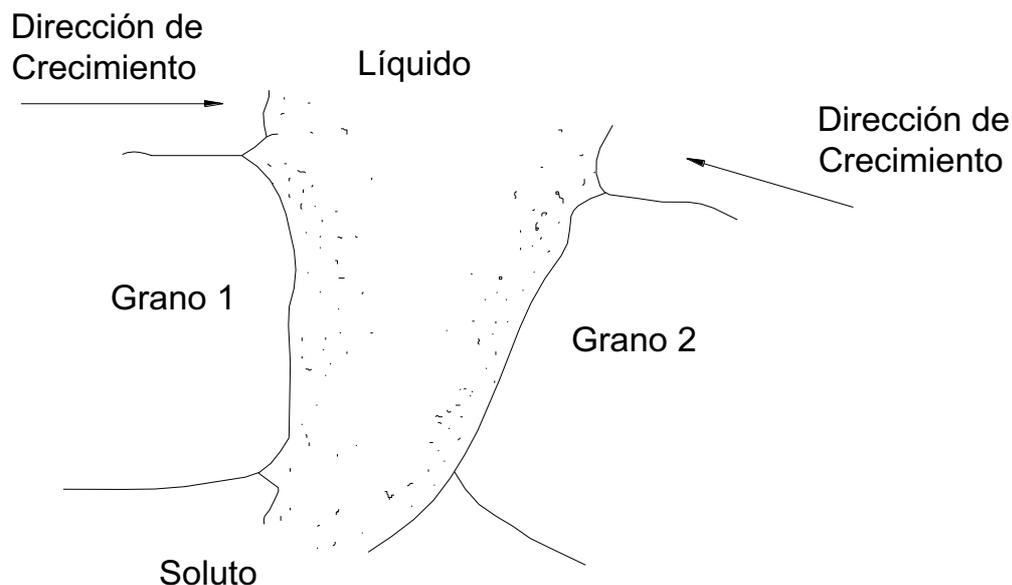


Figura 3.13.- Esquema de segregación en borde grano por atrapamiento de soluto entre dos interfases

La acumulación de soluto en la línea central de la soldadura puede ser marcada cuando predomina el crecimiento columnar.

Un cambio en la velocidad de crecimiento durante la solidificación genera fluctuaciones macroscópicas de la composición, las cuales están asociadas con el bandeado del soluto debido a la periodicidad del calor aportado en el cordón de soldadura, y que aparece como ondulado superficial.

Este efecto de bandeado puede afectar el comportamiento físico y mecánico del metal de soldadura de manera adversa, cuyas ondulaciones superficiales representan una perturbación de la pileta líquida la que es reflejada en la solidificación del cordón.

De lo dicho anteriormente se puede concluir que la segregación de soluto en el cordón de soldadura puede tomar diversas formas, que pueden llevar a variaciones en las propiedades mecánicas de la unión soldada, así como a la ocurrencia de un número de defectos en el metal de soldadura incluyendo porosidad y fisuración por solidificación.

### 3.3.8. NUCLEACIÓN Y CRECIMIENTO

En el proceso de solidificación intervienen dos etapas claramente definidas, la primera la nucleación de la fase sólida y la segunda el crecimiento de esta fase sólida. El proceso de la nucleación de una fase sólida desde el líquido se clasifica en homogénea o heterogénea.

En aceros de baja aleación la solidificación de la soldadura comienza con el crecimiento epitaxial, el cual es un proceso de nucleación heterogénea. El término epitaxial se deriva de epitaxia la cual se define como una capa uniforme que reproduce la estructura cristalina del sustrato sobre el que crece. Para el caso de la soldadura, sobre la superficie del metal base parcialmente fundido se forma un embrión de metal de soldadura, la forma de este depende de las energías superficiales presentes, estas son:

- Energía superficial metal base-líquido ( $\gamma_{SM}$ )
- Energía superficial metal de soldadura sólido-metal base ( $\gamma_{ML}$ )
- Energía superficial metal de soldadura sólido-líquido ( $\gamma_{SL}$ )

Asumiendo que la energía superficial del metal de soldadura sólido-líquido es isotrópico, se obtiene que la energía interfacial es minimizada cuando el embrión tiene la forma de un casquete esférico, y el ángulo formado entre la capa respecto de la interfase se conoce como ángulo de mojado el cual está controlado por el balance de energías.

Debido a que el metal de soldadura es muy similar al metal base, y que la solidificación es epitaxial el ángulo de mojado es cero, por lo que se tiene:

$$\gamma_{SM} \cong 0$$

$$\gamma_{ML} \cong \gamma_{SL}$$

Con lo que se concluye que la barrera para la nucleación del metal de soldadura es despreciable, por lo que no se necesita sobre enfriamiento.

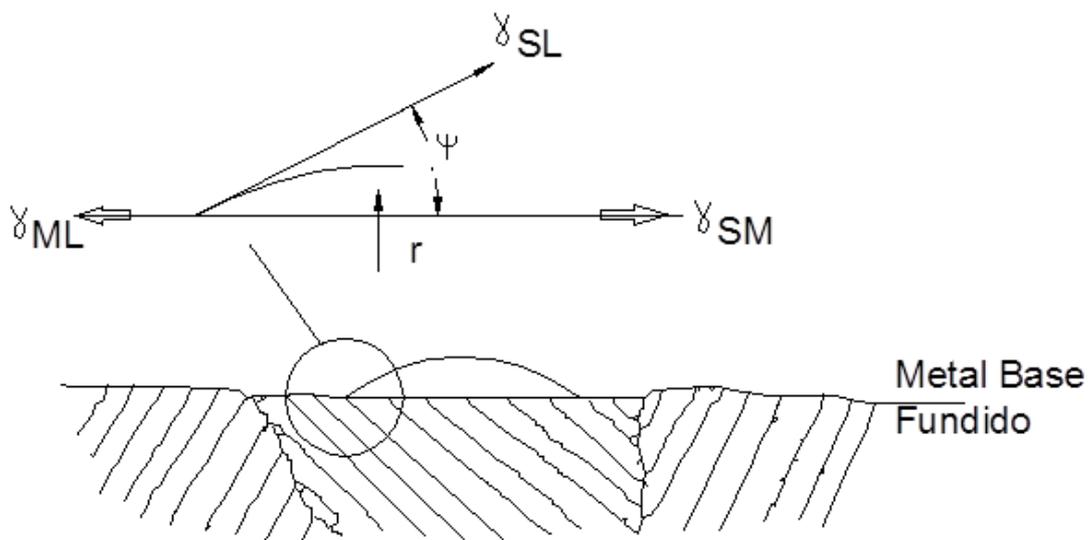


Figura 3.14.- Esquema del crecimiento epitaxial, fuerzas interfaciales y del ángulo de mojado

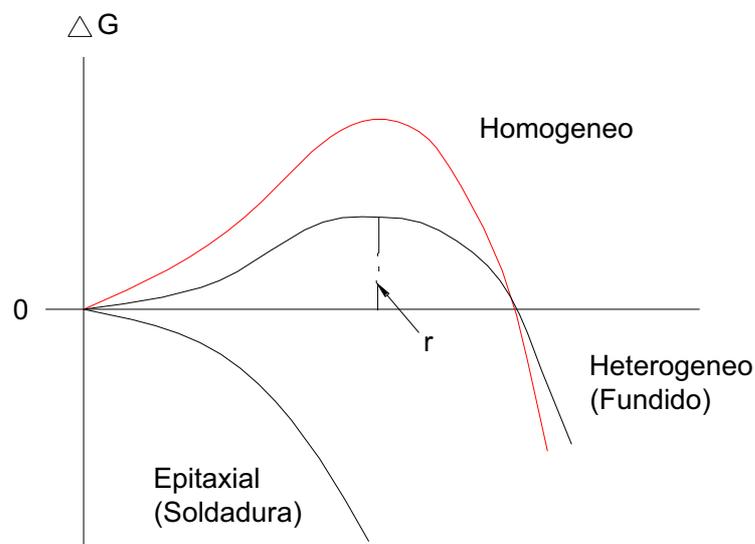


Figura 3.15.- Energía libre en la nucleación homogénea, heterogénea y epitaxial

Debido a los grandes gradientes de temperatura en la interfase sólido-líquido permite que la solidificación se produzca en un frente inestable, por lo que los granos finales de ferrita delta serán del tipo columnar orientados por la

dirección de la máxima extracción de calor. Además la soldadura implica una fuente de calor en movimiento, lo que provoca que la orientación de las isothermas cambien con el tiempo, generando granos de austenita más finos y con dirección distinta con respecto a los de ferrita delta.

La figura 3.16 muestra que si la velocidad de enfriamiento es lo suficientemente alta se puede llegar a obtener austenita metaestable, superando a la ferrita delta.

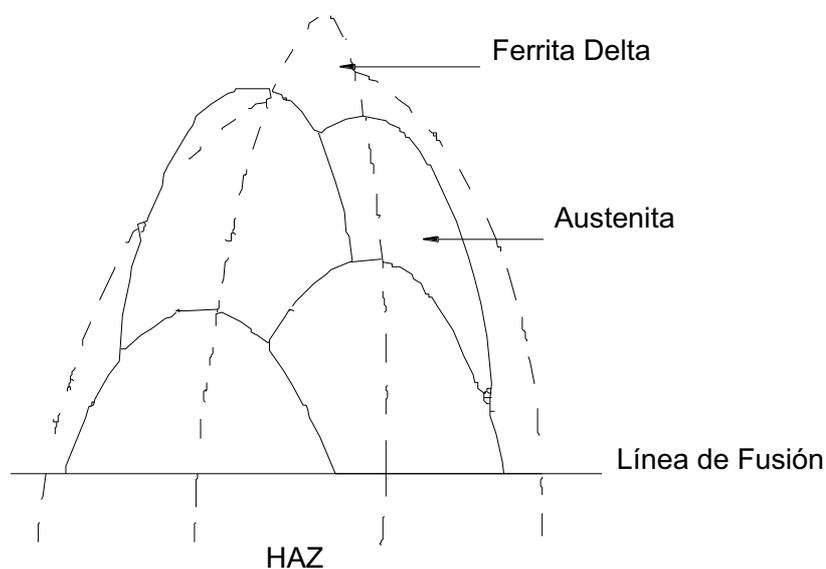


Figura 3.16.- Esquema de la secuencia de solidificación desde ferrita delta en aceros

Este tipo de solidificación puede también efectuarse cuando el acero tiene elementos de aleación estabilizadores de la austenita, tal es el caso de los acero al C-Mn que solidifican directamente desde esta fase.

La solidificación a Austenita puede ser indeseable básicamente por:

- Las inclusiones tienden a quedar atrapadas en la interfase del frente de solidificación, es decir en los bordes de los granos columnares, ocasionando fragilidad en la junta; efecto que no sucede cuando la solidificación tiene lugar desde la ferrita delta ya que las inclusiones

quedan atrapadas en lugares donde hacen menos daño e incluso pueden generar fases más tenaces.

- Mayor segregación debido a que la velocidad de difusión en la ferrita es de mayor grado que a partir de la austenita.

La morfología de los granos en la zona afectada por el calor definirán el ancho de los granos columnares en la línea de fusión.

Seguido de la nucleación comienza el crecimiento de los cristales por adición de átomos de sólido, el cual es un crecimiento normal, en donde la interfase avanza por la adición continua de átomos al azar.

El cambio en la morfología de la interfase está determinado por las condiciones adyacentes a la misma, denominada inestabilización del frente de solidificación. Las condiciones que promueven a esta inestabilización son aquellas que llevan a la presencia de sobrenfriamiento constitucional, las cuales son:

- Bajos Gradientes Térmicos en el líquido
- Altas velocidades de crecimiento
- Para aleaciones, líneas liquidus empinadas
- Altos contenidos de aleación

#### 3.3.8.1. NUCLEACIÓN HOMOGÉNEA

Debido a las grandes velocidades de enfriamiento en el metal de soldadura, se determina que las transformaciones se produzcan bajo condiciones de no-equilibrio, además los volúmenes específicos de las dos fases actuantes no son iguales, por lo que se genera una deformación en la red como consecuencia de la transformación, asociada con una aportación de energía para que se produzca la transformación. El sistema requiere de una energía adicional que se obtiene a través del sobre enfriamiento.

### 3.3.8.2. NUCLEACIÓN HETEROGÉNEA

Los sistemas tienden a disminuir la barrera energética para la formación de una nueva fase a través de la nucleación sobre una interfase preexistente, este proceso es conocido como nucleación heterogénea.

La nucleación heterogénea requiere menos cantidad de energía con respecto a la homogénea, razón por la cual esta se presenta primero y con mayor facilidad. Los sitios donde suelen realizarse la nucleación son:

- Superficies Libres
- Esquinas de granos
- Borde de grano
- Inclusiones
- Dislocaciones
- Conjunto de vacancias

### 3.3.9. TRANSFORMACIONES EN ESTADO SÓLIDO

Las transformaciones en estado sólido que tienen lugar durante el enfriamiento en el metal de soldadura se producen principalmente en forma heterogénea y las características debidas a las transformaciones, será un factor controlante de las propiedades que a la final presente el material.

En la mayoría de las transformaciones en estado sólido la velocidad de la transformación está controlada por difusión.

A continuación se muestra la formación de precipitados monofásicos de equilibrio:

- Aliotromorfos de límites de grano: Los precipitados se forman como bloques en los límites de grano.
- Idiomorfos: Los precipitados se forman como bloques equiaxiales tanto en el límite de grano como en el interior del mismo.
- Placas laterales (Widmanstätten): Los precipitados se forman como delgadas placas con punta acicular que crecen a partir del límite o desde un aliotomorfo.

En la siguiente figura se observa un esquema de los distintos tipos de precipitados mencionados anteriormente:

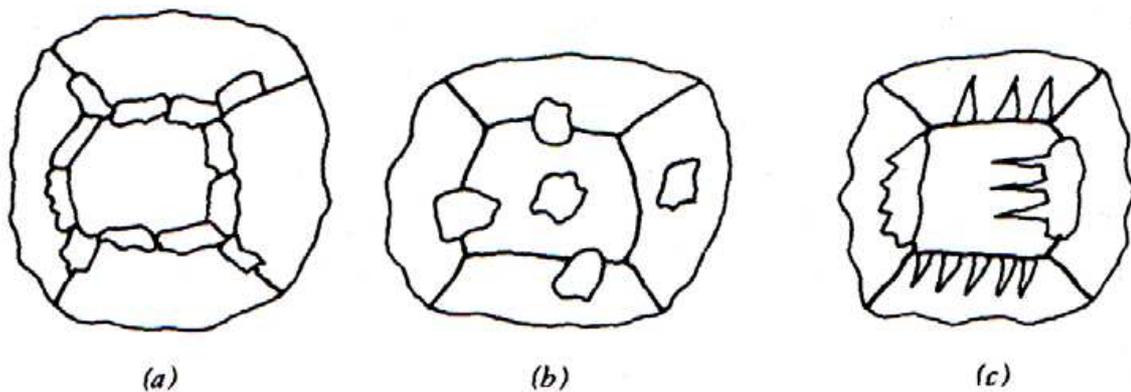


Figura 3.17.- Esquema de las diferentes formas de los precipitados: a- alotriomorfos de límite de grano, b- idiomorfos y c-placas laterales

#### Widmanstätten

Las cinéticas de las transformaciones se pueden diferenciar dos tipos esenciales. Por un lado se tiene transformaciones que se producen isotérmicamente a una temperatura dada, dando como resultado las curvas Transformación – Temperatura – Tiempo (TTT). A su vez, otra forma de producir las transformaciones es mediante enfriamiento continuo, mediante diagramas de enfriamiento continuo (CCT). Esta última es la más representativa de las condiciones reales de la soldadura.

#### 3.3.10. DESCOMPOSICIÓN DE LA AUSTENITA

Después de la solidificación, el acero muestra una estructura celular-dendrítica consistente en granos columnares y anchos de austenita y una fina red celular dentro de los granos. Ya que los bordes de célula tienen pequeño ángulo consistente en un arreglo de dislocaciones, no es probable que sean centros de nucleación muy potentes para la ferrita, sin embargo los productos de transformación que se formen como resultado de la descomposición de la austenita dependerán de la velocidad de enfriamiento del metal de soldadura. La microestructura obtenida al enfriar el metal de soldadura desde el líquido hasta la temperatura ambiente se denomina estructura primaria o “como soldada”. Esta consiste de ferrita alotriomórfica  $\alpha$ , ferrita con placas laterales o Widmanstätten  $\alpha_w$ , ferrita acicular  $\alpha_a$  y las llamadas microfases, que pueden incluir pequeñas cantidades de martensita, austenita retenida o

perlita. La bainita también se puede encontrar en ciertos depósitos de soldadura.

En el enfriamiento la ferrita nucleará inicialmente en las esquinas y bordes de grano austeníticos, ya que estos sitios generalmente proveen la menor barrera energética para la nucleación. La ferrita crecerá dentro de la austenita detrás de un frente planar incoherente llevando a la formación de alotriomorfos en los bordes de grano.

Si se aumenta el sobre enfriamiento la distribución del carbono se vuelve insuficiente para mantener el frente plano de crecimiento, por lo que un crecimiento adicional de la ferrita sólo puede tener lugar por movimiento lateral de las inestabilidades a lo largo de una interfase de baja energía, que es una característica de la estructura de la ferrita Widmanstätten. Las placas laterales de ferrita una vez nucleadas crecen rápidamente bajo las condiciones reinantes como resultado de una eficiente redistribución del carbono hacia los costados de la interfase que avanza.

Simultáneamente o inmediatamente después de la formación de las placas laterales de ferrita en los bordes de grano austeníticos, la ferrita acicular puede comenzar a nuclear intragranularmente sobre las inclusiones. Además de este tipo de nucleación de la ferrita acicular, ésta también puede desarrollarse desde la ferrita Widmanstätten preexistente, en un proceso de nucleación referido como nucleación simpatética. Como las placas de ferrita acicular pueden normalmente crecer hasta chocar con otras placas, el tamaño final de las placas estará fuertemente influenciado por el espaciado promedio entre las inclusiones.

Debido a la formación de ferrita durante el enfriamiento, la austenita remanente es continuamente enriquecida en carbono. Dependiendo de la velocidad de enfriamiento y de la composición química del metal de soldadura la austenita enriquecida en carbono puede transformar en una gran variedad de constituyentes tales como bainita superior e inferior, martensita o perlita.

La descripción anterior es incompleta para soldadura multipasadas, en las cuales parte de la estructura primaria original es recalentada hasta temperaturas lo suficientemente altas como para producir la transformación

inversa hacia austenita, que durante el enfriamiento posterior retransformará dentro de una variedad de productos. La microestructura de la zona recalentada se denomina microestructura secundaria o recristalizada.

#### 3.3.10.1. FERRITA ALIOTROMÓRFICA

Esta ferrita es la primera fase en formarse al nucleando heterogéneamente en los bordes de los granos columnares austeníticos. En el metal de soldadura de aceros de baja aleación los bordes mencionados rápidamente se decoran con capas virtualmente continuas de ferrita, por lo que la transformación subsecuente simplemente implica el engrosamiento difusional de esas capas.

El espesor de la capa de ferrita es insensible al tamaño de grano austenítico inicial, al menos para aceros de baja aleación. Un resultado como este solo puede ser explicado si se asume que la nucleación no tiene una gran influencia en la cinética de la transformación.

Además, la velocidad de crecimiento disminuye a medida que la ferrita crece. Esta relación se origina en el hecho de que la cantidad total de soluto particionado durante el crecimiento aumenta con el tiempo. Consecuentemente, la distancia de difusión aumenta con el tiempo por lo que se reduce la velocidad de crecimiento.

Los efectos de anclado como el retardo del crecimiento debido a la superposición de campos de concentraciones de partículas creciendo desde distintas posiciones tienen una fuerte influencia en la cinética de crecimiento, sobre todo cuando el tamaño de grano austenítico disminuye o la fracción en volumen de ferrita aumenta.

#### 3.3.10.2. FERRITA WIDMANSTATTEN

La forma de la placa puede ser aproximada con una delgada cuña de longitud en la dirección de mayor crecimiento, mientras que el crecimiento en las otras dimensiones rápidamente se ve limitado por los campos de difusión de las placas cercanas en el arreglo. La fracción en volumen de ferrita Widmanstatten sería proporcional a la longitud de la placa.

Las velocidades de crecimiento calculadas para soldadura han sido extremadamente altas por lo que la formación de la ferrita Widmanstätten se completa dentro de una fracción de segundo. Por esto, para todas las aplicaciones prácticas se considera a esta transformación como atérmica. En la gráfica 3.3 se puede ver como varía la velocidad de crecimiento de la ferrita Widmanstätten con el contenido de carbono, para una aleación Fe-1%Mn-C.

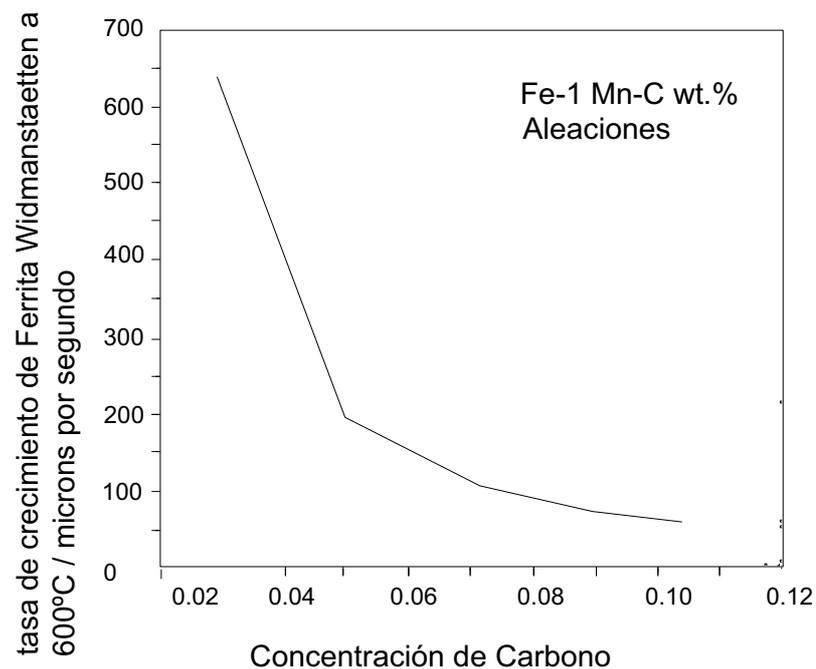


Figura 3.18.- Variación de la velocidad de crecimiento de la ferrita Widmanstätten con el contenido de carbono

La transformación de la austenita Widmanstätten se considera que comienza cuando cesa la ferrita alotriomórfica, la cual no depende únicamente del tamaño de grano austenítico sino también del espesor de la capa de ferrita alotriomórfica formada anteriormente.

El efecto de anclaje con las placas de ferrita acicular nucleadas intragranularmente debe tenerse en cuenta ya que impedirá el ulterior crecimiento de las placas de ferrita Widmanstätten.

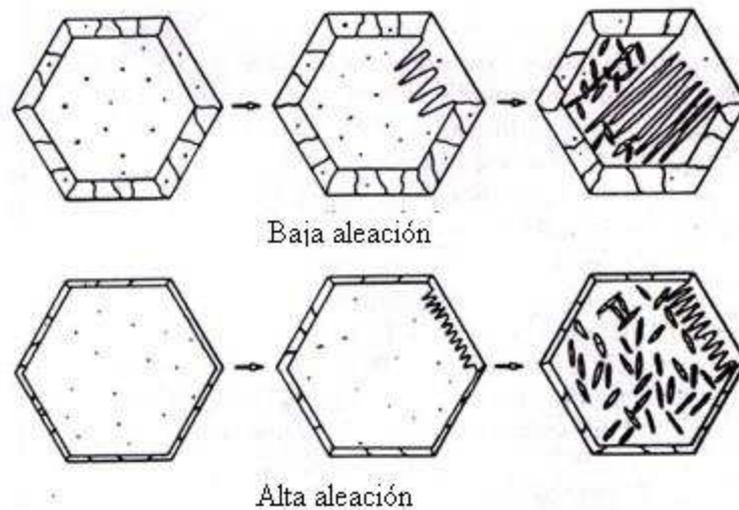


Figura 3.19.- Esquema que ilustra el desarrollo de la ferrita Widmanstatten a través del grano austenítico para bajo y alto contenido de aleación

Los hexágonos representan la sección transversal de los granos columnares de austenita cuyos bordes se encuentran decorados con capas policristalinas de ferrita alotriomórfica, seguidos por la formación de ferrita Widmanstatten. Dependiendo de las velocidades de transformación relativas de la esta ferrita y de la ferrita acicular la ferrita Widmanstatten podrá crecer cruzando enteramente el grano austenítico sin anclarse con las agujas de ferrita acicular.

### 3.3.10.3. FERRITA ACICULAR

La ferrita acicular es la fase más comúnmente encontrada como producto de la descomposición de la austenita en la soldadura de aceros al C-Mn y de baja aleación.

Esta fase es de considerable importancia tecnológica ya que provee una microestructura relativamente tenaz y resistente. Se forma en un intervalo de temperaturas donde las transformaciones reconstructivas se vuelven relativamente lentas, y dan lugar a las transformaciones del tipo cooperativas como la ferrita Widmanstatten, la bainita o la martensita.

El término acicular significa que la tiene la forma de una aguja, sin embargo está generalmente aceptado que la ferrita acicular tiene en tres dimensiones una morfología de delgadas placas lenticulares.

Las inclusiones no metálicas que se encuentran en el seno de la microestructura de los depósitos de soldadura pueden ser óxidos u otros compuestos, y bajo ciertas circunstancias afectan fuertemente el desarrollo microestructural durante el enfriamiento del depósito de soldadura. Las placas de ferrita acicular durante las primeras etapas de la transformación nuclean sobre las inclusiones presentes en el grano columnar grande de austenita, que son típicos de las soldaduras.

Como la transformación se produce a temperaturas relativamente altas la tensión de fluencia de las fases involucradas es relativamente baja, por lo que el cambio de forma puede ser en algún grado acomodado plásticamente. Esta deformación plástica puede ser la causante de que la densidad de dislocaciones de la ferrita acicular y de alguna austenita remanente aumente.

Nunca se ha observado que las placas de ferrita acicular crucen un borde de grano austenítico y la relación de orientación con la austenita desde la que crece es siempre tal que un plano compacto de la austenita sea paralelo o casi paralelo y las correspondientes direcciones compactas difieren unos pocos grados entre ellas.

Cuando una reacción termina antes de alcanzar su fracción de equilibrio, se dice que la reacción es incompleta. Este fenómeno de reacción incompleta puede ser tomado como una consecuencia de que el producto de la transformación es de no-equilibrio. La transformación de la ferrita acicular obedece al fenómeno de reacción incompleta. El grado de reacción tiende a cero a medida que la temperatura de transformación se acerca a la temperatura de comienzo de la transformación bainítica.

El crecimiento de la ferrita acicular es adifusional, con partición de carbono hacia la austenita luego del evento de la transformación. Los datos experimentales disponibles indican que la ferrita acicular es esencialmente idéntica a la bainita.

Su morfología difiere de la de la bainita en que la ferrita acicular nuclea intragranularmente en las inclusiones dentro de grandes granos de austenita, mientras que en los aceros laminados que están relativamente libres de inclusiones no metálicas.

La ferrita acicular normalmente no crece en forma de “sheaves” debido a que el desarrollo de las mismas es detenido por un efecto de anclaje severo (hard impingement) entre placas nucleadas independientemente en sitios adyacentes. Además, la bainita convencional y la ferrita acicular pueden ser obtenidas en condiciones de transformación isotérmicas idénticas en el mismo acero (con el mismo nivel inclusionario). Para el caso de la bainita el tamaño de grano austenítico debe ser pequeño para que domine la nucleación desde las superficies de los granos. Para un tamaño de grano mayor la nucleación intragranular sobre las inclusiones se vuelve dominante por lo que se obtiene ferrita acicular. Estos aspectos mencionados para la nucleación y crecimiento de la bainita y de la ferrita acicular se pueden observar en la figura.

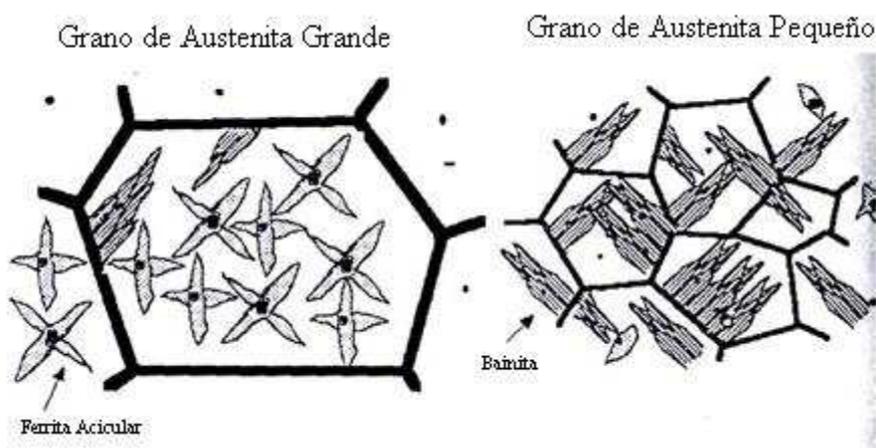


Figura 3.20.- Ilustración esquemática del efecto del tamaño de grano en la descomposición de la austenita.

Esto explica porque no se observa ferrita acicular en los aceros trabajados, debido a que estos están relativamente libres de inclusiones y porque muchos de los tratamientos térmicos comerciales buscan disminuir el tamaño de grano austenítico.

La ferrita acicular es también considerada como un ferrita Widmanstätten nucleada intragranularmente sobre la base de observaciones macroscópicas de la morfología de la interfase en la transformación.

Se ha demostrado utilizando la teoría clásica de la nucleación que las inclusiones son menos efectivas para la nucleación de la ferrita acicular cuando se las compara con las superficies de grano austenítico. La razón principal para que esto suceda es que en las inclusiones, la energía interfacial ferrita/inclusión es grande, mientras que en la nucleación sobre el borde de grano austenítico, la ferrita pueden en principio adoptar una relación de orientación que minimice su energía interfacial.

La dependencia del contenido de ferrita acicular con el tamaño de grano austenítico se vuelve menos pronunciada cuando disminuye la velocidad de enfriamiento, ya que a bajas velocidades de enfriamiento mucha de la austenita se consume en la formación a alta temperatura de la ferrita alotriomórfica.

#### 3.3.10.4. BAINITA

Este producto de la reacción bainítica no constituye una fase, sino una mezcla de ferrita y carburo de hierro. La reacción bainítica implica cambios composicionales y requiere la difusión del carbono en la red de hierro.

Otra propiedad de esta reacción que la diferencia de las reacciones martensíticas es que no es atérmica, sino que evoluciona con el tiempo.

Este constituyente es un producto intermedio entre los constituyentes de equilibrio de los aceros (perlita) y la martensita. Por ser un producto intermedio, presenta características mixtas de ambos tipos de reacciones, es decir, tanto de una reacción de nucleación y crecimiento como de una reacción martensítica.

La bainita, a diferencia de la perlita crece como placas, una característica típicamente martensítica. Sin embargo, aparece una diferencia con la martensita en cuanto a su velocidad de formación, la bainita crece lenta y continuamente, siendo la transformación de las últimas fracciones retardada debido al efecto del tiempo requerido para el proceso de difusión.

El mecanismo de formación de la bainita difiere del de formación de la perlita, si bien ambos son mezclas de ferrita y carburos. En el caso de la bainita, en lugar de precipitar primero los carburos en forma de cementita, y luego transformar la austenita empobrecida en carbono a ferrita, lo que sucede es que por la disminución de la difusión, primero se produce la transformación alotrópica de austenita a ferrita precipitando posteriormente los carburos al encontrarse sobresaturada en carbono la ferrita recién transformada.

#### 3.3.10.5. ROL DE LAS INCLUSIONES NO METÁLICAS

Un depósito de soldadura por arco típicamente contiene inclusiones de un tamaño mayor que 0,05 micrones distribuidas a través de la microestructura, aunque existe una tendencia a que algunas de las partículas de mayor tamaño sean empujadas y consecuentemente atrapadas a lo largo de los bordes de célula de solidificación durante el avance de la interfase sólido-líquido.

Debido a la complejidad de las inclusiones y a la dificultad de conducir experimentos controlados en los depósitos de soldadura, la capacidad de las mismas como agentes nucleantes de la ferrita acicular no está aún claramente comprendida. Una idea popular es que aquellas inclusiones que muestren un mejor ajuste de la red cristalina con la ferrita serán más efectivas en la nucleación de la misma.

Una visión opuesta indica que los granos de ferrita nuclean a veces epitaxialmente con las inclusiones.

#### 3.3.10.6. MARTENSITA

Otra de las fases que puede obtenerse en los depósitos de soldadura es la martensita como resultado de la descomposición de la austenita.

La transformación martensítica es una transformación sin difusión y por lo tanto, no hay cambio de composición química. Es una transformación de volumen del tipo cooperativa que se produce por esfuerzos de cizallamiento. Los átomos se desplazan en conjunto en planos específicos, siendo el

desplazamiento de un átomo respecto de su vecino menor que un espaciado atómico.

Esta transformación se produce a una velocidad altísima, en este sentido, se denomina atérmica debido a que no depende del tiempo como las isotérmicas, sino que el avance de la transformación sólo es función de la temperatura si bien pueden transformarse pequeñas cantidades isotérmicamente.

La austenita al alcanzar una cierta temperatura se transformará a martensita casi instantáneamente. Esta transformación implica una distorsión de la red cristalina, por lo que aumentará la energía libre del sistema y la transformación no proseguirá.

A partir de lo dicho anteriormente se puede definir una temperatura de comienzo de la transformación martensítica que se denomina  $M_s$  y una de finalización llamada  $M_f$ . Los valores de estas temperaturas dependen de varios factores, fundamentalmente de la composición química y la temperatura de austenización.

En general para los aceros de baja aleación y medio carbono, la temperatura  $M_s$  se encuentra a bajas temperaturas, por encima de la temperatura ambiente (200-400°C), mientras que  $M_f$  puede estar por debajo de la temperatura ambiente, por lo que quedaría un porcentaje de austenita sin transformar que se denomina austenita retenida. Los elementos de aleación sustitucionales en los aceros también afectan a la transformación martensítica. A su vez, se encontró que un aumento en la densidad de dislocaciones solo aumenta levemente el número de sitios disponibles para la nucleación de la martensita. Esto puede explicarse debido a que el crecimiento de la martensita puede ser impedido si la densidad de dislocaciones es demasiado alta.

### **3.3.11. EFECTOS DE LOS ELEMENTOS ALEANTES**

Los elementos de aleación presentes en el metal de soldadura se han introducido tanto deliberadamente a través del material de aporte y del

fundente como por dilución desde el metal base. Adiciones de elementos que aumentan la templabilidad del material pueden tener dos propósitos:

- (a) asegurar el nivel de resistencia requerido por endurecimiento por solución sólida o por precipitación, y
- (b) controlar la microestructura a través de la modificación de las velocidades de nucleación y crecimiento de la ferrita proeutectoide.

Sin embargo, la determinación de la influencia de cada elemento individual sobre la microestructura y la tenacidad resultantes es a menudo difícil de estimar debido al número de factores involucrados.

De la gran variedad de elementos utilizados como aleantes de los aceros, se pueden diferenciar dos grandes grupos, por un lado los elementos estabilizadores de la fase Austenita o gamágenos tales como C, N, Mn, Ni, Cu y Zn mencionados en orden de efectividad decreciente.

Por otro lado se tiene los elementos estabilizadores de la fase ferrita o alfégenos tales como Zr, Ti, P, V, Nb, W, Mo, Al, Si, y Cr. A su vez, se puede agregar un concepto adicional que corresponde a los elementos formadores de carburos dado que este aspecto será de importancia en el desarrollo microestructural del metal de soldadura, donde los más significativos son el Mo y el Cr por su amplia utilización en los aceros, siendo otros el Nb, V, W, etc.

De los elementos mencionados se tiene que el C, N, Mn, Si, y Mo suelen encontrarse típicamente en los aceros soldados.

Como resultado del potente efecto del C sobre la templabilidad de los aceros, el contenido de carbono de los depósitos de soldadura se mantiene usualmente bajo y dentro de un rango ajustado (típicamente 0,05-0,10%) en consideración a una alta resistencia contra la fisuración en frío asistida por hidrógeno con una iniciación de fractura frágil en la región soldada.

Después del C, el manganeso es probablemente el más importante de los elementos de aleación comúnmente utilizados para aumentar la resistencia y la templabilidad de un acero. Ya que el Mn disminuye la temperatura de

transformación de austenita a ferrita, adiciones balanceadas de Mn son normalmente utilizadas para aumentar la tenacidad.

Para el caso de soldadura por el proceso SMAW multipasadas de aceros al C-Mn, las mejores propiedades al impacto se obtuvieron para un contenido de Mn de alrededor de 1,4%, asociado a una combinación de una microestructura más favorable y un mayor límite de fluencia con el aumento del contenido de Mn. Este contenido de Mn está relacionado a una estructura de ferrita acicular, mientras que para 0,8%Mn el constituyente predominante es ferrita Widmanstätten, y para 2,2%Mn la estructura está compuesta por bainita.

En contraste con el Mn, el Si es considerado negativo para la tenacidad aún en bajas concentraciones como resultado de la formación de microfases de martensita y/o austenita en combinación con un aumento general del nivel de resistencia de la soldadura. En soldaduras realizadas con SMAW se observó que el Si es menos potente en la formación de ferrita acicular que el Mn, sin embargo se reportó algún refinamiento de la estructura en soldaduras realizadas en SAW y se observó que un aumento de 0,23 a 0,57% de Si disminuyó el intervalo de las temperaturas de transformación, aumentando la dureza y la fracción de austenita retenida.

Un aumento en la tenacidad puede obtenerse con el agregado de Ni, Cu, Mo y Cr. El Ni y el Cu tienen efectos sobre las transformaciones del acero similar al Mn (estabilizadores de la austenita), mientras que el Cr y el Mo suprimen cinéticamente la transformación de la austenita, y por lo tanto sólo disminuyen levemente la temperatura de transformación.

La adición de Ni refina la ferrita acicular y esto se logra debido a que disminuye la temperatura de transformación. A un nivel de Mn de 1%, con un contenido de 1,5% de Ni para soldadura MIG y 3,5% para soldadura SMAW se forma ferrita con segundas fases alineadas. Ha sido mostrado que el Mo promueve la formación de ferrita acicular a expensas de la ferrita proeutectoide.

### 3.4. ZONA AFECTADA POR EL CALOR

La zona afectada por el calor es una formación que se da por procesos de soldadura de metales en donde las temperaturas pico son demasiado bajas para derretir el material, pero también lo suficientemente altas para producir cambios significativos en la microestructura y por lo tanto en las propiedades del material.

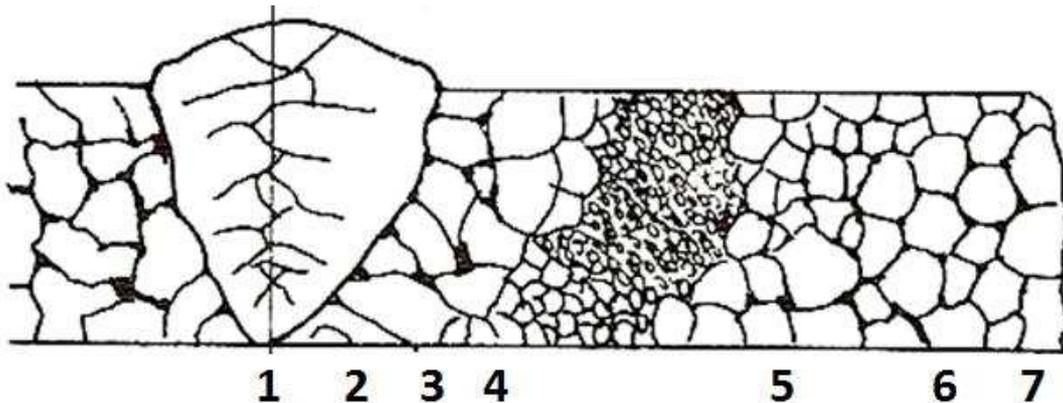


Figura 3.21.- Zonas dentro de la ZAC: 1) Metal depositado; 2) Fusión Incompleta; 3) Campo de sobrecalentamiento; 4) Campo de Normalizado; 5) Recristalización incompleta; 6) Zona de Recristalización 7) Zona de fragilidad azul.<sup>22</sup>

#### 3.4.1. INFORMACIÓN REQUERIDA

Cuando un metal es trabajado en frío y plásticamente deformado, por ejemplo rolado o extruido, numerosas dislocaciones son generadas. Estas dislocaciones pueden interactuar entre sí y formar conjuntos de dislocaciones (enredadas). Estas dislocaciones dificultan el movimiento de nuevas dislocaciones y por lo tanto mayor deformación plástica. De esta manera un metal es endurecido por ser trabajado en frío.<sup>32</sup>

##### 3.4.1.1. RECRISTALIZACIÓN

La mayor parte de la energía gastada en endurecimiento aparece en forma de calor, pero una pequeña parte es almacenada en el material como energía de esfuerzos internos. Cuando un material previamente deformado es recocido, los granos deformados en el material tienden a recristalizar formando nuevos

granos libres de esfuerzos residuales y por lo tanto suaves. La energía residual almacenada se usa en la Recristalización de un material endurecido por trabajo en frío, y esta energía es liberada formando granos libres de esfuerzos residuales. Los bordes de granos que han sido formados durante severos endurecimientos sirven como sitios de nucleación para nuevos granos.

El alcance de la recristalización aumenta con el aumento de temperatura de recocido y el tiempo. Por lo tanto, puede ser esperado que la dureza de un material deformado disminuya con el aumento de la temperatura y tiempo de recocido.

Para la mayoría de los metales, la temperatura de recristalización está alrededor del 40-50% de su punto de fusión en grados Kelvin. Se debe indicar que la temperatura de recristalización de un metal puede ser afectado por el grado de deformación y el nivel de pureza. De hecho, antes que la recristalización suceda, hay un periodo de tiempo durante el cual ciertas propiedades del material deformado, por ejemplo la resistividad eléctrica, tienden a recuperarse sin causar ningún cambio micro estructural. Este fenómeno es conocido como recuperación. Sin embargo, porque las propiedades mecánicas de los materiales, como resistencia y dureza, no cambian significativamente durante la recuperación, la recuperación no es importante en la soldadura.

#### 3.4.1.2. CRECIMIENTO DE GRANO

Sobre la finalización de recristalización, los granos comienzan a crecer. La energía necesaria para el crecimiento de grano es la energía superficial. Los límites de área total de grano y entonces la energía total superficial del sistema puede ser reducido si más pequeños e irregulares granos son presentados.

Esto puede ser ilustrado por el crecimiento del conjunto de celdas que se muestran a continuación.

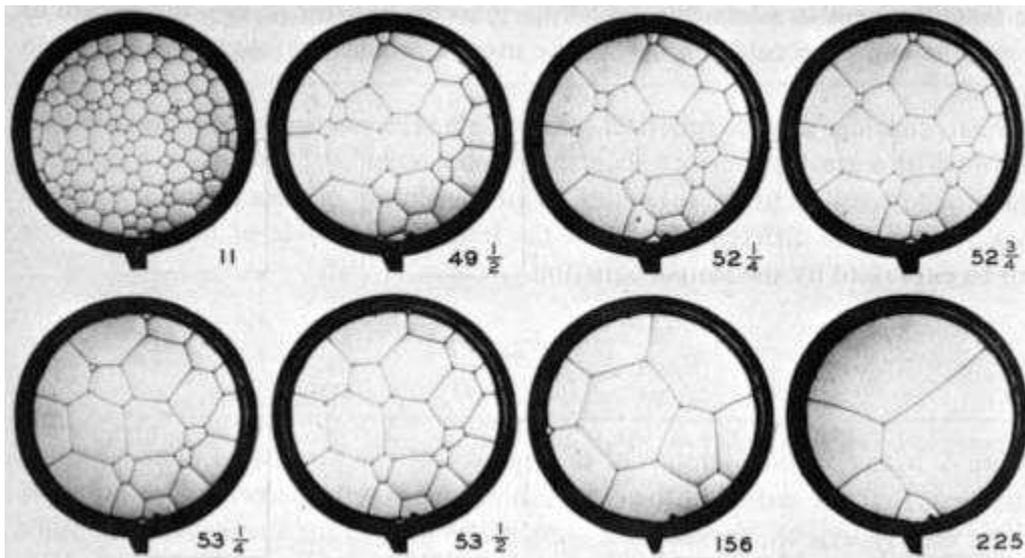


Figura 3.22.- Crecimiento de celdas en un contenedor plano. Los números indican el tiempo de crecimiento en minutos.

Debe ser indicado que debido a que la energía para el crecimiento de grano es la energía superficial y no la energía residual almacenada, el crecimiento de grano no está limitado a materiales deformados en frío.

Así como la recristalización, el alcance de crecimiento de grano también aumenta con temperatura y tiempo de recocido.

No vale nada que las partículas de carburo y el nitruro puedan inhibir el crecimiento de grano en aceros a través de dificultar el movimiento de los bordes de grano. Estas partículas, si no son disueltas durante la soldadura, tienden a inhibir el crecimiento de grano en la zona afectada por el calor.

Cuando miembros estructurales son unidos por soldadura de fusión el material de las placas tienen que ser calentadas hasta su punto de fusión luego enfriado rápidamente bajo condiciones restrictivas impuestas por la geometría de la junta. Como resultado de este severo ciclo térmico, la microestructura original y las propiedades del metal en una región cercana a la soldadura cambian. El volumen de metal, o zona, es usualmente conocido como zona afectada por el calor (ZAC).

La ZAC puede ser convenientemente dividida en un número de sub zonas (dependiendo del material a ser soldado). Estas zonas son mostradas en la figura 3.21.

Cada sub zona se refiere a un diferente tipo de microestructura, y tal vez más importante, cada tipo estructural posee diferentes propiedades mecánicas. El tipo de estructura y el ancho de su sub zona están determinados por un ciclo térmico, por ejemplo, el ciclo completo de calentamiento y enfriamiento debido al movimiento del arco y las propiedades térmicas del material base. Sin embargo, los cambios en la ZAC son también dependientes desde la anterioridad térmica y mecánica del material. Por ejemplo, el comportamiento de la recristalización durante el ciclo de calentamiento está afectado por la condición inicial del material si es rollado en frío o recocido. El comienzo y la extensión de la zona de crecimiento de grano está influenciado por la presencia de precipitaciones y su solubilidad a altas temperaturas. Entonces, para obtener un entendimiento razonable de la ZAC es necesario considerar como la microestructura del material base reacciona a un ciclo térmico completo, por ejemplo, el ciclo de calentamiento, el tiempo que se mantiene la temperatura (intervalo de tiempo, incluyendo el efecto de la zona fundida en la línea de fusión) y finalmente, el ciclo de enfriamiento y su efecto en, por ejemplo, en las transformaciones de fase y reacciones de precipitación.

#### 3.4.1.3. INFLUENCIA DEL CARBONO EN LAS PROPIEDADES Y MICROESTRUCTURA

El efecto del contenido de carbono en la distribución de fase y resistencia en los depósitos de soldadura se ilustra en la figura 3.23.

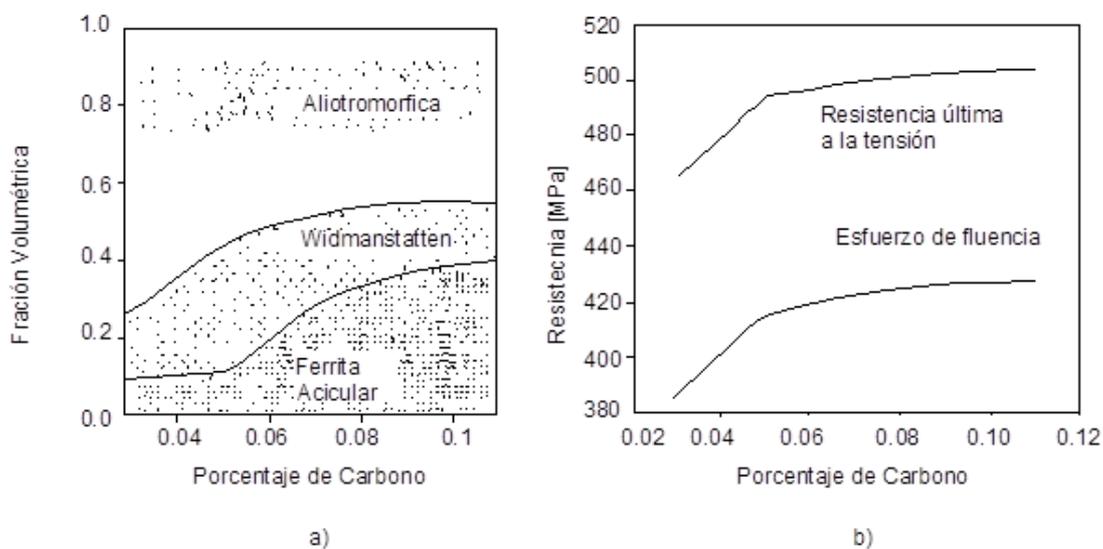


Figura 3.23.- Influencia del contenido de Carbono en a) Microestructuras b) Propiedades

Notar que la microestructura y cambio de propiedades ocurren más rápidamente a concentraciones bajas de carbono. Las altas durezas y la presencia de martensita son influenciadas el tipo de defecto más serio en soldadura. La fisura en frío o la fisura por hidrógeno, un Ceqivalente igual a 0,4 es el valor máximo permisible para que estos defectos sean impedidos. La siguiente figura muestra una relación entre el esfuerzo de cedencia del material y el % de carbono equivalente.

Entonces, el valor de 0,4 establece un límite de una buena soldabilidad sin la necesidad de precalentamiento. Una buena soldabilidad no es necesariamente función de la resistencia del acero, sino es más una indicación de cómo los aleantes afectan la dureza del metal durante el ciclo de enfriamiento de la soldadura.<sup>23</sup>

#### 3.4.1.4. LO QUE OCURRE EN LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR

Durante la soldadura, la temperatura de la piletta fundida alcanza 3000 °F (1650 °C) o más. A una pequeña distancia de la soldadura, la temperatura de la placa puede ser sobre los 600 °F (316 °C). Cuando el acero alcanza o excede cierta temperatura entre estos valores, ocurren cambios que afectan

la estructura del grano, su dureza y sus propiedades mecánicas. Estos cambios pueden representarse como sigue:

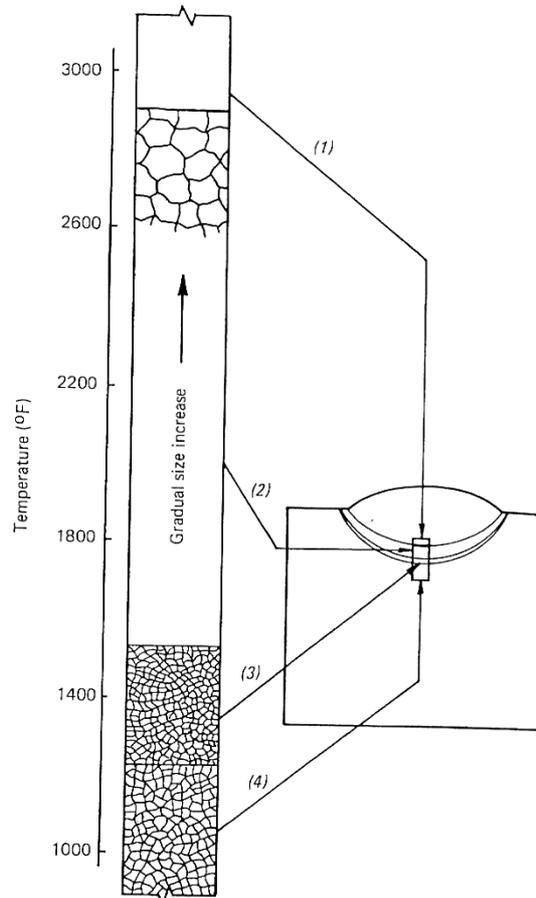


Figura 3.24.- Efecto del calor de la soldadura en dureza y microestructura de una placa de acero con 0,25% C<sup>24</sup>

El grado de cambio en la estructura depende de la máxima temperatura a la cual el metal es sometido, el tiempo que la temperatura ha sido aplicada, la composición del metal, y la velocidad de enfriamiento. El factor principal que controla estos cambios es la cantidad de calor que es aplicada en el material, tanto el precalentamiento como el proceso de soldadura.

La velocidad de enfriamiento afecta las propiedades así como el tamaño de grano. Enfriamientos rápidos producen aceros más resistentes y duros pero con menor ductilidad; velocidades pequeñas de enfriamiento producen lo contrario.

Cuando se sueldan juntas con más de un pase, cada cordón produce una acción de refinamiento de grano en el cordón que precede al ser este

recalentado. Sin embargo, este refinamiento no tiende a ser uniforme a lo largo de toda la junta. <sup>24</sup>

La solidificación del metal fundido en la soldadura está ilustrada en la figura 3.25. Al avanzar la formación del cordón, la temperatura del material depositado disminuye, debido a la conducción de calor hacia el material base y por radiación a la atmósfera del ambiente, y el metal se solidifica.

Adyacente a la soldadura se encuentra una zona de fusión incompleta (1) en la que el metal se calienta hasta una temperatura elevada y se forman granos gruesos. Al alejarse de la soldadura (2), disminuyen la temperatura y la magnitud del sobrecalentamiento, y por tanto también el tamaño del grano. En el campo de normalización (3) el grano es fino, ya que el tiempo de calentamiento no es lo suficientemente largo para que se produzca crecimiento entre los granos austeníticos, y el enfriamiento subsecuente expulsa los granos finos de perlita y ferrita. El campo de normalización va seguido por una zona de recristalización incompleta (4), en la que los granos de perlita se descomponen en granos aún más finos. En la zona de recristalización (5) se caracteriza por la recuperación de los granos deformados por rolado. Las alteraciones estructurales que ocurren en el área afectada por el calor varían generalmente con el contenido de carbono y de elementos de aleación en un acero.

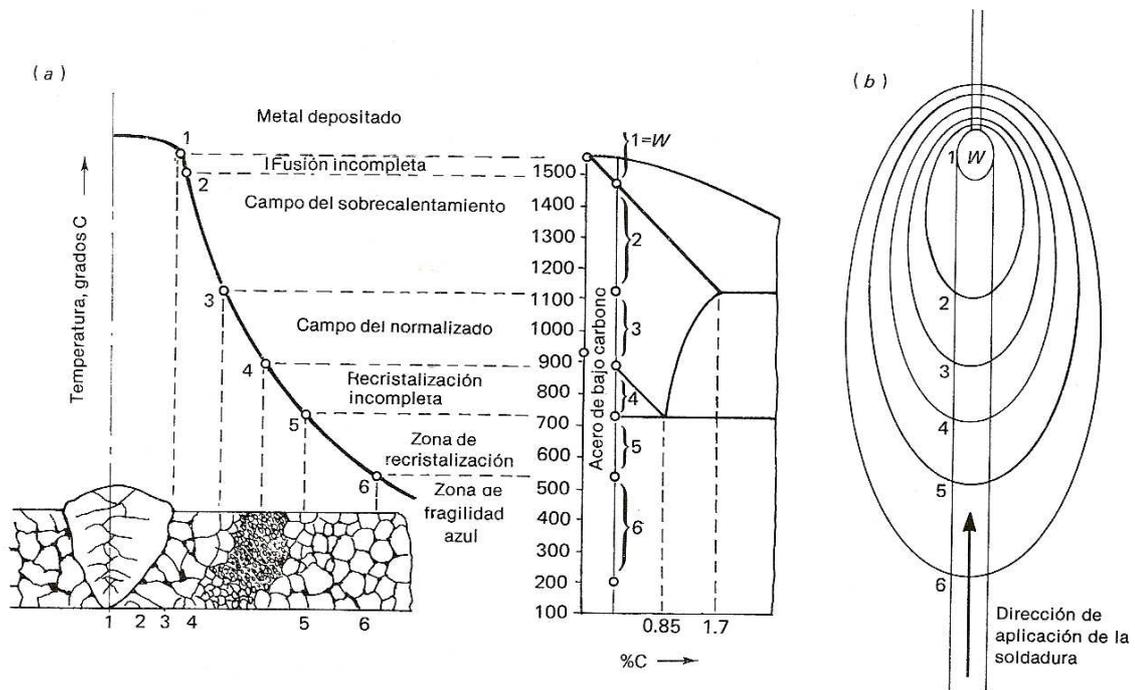


Figura 3.25.- Solidificación progresiva del metal fundido en un pocillo de soldadura. a) Curva de enfriamiento, con expresión de las diferentes estructuras, b) vista superior del pocillo de soldadura (W) y líneas isotermas en torno al pocillo. [5]

Como la temperatura de la zona cercana a la soldadura varía de un lugar a otro, el metal de la zona afectada por el calor también varía en cuanto a su estructura y propiedades mecánicas. En el área de normalización, el metal de la soldadura puede ser superior al metal base. En el área sobrecalentada en la que el grano es grueso, el metal pierde algo de su ductilidad, y especialmente su resistencia al impacto. La zona afectada por el calor muestra también cambios de dureza, especialmente en el caso de los aceros sensibles al tratamiento térmico. Un incremento en la dureza va acompañado generalmente por un aumento en la fragilidad y una reducción en la ductilidad. Debe señalarse que al soldar aceros simples con bajo contenido de carbono, los cambios estructurales que ocurren en la zona cercana a la soldadura no afectan apreciablemente la resistencia de las piezas soldadas.

## **CAPÍTULO 4**

### **PRUEBAS**

Las pruebas que se realizaron en este proyecto incluyen numerosas fases de prueba para luego establecer comparaciones y finalmente entregar resultados a través de interpretaciones.

Debido a que se quiere establecer comparaciones variando algunos aspectos de la soldadura se debe considerar procedimientos unificados cuyas características incluyen:

- Para la realización de las probetas se utilizaron procedimientos precalificados.
- Para unificar el estudio en general de todas las probetas, el cordón de raíz se hizo con el proceso SMAW y los pases siguientes fueron realizados variando los diferentes aspectos a estudiar, por ejemplo: diferentes procesos, diferentes niveles de corriente, diferentes velocidades de soldadura entre otros que serán detallados profundamente más adelante en esta sección.
- Para evitar afectaciones de calor por métodos de obtención de probetas se utilizaron máquinas de corte con enfriamiento.
- Las placas de acero fueron trabajadas de acuerdo a su estado de obtención. Los análisis de los estados iniciales de las placas a ser estudiadas también son contemplados en este capítulo.
- Los cortes secundarios fueron hechos con oxicorte y para evitar afectación térmica se adicionaron 25 milímetros a las medidas de las probetas a ser ensayadas. Los biseles fueron realizados mediante amoladora.

Las pruebas se van a organizar de acuerdo a grupos establecidos según las siguientes características:

- Se varían los procesos de soldadura SMAW, GMAW y SAW en combinaciones de los cuatro aceros estudiados en este proyecto. Los aceros son A36, A588, A131 y AISI 1045. Para estas pruebas se mantiene un espesor constante de 12 milímetros.

- Se varía el espesor en el material A36 que incluye 6, 8, 10 y 12 milímetros con el proceso SMAW.
- Se varía la intensidad de corriente en rango bajo, medio y alto así como se realizan pruebas en corriente alterna (AC) como en corriente continua (DC). Para esta prueba se mantiene el espesor de 12 mm constante así como el proceso de soldadura SMAW en el acero A36.
- Se varía la velocidad de avance en el proceso SMAW en placas de 6 mm de A36 en velocidad lenta, normal y rápida. Se realizaron en espesor de 6 milímetros para poder establecer la diferencia entre cordones que solo tengan 1 pase (adicional al que se dio a todas las probetas).
- Se estudia las afectaciones al soldar cordón por cordón en placas de 12 mm de A36 con corriente alterna según procedimiento precalificado para SMAW. Adicionalmente, se estudia la afectación al soldar de manera seguida y también dejando enfriar el material por cada pase de soldadura.
- Se estudia la afectación del material cuando este ha sido sometido a un precalentamiento en placas de A36 de 12mm de espesor bajo el proceso de soldadura SMAW.
- Se estudia la afectación del material al ser soldado con el proceso SMAW y sometido a un tratamiento térmico post – soldadura. El tratamiento térmico realizado fue un alivio de esfuerzos según dicta la norma del código de soldadura estructural.

## 4.1. MICROESTRUCTURA, COMPOSICIÓN Y CONDICIÓN INICIAL DEL MATERIAL BASE

### 4.1.1. ACERO ASTM A 36

En la figura 4.1 y 4.2 se observa que se trata de un acero ferrítico- perlítico de bajo contenido de carbono con inclusiones de tipo silicato. Presenta deformación plástica por proceso de conformado trabajado en frío y terminado en caliente, los granos equiaxiales de ferrita se encuentran homogéneamente distribuidos mientras que la perlita se muestra alineada en dirección del conformado. La composición y características generales de este material se muestran en la tabla 4.1 basadas en la norma ASTM.

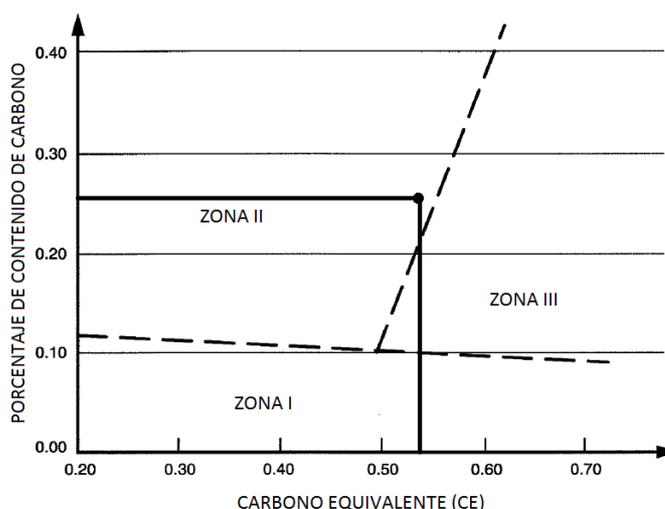
Tabla 4.1.- Composición y características generales del acero ASTM A36.<sup>25</sup>

ACERO	Resumen	% Carbono	% elem. aleante
A36	Esta especificación cubre aceros al carbono en perfiles, placas y barras de calidad estructural para uso en construcciones remachadas, apernadas o soldadas, de puentes y edificios y para uso estructural en general.	0,26	Mn 0,65 – 1,20 P max 0,04 S max 0,05 Si 0,4 Cu 0,02

El carbono equivalente de este material es:

$$CE = C + \frac{Mn + Si}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

$$CE = 0.52$$



Usando el gráfico de Carbono Equivalente de la AWS D1.1 se obtiene que este acero se encuentra dentro de la zona 2 lo que determina que se debe usar el método de control de hidrógeno para evitar fisuras. (Ver precalentamiento en 4.5.4.2 )

Gráfico 4.1.- Carbono equivalente ASTM A-36

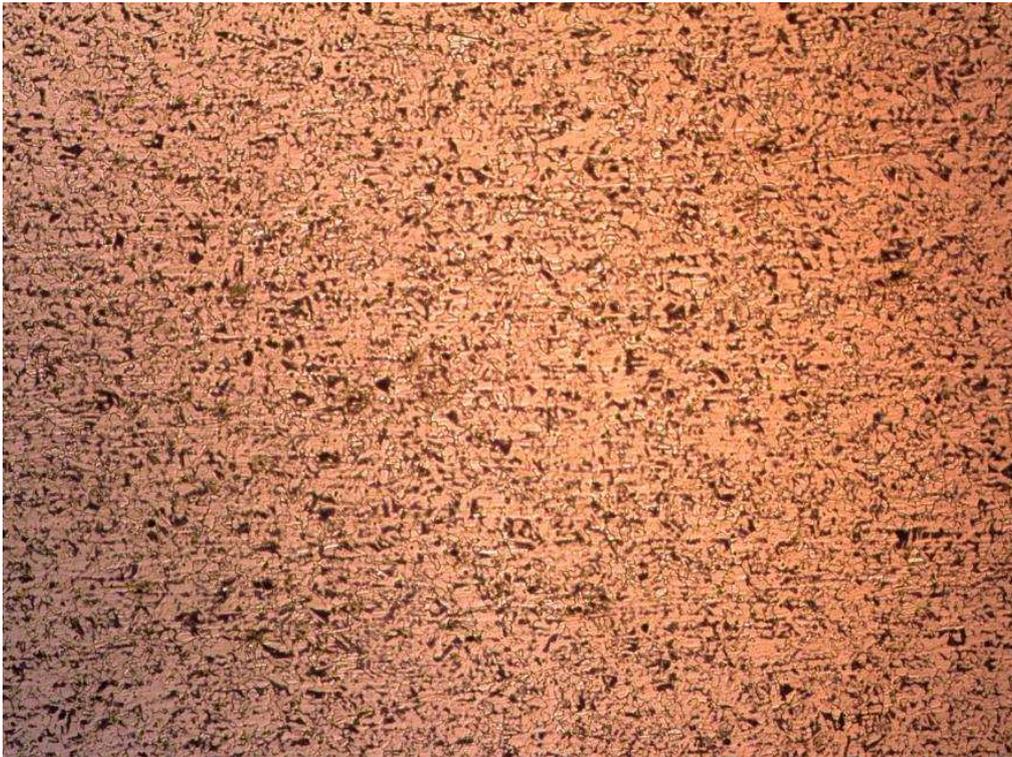


Figura 4.1.- Microestructura del material ASTM A 36 tomada a 100X.

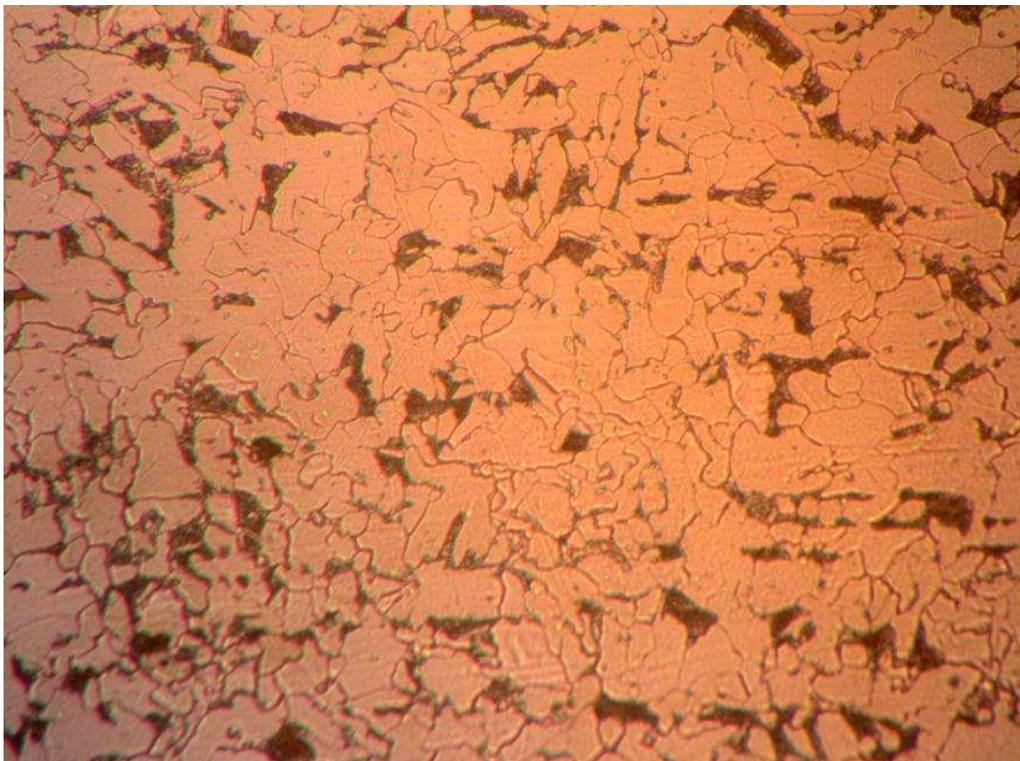


Figura 4.2.- Microestructura del material ASTM A 36 tomada a 500X

#### 4.1.2. ACERO ASTM A 588

En la figura 4.3 y 4.4 se observa un acero ferrítico- perlítico de bajo contenido de carbono con inclusiones de tipo silicato. Se observa menor contenido de carbono que el acero A36. Además, presenta deformación plástica por proceso de conformado trabajado en frío y terminado en caliente, los granos equiaxiales de ferrita se encuentran homogéneamente distribuidos mientras que la perlita se muestra alineada en dirección del conformado. La composición y características generales de este material se muestran en la tabla 4.2 basadas en la norma ASTM.

Tabla 4.2.- Composición y características generales del acero ASTM A588<sup>27</sup>

ACERO	Resumen	% Carbono	% elem. aleante
A588	Esta especificación cubre perfiles, placas y barras de acero al carbono de alta resistencia y baja aleación para construcciones soldadas, remachadas o apernadas, pero creado especialmente para soldadura de puentes y edificios en donde el ahorro en peso o el incremento de durabilidad son importantes. La resistencia a la corrosión atmosférica de este acero en la mayoría de los ambientes es substancialmente mejor que la de aceros estructurales al carbono con o sin adición de cobre. Cuando está expuesto a la atmósfera, este acero es conveniente para aplicaciones en las cuales actúa sin recubrimiento especial.	Max 0,19	Mn 0,8 – 1,35 P Max 0,04 S Max 0,05 Si 0,15 – 0,65 Ni Max 0,5 Cr 0,3 – 0,7 Cu 0,2 – 0,5

El carbono equivalente de este material es:

$$CE = C + \frac{Mn+Si}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15}$$

$$CE = 0.73$$

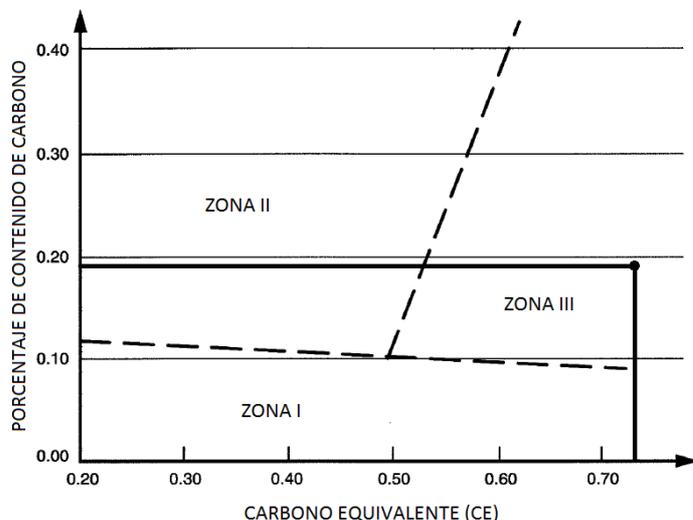


Gráfico 4.2.- Carbono equivalente ASTM A588

Usando el gráfico de Carbono Equivalente de la AWS D1.1 se obtiene que este acero se encuentra dentro de la zona 3 lo que determina que se debe usar el método de control de hidrógeno para evitar fisuras. (Ver precalentamiento en 4.5.4.2 )

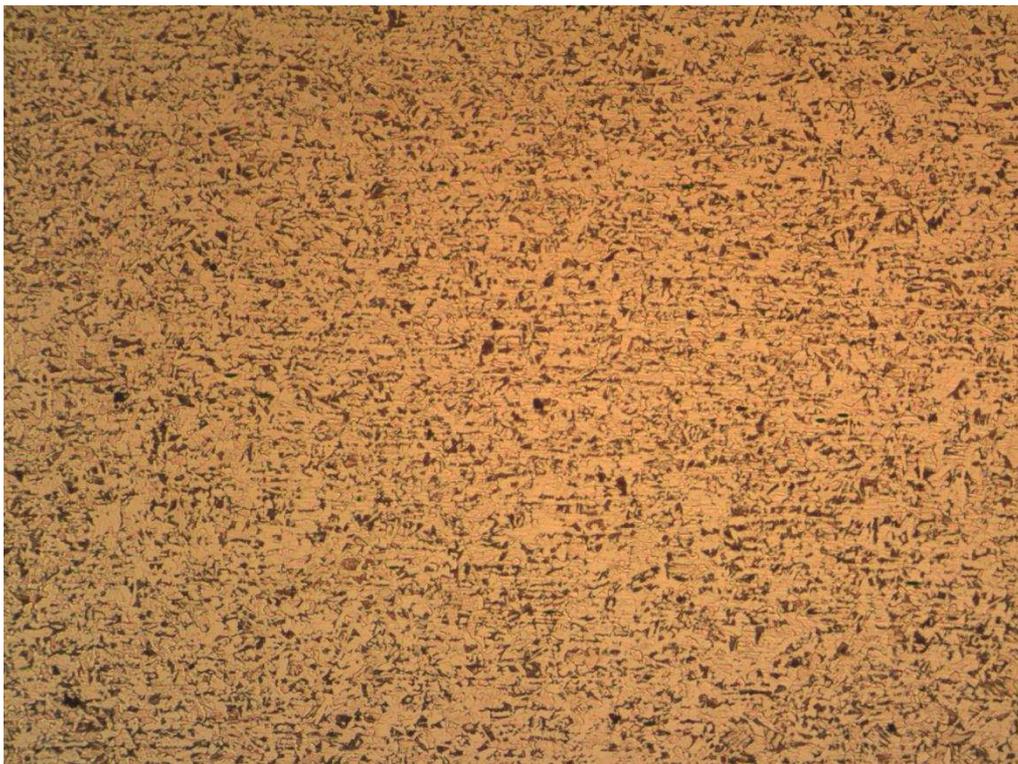


Figura 4.3.- Microestructura del material ASTM A 588 tomada a 100X.

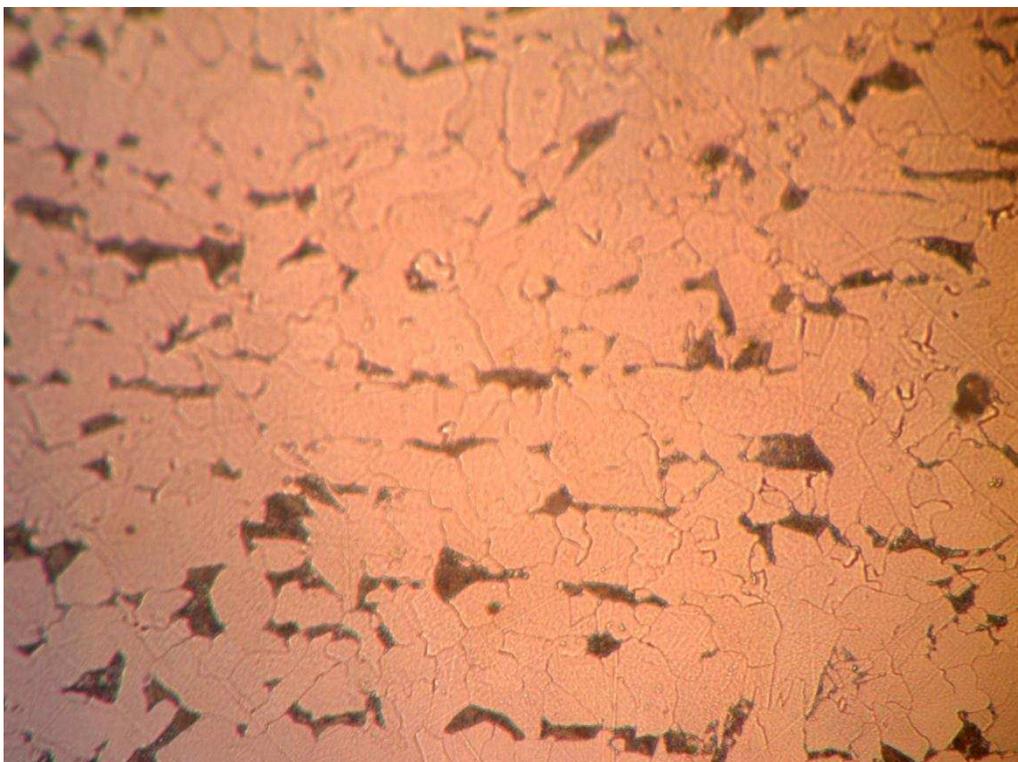


Figura 4.4.- Microestructura del material ASTM A 588 tomada a 500X.

### 4.1.3. ACERO ASTM A 131

En la figura 4.5 y 4.6 se observa un acero ferrítico- perlítico de bajo contenido de carbono con inclusiones de tipo silicato. En este caso el contenido de carbono se asemeja al del acero A588. Adicionalmente, presenta deformación plástica por proceso de conformado trabajado en frío y terminado en caliente, los granos equiaxiales de ferrita se encuentran homogéneamente distribuidos mientras que la perlita se muestra alineada en dirección del conformado. La composición y características generales de este material se muestran en la tabla 4.3 basadas en la norma ASTM.

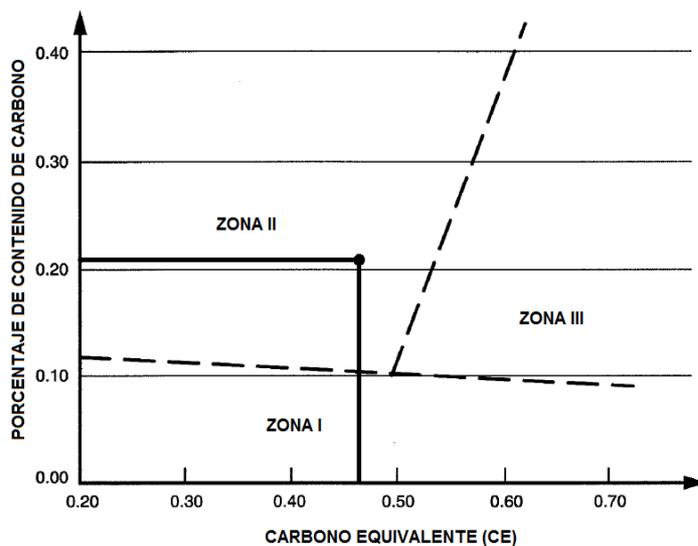
Tabla 4.3.- Composición y características generales del acero ASTM A131 <sup>28</sup>

ACERO	Resumen	% Carbono	% elem. aleante
A131 Gr B	Esta especificación cubre placas, perfiles, barras y remaches de acero estructural primordialmente para usar en construcción de barcos. Hay dos tipos: de resistencia normal (grados A,B,D, CS y E con un punto mínimo de cedencia de 34 Ksi) y de alta resistencia (grados AH, DH, EH y FH con un punto mínimo de cedencia de 46, 51 o 57Ksi )	0,16 - 0,21	Mn 0,6 - 1 P 0,035 S 0,035 Si 0,1 – 0,5 Ni 0,02 Cr 0,02 Cu 0,02

El carbono equivalente de este material es:

$$CE = C + \frac{Mn + Si}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

$$CE = 0.47$$



Usando el gráfico de Carbono Equivalente de la AWS D1.1 se obtiene que este acero se encuentra dentro de la zona 2 lo que determina que se debe usar el método de control de hidrógeno para evitar fisuras. (Ver precalentamiento en 4.5.4.2 )

Gráfico 4.3.- Carbono equivalente ASTM A131

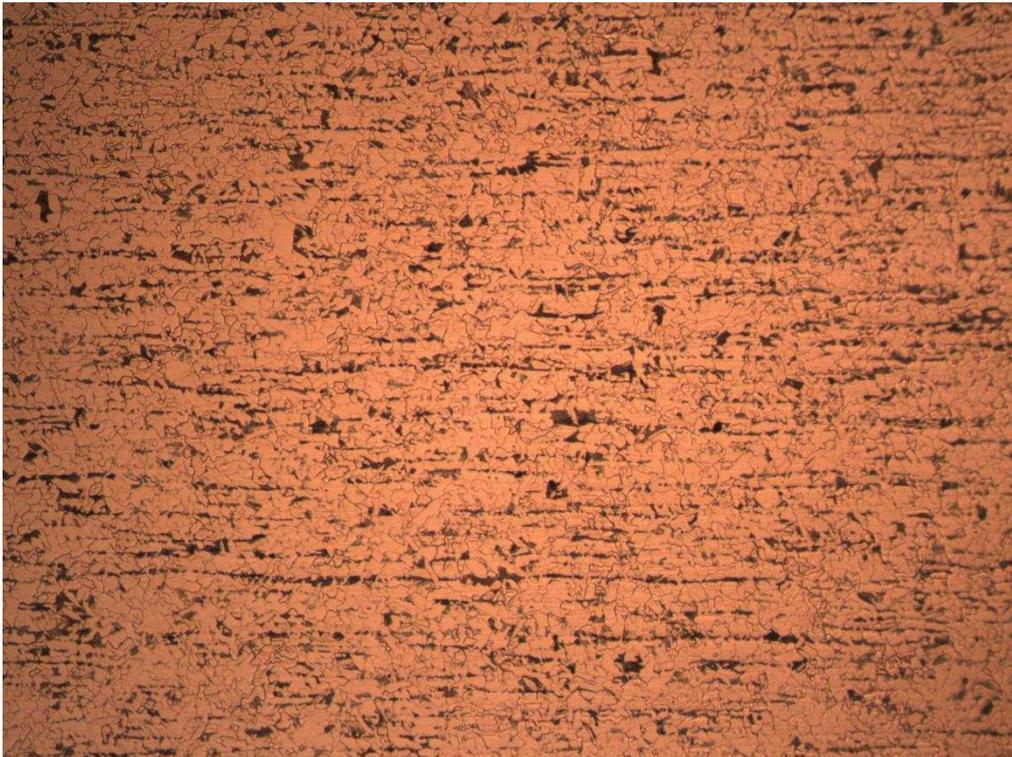


Figura 4.5.- Microestructura del material ASTM A 131 tomada a 100X.

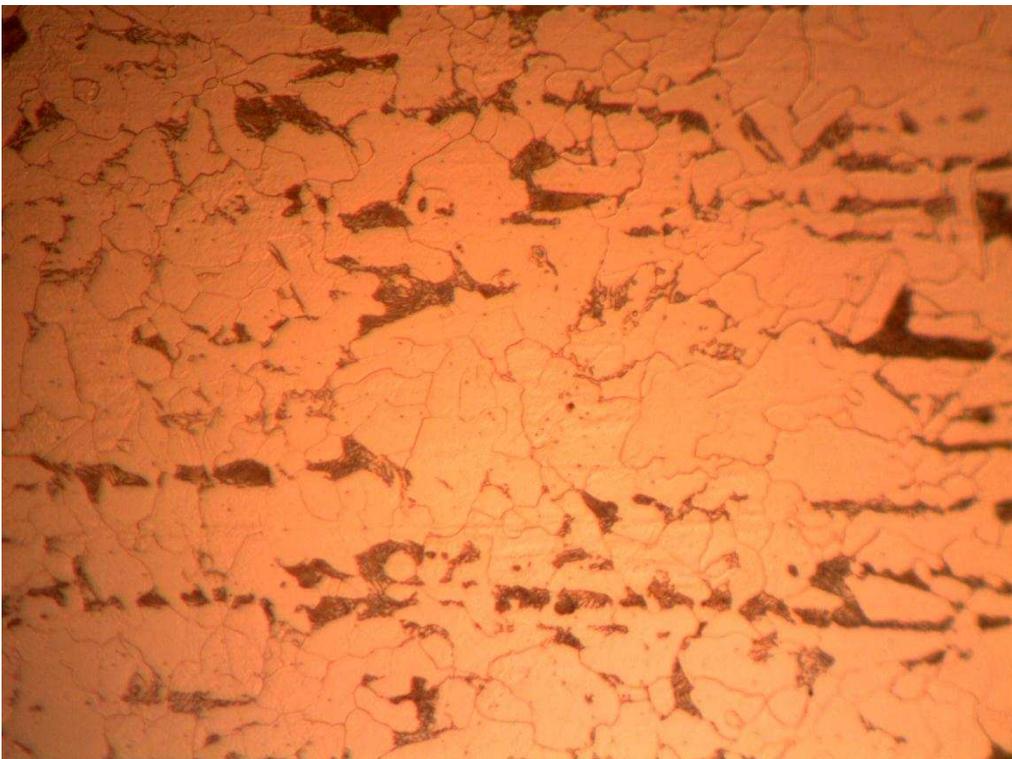


Figura 4.6.- Microestructura del material ASTM A 131 tomada a 500X.

#### 4.1.4. ACERO AISI 1045

La figura 4.7 y 4.8 muestra un acero ferrítico- perlítico de medio contenido de carbono con inclusiones de tipo silicato, terminado en caliente y un tratamiento térmico de recocido posterior.

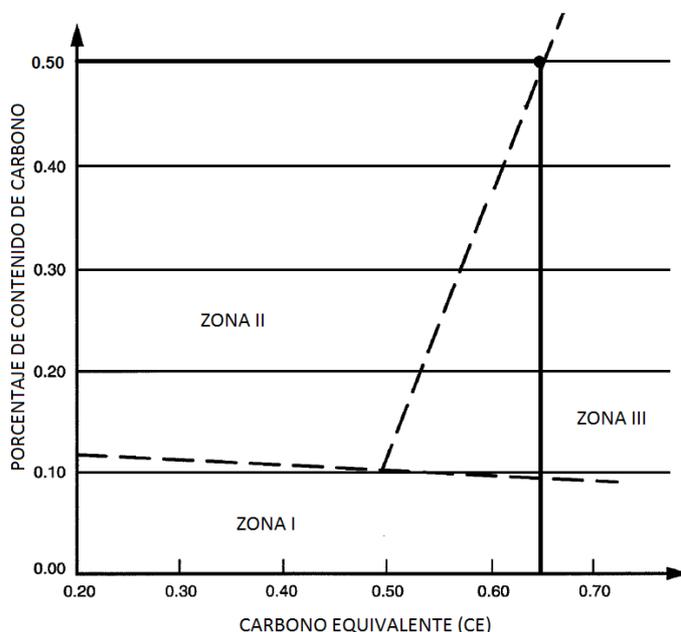
Tabla 4.4.- Composición y características generales del acero AISI 1045<sup>29</sup>

ACERO	Resumen	% Carbono	% elem. aleante
AISI 1045	Acero al Carbono de alta calidad, el cual se emplea para la fabricación de partes de maquinaria sometida a esfuerzos normales, como: árboles de transmisión, ejes, pernos, tuercas, ganchos, pines de sujeción, pasadores cuñas, chavetas, portamatrices.	0,42 - 0,5	Mn 0,6 – 0.9 P 0,04 S 0,05

El carbono equivalente de este material es:

$$CE = C + \frac{Mn + Si}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

$$CE = 0.65$$



Usando el gráfico de Carbono Equivalente de la AWS D1.1 se obtiene que este acero se encuentra dentro de la zona 2 lo que determina que se debe usar el método de control de hidrógeno para evitar fisuras. (Ver precalentamiento en 4.5.4.2 )

Gráfico 4.4.- Carbono equivalente AISI 1045

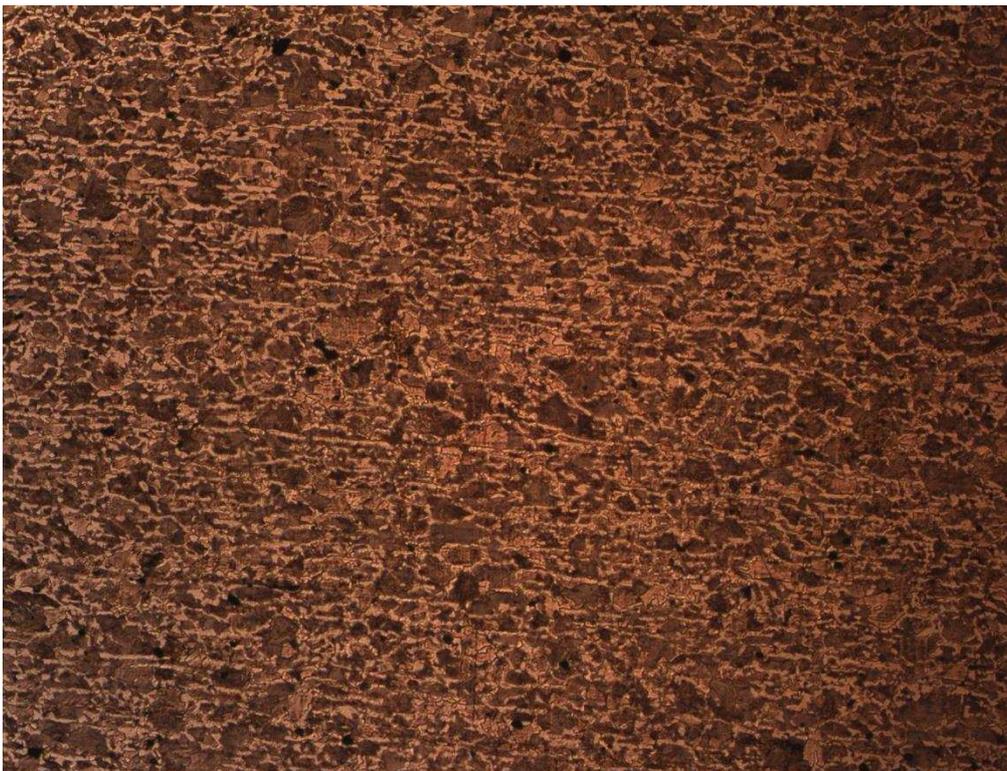


Figura 4.7.- Microestructura del material AISI 1045 tomada a 100X.

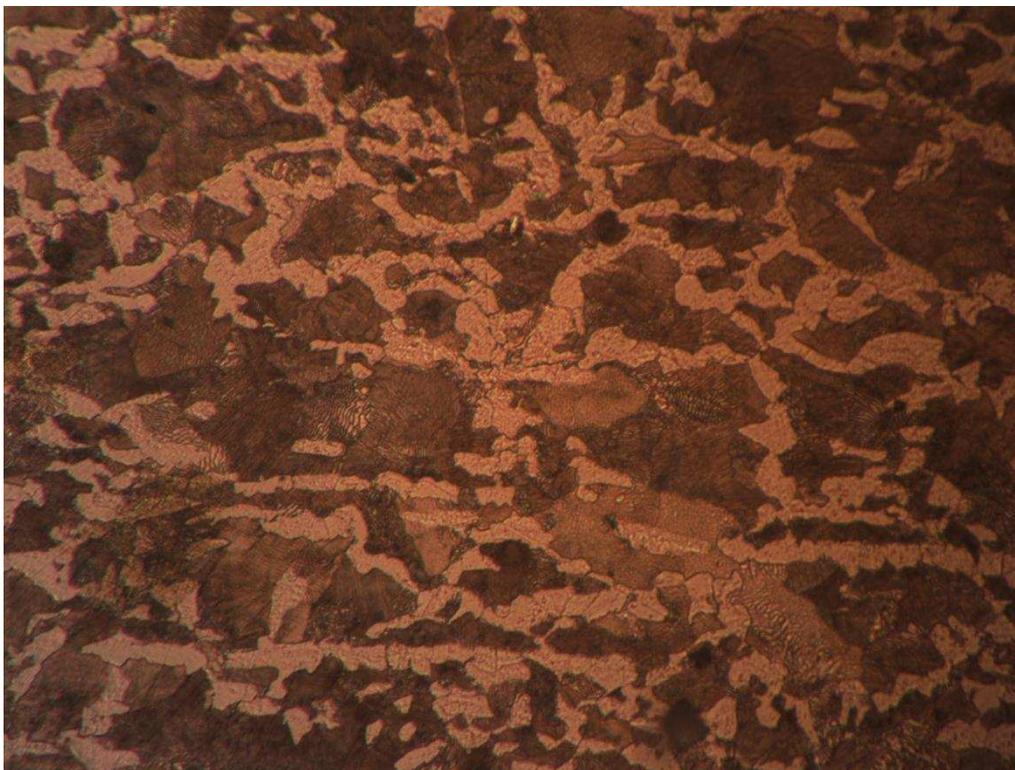


Figura 4.8.- Microestructura del material AISI 1045 tomada a 500X.

## **4.2. PROCESOS DE SOLDADURA UTILIZADOS Y ESPECIFICACIONES DEL ELECTRODO**

### **4.2.1. SMAW**

#### **4.2.1.1. ELECTRODO E7018**

##### **Características**

Electrodo con revestimiento de bajo hidrógeno, con polvo de hierro. Indicado para la soldadura de aceros de alta resistencia a la tracción [56 kg/mm<sup>2</sup> Máx.] así como para aceros de construcción. Su arco es sumamente estable, poco chisporroteo y para mejores resultados se usa arco corto. Se recomienda mantener un arco corto para garantizar buenos resultados en inspecciones radiográficas. Este electrodo permite soldar en posición plana, horizontal, sobrecabeza, vertical ascendente y vertical descendente.

##### **Composición**

Contiene: 0.08% de Carbono, 1% de Manganeso y 0.6% de Silicio.

##### **Corriente y polaridad**

El electrodo usado presenta un diámetro de 1/8" (3.2mm), el cual se recomienda soldar preferiblemente con corriente continua electrodo conectado al polo positivo DC+ y corriente alterna, y con un amperaje comprendido entre 100-140 A.

##### **Aplicaciones**

Para aceros de mediano y bajo carbono, baja aleación.

Para aceros laminados en frío, por sus características de resistencia a la deformación a altas temperaturas, su fácil manejo y óptimo rendimiento, es especialmente adecuado.

Para soldadura de tuberías de vapor

Calderas de alta presión, tanques.

Piezas para maquinaria pesada.

Construcciones metálicas en obra.

Reparaciones Navales.

#### 4.2.1.2. MICROGRAFÍA



Figura 4.9.- Microestructura del cordón de soldadura SMAW E7018 a 100X.

La figura 4.9 muestra la micrografía del cordón de soldadura para el proceso de soldadura SMAW con electrodo E7018, en donde se observa claramente el crecimiento columnar alargado debido a la velocidad de enfriamiento en dirección al mayor gradiente de temperatura. Se presenta una estructura de ferrita aliotrópica, acicular y Widmanstätten (fases principales) y microfases como la bainita, martensita, austenita retenida y perlita en pequeñas cantidades. La dureza obtenida varía entre 80-84 HR B.

#### 4.2.1.3. ELECTRODO 6011:

##### **Características**

Electrodo del tipo celulósico, para soldaduras de penetración. El arco es muy estable, potente y el material depositado es de solidificación rápida. Los depósitos son de alta calidades cualquier posición.

##### **Composición**

Contiene: Entre 0.08 – 0.12% de Carbono, entre 0.4 – 0.6% de Manganeso y 0.25% de Silicio.

##### **Corriente y Polaridad**

El electrodo usado presenta un diámetro de 1/8" (3.2mm), el cual recomienda soldar preferiblemente en Corriente Alterna y Corriente Continua electrodo conectado al polo positivo DC+, y con un amperaje comprendido entre 90-120A.

##### **Aplicaciones**

Soldadura para aceros no templables (aceros dulces)

Carpintería metálica

Estructuras y bastidores para máquinas.

Chapas gruesas y delgadas.

#### 4.2.1.4. MICROGRAFÍA



Figura 4.10.- Microestructura del cordón de soldadura SMAW E6011 a 100X.

La figura 4.10 muestra la micrografía del cordón de soldadura para el proceso de soldadura SMAW con electrodo 6011, en donde se observa claramente el crecimiento columnar alargado debido a la velocidad de enfriamiento en dirección al mayor gradiente de temperatura. Se presenta una estructura de ferrita aliotromorfica, acicular y Widmanstatten (fases principales) y microfases como la bainita, martensita, asutenita retenida y perlita en pequeñas cantidades. La dureza obtenida varía entre 74-76 HR B.

## **4.2.2. GMAW**

### 4.2.2.1. ELECTRODO ER 70 S – 6:

#### **Características**

Electrodo de alambre continuo cobrizado de acero micro – aleado en presentación capa a capa.

#### **Composición**

Contiene: 0.1% de Carbono, 0.9% de Silicio y 1.5% de Manganeso.

#### **Corriente, Flujo de gas y Velocidad de alimentación**

El electrodo usado presenta un diámetro de 0.045” (1.2mm) y se recomienda un amperaje comprendido entre 200-450 A y un voltaje de 24 – 30 V. El flujo de gas 10-20 lt/min y una velocidad de alimentación entre 530 – 990 cm/min.

#### **Aplicaciones**

Para soldar acero dulce en toda posición, mediante proceso MIG/MAG usando anhídrido carbónico o mezcla AGAMIX 20. Utilización en estructuras en general, maquinarias, bastidores de autos, puentes, muelles, torres, etc.

#### 4.2.2.2. MICROGRAFÍA



Figura 4.11.- Microestructura del cordón de soldadura GMAW a 100X.

La figura 4.11 muestra la micrografía del cordón de soldadura para el proceso de soldadura GMAW con electrodo ER 70 S- 6, en donde se observa claramente el crecimiento columnar no muy alargado, debido a la velocidad de enfriamiento en dirección al mayor gradiente de temperatura. Se presenta una estructura de ferrita aliotromorfica, acicular y Widmanstatten (fases principales) y microfases como la bainita, martensita, asutenita retenida y perlita en pequeñas cantidades. La dureza obtenida varía entre 80-88 HR B.

### 4.2.3. SAW

#### 4.2.3.1. ELECTRODO ENi1K Y FUNDENTE F8A2 <sup>ANEXO 4</sup>

##### **Características**

Diseñado primordialmente para soldadura de arco sumergido usando en procesos automáticos. El recubrimiento de cobre le da superior estabilidad al arco de soldar, e incrementa la vida útil de la boquilla de contacto al garantizar un contacto eléctrico adecuado.

##### **Composición**

Alambre de bajo carbono, mediano manganeso, alto silicio y 0,95% de níquel. Especialmente diseñado para ser usado con la familia de fundente neutros Ver anexo (4)

##### **Fundentes Recomendados:**

Lincolnweld 860, 865, 880, 880M, 882, MIL800-H, 960, 980, MIL800-HPNi.

##### **Corriente, Polaridad y Velocidad de avance**

El electrodo usado presenta un diámetro de 2.0mm y se recomienda un amperaje comprendido entre 704 y 880 A, Voltaje de 29 – 34V, Corriente continua electrodo conectado al polo positivo DC+. La velocidad de avance se recomienda entre 23 – 26 in/min

##### **Aplicaciones**

Opción adecuada para la soldadura de aceros resistentes a la acción corrosiva del medio ambiente.

#### 4.2.3.2. MICROGRAFIA



Figura 4.12.- Microestructura del cordón de soldadura SAW 100X.

La figura 4.12 muestra la micrografía del cordón de soldadura para el proceso de soldadura SAW con electrodo F8A2 – ENi1K, en donde se observa claramente el crecimiento columnar muy alargado, debido a la velocidad de enfriamiento en dirección al mayor gradiente de temperatura. Se presenta una estructura de ferrita aliotromorfica, acicular y Widmanstätten (fases principales) y microfases como la bainita, martensita, austenita retenida y perlita en pequeñas cantidades. La dureza obtenida varía entre 80-88 HR B.

### **4.3. ANALISIS PRÁCTICO DE LAS ZONAS DENTRO DE LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR EN SOLDADURA**

#### **4.3.1. ZONA PARCIALMENTE FUNDIDA (TEMPERATURA DE FUSIÓN – TEMPERATURA DE SOLIDIFICACIÓN)**

Es la zona de transición entre el material base y el cordón de soldadura y por lo tanto es la zona sometida a mayor temperatura y está limitada por el intervalo de cristalización. En esta zona coexisten la fase sólida y la fase líquido, facilitando el crecimiento de los granos o cristales sólidos. En donde existe la unión entre el material base y el cordón, por lo que esta zona determina la calidad de la unión soldada. Ver figura 4.13 – 2.

#### **4.3.2. ZONA DE RECALENTAMIENTO (TEMPERATURA DE SOLIDIFICACIÓN – 1130°C)**

En esta zona los granos experimentan un fuerte crecimiento que con la posterior recristalización no presentan un cambio sensible. Por esta razón esta zona presenta una estructura de grano frágil, con disminución de propiedades mecánicas como resistencia y ductilidad por tanto es una de las zonas más críticas de la ZAC. la estructura de los granos son granos frágiles de ferrita envueltos por perlita con alto porcentaje de ferrita. Ver figura 4.13 – 3 y 4.

#### **4.3.3. ZONA DE NORMALIZADO (1130 – 900 °C)**

Es una zona de excelentes propiedades mecánicas aunque los granos de austenita no permanecen mayor tiempo esta temperatura por lo que no alcanzan un crecimiento. Por tanto con el posterior enfriamiento se obtiene una estructura homogénea y fina de muy buenas propiedades en la cual ha ocurrido algo similar a un tratamiento térmico como la normalización o el recocido. Ver figura 4.13 – 5.

#### **4.3.4. ZONA DE RECRISTALIZACION INCOMPLETA (900 – 723 °C)**

Durante el calentamiento ocurre la reacción eutectoide a 723°C y la ferrita se disuelve dentro de los cristales dentro de los cristales de la austenita. Durante el enfriamiento solamente los cristales de austenita forman nuevos cristales de perlita dúctil mientras que los cristales de ferrita experimentan crecimiento y fragilización. Por tanto esta zona tiene menores propiedades que la normalización y está formada por granos frágiles de ferrita y a su alrededor granos dúctiles de perlita. Ver figura 4.13 – 6.

#### **4.3.5. ZONA DE RECRISTALIZACIÓN (723 – 500 °C)**

En esta zona ocurre la recristalización de los granos de ferrita, es decir un crecimiento de grano durante el calentamiento y deformación plástica del metal. La deformación plástica permite un pequeño aumento de la dureza de esta zona. Ver figura 4.13 – 6.

#### **4.3.6. ZONA DE SENSIBILIDAD AZUL (500 – 200 °C)**

Se caracteriza por una disminución de la plasticidad del material sin cambios en la estructura del mismo. El efecto de la sensibilidad azul se explica por el apareamiento de partículas microscópicas de ferrita que se distribuyen en solución sólida en los límites de grano que dan una coloración característica a esta zona. Ver figura 4.13 – 7.

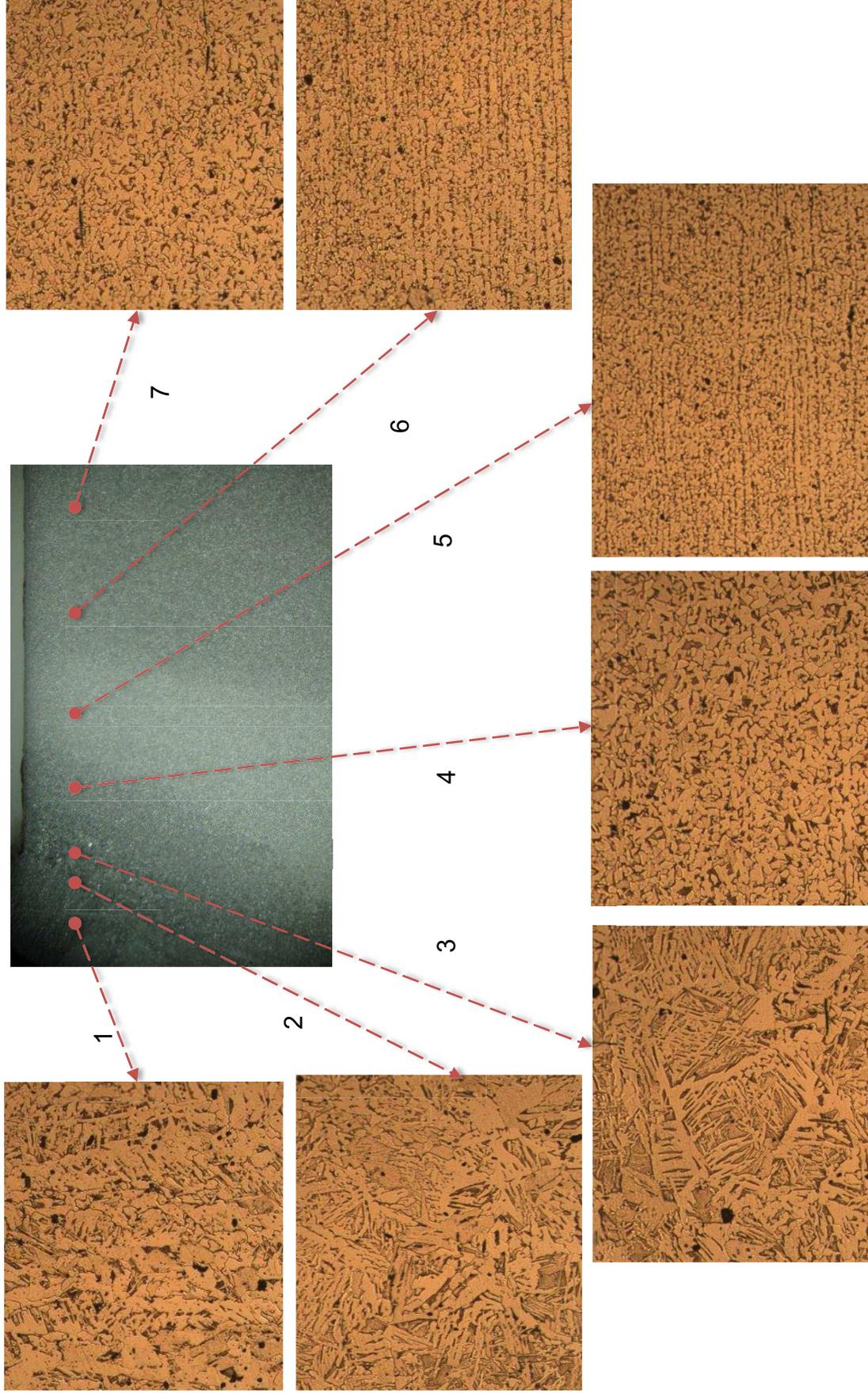


Figura 4.13.- Zonas dentro de la zona afectada por el calor. 1) Material solidificado. 2), Zona parcialmente fundida. 3), 4) Zona de recalentamiento. 5) Zona de Normalizado. 6) Zona de recristalización. 7) Material Base. Fotos a 100X.

#### 4.4. DUREZAS DE LAS ZONAS DENTRO DE LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR EN SOLDADURA

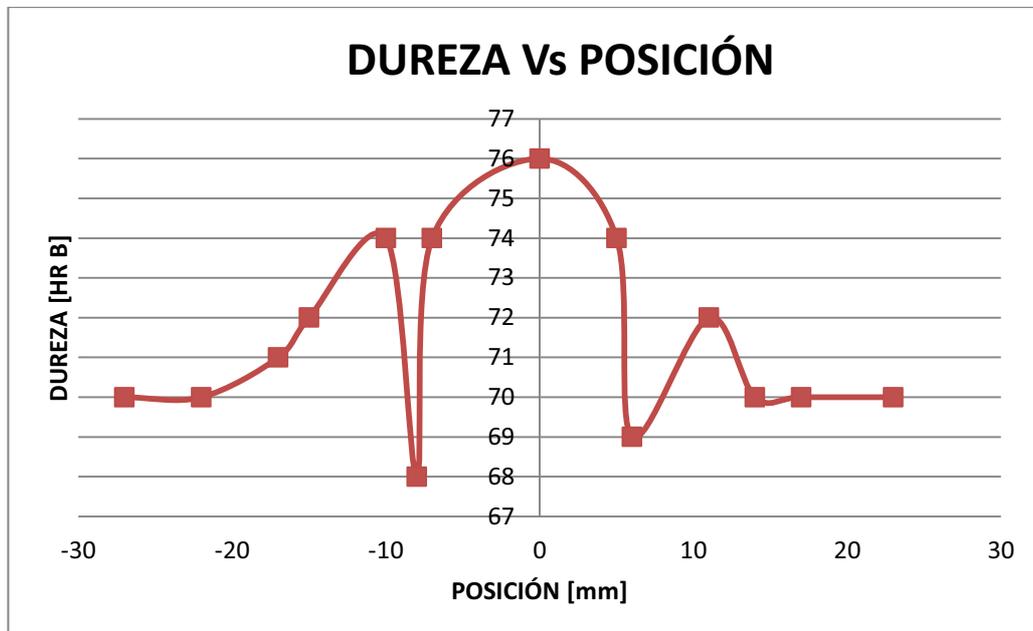


Gráfico 4.5.- Durezas vs posición en las zonas de la ZAC en el acero A-36 con proceso de soldadura SMAW y altos niveles de energía.

El gráfico 4.5 muestra varias medidas de durezas tomadas en función de la longitud de la probeta. Según la tabla 2.1 la escala de dureza recomendable para este tipo de cordón de soldadura es la Rockwell B. El uso de la escala Rockwell C, aun cuando permite mediciones con menor área de indentación, no cubre los valores de durezas para los materiales propuestos. La zona de fusión presenta la mayor dureza, ya que el metal de aporte debe presentar características superiores al resto de material y permitir una unión rígida y segura entre las partes. Dentro de la ZAC las durezas varían de forma significativa. La zona de fusión parcial presenta una disminución no muy significativa de la dureza con respecto al metal de soldadura, al contrario de lo que sucede con la zona de recalentamiento donde la variación de la dureza es elevada, principalmente por el tamaño de grano grueso que se presenta en esta zona. Se llega a la zona de Normalizado en donde la dureza aumenta debido al afinamiento del grano,

tenemos después que la dureza comienza a disminuir nuevamente en la zona de recristalización y de fragilidad azul hasta llegar a la dureza del material base.

## 4.5.VARIANTES ENTRE PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA

### 4.5.1. MATERIALES Y PROCESOS DIFERENTES

Las Probetas se realizaron mediante el proceso de soldadura SMAW (Rendimiento 80%), GMAW (Rendimiento 80%) y SAW (Rendimiento 85%), y en los materiales A-36, A-588, A-131 y AISI 1045, mediante las variables de soldadura mostrados en la tabla 4.5. Para el proceso de soldadura SMAW se utilizó el electrodo E7018 en todos los materiales base.

Tabla 4.5.- Parámetros de soldadura para diferentes procesos y materiales

Proceso	Material	Voltaje [V]	Amperaje [I]	Velocidad [mm/seg]	Calor de entrada [J/mm]	Espesor Relativo
SMAW	A36	22	122	2,1	1022,5	0,845
	A588	23	124	2,2	1037,1	0,839
	A131	23	130	2,3	1040,0	0,838
	AISI1045	26	120	2,5	998,4	0,856
GMAW	A36	18	200	3,8	757,9	0,982
	A588			3,5	822,9	0,942
	A131			3,7	778,4	0,969
	AISI1045			3,6	800,0	0,956
SAW	A36	32	580	10,0	1856,0	0,628
	A588			10,7	1732,3	0,650
	A131			9,4	1979,7	0,608
	AISI1045			10,3	1794,1	0,638

### 4.5.2. ESPESORES DIFERENTES

Las Probetas se realizaron mediante el proceso de soldadura SMAW (Rendimiento 80%) y en el material A-36, variando únicamente los espesores de placa, mediante las variables de soldadura mostrados en la tabla 4.6. Se uso el electrodo E7018.

Tabla 4.6.- Parámetros de soldadura en diferentes espesores de placa

<b>Espesor</b>	<b>Voltaje [V]</b>	<b>Amperaje [I]</b>	<b>Velocidad de soldadura [mm/seg]</b>	<b>Calor de entrada [J/mm]</b>	<b>Espesor Relativo</b>
6	24	130	3,7	673,9	0,5
8	23	124	3,3	691,4	0,7
10	22	126	2,8	792,0	0,8
12	22	122	2,1	1022,5	0,9

### 4.5.3. CORRIENTES DIFERENTES

Las Probetas se realizaron mediante el proceso de soldadura SMAW (Rendimiento 80%) y en el material A-36, variando únicamente las corrientes de soldadura, mediante las variables de soldadura mostrados en la tabla 4.7. Se uso el electrodo E7018.

Tabla 4.7.- Parámetros de soldadura para diferentes corrientes de soldadura

<b>Corriente</b>	<b>Voltaje [V]</b>	<b>Amperaje [I]</b>	<b>Velocidad [mm/seg]</b>	<b>Calor de entrada [J/mm]</b>	<b>Espesor Relativo</b>
Alta	23	140	2,2	1170,9	0,790
Normal	22	122	2,1	1022,5	0,845
Baja	22	100	2,3	765,2	0,977

### 4.5.4. TRATAMIENTO TÉRMICO POST-SOLDADURA Y PRECALENTAMIENTO

#### 4.5.4.1. TRATAMIENTO TÉRMICO POST SOLDADURA

El tratamiento térmico que se realiza después de la soldadura es un tratamiento de alivio de esfuerzos y debe cumplir las siguientes condiciones bajo la norma correspondiente al código de soldadura estructural AWS D1.1:

1. El esfuerzo de fluencia no debe exceder 50 Ksi [345 MPa].
2. La fabricación del metal base no puede incluir templado y revenido, templado y auto revenido, proceso termo mecánico controlado o donde el trabajo en frío se use para alcanzar mayores propiedades mecánicas.

3. No debe haber requerimientos para prueba de impacto del metal base, ZAC o metal de soldadura.
4. Deberá demostrarse que en el cordón de soldadura existe una resistencia adecuada después del tratamiento.
5. Seguir los requerimientos de 5.8 (dentro de la norma)

#### 4.5.4.1.1. REQUERIMIENTOS

1. La temperatura del horno no excederá 315°C cuando la pieza soldada se introduzca en el mismo.
2. Sobre los 315°C, la tasa de calentamiento en °C/hr no excederá 5600 dividido por el espesor máximo en milímetros pero no más de 220°C/hr. Durante el periodo de calentamiento, las variaciones de temperaturas no serán mayores a 140°C dentro de un intervalo de 5m de longitud. Las tasas de enfriamiento necesitan no estar por debajo de 55°C/hr.
3. Después una temperatura máxima de 600 °C es alcanzada es aceros templados y revenidos o un rango entre 600°C y 650°C para otros aceros. La temperatura de la pieza soldada se mantendrá dentro de los límites especificados para tiempos no menores que los de la tabla 5.2 basados en el espesor de soldadura. Cuando el alivio de esfuerzos especificado es para estabilidad dimensional, el tiempo a mantener la temperatura no será menor que el especificado en la tabla 5.3 basado en el menor espesor. Durante el periodo en el cual se mantiene la temperatura no habrá una diferencia mayor a 85°C entre la temperatura más alta y la temperatura más baja.
4. Sobre 315°C, el enfriamiento será hecho en un horno cerrado o cámara de enfriamiento a una tasa no mayor a 260°C/hr dividida por el máximo espesor del metal de la parte más delgada en pulgadas, pero en ningún caso mayor a 260°C/hr. Desde 315°C, la parte soldada puede ser enfriada al aire.

#### 4.5.4.1.2. PROCEDIMIENTO

La placa de acero ASTM A36 (100x100x12,5) será soldada bajo el proceso SMAW bajo el procedimiento precalificado.

Una vez efectuada la limpieza de escoria de soldadura, la pieza soldada se ingresará a una cama pre elaborada y llena de limalla para evitar oxidación en el tratamiento térmico. Esta cama se ingresará al horno a máximo 315°C y se someterá a un calentamiento de 220°C/hr.

Cuando llegue a una temperatura de 600°C (80 minutos aproximadamente) la temperatura se mantendrá durante 45 minutos y pasará a un enfriamiento de 260 °C/hr hasta llegar a 300°C y luego será enfriada al aire libre.

Tabla 4.8.- Tiempo de permanencia del tratamiento térmico<sup>26</sup>

Tiempo mínimo mantener la temperatura		
¼ pulg. [6mm] o menor	Sobre ¼ pulg. [6 mm] hasta 2 pulg. [50 mm]	Sobre 2 pulg. [50 mm]
15 minutos	15 minutos por cada ¼ pulg. [6mm] de placa o fracción de la misma	2 horas más 15 minutos por cada pulgada adicional [25 mm] o fracción de la misma por encima de 2 pulg. [50 mm]

### Curva de tratamiento térmico

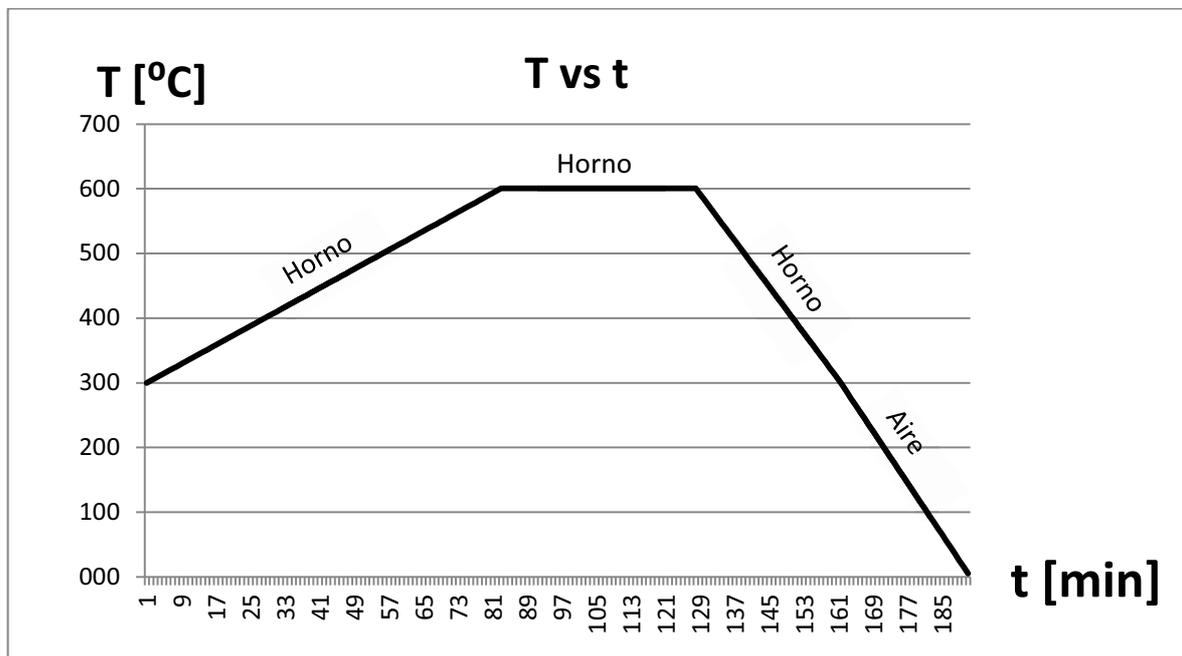


Gráfico 4.6.- Diagrama del tratamiento térmico alivio de tensiones

Tabla 4.9.- Parámetros del tratamiento térmico

Datos a programar:	
Temperatura inicial máxima del Horno:	315 °C
Velocidad de calentamiento 1:	220 °C/hr
Temperatura final de calentamiento:	600 °C
Mantener el horno a 600°C:	0,75 hr
Velocidad de enfriamiento (Hasta llegar a 300°C):	260 °C/hr
Velocidad de enfriamiento (Después de 300°C):	Aire libre

#### 4.5.4.2. PRECALENTAMIENTO

##### 4.5.4.2.1. INTRODUCCIÓN

El propósito es determinar condiciones de soldadura (especialmente precalentamiento) para evitar fisuras en frío. No hay un método disponible para predecir condiciones óptimas en todos los casos, pero se considera algunos factores importantes como el nivel de hidrógeno y la composición química del acero no explícitamente incluida en los requerimientos de la tabla 3.2.<sup>26</sup>

#### 4.5.4.2.2. MÉTODOS

Dos métodos son usados como base para estimar condiciones de soldadura para evitar fisuras en frío:

- Control de dureza de la ZAC
- Control de Hidrógeno

##### 4.5.4.2.2.1. CONTROL DE DUREZA DE LA ZAC

Este método está restringido para soldaduras de filete.

##### 4.5.4.2.2.2. MÉTODO DE CONTROL DE HIDRÓGENO

El método de control de hidrógeno está basado en la suposición que la fisura no ocurrirá si la cantidad promedio de hidrógeno remanente en la junta después de que la junta se haya enfriado por debajo de 50°C no excede un valor crítico que depende de la composición del acero y su restricción. El precalentamiento necesario para permitir suficiente hidrógeno difundido fuera de la junta puede ser estimado bajo este método.

Este método está basado principalmente en resultados de pruebas de soldadura de juntas de penetración parcial.

Una determinación del nivel de restricción y del nivel original del hidrógeno en el charco de soldadura se requiere para el método de control de hidrógeno.

#### SELECCIÓN DEL MÉTODO

El siguiente procedimiento es recomendado como una guía para la selección de control de dureza de la ZAC o el control de hidrógeno.

Se determina el carbono equivalente del material:

$$CE = C + \frac{(Mn+Si)}{6} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15} \quad (4.1)$$

Localizar la posición del acero en la siguiente figura:

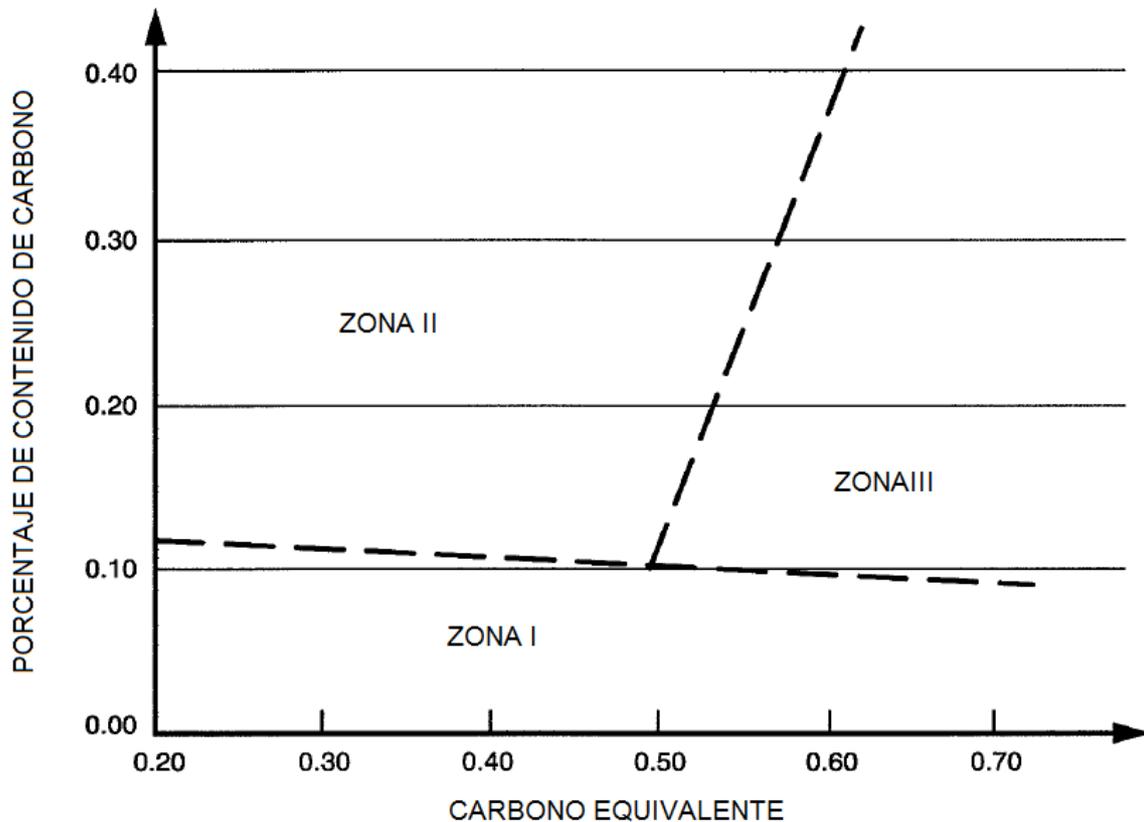


Figura 4.14.- Determinación de la zona para los aceros usados<sup>26</sup>

Las características de desempeño de cada zona y las acciones recomendadas son:

- ZONA I.- El fisuramiento es improbable, pero puede ocurrir con alto hidrógeno o alta restricción. Se debe usar el método de control de hidrógeno para determinar precalentamiento para los aceros de esta zona.
- ZONA II.- Para soldaduras a tope, el control de hidrógeno deberá ser usado para determinar precalentamiento  
Para aceros de alto contenido de carbono, el método de control de hidrógeno puede ser usado para ambos tipos de soldadura: de ranura y de filete.
- ZONA III.- El método de control de hidrógeno deberá ser usado.

#### MÉTODO DE CONTROL DE HIDRÓGENO

El valor del parámetro de composición se muestra en la siguiente ecuación.

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (4.2)$$

El nivel de hidrógeno será determinado y definido como sigue:

- H1 extra bajo hidrógeno

Estos consumibles dan un contenido de hidrógeno difusible menor a 5ml/100g de metal depositado, o un contenido de humedad en el recubrimiento del electrodo de 0,2% máximo en conformidad con AWS A5.1 o A5.5.

- H2 bajo hidrógeno

Estos consumibles dan un contenido de hidrógeno difusible menor a 10ml/100g de metal depositado, o un contenido de humedad en el recubrimiento del electrodo de 0,4% máximo en conformidad con AWS A5.1.

- H3 Hidrógeno no controlado

Todos los otros consumibles que no tienen los requerimientos para ser H1 o H2.

## RESTRICCIONES

La clasificación de tipos de suelda en varios niveles de restricción debe ser determinado en base a la experiencia, criterio ingenieril, investigación o cálculo.

Hay tres niveles de restricción:

- Baja restricción

Este nivel describe juntas soldadas de ranura y filete en las cuales existe una libertad razonable de movimiento.

- Mediana restricción

Este nivel describe juntas soldadas de ranura y filete en las cuales a causa de que los miembros han sido anclados a trabajos estructurales, existe una reducida libertad de movimiento.

- Alta restricción

Este nivel describe juntas soldadas de ranura y filete en las cuales casi no existe libertad de movimiento de los miembros a unir.

Tabla 4.10.- Tabla del nivel de hidrógeno según Pcm

Nivel de Hidrógeno, H	Parámetro de composición, Pcm				
	< 0.18	< 0.23	< 0.28	< 0.33	< 0.38
H1	A	B	C	D	E
H2	B	C	D	E	F
H3	C	D	E	F	G

Tabla 4.11.- Temperatura de precalentamiento

Nivel de restricción	Espesor	Temperatura mínima de precalentamiento y entre pases [°C]						
		A	B	C	D	E	F	G
Bajo	< 10	< 20	< 20	< 20	< 20	60	140	150
	> 10 - 20 incl.	< 20	< 20	20	60	100	140	150
	> 20 - 38 incl.	< 20	< 20	20	80	110	140	150
	> 38 - 75 incl.	20	20	40	95	120	140	150
	> 75	20	20	40	95	120	140	150
Medio	< 10	< 20	< 20	< 20	< 20	70	140	160
	> 10 - 20 incl.	< 20	< 20	20	80	115	145	160
	> 20 - 38 incl.	20	20	75	110	140	150	160
	> 38 - 75 incl.	20	80	110	130	150	150	160
	> 75	95	120	140	150	160	160	160
Alto	< 10	< 20	< 20	20	40	110	150	160
	> 10 - 20 incl.	< 20	20	65	105	140	160	160
	> 20 - 38 incl.	20	85	115	140	150	160	160
	> 38 - 75 incl.	115	130	150	150	160	160	160
	> 75	115	130	150	150	160	160	160

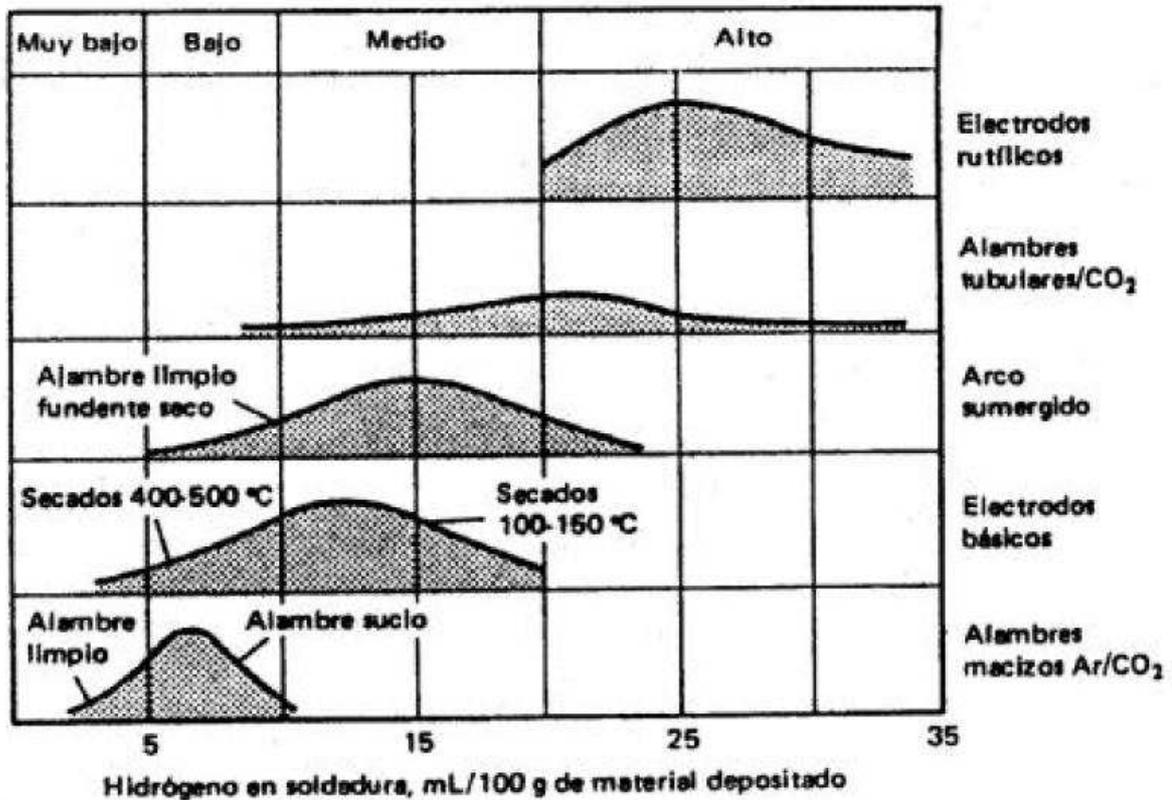


Figura 4.15.- Electrodo Vs Nivel de Hidrógeno <sup>30</sup>

#### PROCEDIMIENTO

Se debe determinar el método que se va a usar de acuerdo a la norma AWS D1.1 con el uso del carbono equivalente:

$$CE = C + \frac{(Mn + Si)}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15}$$

El Carbono equivalente para cada material base usado ya fue determinado anteriormente en la sección 4.1, estos valores se reproducen en conjunto y se localizan en la gráfica 4.8 para determinar la zona en la que se encuentra cada uno.

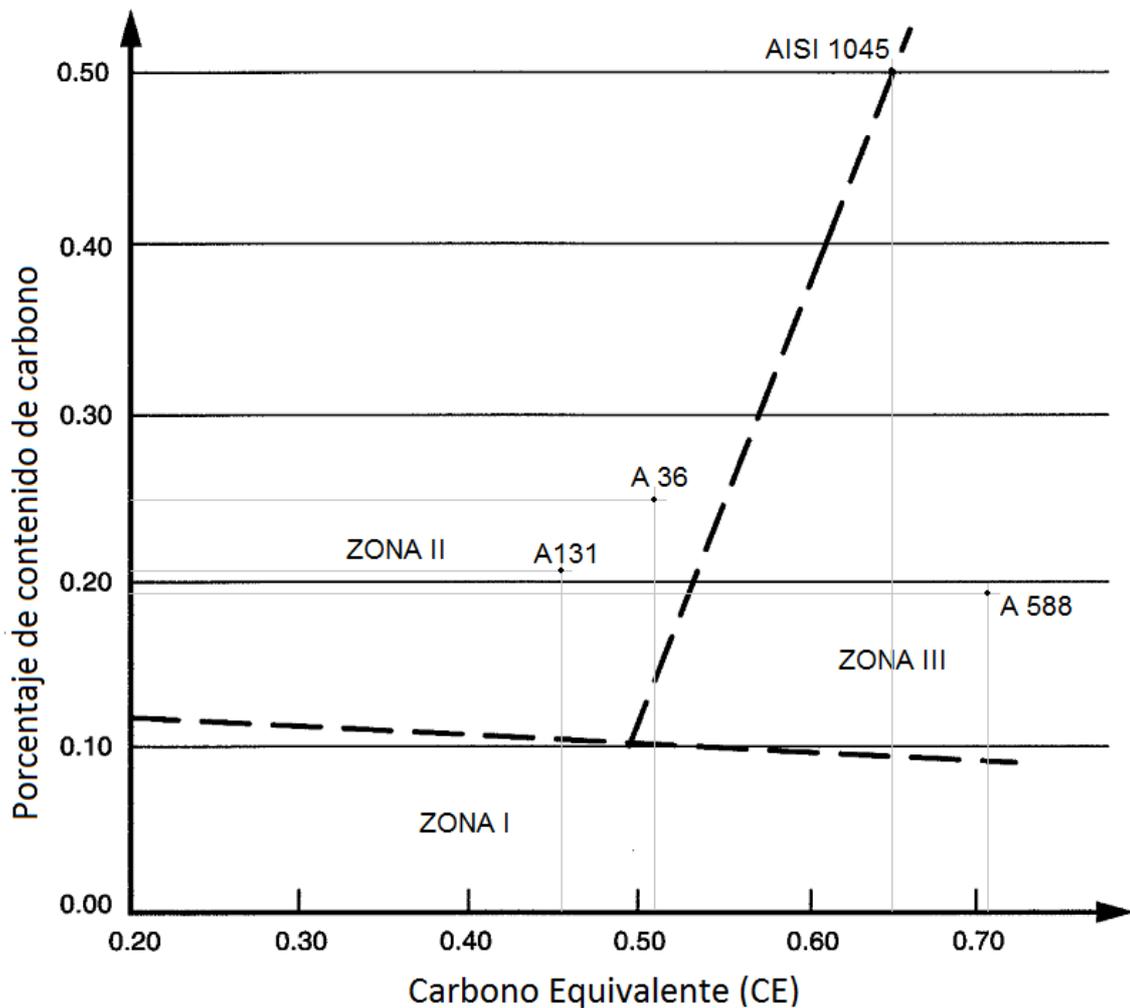


Gráfico 4.7.- Electrodo Vs Nivel de Hidrógeno<sup>26</sup>

A continuación se determina el parámetro de composición  $P_{cm}$  para los aceros mediante la siguiente fórmula:

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

Los valores  $P_{cm}$  para cada acero son:

A 36	0,334
A 588	0,3475
A131	0,279
AISI 1045	0.545

Estos valores deben ser llevados a la tabla 4.12 para seleccionar el grupo en que se encuentran conjuntamente con la medida del nivel de hidrógeno. De la tabla 4.12 se puede determinar que solamente el acero A 131 tiene un parámetro  $P_{cm}$

menor a 0,33 mientras que los aceros A 36 y A 588 tienen valores Pcm menores que 0,38. El parámetro Pcm del acero AISI 1045 no se contempla bajo este método por no pertenecer al grupo de aceros que están bajo la norma AWS D1.1. Sin embargo, se debe decir que por su alto contenido de carbono requiere precalentamiento para evitar fisuras en frío. Por otra parte se selecciona al acero A36 para ser precalentada y así poder realizar las comparaciones adecuadas.

Con la ayuda del valor Pcm y el nivel de hidrógeno se puede llegar a determinar la letra de la zona en la que se encuentra, para con esta poder llegar a la temperatura de precalentamiento que se le debe dar a la probeta. Cabe señalar que el nivel de restricción que se le dio a la probeta fue bajo.

Tabla 4.12.- Tabla Pcm Vs Nivel de Hidrógeno. Práctica

Nivel de Hidrógeno , H	Parámetro de composición, Pcm				
	< 0.18	< 0.23	< 0.28	< 0.33	< 0.38
H1	A	B	C	D	E
H2	B	C	D	E	F
H3	C	D	E	F	G

Tabla 4.13.- Temperatura de precalentamiento. Práctica

Nivel de restricción	Espesor	Temperatura mínima de precalentamiento y entre pases [°C]						
		A	B	C	D	E	F	G
Bajo	< 10	< 20	< 20	< 20	< 20	60	140	150
	> 10 - 20 incl.	< 20	< 20	20	60	100	140	150
	> 20 - 38 incl.	< 20	< 20	20	80	110	140	150
	> 38 - 75 incl.	20	20	40	95	120	140	150
	> 75	20	20	40	95	120	140	150
Medio	< 10	< 20	< 20	< 20	< 20	70	140	160
	> 10 - 20 incl.	< 20	< 20	20	80	115	145	160
	> 20 - 38 incl.	20	20	75	110	140	150	160
	> 38 - 75 incl.	20	80	110	130	150	150	160
	> 75	95	120	140	150	160	160	160
Alto	< 10	< 20	< 20	20	40	110	150	160
	> 10 - 20 incl.	< 20	20	65	105	140	160	160
	> 20 - 38 incl.	20	85	115	140	150	160	160
	> 38 - 75 incl.	115	130	150	150	160	160	160
	> 75	115	130	150	150	160	160	160

Con la ayuda de las tablas 4.12 y 4.13 se llega a determinar que la temperatura de precalentamiento es de 150°C.

Los parámetros de soldadura para cada una de las probetas tanto de precalentamiento y con tratamiento térmico se muestra en la tabla 4.14:

Tabla 4.14.- Parámetros de soldadura con y sin precalentamiento y tratamiento térmico post-soldadura

Proceso	Voltaje [V]	Amperaje [I]	Velocidad de soldadura [mm/seg]	Calor de entrada [J/mm]
A36	22	122	2,1	958,6
Precalentamiento	25	126	2,3	1027,2
Tratamiento térmico	23	125	2,3	937,5

#### 4.5.5. DIFERENTES VELOCIDADES DE SOLDADURA

Las Probetas se realizaron mediante el proceso de soldadura SMAW (Rendimiento 80%) y en el material A-36, variando únicamente las velocidad de soldadura, mediante las variables de soldadura mostrados en la tabla 4.15.

Tabla 4.15.- Parámetros de soldadura diferentes velocidades

<b>Velocidad</b>	<b>Voltaje [V]</b>	<b>Amperaje [I]</b>	<b>Velocidad [mm/seg]</b>	<b>Calor de entrada [J/mm]</b>	<b>Espesor Relativo</b>
Alta	25	120	4,2	570,5	0,566
Normal	24	130	3,7	673,9	0,521
Baja	26	130	2,1	1304,1	0,374

#### 4.5.6. POLARIDAD

Las Probetas se realizaron mediante el proceso de soldadura SMAW (Rendimiento 80%) y en el material A-36, variando únicamente la polaridad de corrientes, es decir corriente continua o alterna, mediante las variables de soldadura mostrados en la tabla 4.16.

Tabla 4.16.- Parámetros de soldadura para diferente polaridad de corriente

<b>Polaridad</b>	<b>Voltaje [V]</b>	<b>Amperaje [I]</b>	<b>Velocidad [mm/seg]</b>	<b>Calor de entrada [J/mm]</b>
AC	29	115	1,90	1404,2
DC+	22	122	2,1	1022,5

#### 4.5.7. SOLDADURA VARIOS PASES SIN ESPERA ENTRE CORDONES

Las Probetas se realizaron mediante el proceso de soldadura SMAW (Rendimiento 80%) y en el material A-36, mediante tres pases continuos, es decir sin espera de tiempo entre pases, mediante las variables de soldadura mostrados en la tabla 4.17.

Tabla 4.17.- Parámetros de soldadura de varios pases sin espera entre cordones

<b>Pase</b>	<b>Voltaje [V]</b>	<b>Amperaje [I]</b>	<b>Velocidad de soldadura [mm/seg]</b>	<b>Calor de entrada [J/mm]</b>
Primer	33	125	1,72	1914,0
Segundo	30	115	1,22	2254,0
Tercero	29	115	1,07	2498,2

#### **4.5.8. SOLDADURA VARIOS PASES CON ESPERA ENTRE CORDONES**

Las Probetas se realizaron mediante el proceso de soldadura SMAW (Rendimiento 80%) y en el material A-36, mediante tres pases con espera de tiempo entre pases, mediante las variables de soldadura mostrados en la tabla 4.18.

Tabla 4.18.- Parámetros de soldadura de varios pases con espera entre cordones

<b>Pase</b>	<b>Voltaje [V]</b>	<b>Amperaje [I]</b>	<b>Velocidad de soldadura [mm/seg]</b>	<b>Calor de entrada [J/mm]</b>
Primer	31	110	1,79	1527,7
Segundo	32	112	1,23	2325,6
Tercero	31	116	1,16	2484,5

#### **4.6. MACROGRAFÍAS**

Una vez pulidas las probetas estas fueron atacadas con Nital 2% para realizar las micrografías y tomar las fotografías correspondientes, lo cual se observará en la sección siguiente. Posteriormente, las probetas fueron atacadas con Nital 10% para generar mayor visibilidad de la zona afectada por el calor en las macrografías. De la figura 4.16 a la Figura 4.21 se encuentran ordenadas las fotografías correspondientes a las macrografías y están clasificadas de acuerdo a las variaciones que se encuentran en los procedimientos ubicados en el anexo 2.

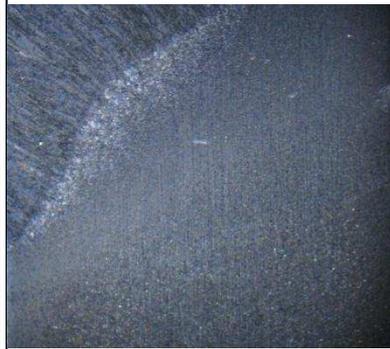
Proceso	A36	A 588	A131	AISI 1045
SMAW				
GMAW				
SAW				

Figura 4.16.- Macrografías para diferentes materiales base y procesos de soldadura

Espesor	
6 mm	8 mm
10 mm	12 mm

Figura 4.17.-- Macrografías para diferentes espesores de placa de las probetas soldadas

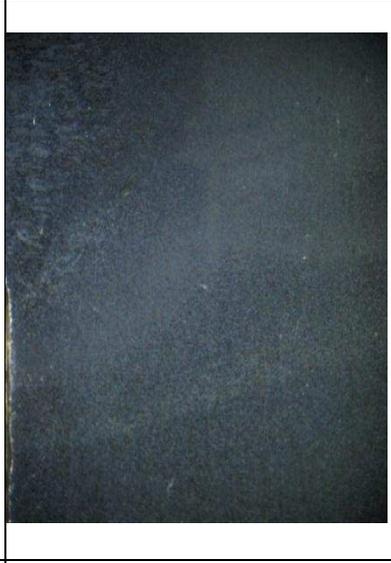
Proceso	Corriente Normal	Corriente Alta	Corriente Baja
a)			
	Sin Tratamiento Térmico	Tratamiento térmico	Precalentamiento
b)			

Figura 4.18.- a) Macrografías para Corriente alta, normal y baja, b) macrografías con y sin precalentamiento y tratamiento térmico.

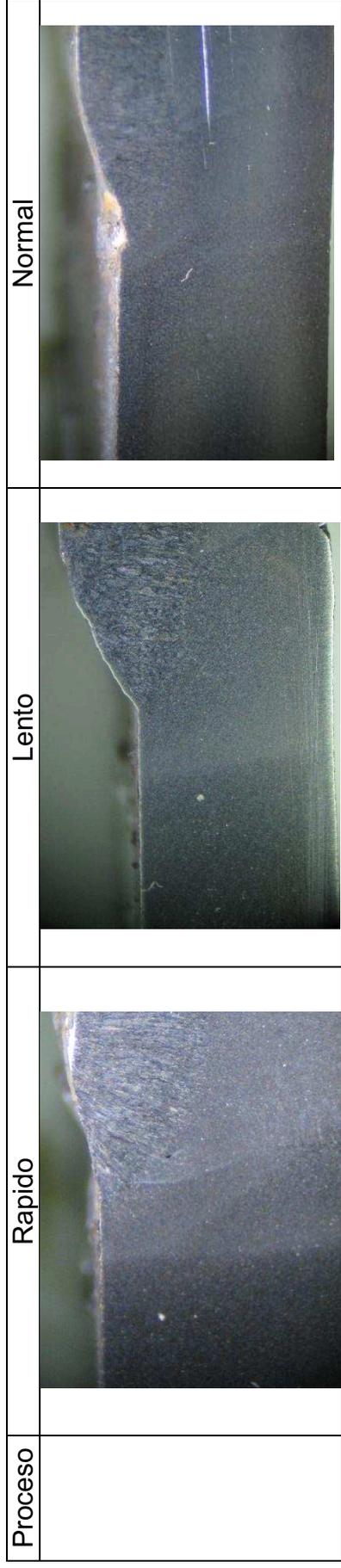


Figura 4.19.- Macrografias para diferentes velocidades de soldadura

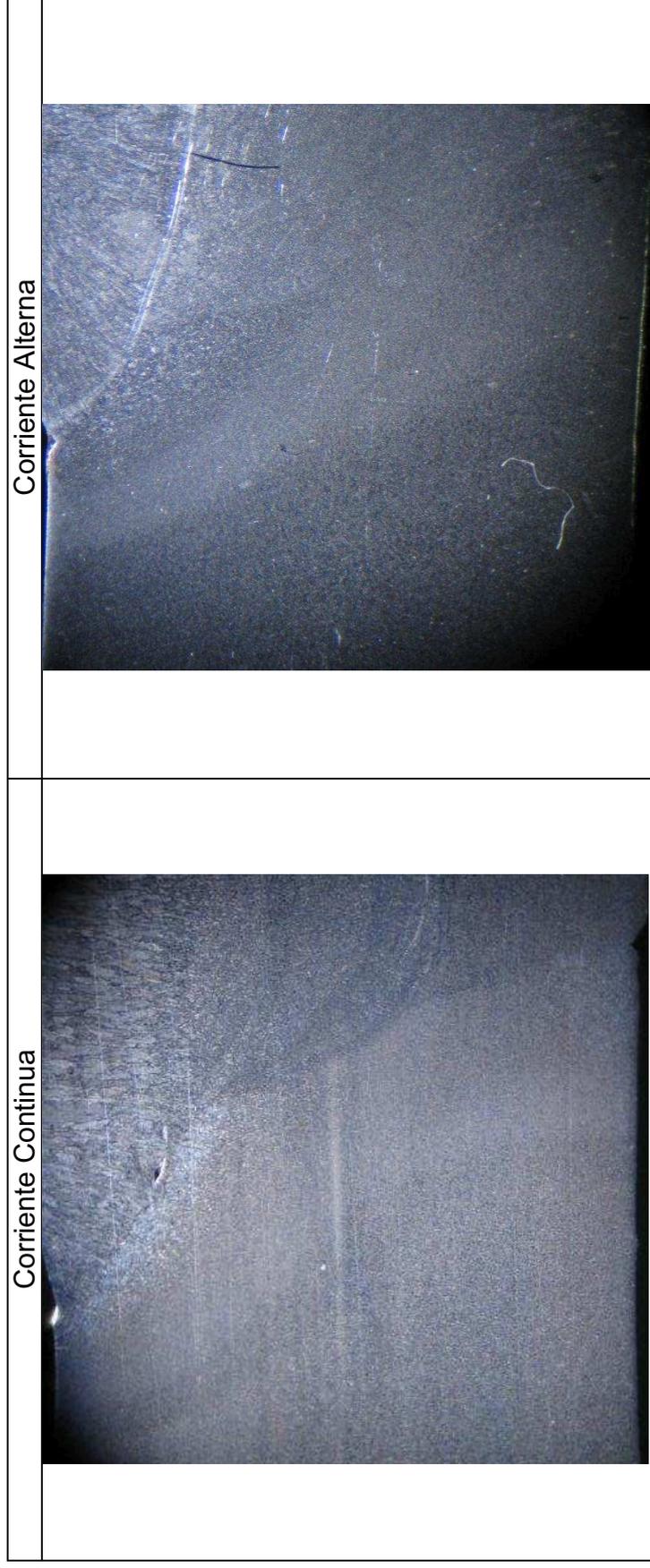


Figura 4.20.- Macrografias para Corriente Alterna y Corriente Continua

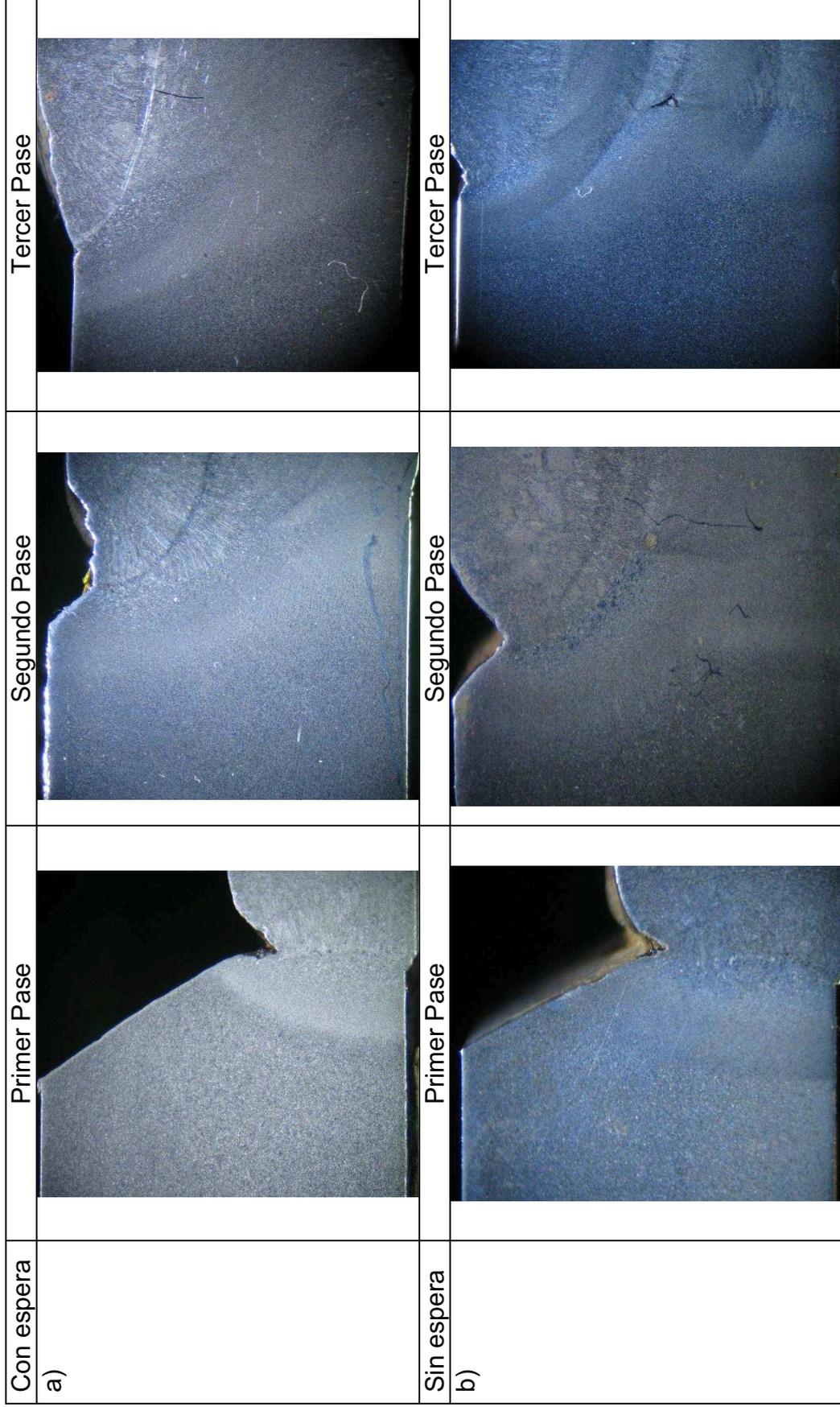


Figura 4.21.- Macrografias de cordones de soldadura: a) Sin espera entre pases, b) Con espera entre pases

## **4.7 MICROGRAFIAS**

Como se indicó en la sección 4.6 las probetas pulidas fueron atacadas con nital 2% para poder visualizar bajo microscopio las micrografías. De igual manera las Figuras que van desde 4.22 hasta 4.36 contienen las micrografías de la zona afectada por el calor para cada probeta así como sus zonas internas. Los análisis se encuentran, para las diferentes variaciones, en el capítulo 5.

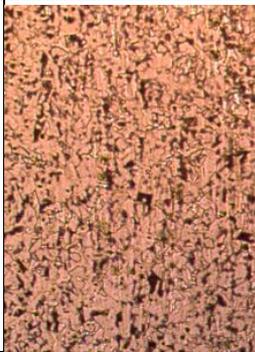
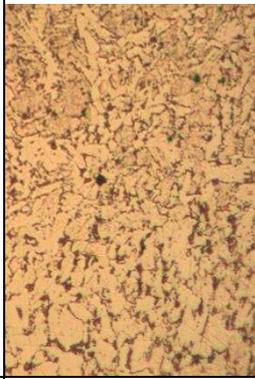
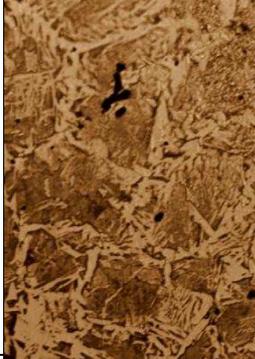
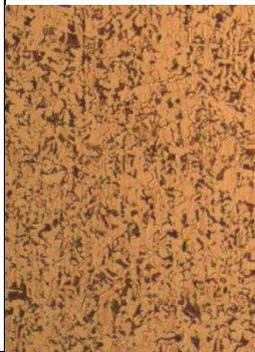
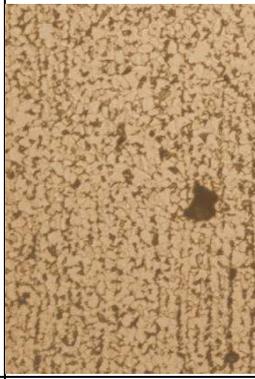
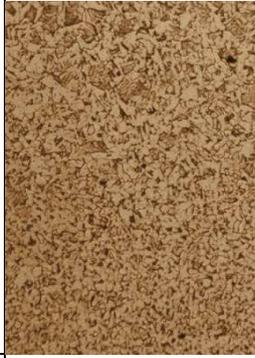
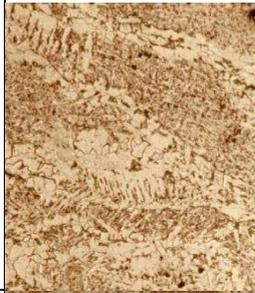
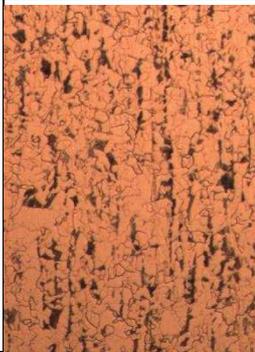
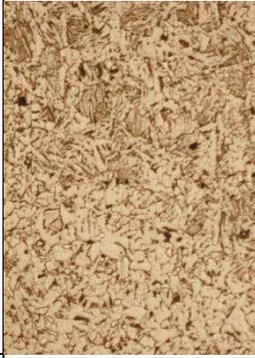
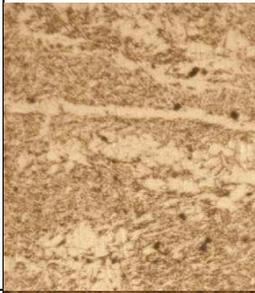
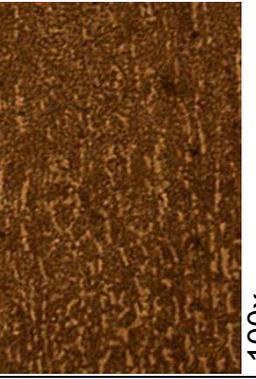
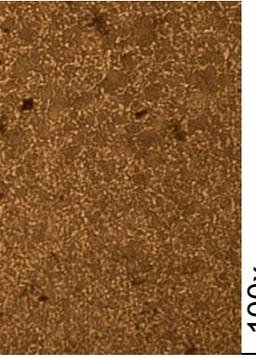
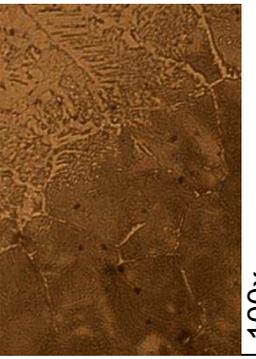
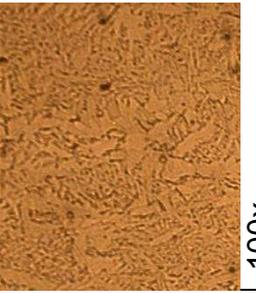
Material	Metal Base	Metal Base - ZAC	ZAC	ZAC - Soldadura	Soldadura
A-36	 100x	 100x	 100x	 100x	 100x
A-588	 100x	 100x	 100x	 100x	 100x
A-131	 100x	 100x	 100x	 100x	 100x
AISI 1045	 100x	 100x	 100x	 100x	 100x

Figura 4.22.- Micrografias para diferentes materiales base y con el proceso SMAW

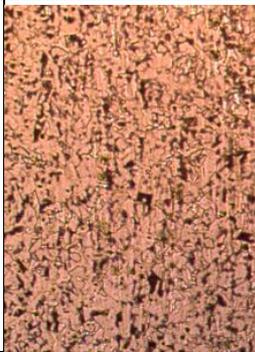
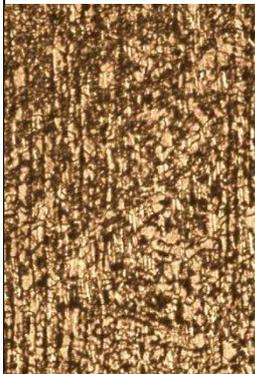
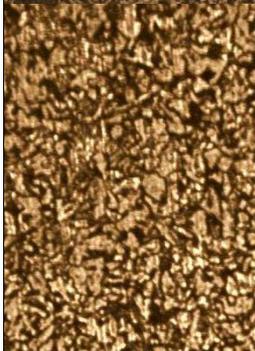
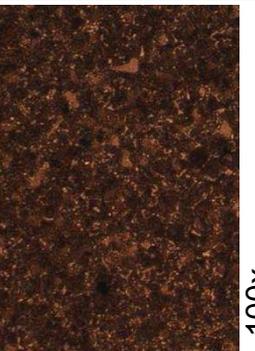
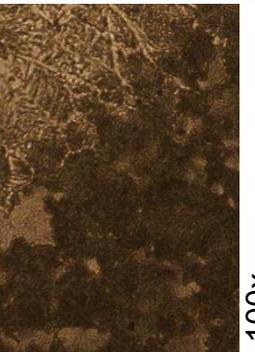
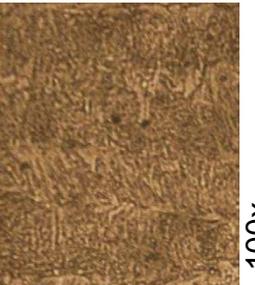
Material	Metal Base	Metal Base - ZAC	ZAC	ZAC - Soldadura	Soldadura
A-36	 100x	 100x	 100x	 100x	 100x
A-588	 100x	 100x	 100x	 100x	 100x
A-131	 100x	 100x	 100x	 100x	 100x
AISI 1045	 100x	 100x	 100x	 100x	 100x

Figura 4.23.- Micrografías para diferentes materiales base y con el proceso GMAW

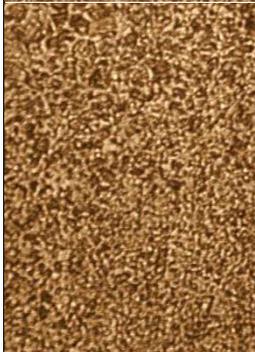
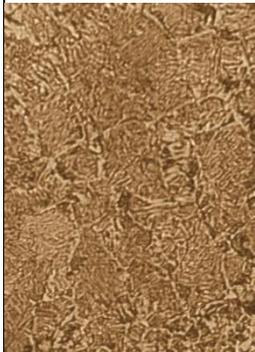
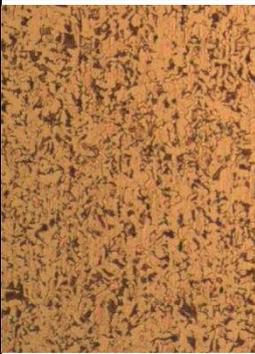
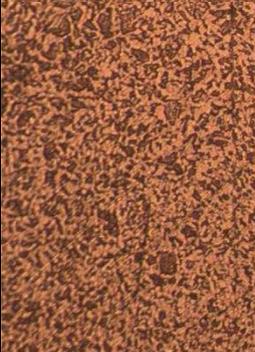
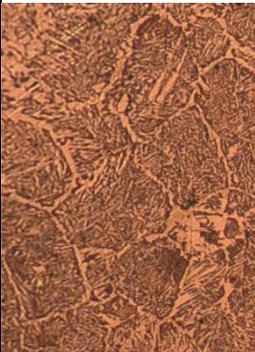
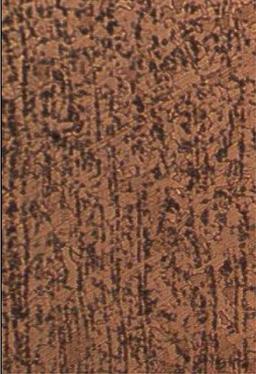
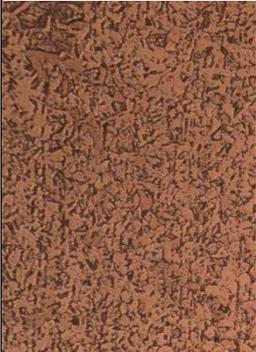
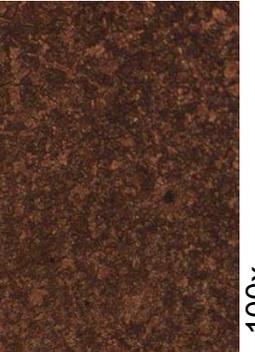
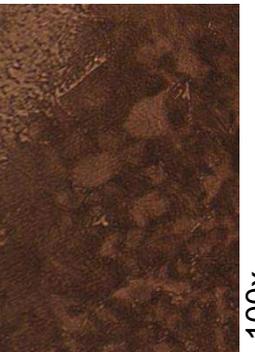
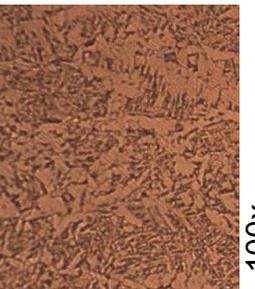
Material	Metal Base	Metal Base - ZAC	ZAC	ZAC - Soldadura	Soldadura
A-36	 100x	 100x	 100x	 100x	 100x
A-588	 100x	 100x	 100x	 100x	 100x
A-131	 100x	 100x	 100x	 100x	 100x
AISI 1045	 100x	 100x	 100x	 100x	 100x

Figura 4.24.- Micrografias para diferentes materiales base y con el proceso SAW

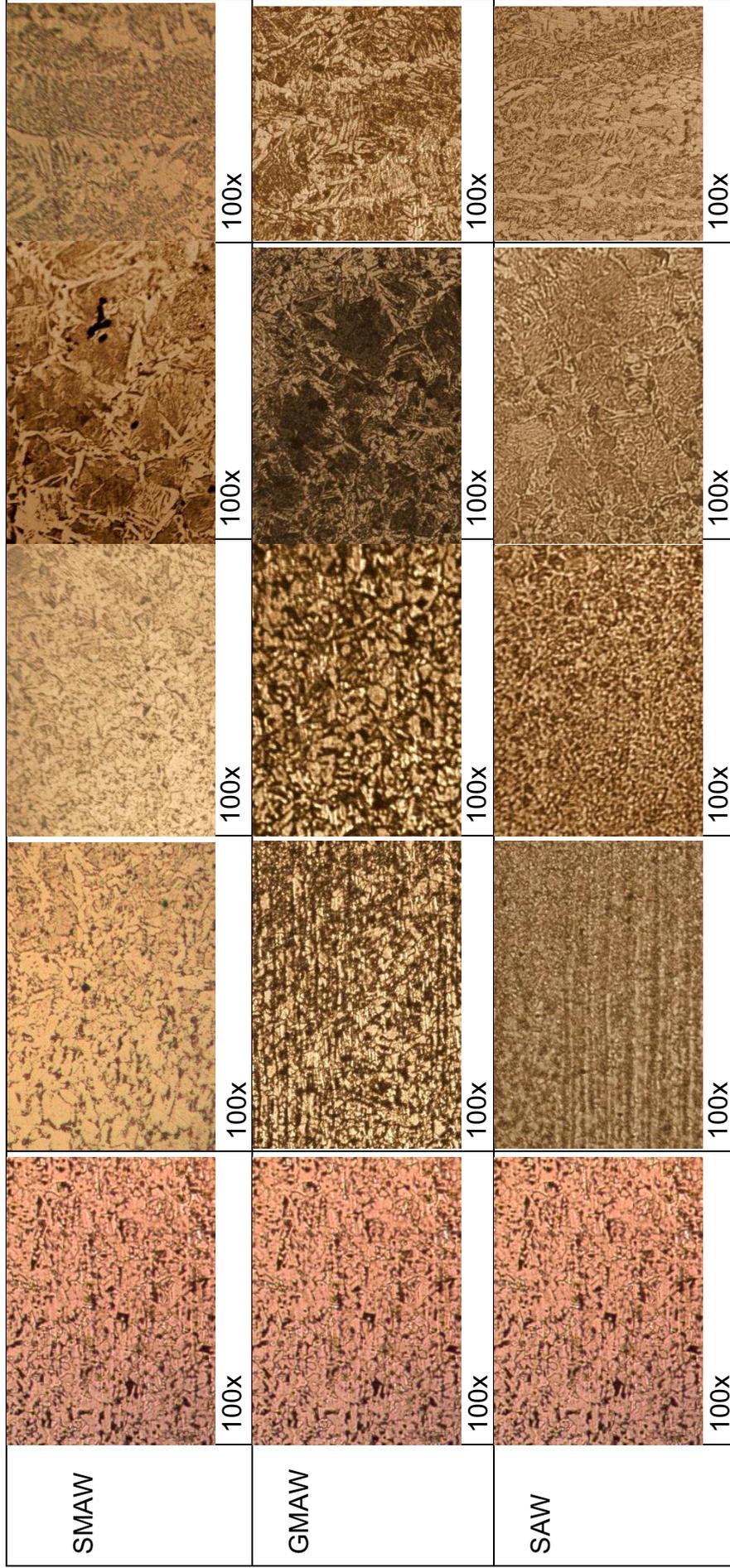


Figura 4.25.- Micrografías para el material A-36 en diferentes procesos de soldadura

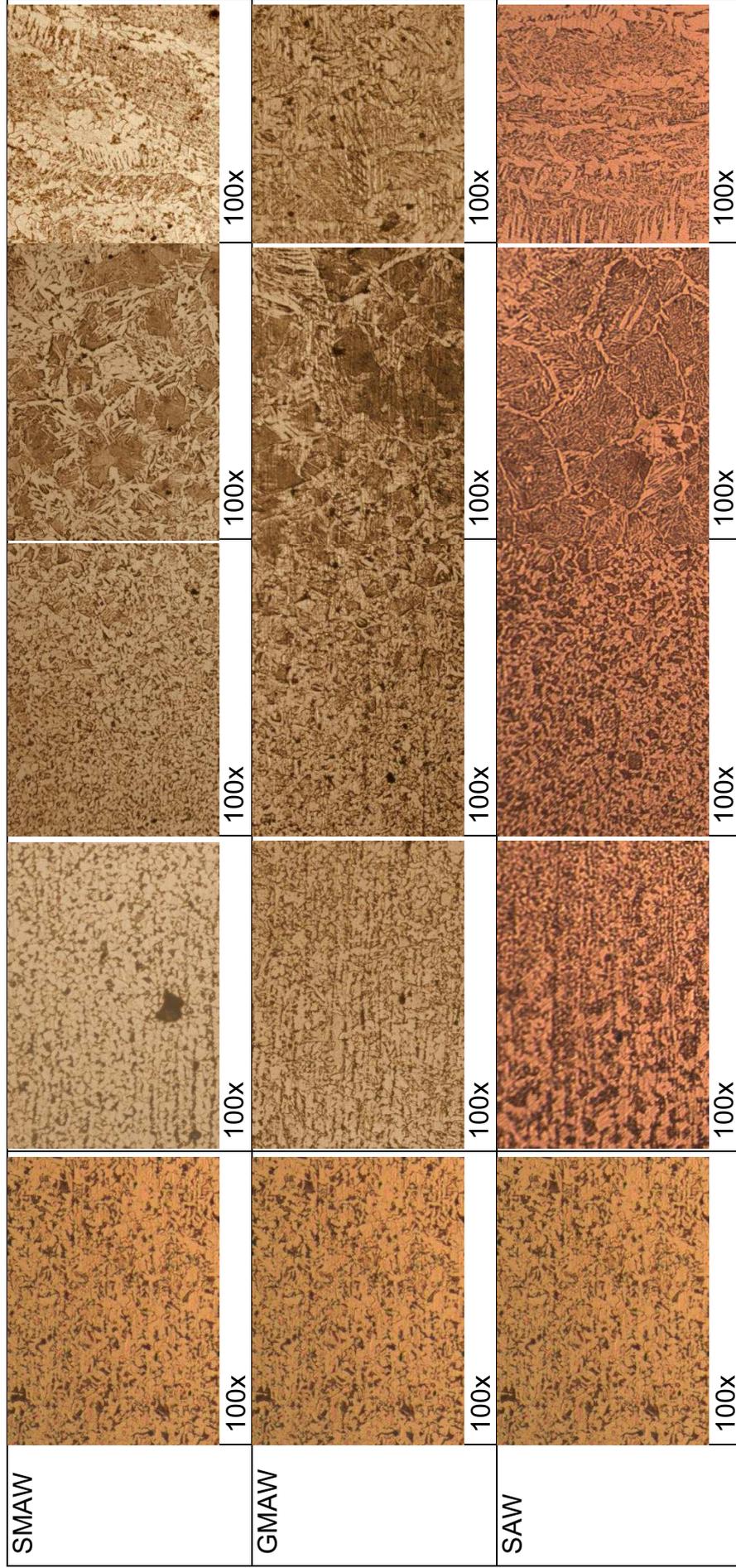


Figura 4.26.- Micrografias para el material A-588 en diferentes procesos de soldadura

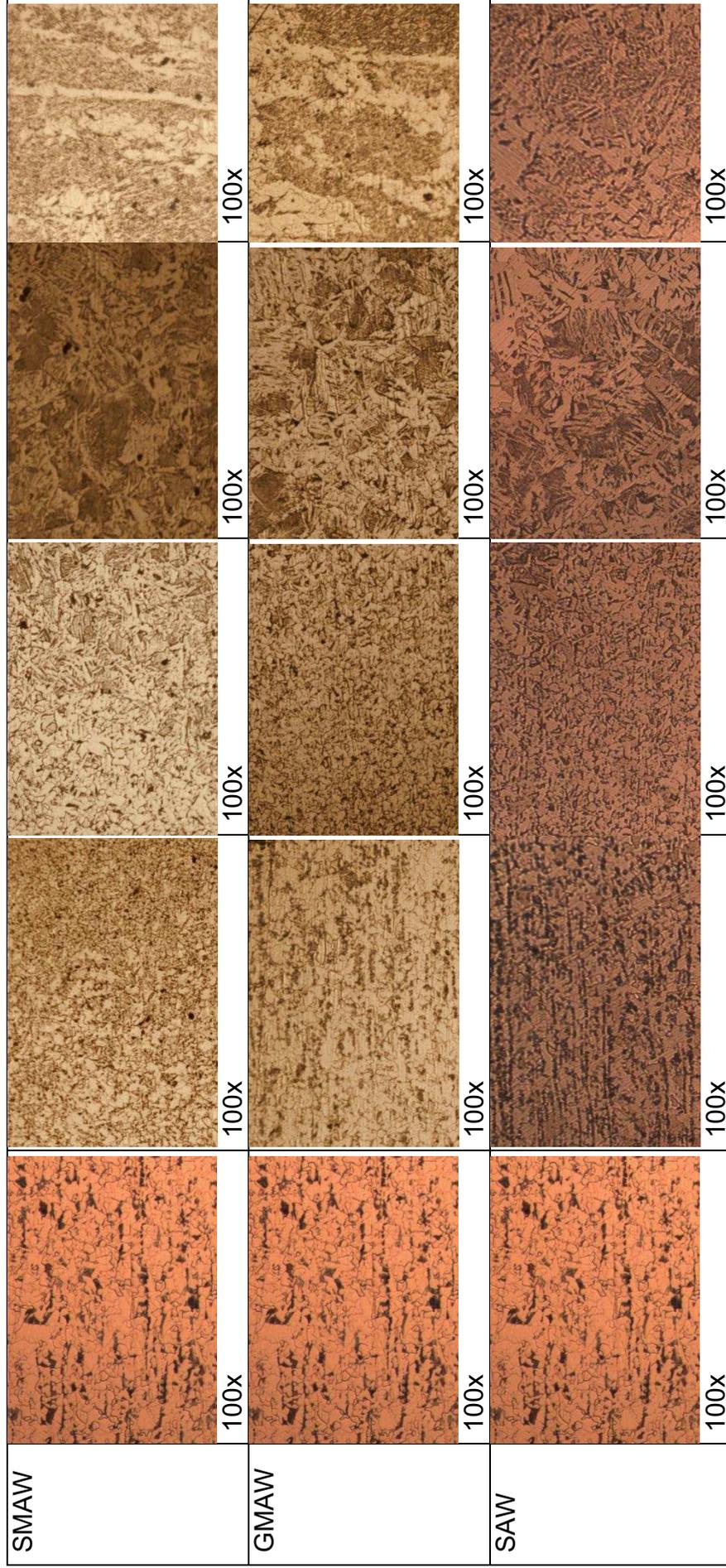


Figura 4.27.- Micrografías para el material A-131 en diferentes procesos de soldadura

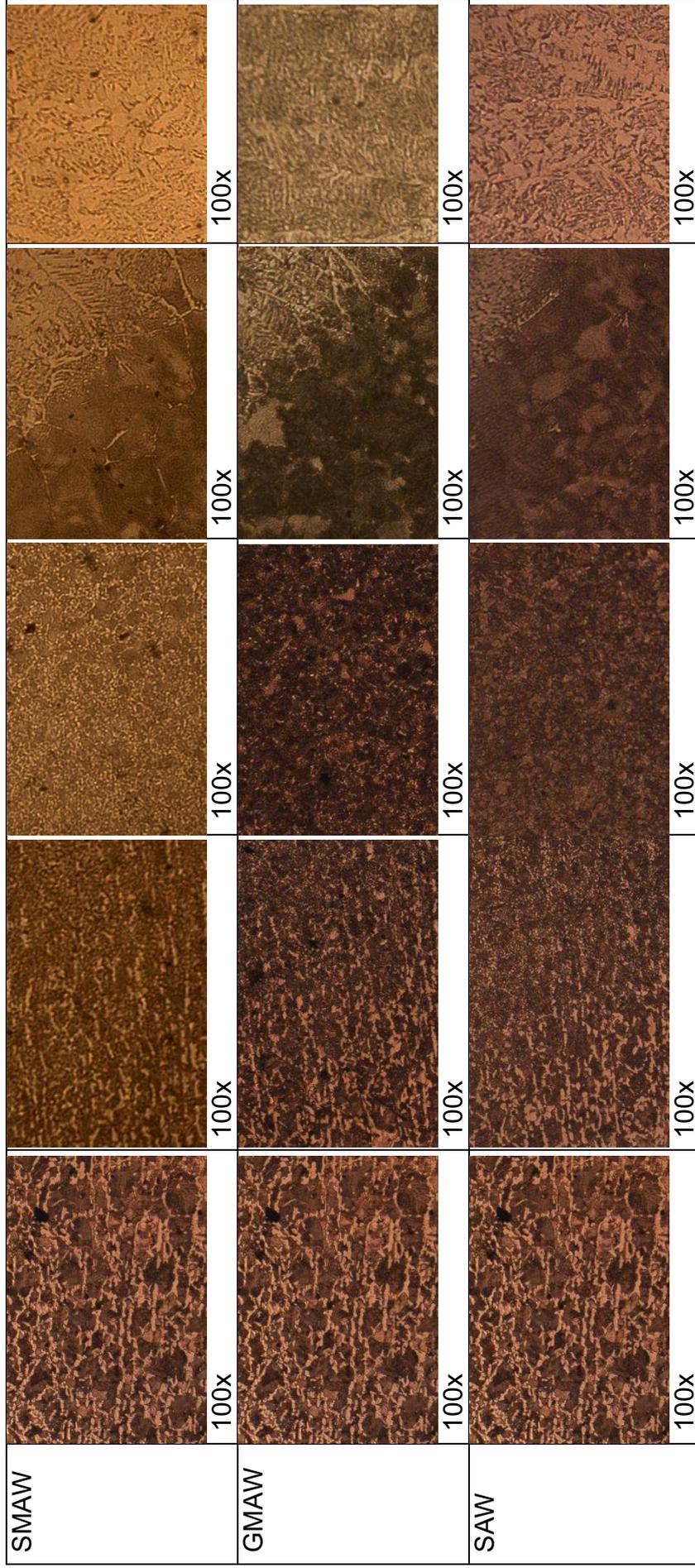


Figura 4.28.- Micrografías para el material AISI 1045 en diferentes procesos de soldadura

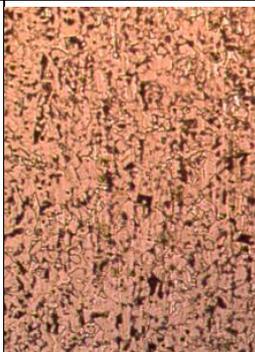
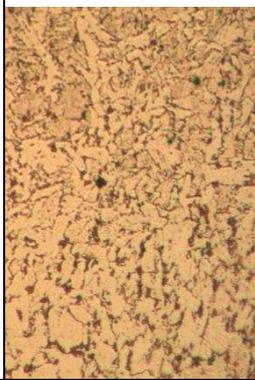
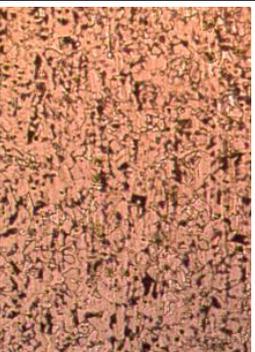
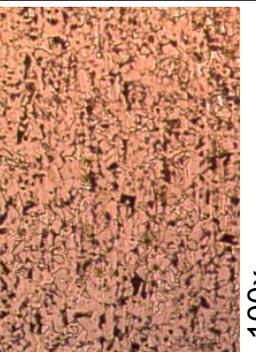
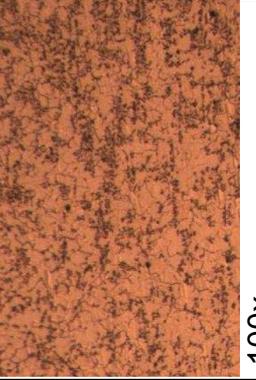
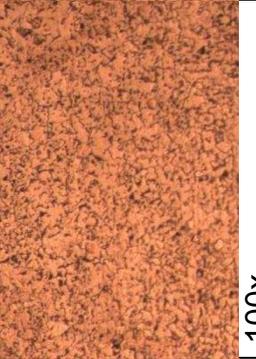
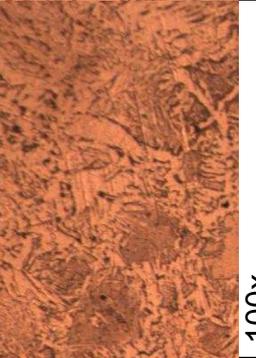
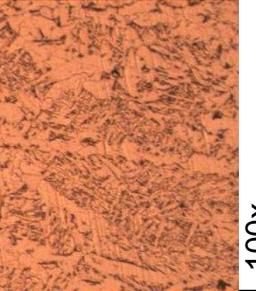
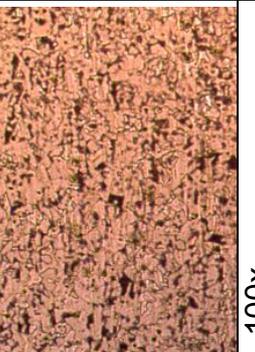
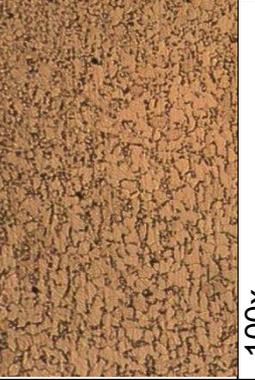
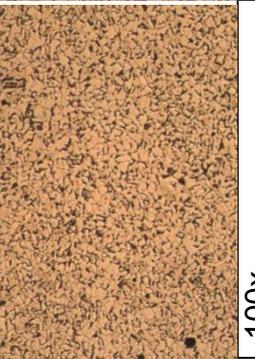
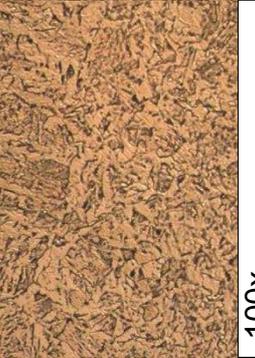
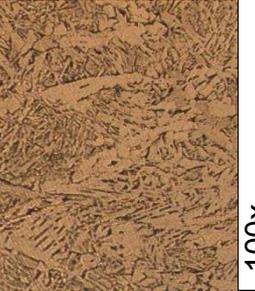
Material	Metal Base	Metal Base - ZAC	ZAC	ZAC - Soldadura	Soldadura
A-36 Espesor : 12 mm	 100x	 100x	 100x	 100x	 100x
A-36 Espesor : 10 mm	 100x	 100x	 100x	 100x	 100x
A-36 Espesor : 8 mm	 100x	 100x	 100x	 100x	 100x
A-36 Espesor : 6 mm	 100x	 100x	 100x	 100x	 100x

Figura 4.29.- Micrografías para diferentes espesores de placa

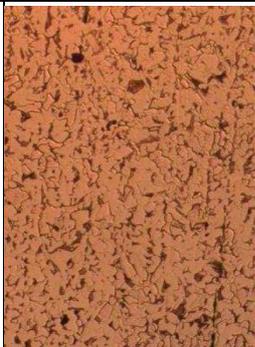
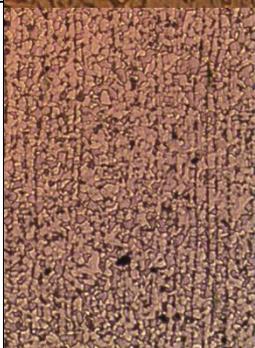
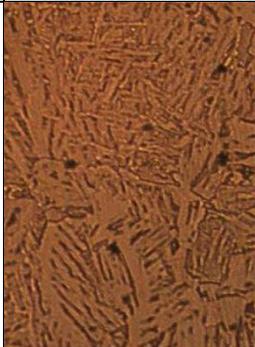
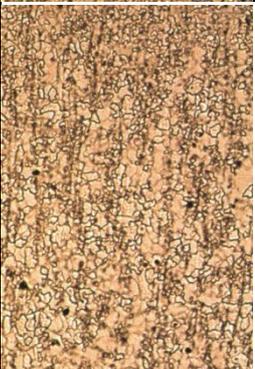
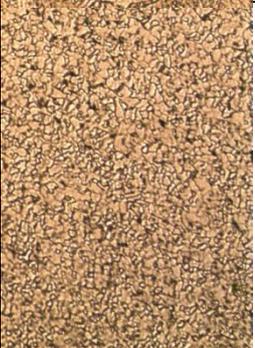
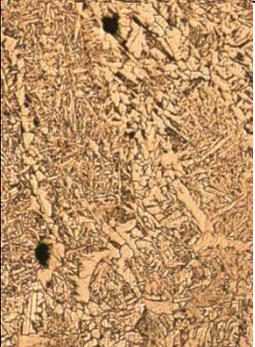
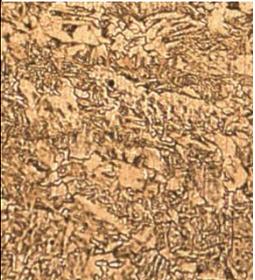
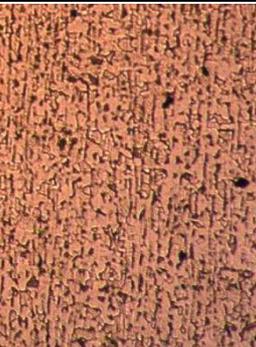
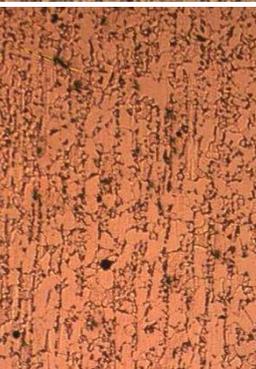
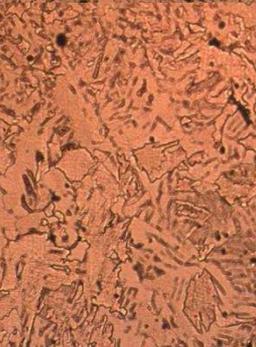
Material	Metal Base	Metal Base - ZAC	ZAC	ZAC - Soldadura	Soldadura
A-36 Amperaje alto	 100x	 100x	 100x	 100x	 100x
A-36 Amperaje normal	 100x	 100x	 100x	 100x	 100x
A-36 Amperaje bajo	 100x	 100x	 100x	 100x	 100x

Figura 4.30.- Micrografías para diferentes niveles de corriente

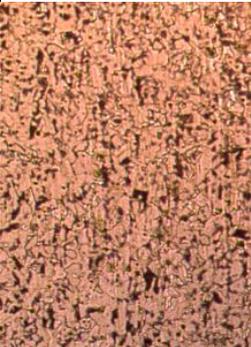
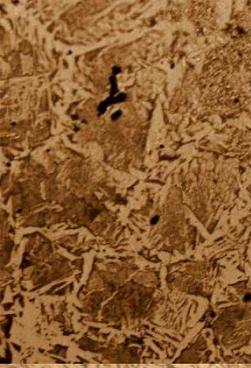
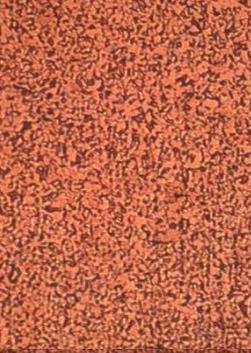
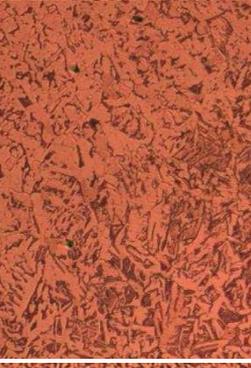
Material	Metal Base	Metal Base - ZAC	ZAC	ZAC - Soldadura	Soldadura
A-36	 100x	 100x	 100x	 100x	 100x
A-36 Precalentamiento	 100x	 100x	 100x	 100x	 100x
A-36 Tratamiento térmico	 100x	 100x	 100x	 100x	 100x

Figura 4.31.- Micrografías con y sin precalentamiento y tratamiento térmico

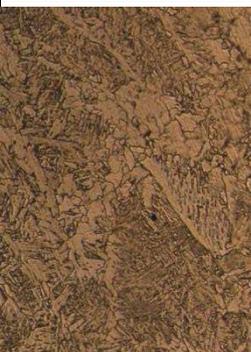
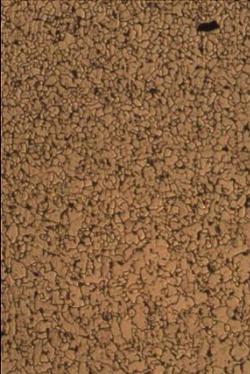
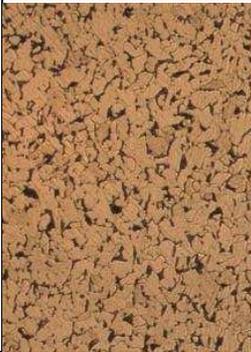
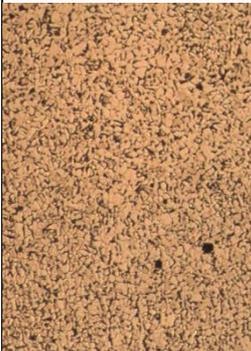
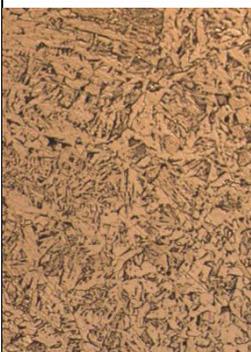
Material	Metal Base	Metal Base - ZAC	ZAC	ZAC - Soldadura	Soldadura
A-36 Velocidad rápido	 100x	 100x	 100x	 100x	 100x
A-36 Velocidad lenta	 100x	 100x	 100x	 100x	 100x
A-36 Normal	 100x	 100x	 100x	 100x	 100x

Figura 4.32.- Micrografías a diferentes velocidades de soldadura

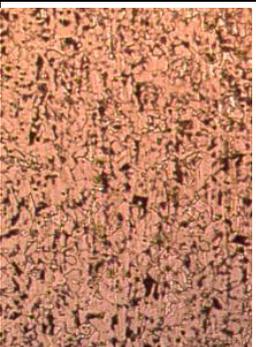
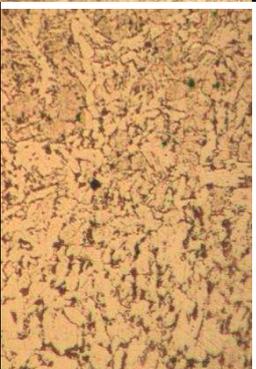
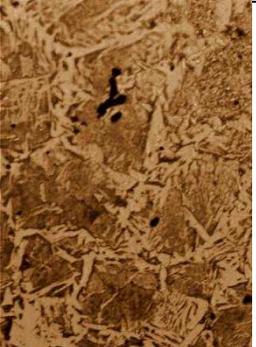
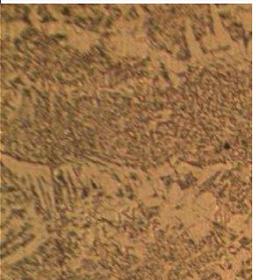
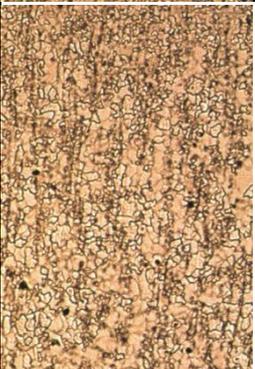
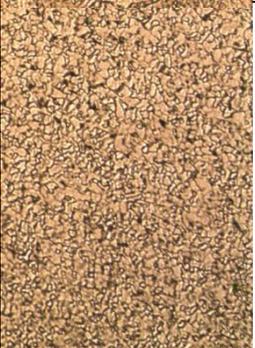
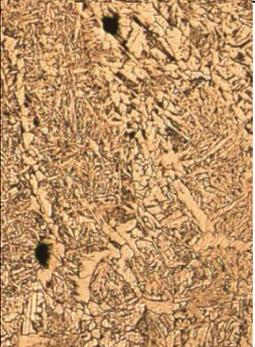
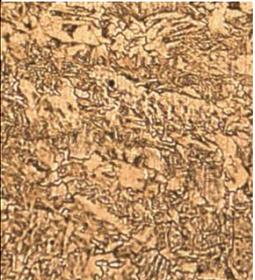
Material	Metal Base	Metal Base - ZAC	ZAC	ZAC - Soldadura	Soldadura
A-36 DC+	 100x	 100x	 100x	 100x	 100x
A-36 AC	 100x	 100x	 100x	 100x	 100x

Figura 4.33.- Micrografías para diferentes polaridades de corriente

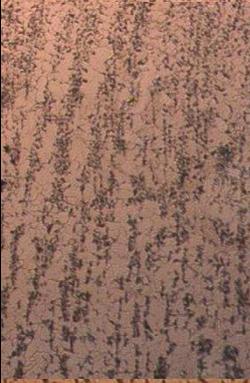
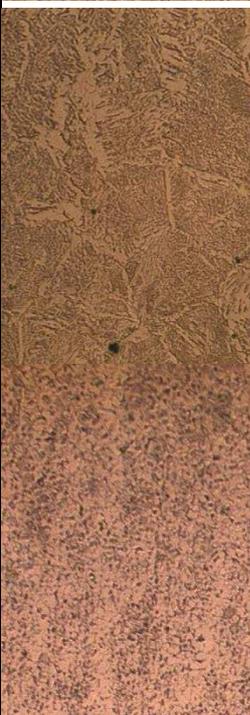
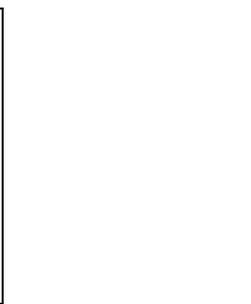
Material	Metal Base	Metal Base - ZAC	ZAC	ZAC - Soldadura	Soldadura
A-36 1er. cordón Con espera	 100x	 100x	 100x	 100x	 100x
A-36 1er cordón Sin espera	 100x	 100x	 100x	 100x	 100x

Figura 4.34.- Micrografías primer cordón con y sin espera entre pases.

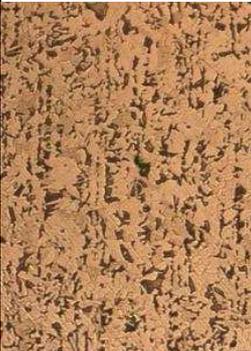
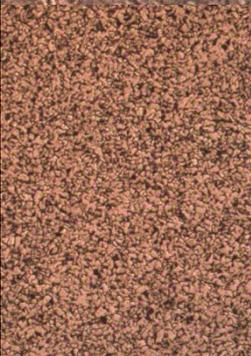
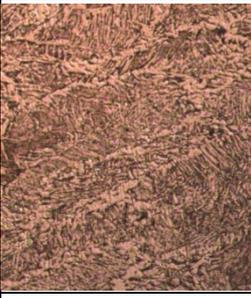
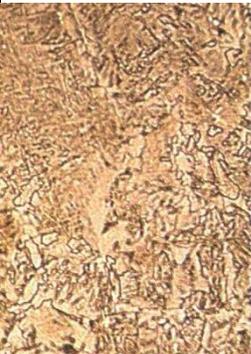
Material	Metal Base	Metal Base - ZAC	ZAC	ZAC - Soldadura	Soldadura
A-36 2do cordón Con espera	 100x	 100x	 100x	 100x	 100x
A-36 2do cordón Sin espera	 100x	 100x	 100x	 100x	 100x

Figura 4.35.- Micrografías segundo cordón con y sin espera entre pases.

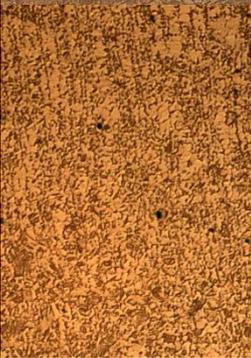
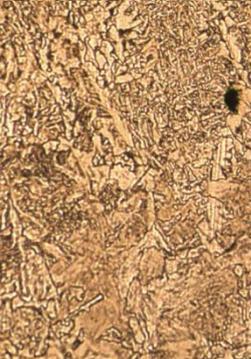
Material	Metal Base	Metal Base - ZAC	ZAC	ZAC - Soldadura	Soldadura
A-36 3er cordón Con espera	 100x	 100x	 100x	 100x	 100x
A-36 3er cordón Sin espera	 100x	 100x	 100x	 100x	 100x

Figura 4.36.- Micrografías tercer cordón con y sin espera entre pases.

#### 4.8. BARRIDO DE DUREZAS

El barrido de durezas se lo realizó a cada una de las probetas mediante la escala Rockwell B, ya que como se explicó anteriormente, se encuentra dentro del rango de valores de las diferentes zonas presentes y materiales usados. La distancia permitida entre cada punto de dureza es de tres veces el diámetro. El diámetro de la punta para la escala Rockwell B es de  $1/16''$ , es decir que para este caso la separación mínima es de  $0.1875''$  (4.76 mm).

Se consideró inicialmente la opción de realizar el barrido de durezas bajo la escala Rockwell C, sin embargo los valores generados resultaron en un rango en el cual esta escala perdía confiabilidad. Por lo tanto se realizó dicho barrido con la escala de durezas correspondiente a Rockwell B.

Además, debido a la unificación de procedimientos de soldadura considerado al principio de este capítulo, el acero de medio contenido de carbono AISI 1045 fue soldado bajo las mismas condiciones. Esto tiene suma importancia en el barrido de durezas de las probetas de este acero porque el electrodo con el que fue soldado no es el recomendado ya que el cordón de soldadura genera menor dureza que el propio material base.



Figura 4.37.- Medidas de durezas tomadas en la soldadura y zona afectada por el calor



Figura 4.38.- Medición de las durezas

4.8.1. DUREZAS EN DIFERENTES PROCESOS DE SOLDADURA Y MATERIALES BASE

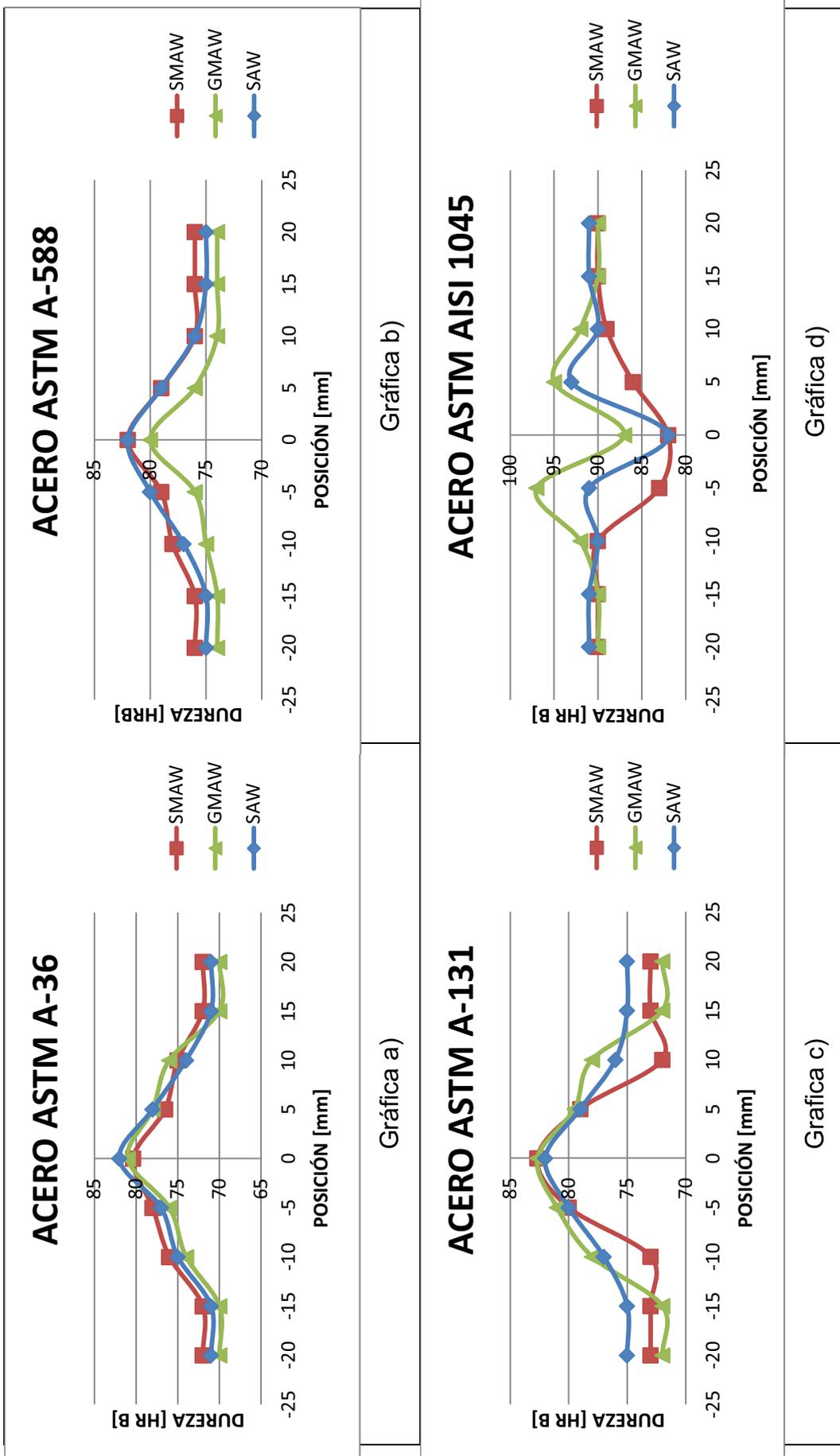


Gráfico 4.8.- Dureza Vs Distancia: a) A-36, b) A-588, c) A-131 y d) AISI 1045; en los diferentes procesos de soldadura

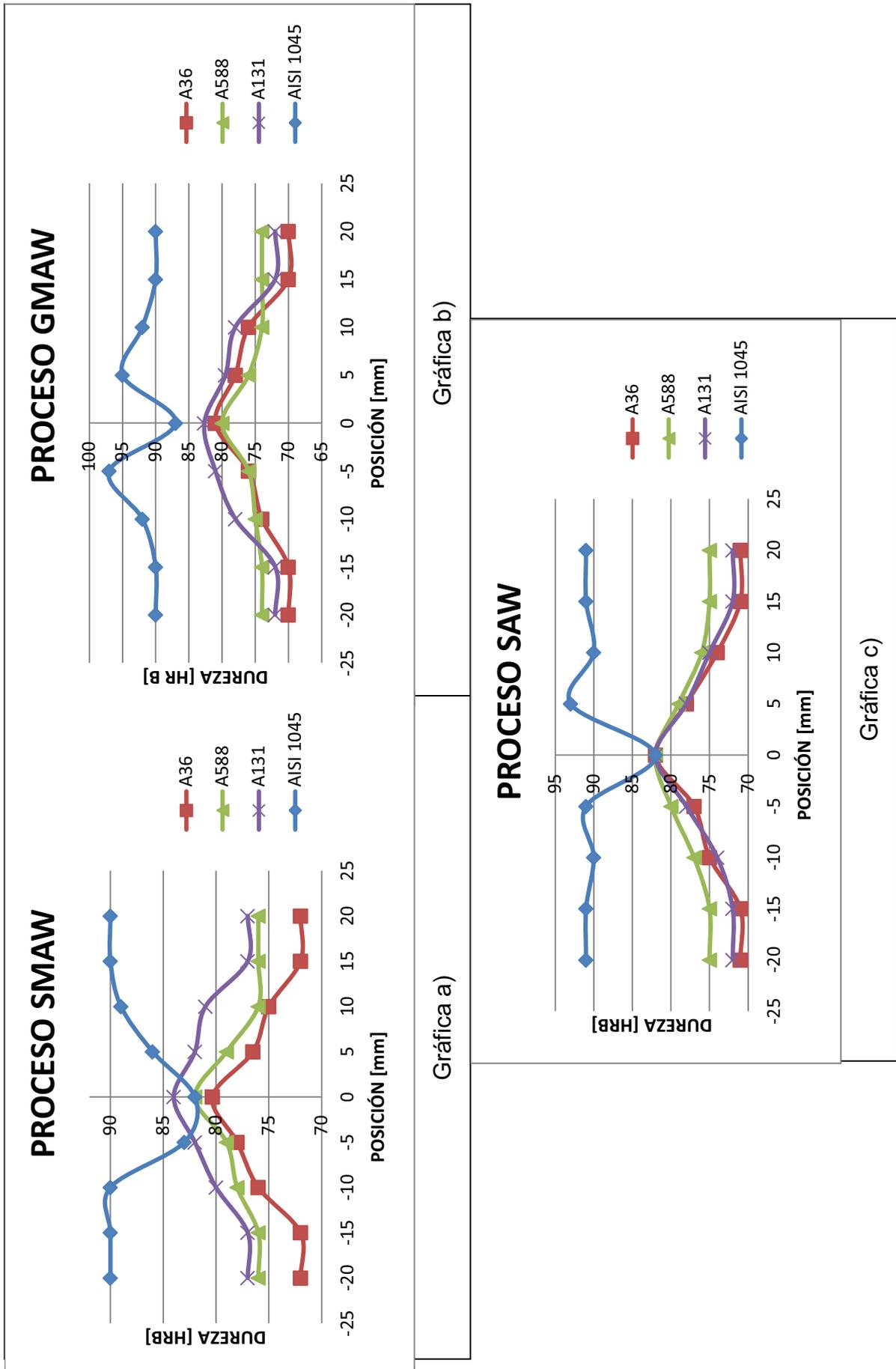


Gráfico 4.9.- Dureza Vs Distancia: a) SMAW, b) GMAW y c) SAW; en los diferentes materiales base.

**4.8.2. DUREZAS EN DIFERENTES ESPESORES DE PLACA**

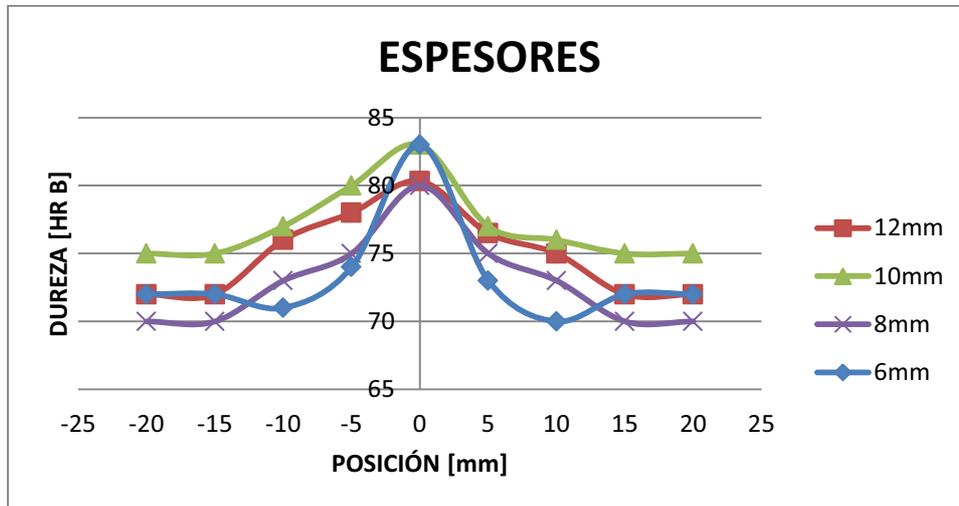


Gráfico 4.10.- Dureza Vs Distancia para los diferentes espesores de placa

**4.8.3. DUREZAS EN DIFERENTES CORRIENTES DE SOLDADURA**

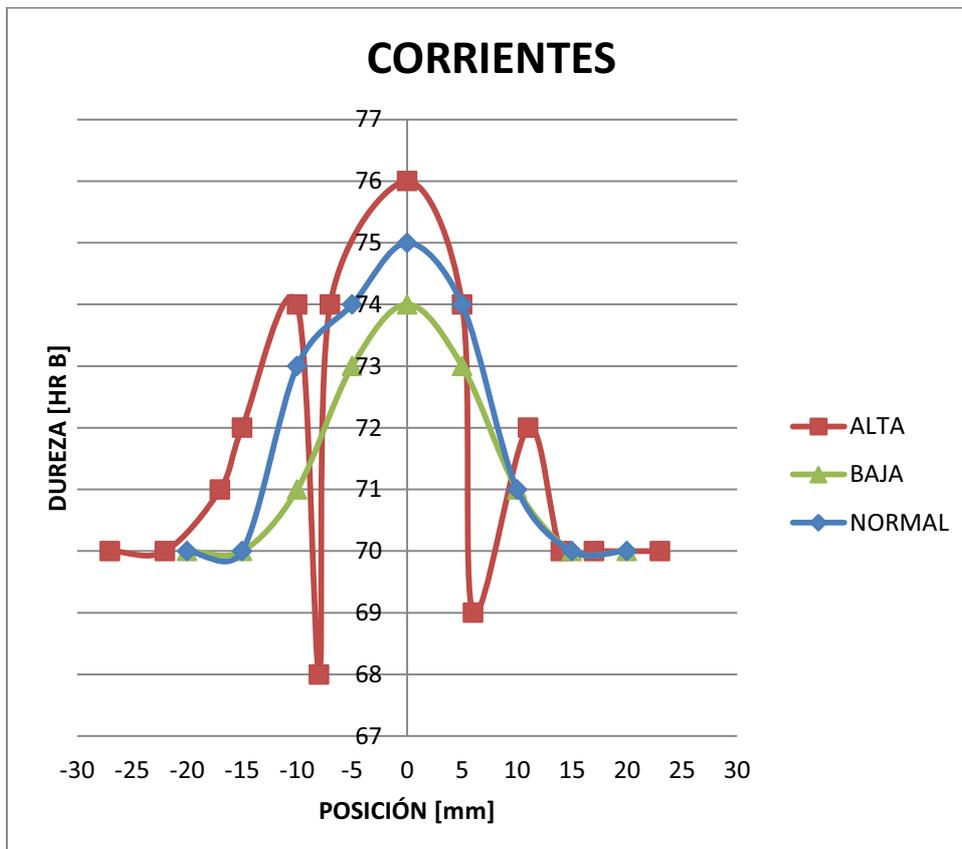


Gráfico 4.11.- Dureza Vs Distancia para los corrientes baja, normal y alta

#### 4.8.4. DUREZAS EN PROBETAS CON Y SIN PRECALENTAMIENTO Y TRATAMIENTO TÉRMICO POST-SOLDADURA

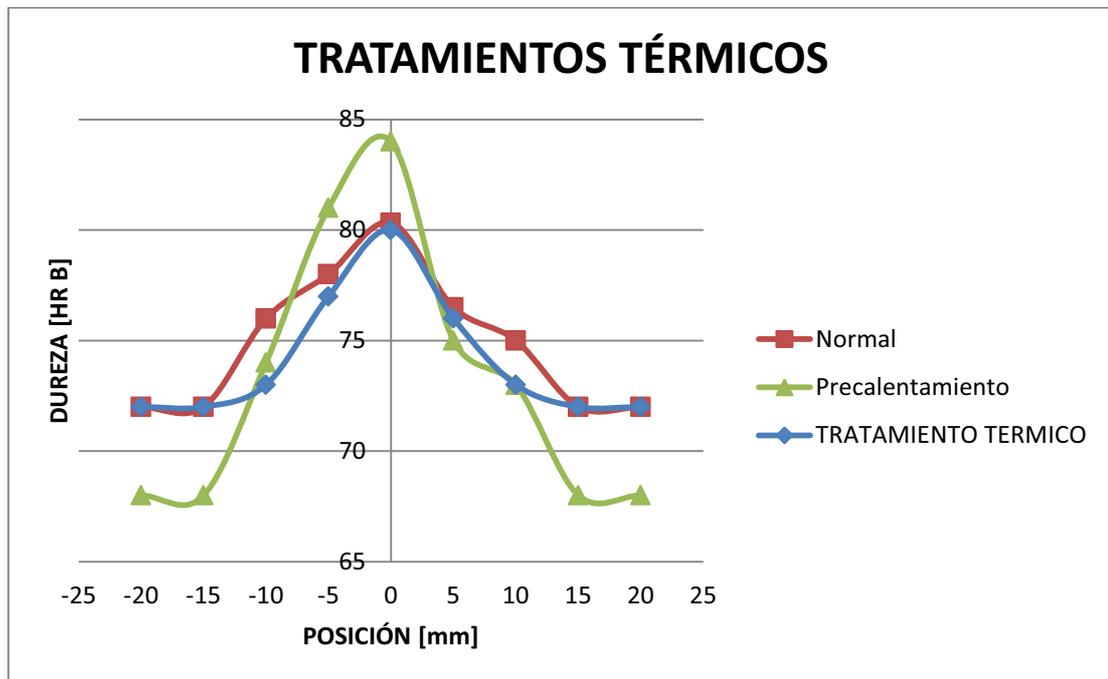


Gráfico 4.12.- Dureza Vs Distancia para probetas con y sin precalentamiento y tratamiento térmico post-soldadura

#### 4.8.5. DUREZAS PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE SOLDADURA

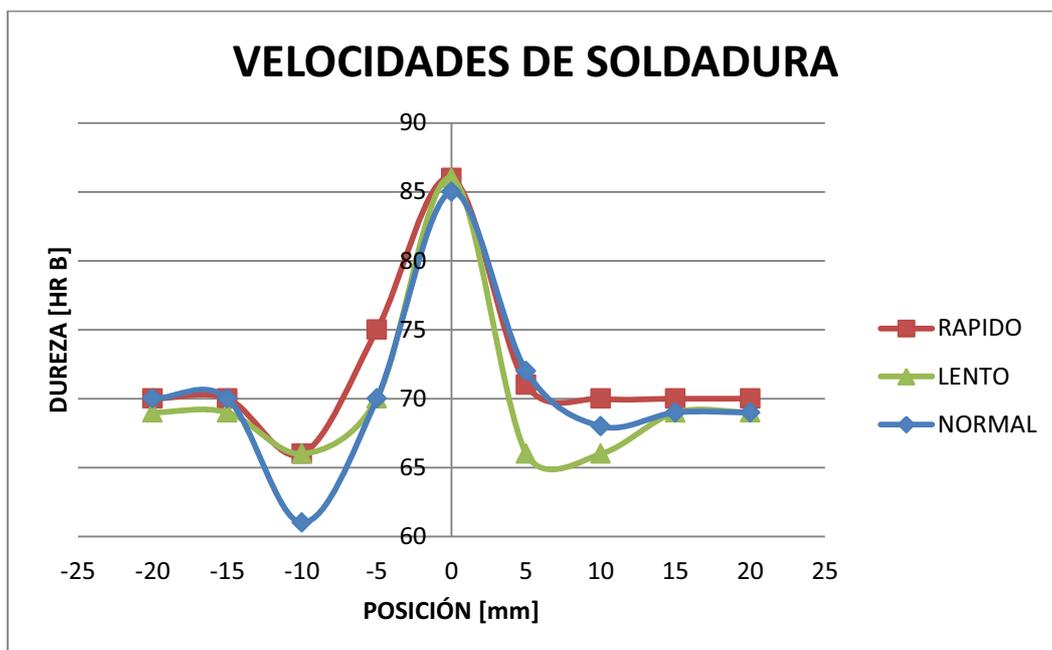


Gráfico 4.13.- Dureza Vs Distancia para diferentes velocidades de soldadura

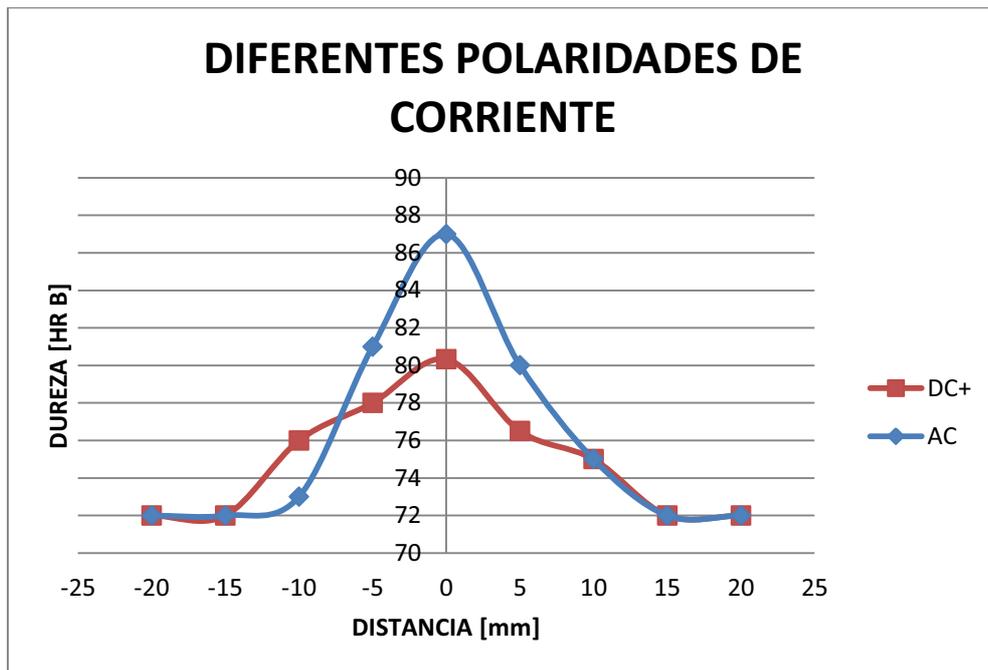


Gráfico 4.14.- Dureza Vs Distancia para diferentes polaridades de corriente

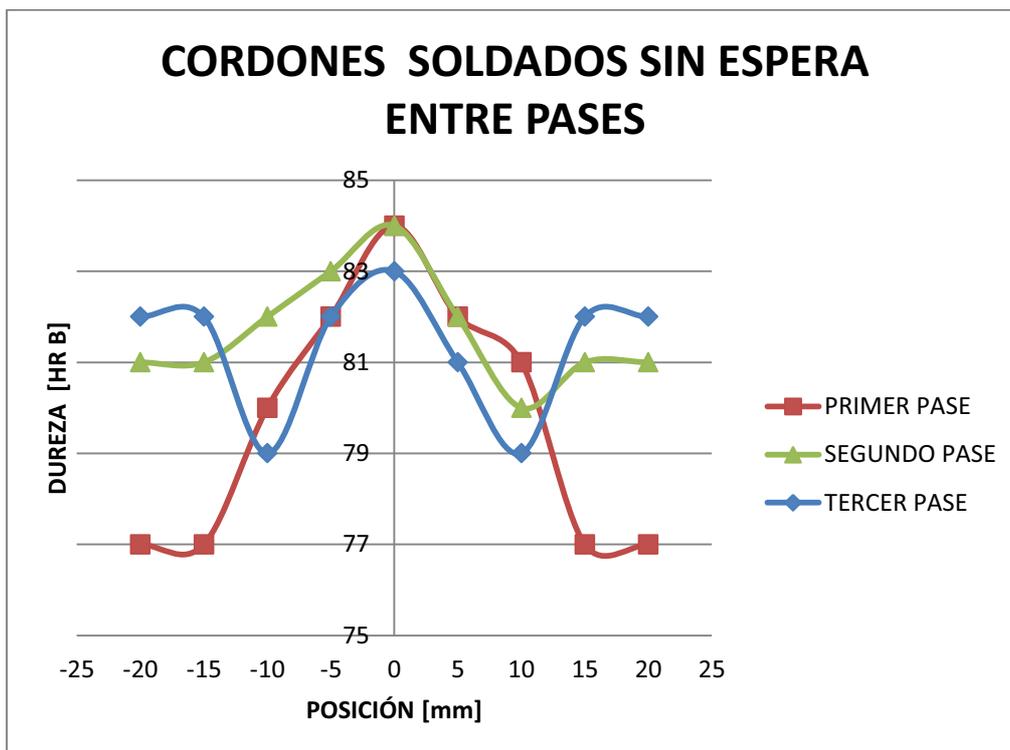


Gráfico 4.15.- Dureza Vs Distancia para una junta soldada sin espera entre pases

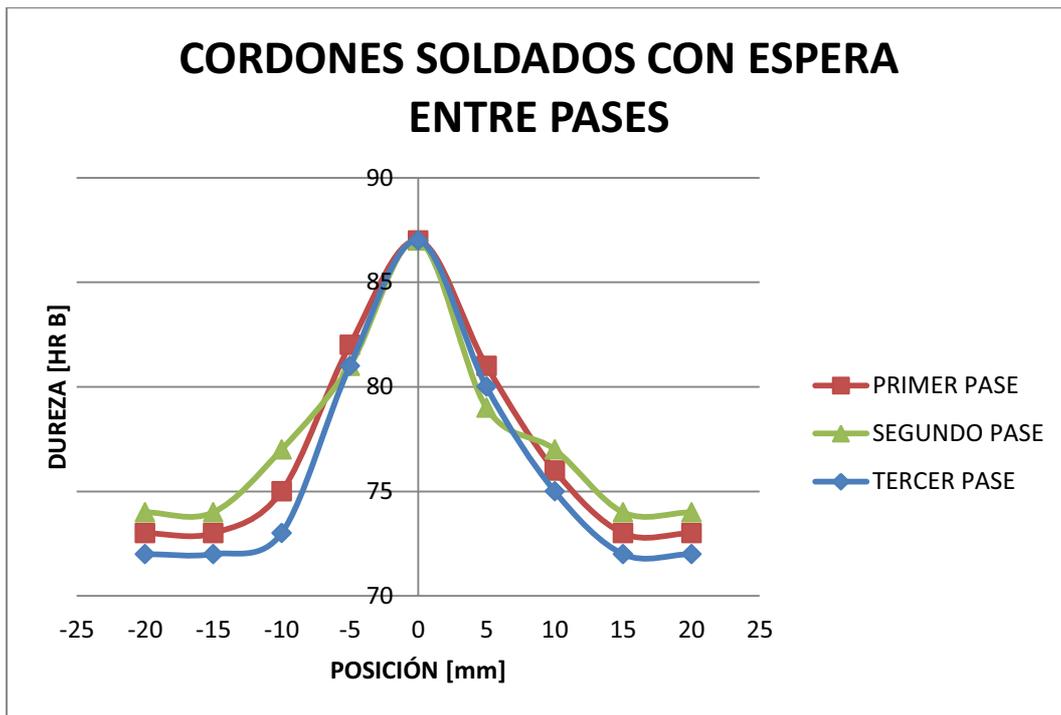


Gráfico 4.16.- Dureza Vs Distancia para una junta soldada con espera entre pases

La tabla 4.40 muestra la influencia que presenta el último cordón con respecto a los anteriores.

Tabla 4.19.- Dureza Vs Distancia para diferentes pasadas con espera

Condición	#Pase	Durezas [RH B]		
Sin espera	Primer Pase	84	78	78
	Segundo Pase		84	76
	Tercer Pase			83
Con espera	Primer Pase	87	80	83
	Segundo Pase		87	83
	Tercer Pase			87

## **CAPÍTULO 5**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

#### **5.1. ANALISIS DE LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR PARA DIFERENTES ACEROS Y CON DIFEENTES PROCESOS.**

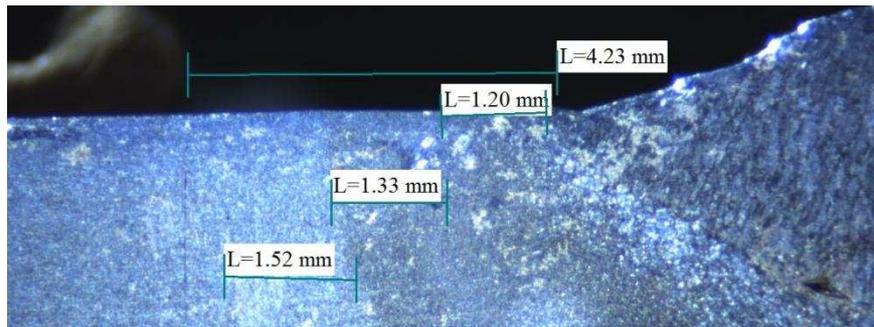
Al comparar procesos de soldadura se obtiene que mediante los datos de la tabla 4.5 el mayor calor aportado se presenta con el proceso de soldadura SAW, seguido por el proceso de soldadura SMAW y finalmente GMAW. De lo anterior y con la ayuda de la ecuación 3.1 se observa que la velocidad de enfriamiento es inversamente proporcional al calor aportado.

Con lo mencionado anteriormente se esperaría que el proceso de soldadura SAW presente la mayor zona afectada por el calor con respecto a los otros dos procesos, y en efecto esto se observa en las macrografías. Sin embargo, en la zona afectada por el calor aledaña al refuerzo de soldadura esto no sucede, por el contrario para los procesos de soldadura SMAW y GMAW cerca al refuerzo de soldadura la ZAC es mayor, y esto se debe al movimiento oscilante que se le debe dar al electrodo y alambre continuo con protección de gas, al contrario del proceso SAW en donde la boquilla se traslada de manera lineal, sin necesidad de un movimiento oscilante. Es necesario recalcar que para el proceso SAW el procedimiento se contempló con dos cordones debido a la gran tasa de aportación que presenta este proceso con respecto a los otros.

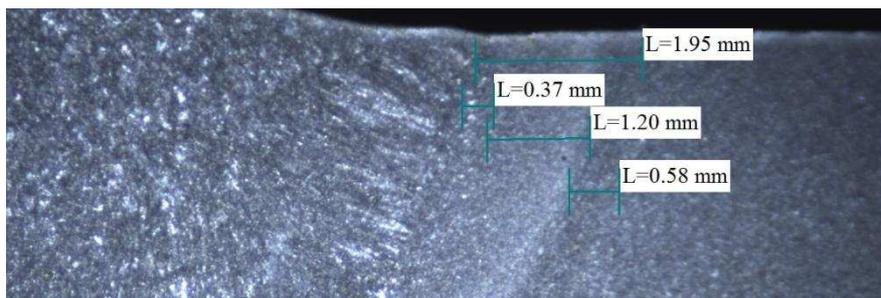
Además, las macrografías muestran que la mayor velocidad de enfriamiento permite que las zonas dentro de la zona afectada por el calor sean de menor magnitud, claramente se muestra en el proceso de soldadura GMAW, en donde prácticamente estas zonas son disminuidas con respecto a los otros dos procesos. Esto último se debe al menor tiempo que se tiene para la formación de las zonas y a la temperatura pico alcanzada con este proceso, además del enfriamiento que se obtiene debido a la diferencia de temperaturas. La última zona o de sensibilidad azul es prácticamente imperceptible con la macrografía.

Con respecto al direccionamiento del flujo de calor, el cual puede ser bidireccional o tridimensional, se observa que los procesos SMAW y GMAW presentan

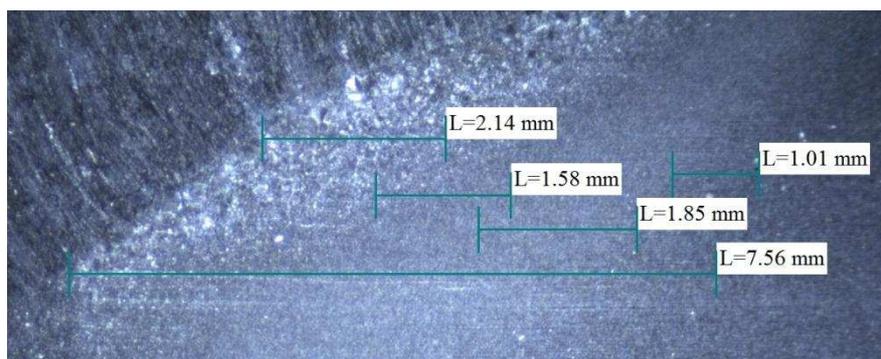
direccionamiento tridimensional, mientras que SAW presenta una condición intermedia de direccionamiento, es decir que puede ser tanto tridimensional como bidimensional, claramente se evidencia en las macrografías en donde para el proceso de soldadura SAW el límite de la ZAC es independiente de la forma del cordón. Por el contrario, para los procesos GMAW y SMAW la ZAC presenta una forma similar a la del cordón de soldadura.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.1.- Medidas de la ZAC en diferentes procesos. a) Proceso SMAW, b) Proceso GMAW y c) Proceso SAW. Fotos tomadas a 10x.

Con respecto al contenido de carbono de los materiales se observa que mientras mayor sea el porcentaje de este elemento, mayor será la ZAC, esto se explica al

observar el Anexo 3, en donde se muestra que al aumentar el contenido de carbono se disminuye la conductividad térmica del material, lo cual disminuye el flujo de calor. En las macrografías correspondientes al acero AISI 1045 se observa claramente un aumento de la ZAC con respecto a los otros materiales usados, en todos los procesos de soldadura.

El tamaño de grano va a ser de mucha importancia para la determinación de la microestructura y sus propiedades, la cual a su vez es influenciada por la velocidad de enfriamiento.

Para los aceros A-36, A-588 y A-131 soldados con los procesos de soldadura SMAW y GMAW, las micrografías muestran la microestructura de ferrita acicular y aliotromorfica delimitando colonias de perlita en la zona de recalentamiento; en cambio que para el proceso SAW, en la misma zona, se muestra el crecimiento de la fase Widmanstaetten, ferrita acicular y aliotromorfica en colonias de perlita, esto se produce por la velocidad de enfriamiento. El mayor calor aportado y menor tiempo de enfriamiento en el proceso de soldadura SAW permite el crecimiento de la microestructura de Widmanstaetten, a diferencia de los otros dos procesos.

Además, se puede observar en ciertas zonas el impedimento que tiene el crecimiento de la ferrita Widmanstaetten por la presencia de ferrita acicular.

Las otras zonas presentes en la ZAC, tratadas en el capítulo 4, muestran una microestructura parecida y únicamente se diferencia por el tamaño de la zona, esto fue explicado y se puede apreciar de mejor manera en las macrografías

Por otra parte, en el acero AISI 1045 las micrografías muestran colonias de perlita con presencia de ferrita en menor cantidad, y con esporádicas apariciones de ferrita acicular, esto para todos los procesos de soldadura estudiados, debido al porcentaje de Carbono mayor que presenta este material.

Las gráficas de las durezas 4.10 y 4.11 obtenidas, difieren levemente de las teóricas debido a la escala de medición. Sin embargo, cumplen con las condiciones adecuadas de dureza para la soldadura en los aceros A-36, A-588 y A-131, explicadas en el capítulo 4, pero no en el Acero AISI 1045, en donde se observa que el cordón muestra un valor de dureza menor que el del material base, siendo insatisfactorio para los procedimientos de soldadura.

Se recomienda utilizar el electrodo sugerido por el fabricante y cálculos previos de precalentamiento para obtener una junta de mayor dureza que el acero AISI 1045.

Las macrografías se muestran en la figura 4.16 y micrografías en las tablas 4.25 a la 4.31

## **5.2. ANALISIS DE LA ZONA AFECTADA PARA DIFERENTES ESPESORES DE PLACA**

Mediante la tabla 4.6 se observa que el calor aportado aumenta conforme lo haga el espesor de la placa, esto debido a que la velocidad de soldadura debe disminuir cuando el espesor aumenta para poder rellenar correctamente la junta. De lo dicho anteriormente, se tiene que la velocidad de enfriamiento será menor para grandes espesores, además es necesario considerar el tipo de flujo de calor y el número de pases dados.

El tipo de flujo de calor puede ser bidimensional o tridimensional y va a depender del espesor relativo, este último disminuye con el espesor de la placa. Los valores obtenidos en cuanto a espesor relativo pueden observarse en la tabla 4.6, determinándose que en la probeta de espesor 12mm se genera un flujo de calor tridimensional, en cambio en las probetas cuyo espesor es de 10 y 8mm el flujo se va a encontrar en una condición intermedia, es decir tanto bidimensional como tridimensional, y por último para la probeta de 6mm el flujo va a producirse bidimensionalmente.

Un flujo tridimensional va a generar una zona afectada por el calor con la forma del cordón de soldadura, esto se observa claramente en la probeta cuyo espesor es de 12mm; en cambio las probetas de 10 y 8mm, en donde se presenta un flujo tanto tridimensional como bidimensional, la ZAC va a tener una forma no precisamente definida por el cordón de soldadura sino que la última zona tiende a terminar en límite con tendencia recta. Para la probeta en espesor de 6 mm debido al flujo de calor bidimensional la ZAC no sigue la forma del cordón de soldadura, y el límite de la zona afectada tiende a ser recto.

En cuanto al número de pases, las probetas de 8, 9 y 10mm se las realizó tres pases, en cambio la de 6mm únicamente se produjeron dos pases; debido al espesor el cual afecta el área de relleno de soldadura. Debido al número de pases dados se puede

retardar en mayor medida los regímenes de enfriamiento en los cordones subsiguientes.

Debido al número de pases y al menor calor aportado la probeta de 6mm presenta la menor ZAC.

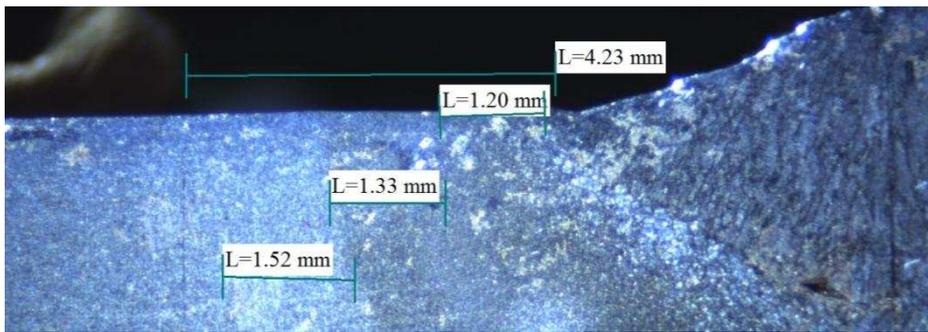
Al comparar las probetas soldadas con tres cordones se observa que las que presentan un espesor de 8 y 10mm muestran una zona afectada por el calor muy parecidas, a pesar de que la probeta de 10mm tiene mayor calor aportado por su velocidad de soldadura menor. Esto se explica por la diferencia de espesores que existe, ya que la probeta de 8mm presenta un flujo de calor predominante bidimensional, al contrario de la probeta de 10mm en donde el flujo se acerca más al límite tridimensional.

La probeta de 12mm presenta un calor aportado mayor por lo que la velocidad de enfriamiento es menor, se esperaría que su ZAC resulte ser la mayor de todas pero esto no sucede, ya que también se ve influenciada por el flujo de calor tridimensional, dando como resultado que la energía se distribuya en mayor área.

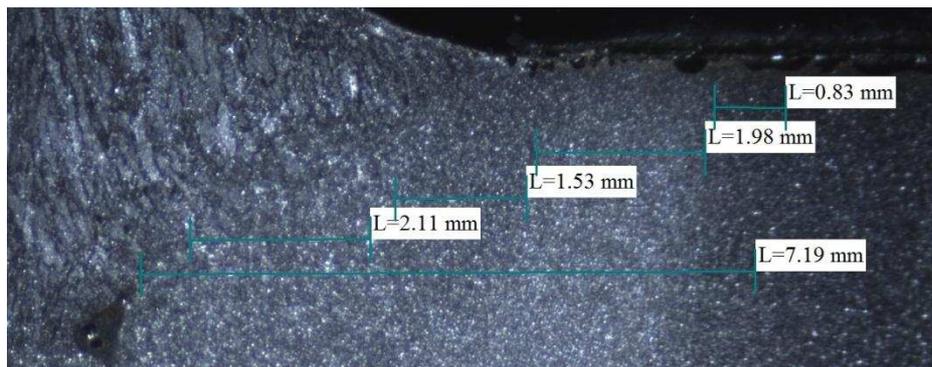
Las micrografías de la zona de recalentamiento en el espesor de 12mm, muestran la presencia de ferrita aliotromórfica delimitando colonias de perlita y además el crecimiento de ferrita acicular. La probeta de 10mm en esta zona además de ferrita aliotromórfica y colonias de perlita, se observa la microestructura de Widmanstätten. La probeta de espesor de 8mm presenta ferrita aliotromórfica con colonias de perlita y menores cantidades de la estructura Widmanstätten que la de 10mm. La probeta de 8mm presenta granos de ferrita acicular y colonias de perlita además debido a la menor energía de entrada por su velocidad de soldadura, los granos de la zona de recalentamiento son de menor tamaño que los de mayor espesor. Las zonas aledañas a la de recalentamiento se reproducen normalmente pero bajo diferentes tamaños según el calor que se haya aportado.

La gráfica 4.12 muestra la influencia que presenta el espesor de la placa con respecto a la dureza tomada a diferentes distancias, sin embargo no se muestra como una variación muy relevante ya que el cambio que se produce es leve.

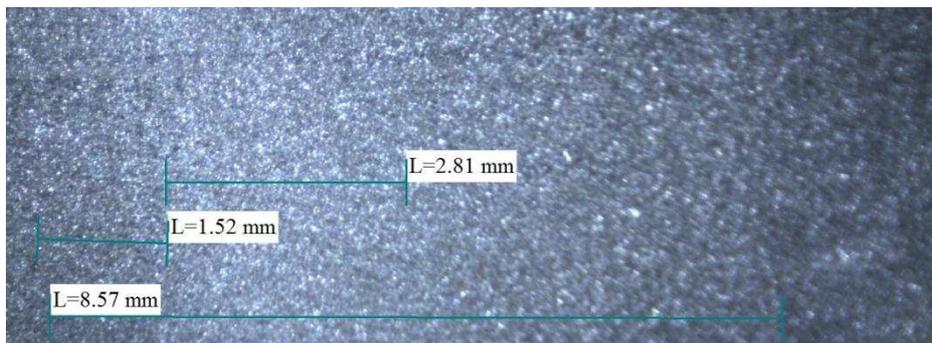
Las macrografías para esta condición se muestran en la figura 4.17 y las micrografías en la Figura 4.29.



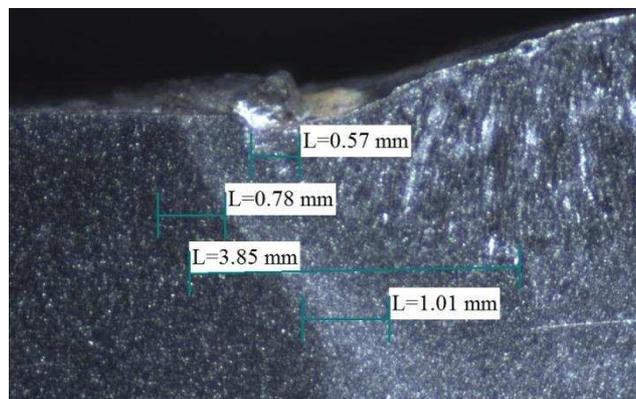
a)



b)



c)



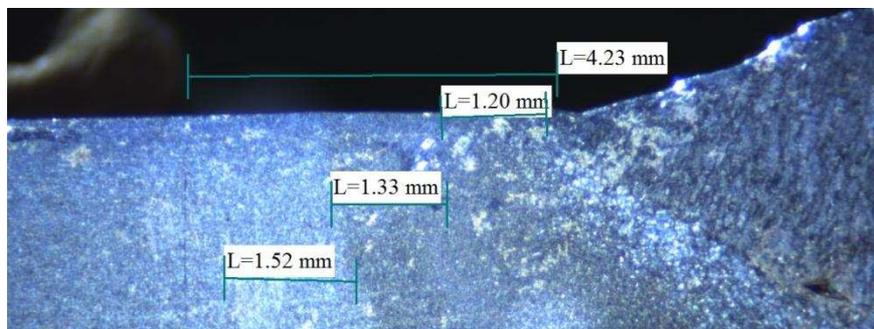
d)

Figura 5.2.- Medidas en diferentes espesores de placa. a) 12mm, b) 10mm, c) 8mm y d) 6mm. Fotos tomadas a 10X.

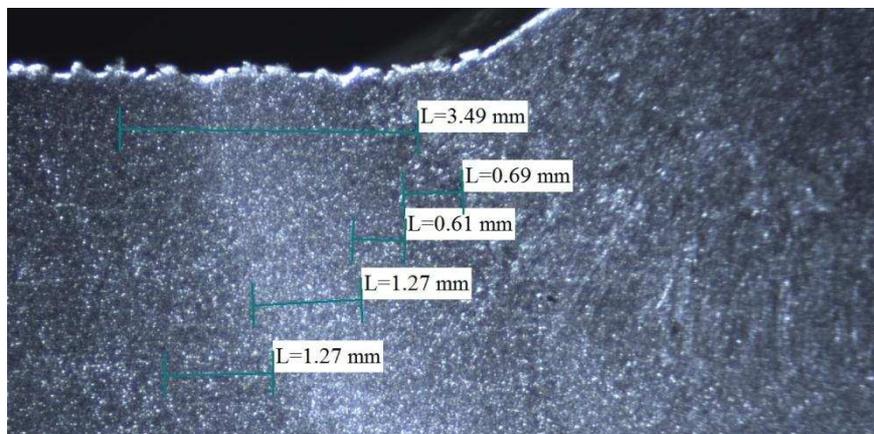
### 5.3. ANALISIS DE LA ZONA AFECTADA PARA DIFERENTES CORRIENTES DE SOLDADURA

A medida que se aumenta la corriente de soldadura también se aumenta el calor aportado en el proceso, tabla 4.7, razón por la cual se tiene una velocidad de enfriamiento menor por lo que se espera obtener una ZAC mayor. Esto último se observa claramente en las macrografías de la figura 5.3.

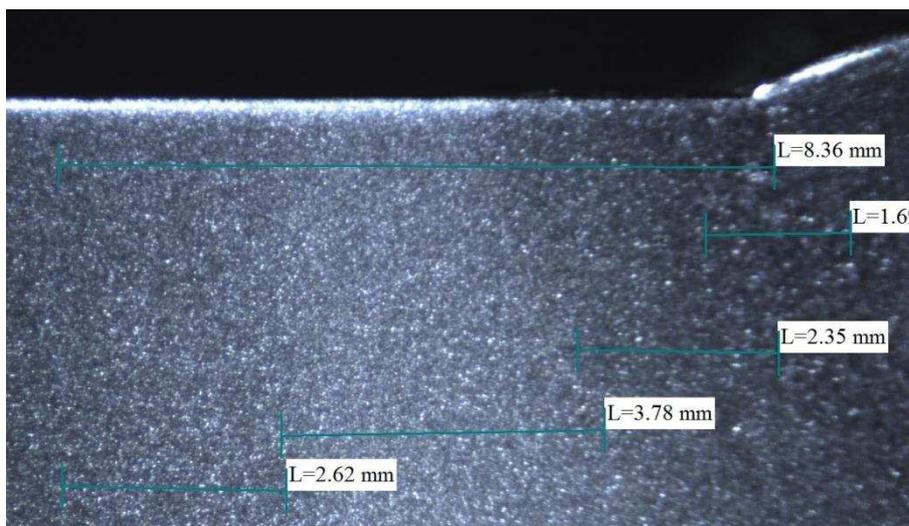
Además, en las macrografías se observa claramente que el tamaño de cada una de las zonas dentro de la ZAC aumentan conforme aumenta la corriente debido a la velocidad de enfriamiento.



a)



b)



c)

Figura 5.3.- Medidas de ZAC variando niveles de amperaje: a) Mediano amperaje, b) bajo amperaje y c) alto amperaje

En lo que respecta a las micrografías, se observa diferencia dentro de la zona de recalentamiento por la presencia de grano grueso más alargado cuando el amperaje es alto. Las otras zonas se diferencian únicamente en el tamaño de cada una, cosa que ya se mencionó en el análisis de las macrografías.

La microestructura de Widmanstätten se presenta en la probeta en la cual la corriente es elevada. Esto se debe al gran calor aportado por soldadura que conlleva velocidades de enfriamiento lentas dando tiempo para que se forme esta microestructura.

En la ZAC de la probeta realizada con bajo amperaje se nota una reducción significativa del tamaño de grano en la zona de recalentamiento que corresponde a la menor energía entregada al material para la transformación de fases.

En la probeta de corriente alta fue posible determinar las durezas reales de un cordón de soldadura, ya que sus zonas son claramente identificadas.

El gráfico 4.13 de dureza Vs Posición permite mostrar la diferencia de tamaño de la zona afectada por el calor para diferentes corrientes de soldadura, donde es muy notorio, además, la gráfica determinada por la corriente alta de soldadura debido al gran tamaño que presentan las zonas dentro de la ZAC, se muestra muy cercana a lo teórico.

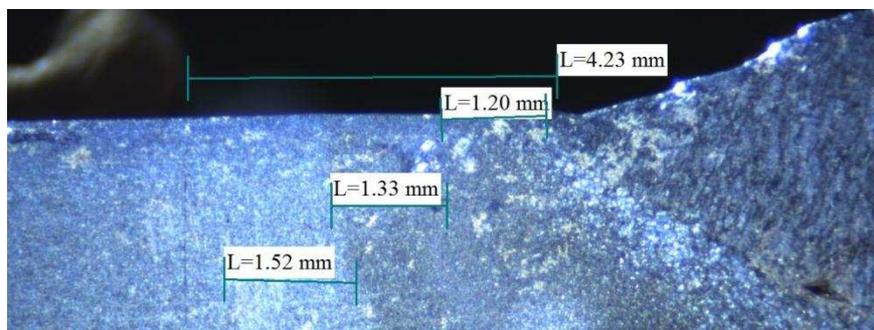
Las macrografías para esta condición se muestran en la Figura 4.18 a y las micrografías en la Figura 4.30.

#### 5.4. ANALISIS DE LA ZONA AFECTADA CON Y SIN PRECALENTAMIENTO Y TRATAMIENTO TERMICO.

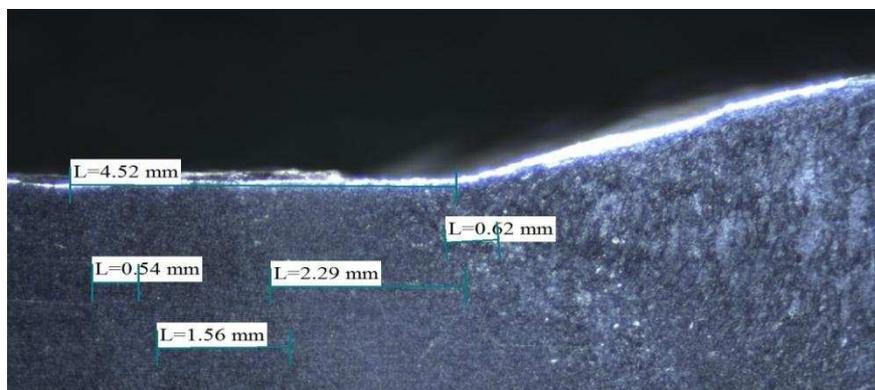
Las variantes de soldadura que incluyen tratamiento térmico y precalentamiento no presentan mucha influencia, ya que se lo realiza bajo condiciones iguales, pero al momento en que se aplica el precalentamiento se puede considerar un aumento en el calor aportado razón por la cual en las macrografías se observa una ZAC ligeramente mayor con respecto a la probeta a la que no se aplicó el precalentamiento.

En el precalentamiento no se espera un gran cambio ya que en el acero A36 no es necesario este procedimiento sino hasta un espesor determinado que generalmente supera los 19mm.

En cambio la Zona afectada por el calor para la probeta a la cual se la realizó el tratamiento térmico post-soldadura presenta similar tamaño de la zona. Sin embargo la zona de normalizado se ve aumentada.



a)



b)

Figura 5.4.- Medidas de ZAC: a) Sin Precalentamiento, b) Con precalentamiento

El precalentamiento permite disminuir la velocidad de enfriamiento debido al calentamiento uniforme que presenta la pieza, razón por la cual se tiene el crecimiento de microestructuras de formación más lenta como la ferrita acicular y Widmanstätten, a diferencia de la probeta a la cual no se aplicó el precalentamiento donde la microestructura relevante es la ferrita acicular.

Microestructuralmente no se produce un cambio específico en la ZAC comparándolo con la probeta a la cual no se la realizó el tratamiento térmico, ya que este tipo de tratamientos lo principal es obtener un alivio o eliminación de los esfuerzos residuales.

La gráfica de durezas Vs posición 4.14, muestra la influencia clara que presenta tanto el precalentamiento como la aplicación de tratamiento térmico. Para los dos casos se obtiene una ZAC de menor dureza, mejorando las propiedades de la zona, reduciendo la fragilidad.

Las macrografías para esta condición se muestran en la figura 4.18 b y las micrografías en la Figura 4.31.

## **5.5. ANALISIS DE LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE SOLDADURA**

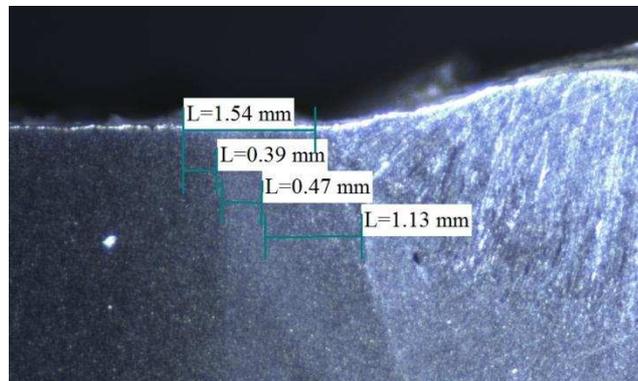
La tabla 4.15 muestra que al aumentar la velocidad de soldadura se tiene menor calor aportado y por lo tanto la velocidad de enfriamiento es mayor, razón por la cual la probeta que fue soldada a menor velocidad de soldadura presenta mayor zona afectada por el calor, tal como muestran las macrografías de la figura 5.5.

Además, como se explicó anteriormente, al aumentar el calor aportado las longitudes de las zonas dentro de la ZAC son mayores, es decir que al disminuir la velocidad de soldadura se reduce la velocidad de enfriamiento, por lo que se tiene un mayor tiempo para que se produzca la formación de cada zona dentro la ZAC.

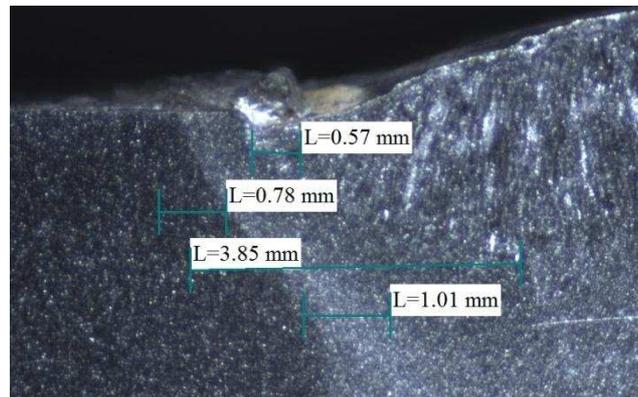
Adicionalmente, el flujo de calor que se presenta en estas probetas es bidimensional porque la relación entre el calor y el espesor de las placas determina un espesor relativo muy bajo.

Micrográficamente la probeta con menor velocidad de soldadura presenta en su zona de recalentamiento mayor tamaño de grano. Esto se presenta por la entrada de calor superior hacia esta probeta producida por la lenta velocidad de soldadura. Con

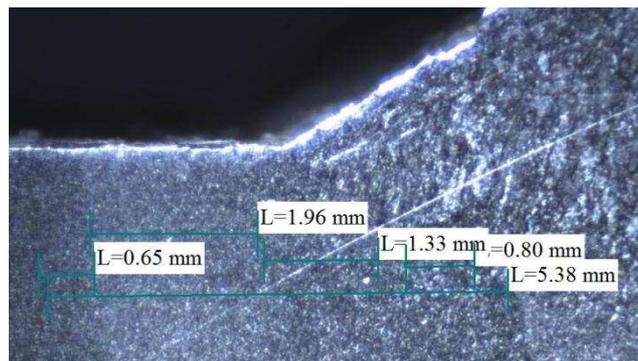
respecto a las otras zonas de la ZAC, las características se reproducen solamente diferenciadas por el tamaño que estas abarcan.



a)



b)



c)

Figura 5.5.- Medidas de la ZAC a diferentes velocidades de soldadura: a) Velocidad rápida, b) Velocidad normal y c) Velocidad lenta. Las macrografías están a 10X.

La gráfica 4.15 muestra la relación entre dureza vs distancia para diferentes velocidades de soldadura, en donde lo más notorio se presenta al momento de realizar soldaduras a grandes velocidades, que muestran menos ZAC y un mayor valor de dureza en la zona de recalentamiento.

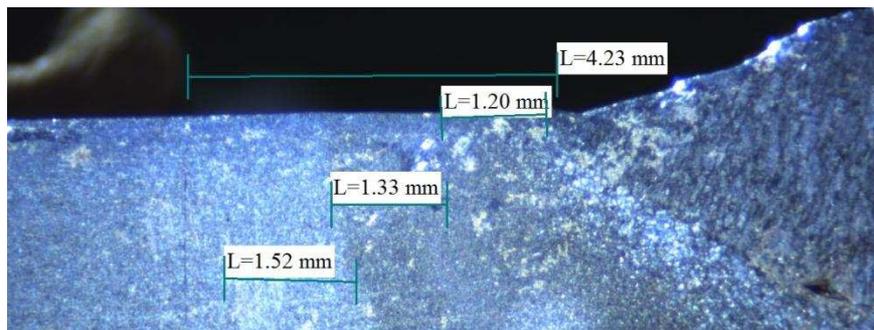
Las macrografías para esta condición se muestran en la Figura 4.19 y las micrografías en la Figura 4.32

## **5.6. ANALISIS DE LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR PARA DIFERENTES POLARIDADES DE CORRIENTE**

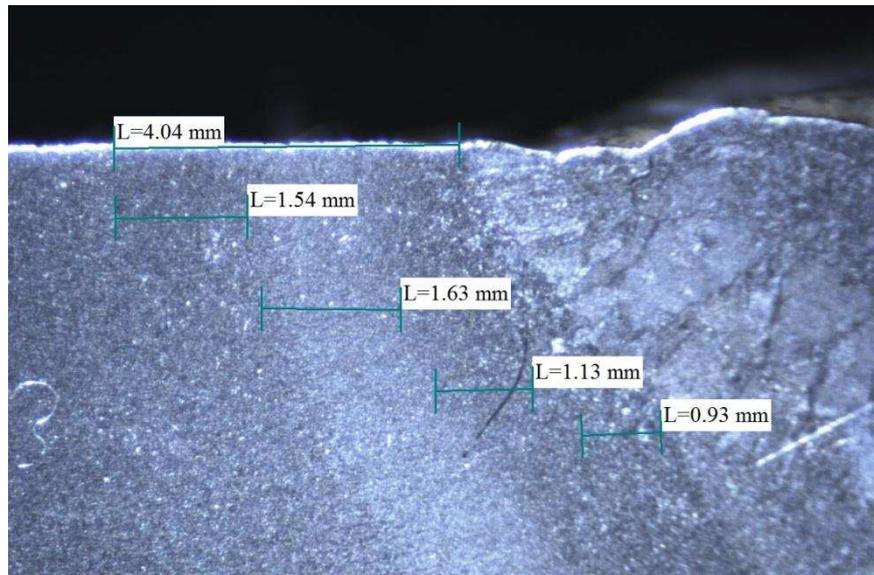
Para este análisis se debe recordar que la polaridad en soldadura juega un papel importante. Para estas pruebas se mantiene constante el proceso SMAW, el material acero A36, el espesor de 12 mm, de tal manera que lo único que varía es la polaridad. Al unificar los procedimientos de soldadura se determinó que se debe soldar con el electrodo E7018 para el cual, únicamente se acepta la polaridad DC+ (polaridad inversa) y AC (la corriente alterna tiene ambas polaridades que cambian sinusoidalmente). La polaridad inversa significa que el electrodo tiene la polaridad positiva y que el material base tiene la polaridad negativa durante todo el proceso de soldadura, lo que significa que el flujo de electrones van desde la pieza de trabajo hacia el electrodo creando así una diferencia de temperaturas en la cual el electrodo se calienta más que el material base. Al utilizar la corriente alterna la variación de polaridades entre el electrodo y la pieza de trabajo ocurre 120 veces por segundo. Esto genera que tanto la pieza de trabajo como el electrodo alcancen prácticamente la misma temperatura. Por lo tanto en AC se debe obtener una mayor ZAC ya que se concentra el calor en la pieza de trabajo y por el contrario en DC+ el calor se concentra en el electrodo. Eso es lo que se comprueba en la práctica, la probeta soldada con DC+ tiene una ZAC menor a la generada con AC. Esto también se explica al emplear el criterio de espesores relativos. Según la tabla 4.16 la probeta que se soldó con AC tiene una condición intermedia de flujo de calor entre bidimensional y tridimensional lo que genera una ZAC mayor, mientras que la probeta soldada con DC+ presenta una dirección tridimensional de flujo de calor generando una menor ZAC.

Las micrografías muestran que debido a la concentración y al mayor calor aportado en la probeta soldada con corriente alterna, la zona de recalentamiento presenta granos de gran tamaño con microestructura de Widmanstatten con respecto a la probeta soldada con corriente continua y electrodo positivo, donde se observa un grano más pequeño en presencia de ferrita acicular.

Con respecto a las otras zonas de la ZAC, las características se reproducen solamente diferenciadas por el tamaño que estas abarcan.



a)



b)

Figura 5.6.- Medidas de la ZAC a diferentes polaridades de soldadura: a) Corriente continua electrodo positivo, b) Corriente alterna. Las macrografías están a 10X.

La gráfica de dureza Vs posición 4.16 muestra la diferencia clara de la ZAC, debido al gran calor aportado por la soldadura con corriente alterna, donde en la zona de

recalentamiento alcanzan valores de dureza elevados con respecto a la soldadura por corriente continua y electrodo positivo.

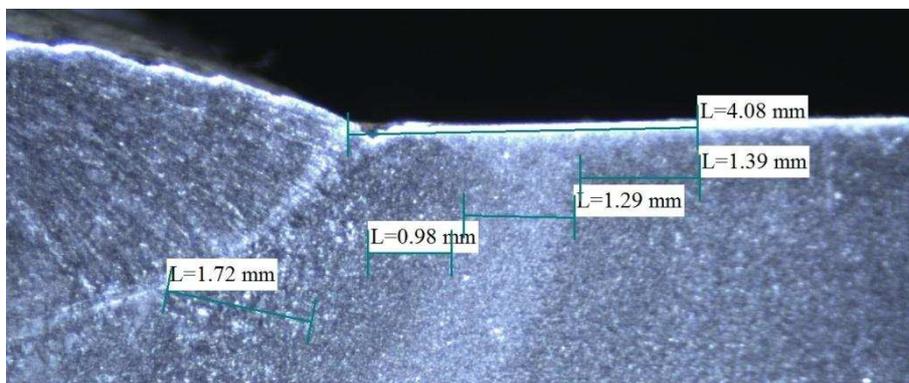
Las macrografías se muestran en la tabla 4.23 y las micrografías en la Figura 4.33.

### 5.7. ANALISIS DE LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR EN JUNTAS SOLDADAS CON CORDONES CON Y SIN ESPERA ENTRE PASES

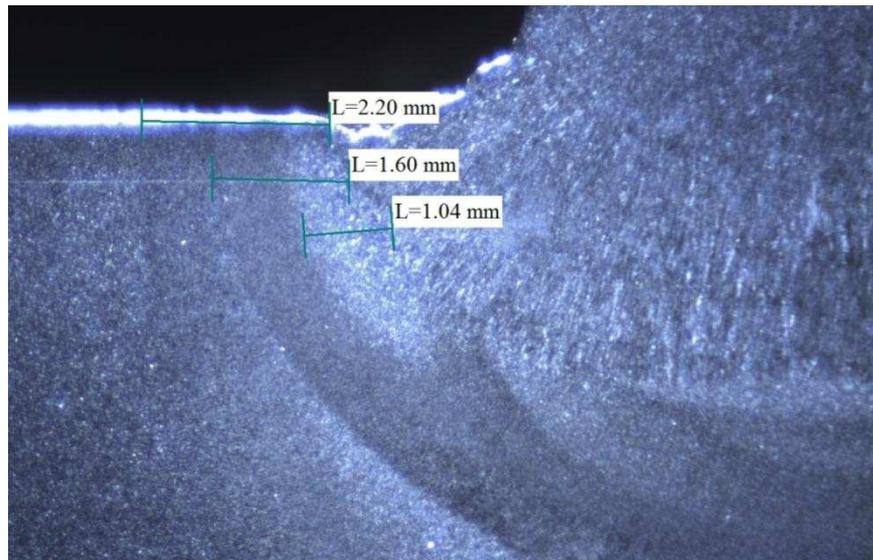
Para los dos casos a medida que se realiza los pases se va disminuyendo la velocidad de soldadura para al final obtener una sobremonta adecuada y por tanto una junta correcta, razón por la cual el tercer pase va a ser realizado con mayor calor aportado que el primer pase.

La ZAC va a depender de los cordones de soldadura sucesivos que fueron dados con o sin espera entre pases, ya que al momento de realizarlo sin espera, el segundo y tercer pase actúan como si se efectuara un precalentamiento, y como se explicó anteriormente se obtendrá un ZAC mayor por la suma de calores aportados. En cambio al momento en que se deja enfriar la probeta entre pases se permitirá obtener una nueva zona afectada por el calor que se traslapará a la anterior ZAC formada por el cordón anterior, pero sin producirse una suma entre calores aportados. Por lo tanto, la ZAC obtenida al realizar la junta soldada con espera entre pases es menor que la ZAC generada por cordones de soldadura sin espera entre pases.

En las micrografías se muestra que por la concentración de calor que se tiene en la soldadura de cordones sin espera, la zona de recalentamiento presenta un tamaño de grano mayor a la zona de recalentamiento que se desarrolló por soldadura sin espera. El resto de zonas se desarrollan normalmente únicamente con la diferencia de tamaño que presentan las zonas afectadas por el calor de cada probeta.



a)



b)

Figura 5.7.- Macrografías de soldaduras: a) sin espera entre pases y b) con espera entre pases. Fotos tomadas a 10X.

Las gráficas de dureza Vs posición 4.17 y 4.18, muestran la influencia que se presenta al realizar cordones de soldadura con y sin espera entre cada pase. No existe una considerable diferencia de durezas entre los pases realizados con y sin espera.

Las macrografías se muestran en la Figura 4.21 y las micrografías en las tablas 4.37, 4.38 y 4.39.

## 5.8. LAS MEJORES CONDICIONES PARA LA ZAC

Las mejores condiciones para que se pueda obtener la ZAC son aquellas que la minimicen. Básicamente la mayor influencia que se tiene es debido al calor aportado. Este último a su vez depende de varios factores mencionados a continuación:

Tabla 5.1.- Mejores condiciones para la ZAC

Factores	Mejores Condiciones de la ZAC
Procesos de Soldadura	De los procesos analizados, GMAW presenta el menor tamaño de la ZAC, y por lo tanto menor tamaño de la zona crítica o de recalentamiento.

Contenido de Carbono	Los materiales con menor contenido de Carbono presentan un coeficiente de conductividad térmica mayor, que disminuye el tamaño de la ZAC.
Espesor de placa	Depende fundamentalmente de la dirección de flujo de calor. El direccionamiento tridimensional disminuye el tamaño de la ZAC.
Velocidad de soldadura	Se debe intentar aumentar la velocidad de soldadura para disminuir la ZAC pero que sea la suficiente para generar un cordón adecuado.
Intensidad de corriente	La intensidad de corriente debe ser la menor posible dentro de un rango recomendado para obtener la menor ZAC sin descuidar la calidad de la junta.
Pre calentamiento	El pre calentamiento es recomendable en las juntas soldadas no tanto para disminuir la ZAC, por el contrario la ZAC aumentará su tamaño, sino para impedir el endurecimiento de la zona afectada. Por supuesto debe tomarse en cuenta la composición y el espesor del material base para que el pre calentamiento sea considerado.
Tratamiento térmico	El tratamiento térmico es recomendable. Este no produce mayor cambio en la ZAC, sin embargo, permite la liberación de esfuerzos residuales que pueden generar fisuras en la zona afectada. El tratamiento térmico se limita por el tamaño y geometría de la pieza soldada.
Espera entre pases de soldadura	Las mejores propiedades de la ZAC se obtienen con una junta con cordones de soldadura sin espera entre pases. Aunque ésta condición aumente el tamaño de la ZAC, la misma mejora las propiedades de los cordones anteriores.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES

- El proceso de soldadura que genera mayor ZAC es SAW, le sigue SMAW y por último GMAW.
- La técnica de avance del material de aporte, oscilado o no, influye en la forma de la ZAC y el tamaño en la zona aledaña al refuerzo de soldadura.
- El mayor calor aportado genera una velocidad de enfriamiento menor y por tanto el aumento de la ZAC y las zonas dentro de esta.
- El flujo de calor puede ser bidimensional o tridimensional dependiendo de la relación entre el espesor y el calor de aporte, es decir su espesor relativo, el cual va a influir en la forma y tamaño de la ZAC.
- En la variación de contenido de carbono, a mayor porcentaje de carbono en el material, la ZAC presenta mayor tamaño.
- La diferencia de espesores permite obtener un flujo de calor diferente, que afecta a la forma y tamaño de la ZAC
- El número de pases aumenta a medida que lo haga el espesor, retardando los regímenes de enfriamiento del último cordón.
- A medida que aumenta la corriente se aumenta la ZAC, y por ende el tamaño de las zonas presentes dentro de esta.
- La velocidad de soldadura influye en el tamaño y forma de la ZAC. Al disminuir la velocidad de soldadura se tiene un aumento en el valor del calor aportado, y por lo tanto la ZAC y las zonas dentro de esta aumentarán de tamaño.
- La polaridad de la corriente afectará a la ZAC principalmente por el aumento o disminución del calor generado hacia la pieza. Al soldar con polaridad de corriente continua y electrodo positivo, se obtiene que se caliente en menor magnitud la pieza a diferencia de la corriente alterna.
- La ZAC obtenida de la junta realizada por cordones de soldadura con espera entre pases es menor que la ZAC generada de la junta por cordones de soldadura sin espera entre pases.
- La diferencia de materiales con los diferentes procesos de soldadura permite obtener distintas microestructuras en la ZAC, la cual va a depender del porcentaje

de cada uno de los elementos aleantes y calor aportado. Estas microestructuras afectan directamente las propiedades del material.

- Microestructuralmente la zona de recalentamiento presenta las mayores diferencias con respecto al tamaño y la fase formada, en presencia de mayor o menor calor aportado. Las otras zonas restantes únicamente se diferencian por el tamaño de cada una de estas.
- La dureza del cordón de soldadura por lo menos debe ser igual al metal base para conseguir una junta correcta y no se produzca falla en el cordón.
- El efecto del tratamiento térmico en la zona afectada por el calor no tiene mayor notoriedad para el acero tratado.
- De los procesos analizados, GMAW presenta el menor tamaño de la ZAC, y por lo tanto menor tamaño de la zona crítica o de recalentamiento.
- Los materiales con menor contenido de Carbono presentan un coeficiente de conductividad térmica mayor, que disminuye el tamaño de la ZAC.
- La influencia del espesor en la ZAC depende fundamentalmente de la dirección de flujo de calor. El direccionamiento tridimensional disminuye el tamaño de la ZAC.
- Se debe intentar aumentar la velocidad de soldadura para disminuir la ZAC pero que sea la suficiente para generar un cordón adecuado.
- La intensidad de corriente debe ser la menor posible dentro de un rango recomendado para obtener la menor ZAC sin descuidar la calidad de la junta.
- El precalentamiento es recomendable en las juntas soldadas no tanto para disminuir la ZAC, por el contrario la ZAC aumentará su tamaño, sino para impedir el endurecimiento de la zona afectada. Por supuesto debe tomarse en cuenta la composición y el espesor del material base para que el precalentamiento sea considerado.
- El tratamiento térmico es recomendable. Este no produce mayor cambio en la ZAC, sin embargo, permite la liberación de esfuerzos residuales que pueden generar fisuras en la zona afectada. El tratamiento térmico se limita por el tamaño y geometría de la pieza soldada.

- Las mejores propiedades de la ZAC se obtiene soldando sin espera entre pases, aunque ésta aumente de tamaño mejora las propiedades de los cordones precedentes.
- Con la elaboración del presente proyecto se obtuvo un Kit de probetas claramente identificadas según las diferentes variables aplicadas para el análisis de la Zona Afectada por el Calor.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda utilizar los electrodos sugeridos por el fabricante en la soldadura del acero de mediano contenido de carbono AISI 1045. El electrodo es el E7018 A1, el cual tiene como elemento aleante 5% de Molibdeno que aumenta la resistencia de la junta soldada.
- Se recomienda el uso de la escala de micro durezas y un micro durómetro para obtener datos más precisos de durezas en cada zona dentro de la ZAC.
- Para profundizar el estudio de la ZAC a diferentes polaridades de soldadura se recomienda soldar con un electrodo que permita el uso de corriente continua electrodo positivo, negativo y corriente alterna, como por ejemplo el E6013.
- Se debe tener mucho cuidado en el estudio micro estructural con respecto a la obtención de las probetas. El corte de las probetas debe ser con enfriamiento para no modificar la estructura del material.
- Es recomendable procedimientos para soldaduras de gran responsabilidad junto con la calificación de dichos procedimientos, se determine el tamaño de la ZAC. Esto ayuda a controlar los cortes mínimos en caso de reparación, la separación mínima entre cordones, etc.

## **ANEXOS**

**ANEXO 1**  
**FOTOGAFÍAS DE LAS ZONAS AFECTADAS POR EL CALOR**  
**EN LA PROBETA SOLDADA CON ALTA CORRIENTE**

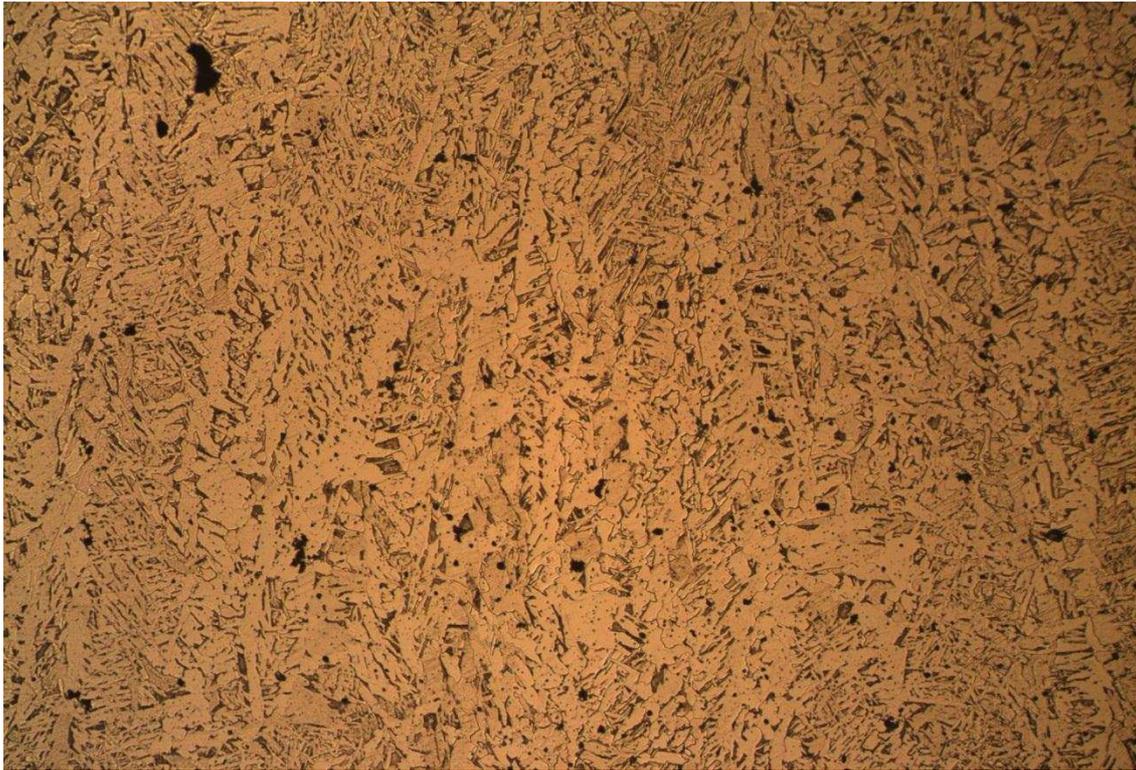


Figura A.1.- Zona fundida o de soldadura. Ataque con Nital 2%. 100X.

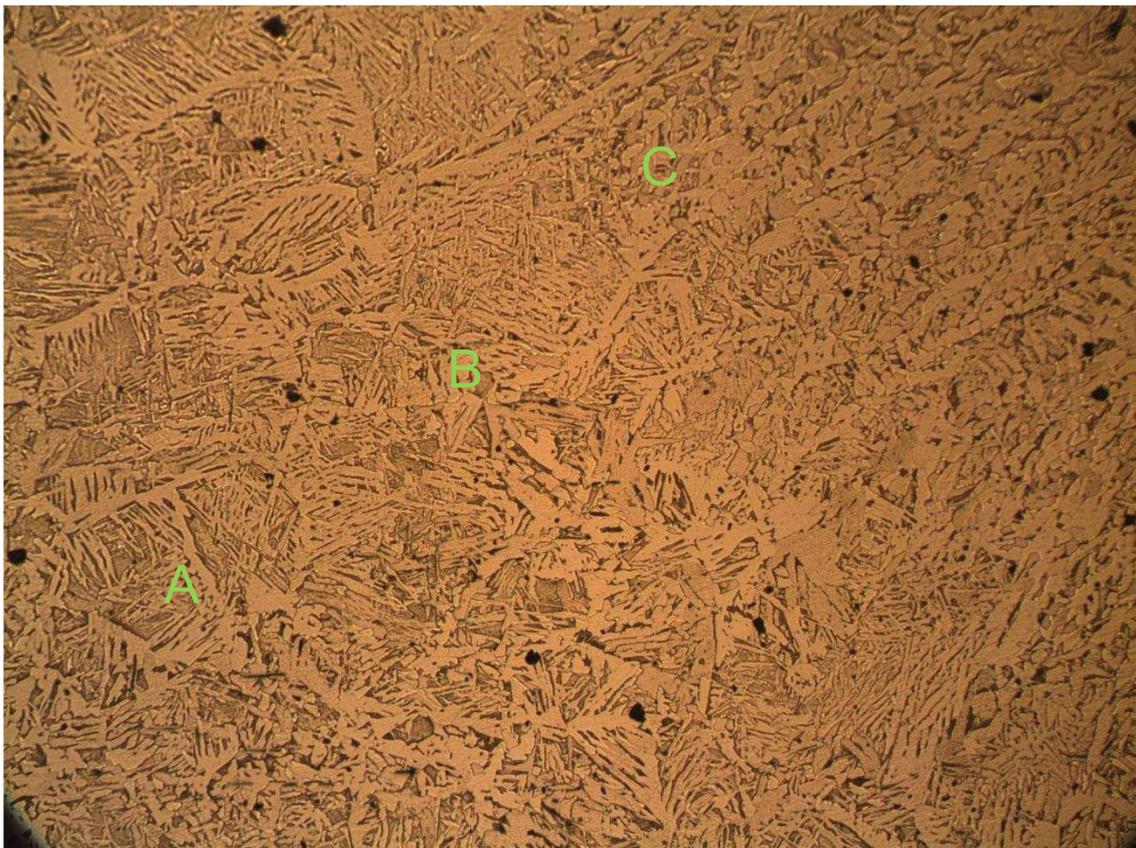


Figura A.2.- A) Zona de recalentamiento, B) Zona parcialmente fundida y C) Zona fundida o de soldadura. Ataque con Nital 2%. 100X.

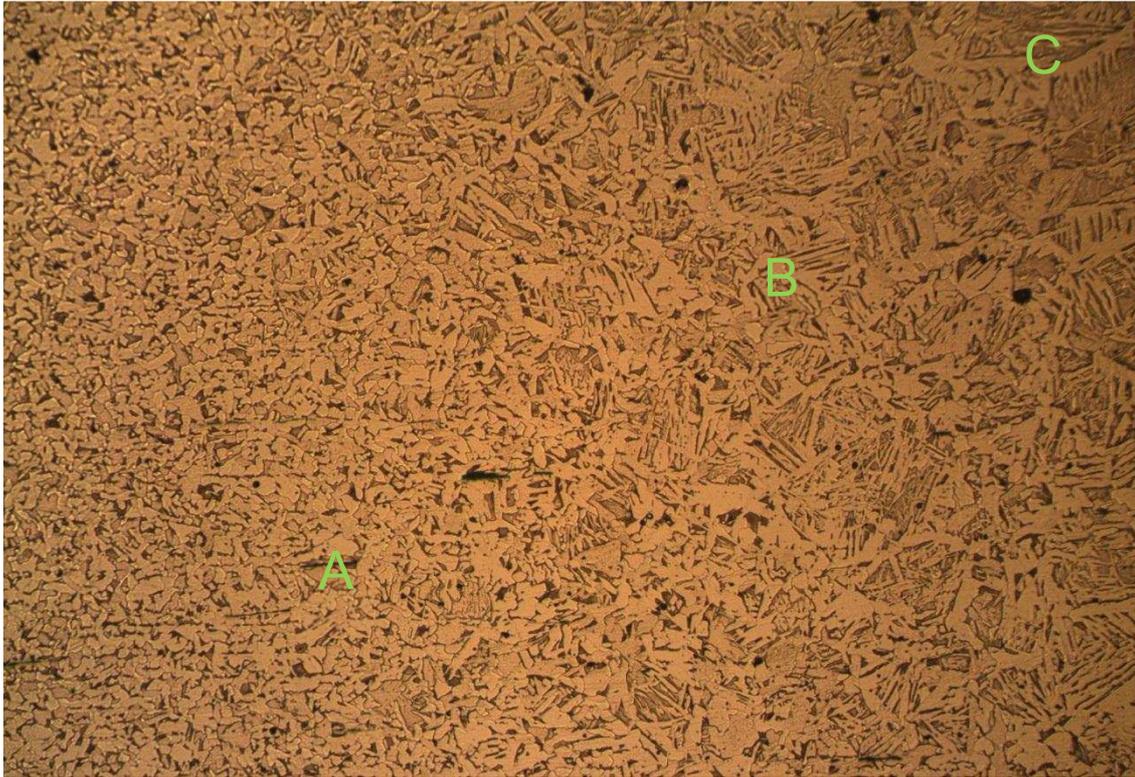


Figura A.3.- A) Zona de recalentamiento sin crecimiento de grano, B) Zona de recalentamiento con crecimiento de grano y C) Zona fundida o de soldadura. Ataque con Nital 2%. 100X.

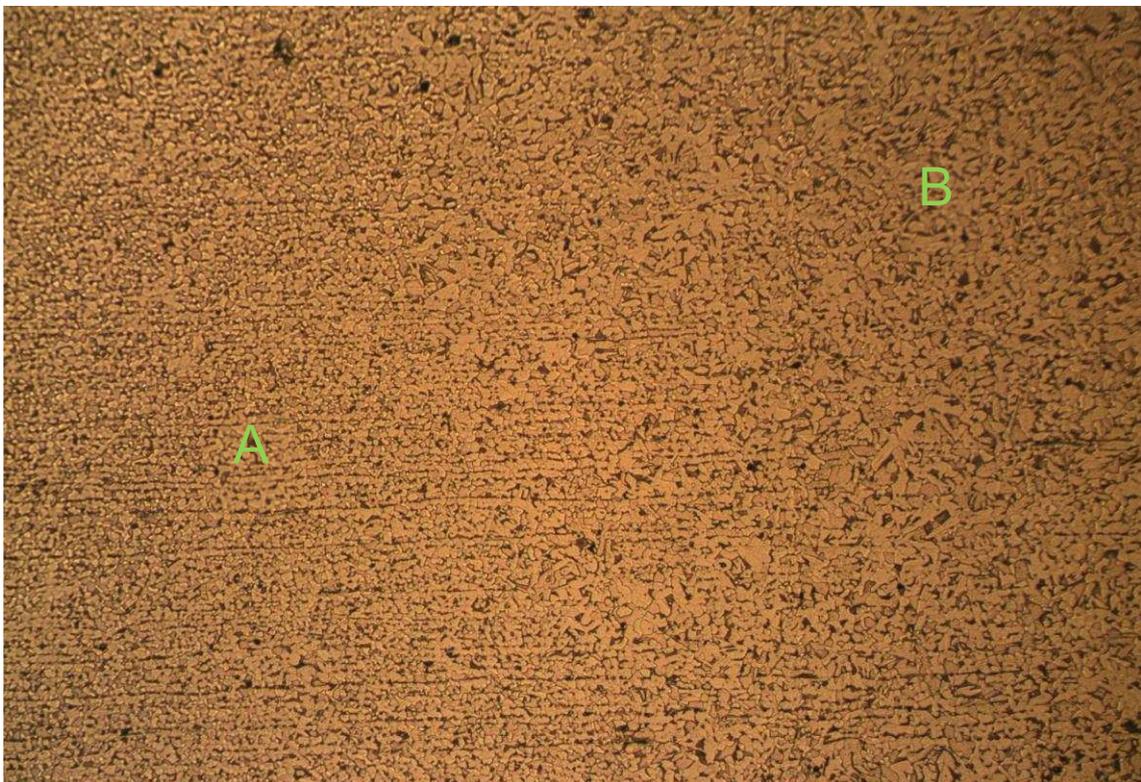


Figura A.4.- A) Zona de normalización de grano y B) Zona de recalentamiento sin crecimiento de grano. Ataque con Nital 2%. 100X.



Figura A.5.- Zona de normalización de grano. Ataque con Nital 2%. 100X.

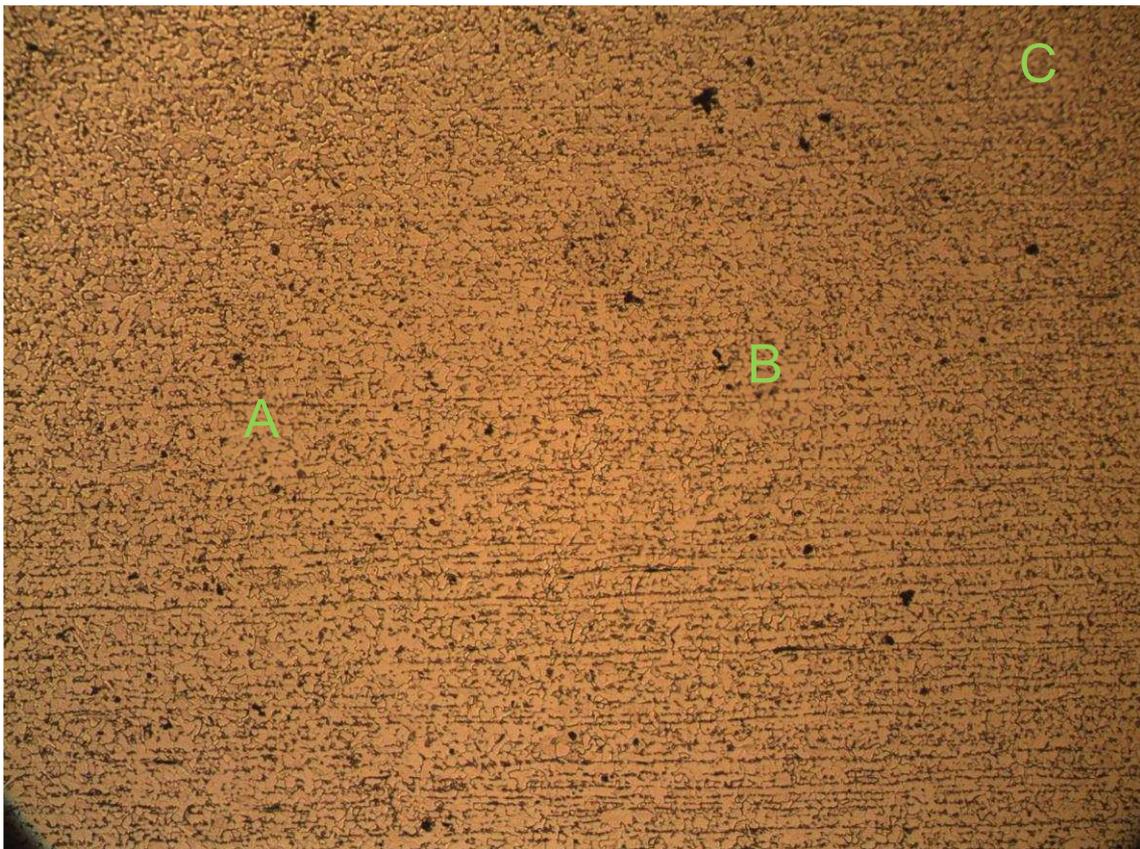
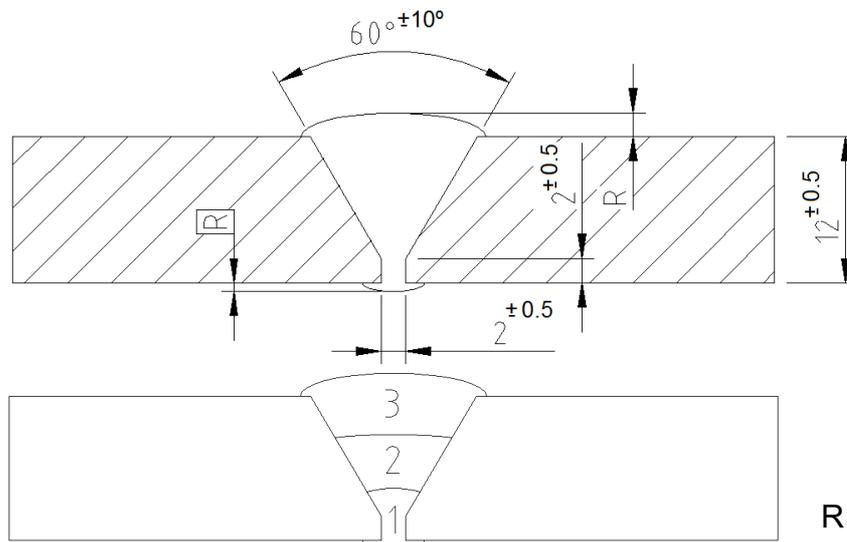


Figura A.6.- A) Material Base, B) Zona de recristalización y C) Zona de normalización de grano. Ataque con Nital 2%. 100X.

**ANEXO 2**  
**PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA**

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)									
Nombre Compañía: TESIS-EPN-ZAC-AM					WPS No.: WPS - EPN - AM -01				
Según norma : AWS D1.1 Structural Welding Code					Fecha : 01-03-2010				
					Realizado por: Daniel Ayala Galo Mosquera				
<b>ARTÍCULO I. JUNTA UTILIZADA</b>					<b>ARTÍCULO VI. POSICIÓN DE SOLDADURA</b>				
Tipo de junta:		A TOPE			Posición de Soldadura:			<b>1G</b>	
Abertura raíz:		2 +/- 0,5 mm			Progresión:			Arrastre	
Talón:		2 +/- 0.5 mm			Técnica:			Un pase <input type="checkbox"/>	
Preparar bisel:		Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>			<b>ARTÍCULO VII. PRECALENTAMIENTO</b> Temperatura: N/A Temperatura entre pases máx: N/A Tiempo entre pases : N/A				
Angulo de ranura:		30° +/- 5°							
Espesor:		12 mm							
Placa de respaldo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>							
<b>ARTÍCULO II. METAL BASE</b>					<b>ARTÍCULO VIII. TÉCNICA DE SOLDADURA</b>				
Especificación:		ASTM A36			Soldadura de:			RANURA	
Espesor:		12 mm			Proceso de soldadura:			<b>SMAW</b>	
Longitud:		150 mm			Tipo de Soldadura:			Manual <input checked="" type="checkbox"/>	
Ancho:		75 mm						Semiautomática <input type="checkbox"/>	
<b>ARTÍCULO III. METAL DE APORTE</b>					Automática <input type="checkbox"/> <b>Un lado</b> <input checked="" type="checkbox"/> Dos lados <input type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/> Múltiples Múltiples Recto / Oscilante Disco Grata				
Proceso:		SMAW		SMAW		Soldadura a: Cordón de respaldo: Pase multiples o simples ( por lado) Electrodo Multiples o únicos Cordón Recto u Oscilante Limpieza: Primer pase. Pases siguientes.			
Especificación (SFA) No.		5.1		5.1					
Diámetro :		3,2 mm		3,2 mm					
Denominación AWS:		E 6011		E 7018					
Marca:		AGA		AGA					
Denominación comercial		C - 13		B - 10					
<b>ARTÍCULO IV. GAS DE PROTECCIÓN</b>					<b>ARTÍCULO IX. NOTAS</b>				
Tipo:		N/A			<ul style="list-style-type: none"> <li>Asegurar limpieza de las partes.</li> <li>Verificar alineación de la junta.</li> </ul>				
Caudal:		N/A							
<b>Detalle de la Junta</b>									
R: máximo 3 mm									
<b>ARTÍCULO X. CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN</b>									
No de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De avance (mm/min)	Progresión	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Intensidad (Amperios)				oscilado	Recto
1	E6011	3,2	DC+	90 - 120	25 - 30	100 - 120	Arrastre		X
2	E7018	3,2	DC+	100 - 140	20 - 25	120 - 140	Arrastre	X	
3-n	E7018	3,2	DC+	100 - 140	20 - 25	120 - 140	Arrastre	X	
ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)									

<b>Nombre Compañía:</b> TESIS-EPN-ZAC-AM		<b>WPS No.:</b> WPS - EPN - AM -02	
<b>Según norma :</b> AWS D1.1 Structural Welding Code		<b>Fecha :</b> 01-03-2010	
		<b>Realizado por:</b> Daniel Ayala Galo Mosquera	
<b>ARTÍCULO I. JUNTA UTILIZADA</b>		<b>ARTÍCULO VI. POSICIÓN DE SOLDADURA</b>	
Tipo de junta:	A TOPE	Posición de Soldadura:	<b>1G</b>
Abertura raíz:	2 +/- 0,5 mm	Progresión:	<b>Arrastre</b>
Talón:	2 +/- 0,5 mm	Técnica:	Un pase <input type="checkbox"/>
Preparar bisel:	Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>		<b>Varios pases</b> <input checked="" type="checkbox"/>
Angulo de ranura:	30° +/- 5°	<b>ARTÍCULO VII. PRECALENTAMIENTO</b>	
Espesor:	12 mm	Temperatura:	N/A
Placa de respaldo:	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>	Temperatura entre pases máx:	N/A
<b>ARTÍCULO II. METAL BASE</b>		Tiempo entre pases :	N/A
Especificación:	ASTM A131	<b>ARTÍCULO VIII. TÉCNICA DE SOLDADURA</b>	
Espesor:	12 mm	Soldadura de:	<b>RANURA</b>
Longitud:	150 mm	Proceso de soldadura:	<b>SMAW</b>
Ancho:	75 mm	Tipo de Soldadura:	<b>Manual</b> <input checked="" type="checkbox"/>
<b>ARTÍCULO III. METAL DE APORTE</b>			Semiautomática <input type="checkbox"/>
Proceso:	SMAW		Automática <input type="checkbox"/>
Especificación (SFA) No.	5.1		<b>Un lado</b> <input checked="" type="checkbox"/> Dos lados
Diámetro :	3,2 mm		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Denominación AWS:	E 6011		Múltiples
Marca:	AGA		Múltiples
Denominación comercial	C - 13		Recto / Oscilante
<b>ARTÍCULO IV. GAS DE PROTECCIÓN</b>			Disco
Tipo:	N/A		Grata
Caudal:	N/A		
		<b>ARTÍCULO IX. NOTAS</b>	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Asegurar limpieza de las partes.</li> <li>Verificar alineación de la junta.</li> </ul>	

**Detalle de la Junta**

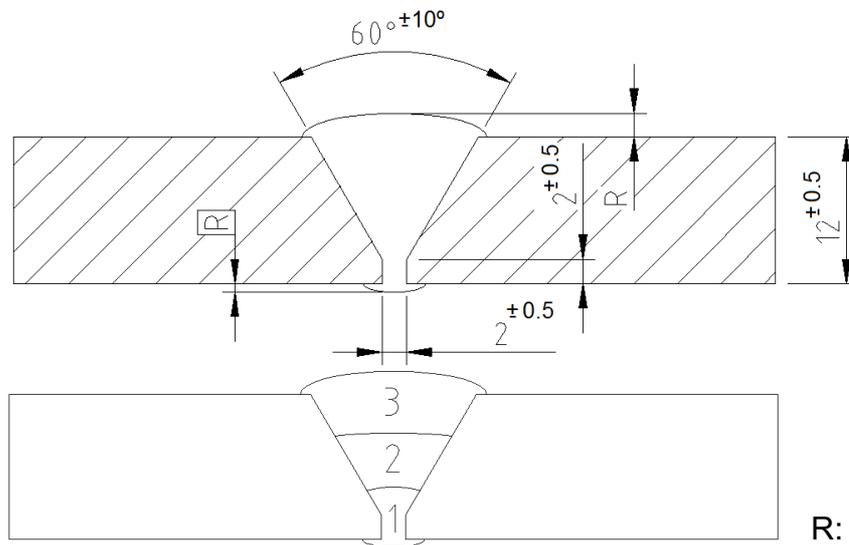
R: máximo 3 mm

**ARTÍCULO X. CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN**

No de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De avance (mm/min)	Progresión	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Intensidad (Amperios)				oscilado	Recto
1	E6011	3,2	DC+	90 - 120	25 - 30	100 - 120	Arrastre		X
2	E7018	3,2	DC+	100 - 140	20 - 25	120 - 140	Arrastre	X	
3-n	E7018	3,2	DC+	100 - 140	20 - 25	120 - 140	Arrastre	X	

**ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)**

<b>Nombre Compañía:</b> TESIS-EPN-ZAC-AM		<b>WPS No.:</b> WPS - EPN – AM -03	
<b>Según norma :</b> AWS D1.1 Structural Welding Code		<b>Fecha :</b> 01-03-2010	
		<b>Realizado por:</b> Daniel Ayala Galo Mosquera	
<b>ARTÍCULO I. JUNTA UTILIZADA</b>		<b>ARTÍCULO VI. POSICIÓN DE SOLDADURA</b>	
Tipo de junta:	A TOPE	Posición de Soldadura:	<b>1G</b>
Abertura raíz:	2 +/- 0,5 mm	Progresión:	<b>Arrastre</b>
Talón:	2 +/- 0.5 mm	Técnica:	Un pase <input type="checkbox"/> <b>Varios pases</b> <input checked="" type="checkbox"/>
Preparar bisel:	Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>	<b>ARTÍCULO VII. PRECALENTAMIENTO</b>	
Angulo de ranura:	30° +/- 5°	Temperatura:	N/A
Espesor:	12 mm	Temperatura entre pases máx:	N/A
Placa de respaldo:	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>	Tiempo entre pases :	N/A
<b>ARTÍCULO II. METAL BASE</b>		<b>ARTÍCULO VIII. TÉCNICA DE SOLDADURA</b>	
Especificación:	ASTM A588	Soldadura de:	<b>RANURA</b>
Espesor:	12 mm	Proceso de soldadura:	<b>SMAW</b>
Longitud:	150 mm	Tipo de Soldadura:	<b>Manual</b> <input checked="" type="checkbox"/>
Ancho:	75 mm		Semiautomática <input type="checkbox"/> Automática <input type="checkbox"/>
<b>ARTÍCULO III. METAL DE APORTE</b>		Soldadura a:	<b>Un lado</b> <input checked="" type="checkbox"/> Dos lados <input type="checkbox"/>
Proceso:	SMAW	Cordón de respaldo:	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Especificación (SFA) No.	5.1	Pase multiples o simples ( por lado)	Múltiples
Diámetro :	3,2 mm	Electrodos Múltiples o únicos	Múltiples
Denominación AWS:	E 6011	Cordón Recto u Oscilante	Recto / Oscilante
Marca:	AGA	Limpieza:	Disco Grata
Denominación comercial	C – 13	Primer pase. Pases siguientes.	
<b>ARTÍCULO IV. GAS DE PROTECCIÓN</b>		<b>ARTÍCULO IX. NOTAS</b>	
Tipo:	N/A	<ul style="list-style-type: none"> <li>Asegurar limpieza de las partes.</li> <li>Verificar alineación de la junta.</li> </ul>	
Caudal:	N/A		

**Detalle de la Junta**

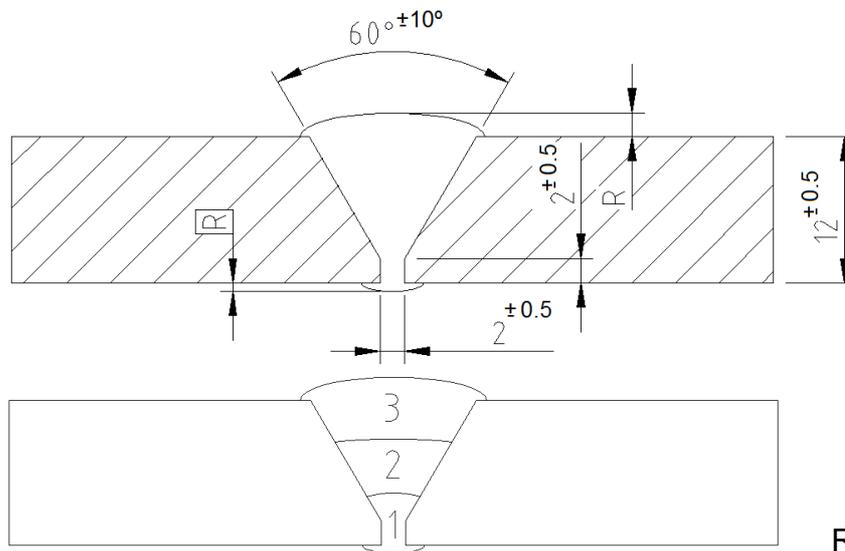
R: máximo 3 mm

**ARTÍCULO X. CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN**

No de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De avance (mm/min)	Progresión	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Intensidad (Amperios)				oscilado	Recto
1	E6011	3,2	DC+	90 – 120	25 – 30	100 - 120	Arrastre		X
2	E7018	3,2	DC+	100 – 140	20 – 25	120 - 140	Arrastre	X	
3-n	E7018	3,2	DC+	100 – 140	20 – 25	120 - 140	Arrastre	X	

**ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)**

<b>Nombre Compañía:</b> TESIS-EPN-ZAC-AM		<b>WPS No.:</b> WPS - EPN - AM -04	
<b>Según norma :</b> AWS D1.1 Structural Welding Code		<b>Fecha :</b> 01-03-2010	
		<b>Realizado por:</b> Daniel Ayala Galo Mosquera	
<b>ARTÍCULO I. JUNTA UTILIZADA</b>		<b>ARTÍCULO VI. POSICIÓN DE SOLDADURA</b>	
Tipo de junta:	A TOPE	Posición de Soldadura:	<b>1G</b>
Abertura raíz:	2 +/- 0,5 mm	Progresión:	<b>Arrastre</b>
Talón:	2 +/- 0,5 mm	Técnica:	Un pase <input type="checkbox"/>
Preparar bisel:	Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>		<b>Varios pases</b> <input checked="" type="checkbox"/>
Angulo de ranura:	30° +/- 5°	<b>ARTÍCULO VII. PRECALENTAMIENTO</b>	
Espesor:	12 mm	Temperatura:	N/A
Placa de respaldo:	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>	Temperatura entre pases máx:	N/A
<b>ARTÍCULO II. METAL BASE</b>		Tiempo entre pases :	N/A
Especificación:	AISI/SAE 1045	<b>ARTÍCULO VIII. TÉCNICA DE SOLDADURA</b>	
Espesor:	12 mm	Soldadura de:	<b>RANURA</b>
Longitud:	150 mm	Proceso de soldadura:	<b>SMAW</b>
Ancho:	75 mm	Tipo de Soldadura:	<b>Manual</b> <input checked="" type="checkbox"/>
<b>ARTÍCULO III. METAL DE APORTE</b>			Semiautomática <input type="checkbox"/>
Proceso:	SMAW		Automática <input type="checkbox"/>
Especificación (SFA) No.	5.1		<b>Un lado</b> <input checked="" type="checkbox"/> <b>Dos lados</b>
Diámetro :	3,2 mm		Si <input type="checkbox"/> <b>No</b> <input checked="" type="checkbox"/>
Denominación AWS:	E 6011		Múltiples
Marca:	AGA		Múltiples
Denominación comercial	C - 13		Recto / Oscilante
<b>ARTÍCULO IV. GAS DE PROTECCIÓN</b>			Disco
Tipo:	N/A		Grata
Caudal:	N/A		
		<b>ARTÍCULO IX. NOTAS</b>	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Asegurar limpieza de las partes.</li> <li>Verificar alineación de la junta.</li> </ul>	

**Detalle de la Junta**

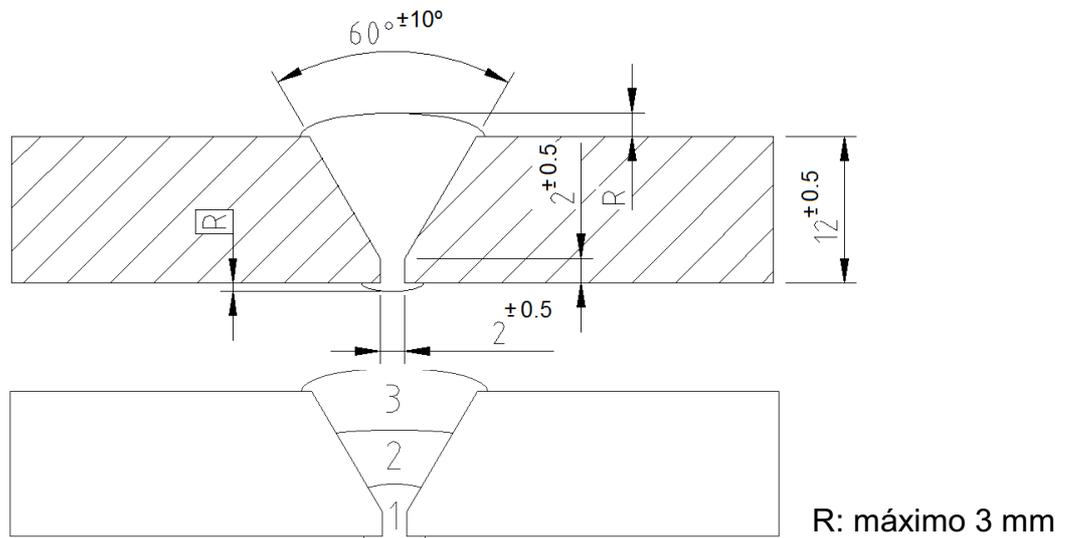
R: máximo 3 mm

**ARTÍCULO X. CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN**

No de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De avance (mm/min)	Progresión	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Intensidad (Amperios)				oscilado	Recto
1	E6011	3,2	DC+	90 - 120	25 - 30	100 - 120	Arrastre		X
2	E7018	3,2	DC+	100 - 140	20 - 25	120 - 140	Arrastre	X	
3-n	E7018	3,2	DC+	100 - 140	20 - 25	120 - 140	Arrastre	X	

**ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)**

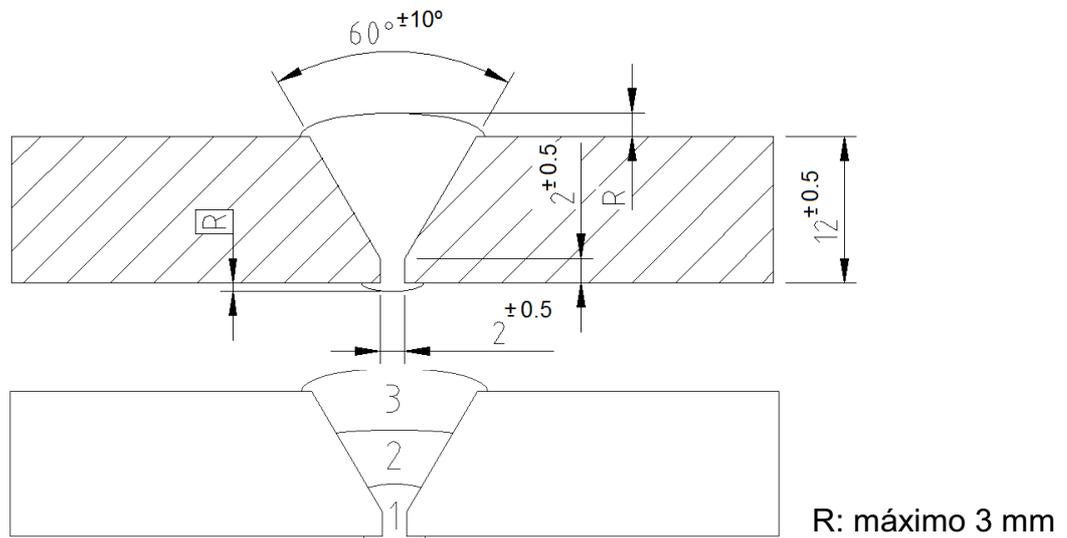
<b>Nombre Compañía:</b> TESIS-EPN-ZAC-AM		<b>WPS No.:</b> WPS - EPN – AM -05	
<b>Según norma :</b> AWS D1.1 Structural Welding Code		<b>Fecha :</b> 01-03-2010	
		<b>Realizado por:</b> Daniel Ayala Galo Mosquera	
<b>ARTÍCULO I. JUNTA UTILIZADA</b>		<b>ARTÍCULO VI. POSICIÓN DE SOLDADURA</b>	
Tipo de junta:	A TOPE	Posición de Soldadura:	<b>1G</b>
Abertura raíz:	2 +/- 0,5 mm	Progresión:	<b>Arrastre</b>
Talón:	2 +/- 0.5 mm	Técnica:	Un pase <input type="checkbox"/>
Preparar bisel:	Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>		<b>Varios pases</b> <input checked="" type="checkbox"/>
Angulo de ranura:	30° +/- 5°	<b>ARTÍCULO VII. PRECALENTAMIENTO</b>	
Espesor:	12 mm	Temperatura:	N/A
Placa de respaldo:	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>	Temperatura entre pases máx:	N/A
		Tiempo entre pases :	N/A
<b>ARTÍCULO II. METAL BASE</b>		<b>ARTÍCULO VIII. TÉCNICA DE SOLDADURA</b>	
Especificación:	ASTM A36	Soldadura de:	RANURA
Espesor:	12 mm	Proceso de soldadura:	<b>SMAW/GMAW</b>
Longitud:	150 mm	Tipo de Soldadura:	<b>Manual</b> <input checked="" type="checkbox"/>
Ancho:	75 mm		<b>Semiautomática</b> <input checked="" type="checkbox"/>
<b>ARTÍCULO III. METAL DE APORTE</b>			Automática <input type="checkbox"/>
Proceso:	SMAW	GMAW	<b>Un lado</b> <input checked="" type="checkbox"/> Dos lados <input type="checkbox"/>
Especificación (SFA) No.	5.1	5.18	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Diámetro :	3,2 mm	1,2 mm	Múltiples
Denominación AWS:	E 6011	ER70S-6	Múltiples
Marca:	AGA	AGA	Recto / Oscilante
Denominación comercial	C – 13	ER70S-6	Disco
Velocidad de alimentación	N/A	7-8 m/min	Grata
<b>ARTÍCULO IV. GAS DE PROTECCIÓN</b>		<b>ARTÍCULO IX. NOTAS</b>	
Tipo:	AGAMIX 20	• Asegurar limpieza de las partes.	
Caudal:	15 - 20 cfh	• Verificar alineación de la junta.	

**Detalle de la Junta****ARTÍCULO X. CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN**

No de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De avance (mm/min)	Progresión	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Intensidad (Amperios)				oscilado	Recto
1	E6011	3,2	DC+	90 – 120	25 – 30	100 - 120	Arrastre		X
2	ER70S-6	1,2	DC+	200	18	200 - 220	Arrastre	X	
3-n	ER70S-6	1,2	DC+	200	18	200 - 220	Arrastre	X	

**ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)**

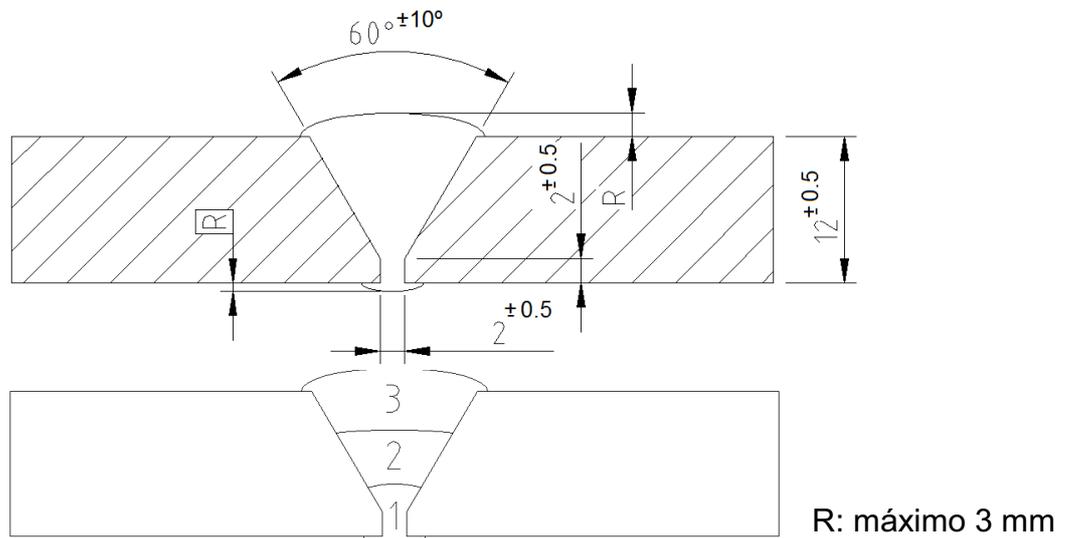
<b>Nombre Compañía:</b> TESIS-EPN-ZAC-AM		<b>WPS No.:</b> WPS - EPN – AM -06	
<b>Según norma :</b> AWS D1.1 Structural Welding Code		<b>Fecha :</b> 01-03-2010	
		<b>Realizado por:</b> Daniel Ayala Galo Mosquera	
<b>ARTÍCULO I. JUNTA UTILIZADA</b>		<b>ARTÍCULO VI. POSICIÓN DE SOLDADURA</b>	
Tipo de junta:	A TOPE	Posición de Soldadura:	<b>1G</b>
Abertura raíz:	2 +/- 0,5 mm	Progresión:	<b>Arrastre</b>
Talón:	2 +/- 0.5 mm	Técnica:	Un pase <input type="checkbox"/>
Preparar bisel:	Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>		<b>Varios pases</b> <input checked="" type="checkbox"/>
Angulo de ranura:	30° +/- 5°	<b>ARTÍCULO VII. PRECALENTAMIENTO</b>	
Espesor:	12 mm	Temperatura:	N/A
Placa de respaldo:	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>	Temperatura entre pases máx:	N/A
<b>ARTÍCULO II. METAL BASE</b>		Tiempo entre pases :	N/A
Especificación:	ASTM A131	<b>ARTÍCULO VIII. TÉCNICA DE SOLDADURA</b>	
Espesor:	12 mm	Soldadura de:	RANURA
Longitud:	150 mm	Proceso de soldadura:	<b>SMAW/GMAW</b>
Ancho:	75 mm	Tipo de Soldadura:	<b>Manual</b> <input checked="" type="checkbox"/>
<b>ARTÍCULO III. METAL DE APORTE</b>			<b>Semiautomática</b> <input checked="" type="checkbox"/>
Proceso:	SMAW		Automática <input type="checkbox"/>
Especificación (SFA) No.	5.1		<b>Un lado</b> <input checked="" type="checkbox"/> <b>Dos lados</b>
Diámetro :	3,2 mm		Si <input type="checkbox"/> <b>No</b> <input checked="" type="checkbox"/>
Denominación AWS:	E 6011		Múltiples
Marca:	AGA		Múltiples
Denominación comercial	C – 13		Recto / Oscilante
Velocidad de alimentación	N/A		Disco
<b>ARTÍCULO IV. GAS DE PROTECCIÓN</b>			Grata
Tipo:	AGAMIX 20		
Caudal:	15 - 20 cfh		
		<b>ARTÍCULO IX. NOTAS</b>	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Asegurar limpieza de las partes.</li> <li>Verificar alineación de la junta.</li> </ul>	

**Detalle de la Junta****ARTÍCULO X. CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN**

No de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De avance (mm/min)	Progresión	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Intensidad (Amperios)				oscilado	Recto
1	E6011	3,2	DC+	90 – 120	25 – 30	100 - 120	Arrastre		X
2	ER70S-6	1,2	DC+	200	18	200 - 220	Arrastre	X	
3-n	ER70S-6	1,2	DC+	200	18	200 - 220	Arrastre	X	

**ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)**

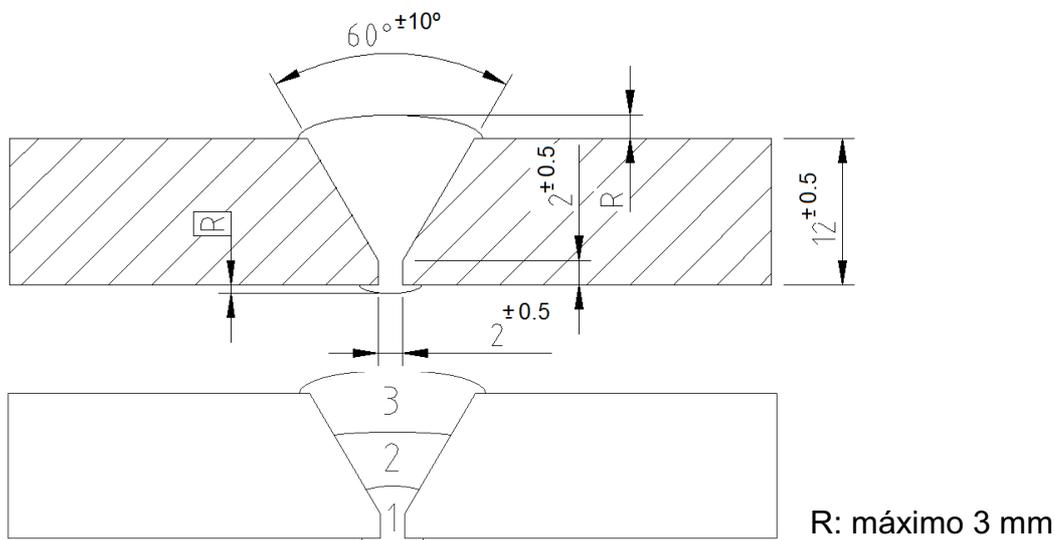
<b>Nombre Compañía:</b> TESIS-EPN-ZAC-AM		<b>WPS No.:</b> WPS - EPN – AM -07	
<b>Según norma :</b> AWS D1.1 Structural Welding Code		<b>Fecha :</b> 01-03-2010	
		<b>Realizado por:</b> Daniel Ayala Galo Mosquera	
<b>ARTÍCULO I. JUNTA UTILIZADA</b>		<b>ARTÍCULO VI. POSICIÓN DE SOLDADURA</b>	
Tipo de junta:	A TOPE	Posición de Soldadura:	<b>1G</b>
Abertura raíz:	2 +/- 0,5 mm	Progresión:	<b>Arrastre</b>
Talón:	2 +/- 0.5 mm	Técnica:	Un pase <input type="checkbox"/>
Preparar bisel:	Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>		<b>Varios pases</b> <input checked="" type="checkbox"/>
Angulo de ranura:	30° +/- 5°	<b>ARTÍCULO VII. PRECALENTAMIENTO</b>	
Espesor:	12 mm	Temperatura:	N/A
Placa de respaldo:	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>	Temperatura entre pases máx:	N/A
<b>ARTÍCULO II. METAL BASE</b>		Tiempo entre pases :	N/A
Especificación:	ASTM A588	<b>ARTÍCULO VIII. TÉCNICA DE SOLDADURA</b>	
Espesor:	12 mm	Soldadura de:	RANURA
Longitud:	150 mm	Proceso de soldadura:	<b>SMAW/GMAW</b>
Ancho:	75 mm	Tipo de Soldadura:	<b>Manual</b> <input checked="" type="checkbox"/>
<b>ARTÍCULO III. METAL DE APORTE</b>			<b>Semiautomática</b> <input checked="" type="checkbox"/>
Proceso:	SMAW		Automática <input type="checkbox"/>
Especificación (SFA) No.	5.1		<b>Un lado</b> <input checked="" type="checkbox"/> <b>Dos lados</b>
Diámetro :	3,2 mm		Si <input type="checkbox"/> <b>No</b> <input checked="" type="checkbox"/>
Denominación AWS:	E 6011		Múltiples
Marca:	AGA		Múltiples
Denominación comercial	C – 13		Recto / Oscilante
Velocidad de alimentación	N/A		Disco
<b>ARTÍCULO IV. GAS DE PROTECCIÓN</b>			Grata
Tipo:	AGAMIX 20		
Caudal:	15 - 20 cfh		
		<b>ARTÍCULO IX. NOTAS</b>	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Asegurar limpieza de las partes.</li> <li>Verificar alineación de la junta.</li> </ul>	

**Detalle de la Junta****ARTÍCULO X. CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN**

No de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De avance (mm/min)	Progresión	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Intensidad (Amperios)				oscilado	Recto
1	E6011	3,2	DC+	90 – 120	25 – 30	100 - 120	Arrastre		X
2	ER70S-6	1,2	DC+	200	18	200 - 220	Arrastre	X	
3-n	ER70S-6	1,2	DC+	200	18	200 - 220	Arrastre	X	

**ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)**

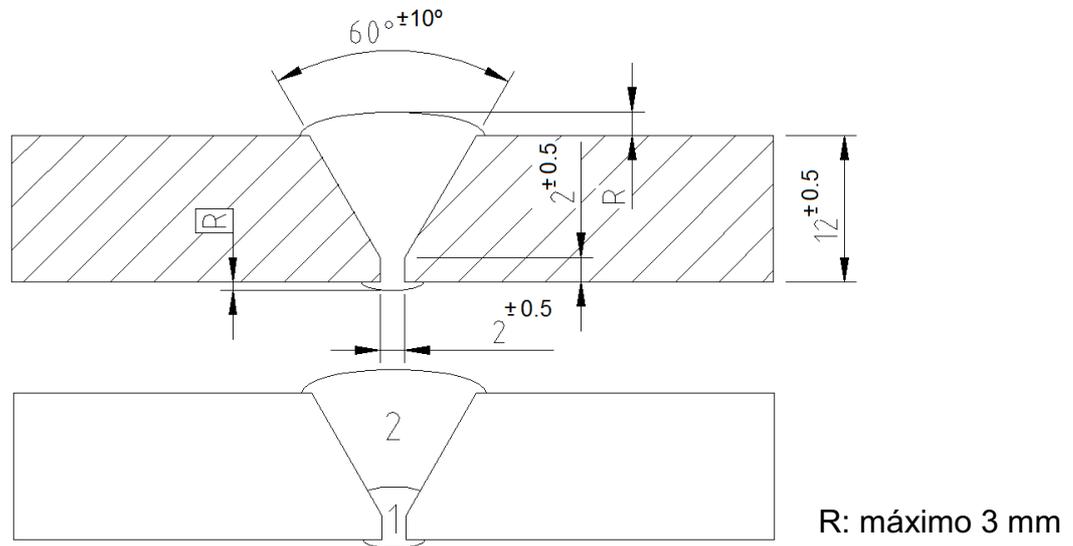
<b>Nombre Compañía:</b> TESIS-EPN-ZAC-AM		<b>WPS No.:</b> WPS - EPN - AM -08	
<b>Según norma :</b> AWS D1.1 Structural Welding Code		<b>Fecha :</b> 01-03-2010	
		<b>Realizado por:</b> Daniel Ayala Galo Mosquera	
<b>ARTÍCULO I. JUNTA UTILIZADA</b>		<b>ARTÍCULO VI. POSICIÓN DE SOLDADURA</b>	
Tipo de junta:	A TOPE	Posición de Soldadura:	<b>1G</b>
Abertura raíz:	2 +/- 0,5 mm	Progresión:	<b>Arrastre</b>
Talón:	2 +/- 0,5 mm	Técnica:	Un pase <input type="checkbox"/>
Preparar bisel:	Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>		<b>Varios pases</b> <input checked="" type="checkbox"/>
Angulo de ranura:	30° +/- 5°	<b>ARTÍCULO VII. PRECALENTAMIENTO</b>	
Espesor:	12 mm	Temperatura:	N/A
Placa de respaldo:	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>	Temperatura entre pases máx:	N/A
<b>ARTÍCULO II. METAL BASE</b>		Tiempo entre pases :	N/A
Especificación:	AISI/SAE 1045	<b>ARTÍCULO VIII. TÉCNICA DE SOLDADURA</b>	
Espesor:	12 mm	Soldadura de:	RANURA
Longitud:	150 mm	Proceso de soldadura:	<b>SMAW/GMAW</b>
Ancho:	75 mm	Tipo de Soldadura:	<b>Manual</b> <input checked="" type="checkbox"/>
<b>ARTÍCULO III. METAL DE APORTE</b>			<b>Semiautomática</b> <input checked="" type="checkbox"/>
Proceso:	SMAW		Automática <input type="checkbox"/>
Especificación (SFA) No.	5.1		<b>Un lado</b> <input checked="" type="checkbox"/> <b>Dos lados</b>
Diámetro :	3,2 mm		Si <input type="checkbox"/> <b>No</b> <input checked="" type="checkbox"/>
Denominación AWS:	E 6011		Múltiples
Marca:	AGA		Múltiples
Denominación comercial	C - 13		Recto / Oscilante
Velocidad de alimentación	N/A		Disco
<b>ARTÍCULO IV. GAS DE PROTECCIÓN</b>			Grata
Tipo:	AGAMIX 20		
Caudal:	15 - 20 cfh		
		<b>ARTÍCULO IX. NOTAS</b>	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Asegurar limpieza de las partes.</li> <li>Verificar alineación de la junta.</li> </ul>	

**Detalle de la Junta****ARTÍCULO X. CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN**

No de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De avance (mm/min)	Progresión	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Intensidad (Amperios)				oscilado	Recto
1	E6011	3,2	DC+	90 - 120	25 - 30	100 - 120	Arrastre		X
2	ER70S-6	1,2	DC+	200	18	200 - 220	Arrastre	X	
3-n	ER70S-6	1,2	DC+	200	18	200 - 220	Arrastre	X	

**ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)**

<b>Nombre Compañía:</b> TESIS-EPN-ZAC-AM		<b>WPS No.:</b> WPS - EPN - AM -09	
<b>Según norma :</b> AWS D1.1 Structural Welding Code		<b>Fecha :</b> 01-03-2010	
<b>ARTÍCULO I. JUNTA UTILIZADA</b>		<b>ARTÍCULO VI. POSICIÓN DE SOLDADURA</b>	
Tipo de junta:	A TOPE	Posición de Soldadura:	<b>1G</b>
Abertura raíz:	2 +/- 0,5 mm	Progresión:	<b>Electrodo Vertical</b>
Talón:	2 +/- 0.5 mm	Técnica:	Un pase <input type="checkbox"/>
Preparar bisel:	Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>		<b>Varios pases <input checked="" type="checkbox"/></b>
Angulo de ranura:	30° +/- 5°	<b>ARTÍCULO VII. PRECALENTAMIENTO</b>	
Espesor:	12 mm	Temperatura:	N/A
Placa de respaldo:	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>	Temperatura entre pases máx:	N/A
<b>ARTÍCULO II. METAL BASE</b>		Tiempo entre pases :	N/A
Especificación:	ASTM A36	<b>ARTÍCULO VIII. TÉCNICA DE SOLDADURA</b>	
Espesor:	12 mm	Soldadura de:	<b>RANURA</b>
Longitud:	150 mm	Proceso de soldadura:	<b>SMAW/SAW</b>
Ancho:	75 mm	Tipo de Soldadura:	Manual <input type="checkbox"/>
<b>ARTÍCULO III. METAL DE APORTE</b>			Semiautomática <input type="checkbox"/>
Proceso:	SMAW		<b>Automática <input checked="" type="checkbox"/></b>
Especificación (SFA) No.	5.1		<b>Un lado <input checked="" type="checkbox"/> Dos lados</b>
Diámetro :	3,2 mm		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Denominación AWS:	E 6011		Múltiples
Marca:	AGA		Múltiples
Denominación comercial	C - 13		Recto
Velocidad de alimentación	N/A		Disco
Stick out	N/A		Grata
<b>ARTÍCULO IV. FUNDENTE</b>			
Tipo:	F8A2		
Marca:	LINCOLNWELD 960		
		<b>ARTÍCULO IX. NOTAS</b>	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Asegurar limpieza de las partes.</li> <li>Verificar alineación de la junta.</li> </ul>	

**Detalle de la Junta****ARTÍCULO X. CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN**

No de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De avance (mm/min)	Progresión	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Intensidad (Amperios)				oscilado	Recto
1	E6011	3,2	DC+	90 - 120	25 - 30	100 - 120	Arrastre		X
2	ENi1K	2	DC+	580	32	590 - 620	Electrodo vertical		X

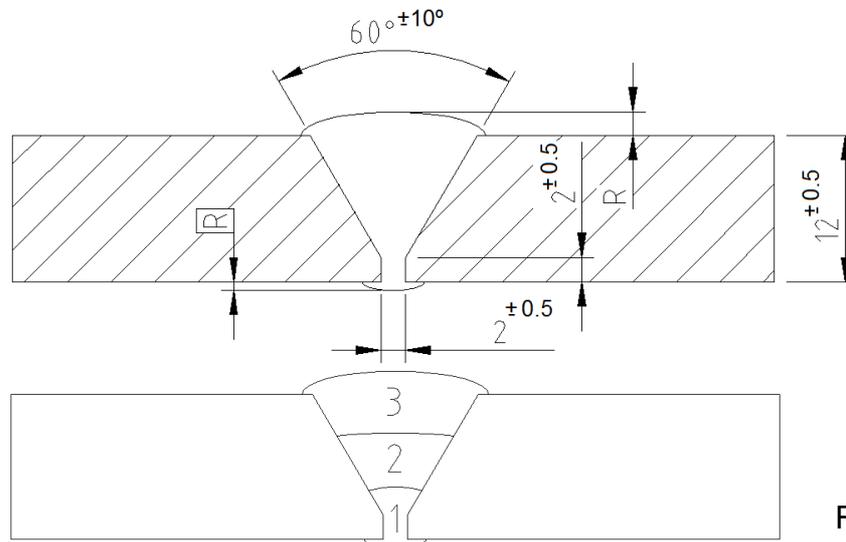
ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)									
<b>Nombre Compañía:</b> TESIS-EPN-ZAC-AM				<b>WPS No.:</b> WPS - EPN - AM -10					
<b>Según norma :</b> AWS D1.1 Structural Welding Code				<b>Fecha :</b> 01-03-2010					
<b>ARTÍCULO I. JUNTA UTILIZADA</b>				<b>ARTÍCULO VI. POSICIÓN DE SOLDADURA</b>					
Tipo de junta:		A TOPE		Posición de Soldadura:		1G			
Abertura raíz:		2 +/- 0,5 mm		Progresión:		Electrodo Vertical			
Talón:		2 +/- 0.5 mm		Técnica:		Un pase <input type="checkbox"/>			
Preparar bisel:		Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>				Varios pases <input checked="" type="checkbox"/>			
Angulo de ranura:		30° +/- 5°		<b>ARTÍCULO VII. PRECALENTAMIENTO</b>					
Espesor:		12 mm		Temperatura:		N/A			
Placa de respaldo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>		Temperatura entre pases máx:		N/A			
				Tiempo entre pases :		N/A			
<b>ARTÍCULO II. METAL BASE</b>				<b>ARTÍCULO VIII. TÉCNICA DE SOLDADURA</b>					
Especificación:		ASTM A131		Soldadura de:		RANURA			
Espesor:		12 mm		Proceso de soldadura:		SMAW/SAW			
Longitud:		150 mm		Tipo de Soldadura:		Manual <input type="checkbox"/>			
Ancho		75 mm				Semiautomática <input type="checkbox"/>			
<b>ARTÍCULO III. METAL DE APORTE</b>						Automática <input checked="" type="checkbox"/>			
Proceso:		SMAW	SAW			Un lado <input checked="" type="checkbox"/> Dos lados <input type="checkbox"/>			
Especificación (SFA) No.		5.1	5.23			Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>			
Diámetro :		3,2 mm	2 mm			Múltiples			
Denominación AWS:		E 6011	ENi1K			Múltiples Recto			
Marca:		AGA	LINCOLN			Disco			
Denominación comercial		C - 13	LA - 75			Grata			
Velocidad de alimentación		N/A	20 m/min						
Stick out		N/A	15 - 25 mm						
<b>ARTÍCULO IV. FUNDENTE</b>				<b>ARTÍCULO IX. NOTAS</b>					
Tipo:		F8A2		<ul style="list-style-type: none"> <li>Asegurar limpieza de las partes.</li> <li>Verificar alineación de la junta.</li> </ul>					
Marca		LINCOLNWELD 960							
<b>Detalle de la Junta</b>									
<p style="text-align: right;">R: máximo 3 mm</p>									
<b>ARTÍCULO X. CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN</b>									
No de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De avance (mm/min)	Progresión	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Intensidad (Amperios)				oscilado	Recto
1	E6011	3,2	DC+	90 - 120	25 - 30	100 - 120	Arrastre		X
2	ENi1K	2	DC+	580	32	590 - 620	Electrodo vertical		X

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)									
<b>Nombre Compañía:</b> TESIS-EPN-ZAC-AM				<b>WPS No.:</b> WPS - EPN - AM -11					
<b>Según norma :</b> AWS D1.1 Structural Welding Code				<b>Fecha :</b> 01-03-2010					
<b>Realizado por:</b> Daniel Ayala, Galo Mosquera									
<b>ARTÍCULO I. JUNTA UTILIZADA</b>				<b>ARTÍCULO VI. POSICIÓN DE SOLDADURA</b>					
Tipo de junta:		A TOPE		Posición de Soldadura:		1G			
Abertura raíz:		2 +/- 0,5 mm		Progresión:		Electrodo Vertical			
Talón:		2 +/- 0.5 mm		Técnica:		Un pase <input type="checkbox"/>			
Preparar bisel:		Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>				Varios pases <input checked="" type="checkbox"/>			
Angulo de ranura:		30° +/- 5°		<b>ARTÍCULO VII. PRECALENTAMIENTO</b>					
Espesor:		12 mm		Temperatura:		N/A			
Placa de respaldo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>		Temperatura entre pases máx:		N/A			
				Tiempo entre pases :		N/A			
<b>ARTÍCULO II. METAL BASE</b>				<b>ARTÍCULO VIII. TÉCNICA DE SOLDADURA</b>					
Especificación:		ASTM A588		Soldadura de:		RANURA			
Espesor:		12 mm		Proceso de soldadura:		SMAW/SAW			
Longitud:		150 mm		Tipo de Soldadura:		Manual <input type="checkbox"/>			
Ancho		75 mm				Semiautomática <input type="checkbox"/>			
<b>ARTÍCULO III. METAL DE APORTE</b>						Automática <input checked="" type="checkbox"/>			
Proceso:		SMAW	SAW			Un lado <input checked="" type="checkbox"/> Dos lados <input type="checkbox"/>			
Especificación (SFA) No.		5.1	5.23			Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>			
Diámetro :		3,2 mm	2 mm			Múltiples			
Denominación AWS:		E 6011	ENi1K			Múltiples Recto			
Marca:		AGA	LINCOLN			Disco			
Denominación comercial		C - 13	LA - 75			Grata			
Velocidad de alimentación		N/A	20 m/min						
Stick out		N/A	15 - 25 mm						
<b>ARTÍCULO IV. FUNDENTE</b>				<b>ARTÍCULO IX. NOTAS</b>					
Tipo:		F8A2		<ul style="list-style-type: none"> <li>Asegurar limpieza de las partes.</li> <li>Verificar alineación de la junta.</li> </ul>					
Marca		LINCOLNWELD 960							
<b>Detalle de la Junta</b>									
<p style="text-align: right;">R: máximo 3 mm</p>									
<b>ARTÍCULO X. CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN</b>									
No de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De avance (mm/min)	Progresión	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Intensidad (Amperios)				oscilado	Recto
1	E6011	3,2	DC+	90 - 120	25 - 30	100 - 120	Arrastre		X
2	ENi1K	2	DC+	580	32	590 - 620	Electrodo vertical		X

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)									
<b>Nombre Compañía:</b> TESIS-EPN-ZAC-AM				<b>WPS No.:</b> WPS - EPN - AM -12					
<b>Según norma :</b> AWS D1.1 Structural Welding Code				<b>Fecha :</b> 01-03-2010					
<b>Realizado por:</b> Daniel Ayala, Galo Mosquera									
<b>ARTÍCULO I. JUNTA UTILIZADA</b>				<b>ARTÍCULO VI. POSICIÓN DE SOLDADURA</b>					
Tipo de junta:		A TOPE		Posición de Soldadura:		1G			
Abertura raíz:		2 +/- 0,5 mm		Progresión:		Electrodo Vertical			
Talón:		2 +/- 0.5 mm		Técnica:		Un pase <input type="checkbox"/>			
Preparar bisel:		Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>				Varios pases <input checked="" type="checkbox"/>			
Angulo de ranura:		30° +/- 5°		<b>ARTÍCULO VII. PRECALENTAMIENTO</b>					
Espesor:		12 mm		Temperatura:		N/A			
Placa de respaldo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>		Temperatura entre pases máx:		N/A			
				Tiempo entre pases :		N/A			
<b>ARTÍCULO II. METAL BASE</b>				<b>ARTÍCULO VIII. TÉCNICA DE SOLDADURA</b>					
Especificación:		AISI/SAE 1045		Soldadura de:		RANURA			
Espesor:		12 mm		Proceso de soldadura:		SMAW/SAW			
Longitud:		150 mm		Tipo de Soldadura:		Manual <input type="checkbox"/>			
Ancho		75 mm				Semiautomática <input type="checkbox"/>			
<b>ARTÍCULO III. METAL DE APORTE</b>						Automática <input checked="" type="checkbox"/>			
Proceso:		SMAW		SAW		Un lado <input checked="" type="checkbox"/> Dos lados <input type="checkbox"/>			
Especificación (SFA) No.		5.1		5.23		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>			
Diámetro :		3,2 mm		2 mm		Múltiples			
Denominación AWS:		E 6011		ENi1K		Múltiples			
Marca:		AGA		LINCOLN		Recto			
Denominación comercial		C - 13		LA - 75		Disco			
Velocidad de alimentación		N/A		20 m/min		Grata			
Stick out		N/A		15 - 25 mm					
<b>ARTÍCULO IV. FUNDENTE</b>				<b>ARTÍCULO IX. NOTAS</b>					
Tipo:		F8A2		<ul style="list-style-type: none"> <li>Asegurar limpieza de las partes.</li> <li>Verificar alineación de la junta.</li> </ul>					
Marca		LINCOLNWELD 960							
<b>Detalle de la Junta</b>									
<p style="text-align: right;">R: máximo 3 mm</p>									
<b>ARTÍCULO X. CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN</b>									
No de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De avance (mm/min)	Progresión	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Intensidad (Amperios)				oscilado	Recto
1	E6011	3,2	DC+	90 - 120	25 - 30	100 - 120	Arrastre		X
2	ENi1K	2	DC+	580	32	590 - 620	Electrodo vertical		X

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)									
<b>Nombre Compañía:</b> TESIS-EPN-ZAC-AM					<b>WPS No.:</b> WPS - EPN - AM -13				
<b>Según norma :</b> AWS D1.1 Structural Welding Code					<b>Fecha :</b> 01-03-2010				
					<b>Realizado por:</b> Daniel Ayala Galo Mosquera				
<b>ARTÍCULO I. JUNTA UTILIZADA</b>					<b>ARTÍCULO VI. POSICIÓN DE SOLDADURA</b>				
Tipo de junta:		A TOPE			Posición de Soldadura:			<b>1G</b>	
Abertura raíz:		2 +/- 0,5 mm			Progresión:			<b>Arrastre</b>	
Talón:		2 +/- 0.5 mm			Técnica:			Un pase <input type="checkbox"/>	
Preparar bisel:		Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>						<b>Varios pases</b> <input checked="" type="checkbox"/>	
Angulo de ranura:		30° +/- 5°			<b>ARTÍCULO VII. PRECALENTAMIENTO</b>				
Espesor:		12 mm			Temperatura:			N/A	
Placa de respaldo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>			Temperatura entre pases máx:			N/A	
<b>ARTÍCULO II. METAL BASE</b>					Tiempo entre pases :				
Especificación:		ASTM A36			<b>ARTÍCULO VIII. TÉCNICA DE SOLDADURA</b>				
Espesor:		12 mm			Soldadura de:			<b>RANURA</b>	
Longitud:		150 mm			Proceso de soldadura:			<b>SMAW</b>	
Ancho:		75 mm			Tipo de Soldadura:			<b>Manual</b> <input checked="" type="checkbox"/>	
<b>ARTÍCULO III. METAL DE APORTE</b>								Semiautomática <input type="checkbox"/>	
Proceso:		SMAW	SMAW			Automática <input type="checkbox"/>			
Especificación (SFA) No.		5.1	5.1			<b>Un lado</b> <input checked="" type="checkbox"/> Dos lados			
Diámetro :		3,2 mm	3,2 mm			Si <input type="checkbox"/> <b>No</b> <input checked="" type="checkbox"/>			
Denominación AWS:		E 6011	E 7018			Múltiples			
Marca:		AGA	AGA			Múltiples			
Denominación comercial		C - 13	B - 10			Recto / Oscilante			
<b>ARTÍCULO IV. GAS DE PROTECCIÓN</b>								Disco	
Tipo:		N/A						Grata	
Caudal:		N/A							
<b>ARTÍCULO IX. NOTAS</b>									
					<ul style="list-style-type: none"> <li>Asegurar limpieza de las partes.</li> <li>Verificar alineación de la junta.</li> </ul>				
<b>Detalle de la Junta</b>									
<p style="text-align: right;">R: máximo 3 mm</p>									
<b>ARTÍCULO X. CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN</b>									
No de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De avance (mm/min)	Progresión	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Intensidad (Amperios)				oscilado	Recto
1	E6011	3,2	DC+	90 - 120	25 - 30	100 - 120	Arrastre		X
2	E7018	3,2	DC+	140 - 150	20 - 25	120 - 140	Arrastre	X	
3-n	E7018	3,2	DC+	140 - 150	20 - 25	120 - 140	Arrastre	X	
ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)									

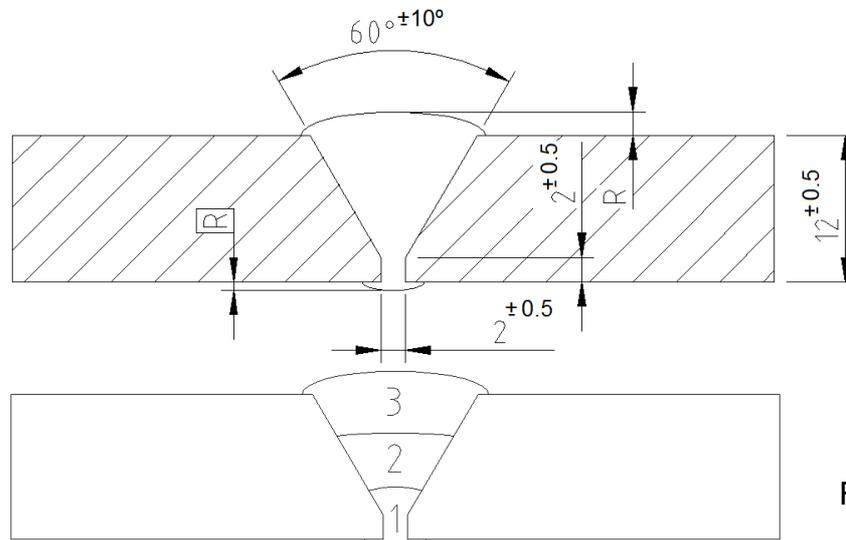
<b>Nombre Compañía:</b> TESIS-EPN-ZAC-AM		<b>WPS No.:</b> WPS - EPN - AM -14	
<b>Según norma :</b> AWS D1.1 Structural Welding Code		<b>Fecha :</b> 01-03-2010	
		<b>Realizado por:</b> Daniel Ayala Galo Mosquera	
<b>ARTÍCULO I. JUNTA UTILIZADA</b>		<b>ARTÍCULO VI. POSICIÓN DE SOLDADURA</b>	
Tipo de junta:	A TOPE	Posición de Soldadura:	<b>1G</b>
Abertura raíz:	2 +/- 0,5 mm	Progresión:	<b>Arrastre</b>
Talón:	2 +/- 0.5 mm	Técnica:	Un pase <input type="checkbox"/>
Preparar bisel:	Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>		<b>Varios pases</b> <input checked="" type="checkbox"/>
Angulo de ranura:	30° +/- 5°	<b>ARTÍCULO VII. PRECALENTAMIENTO</b>	
Espesor:	12 mm	Temperatura:	N/A
Placa de respaldo:	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>	Temperatura entre pases máx:	N/A
<b>ARTÍCULO II. METAL BASE</b>		Tiempo entre pases :	N/A
Especificación:	ASTM A36	<b>ARTÍCULO VIII. TÉCNICA DE SOLDADURA</b>	
Espesor:	12 mm	Soldadura de:	<b>RANURA</b>
Longitud:	150 mm	Proceso de soldadura:	<b>SMAW</b>
Ancho:	75 mm	Tipo de Soldadura:	<b>Manual</b> <input checked="" type="checkbox"/>
<b>ARTÍCULO III. METAL DE APORTE</b>			Semiautomática <input type="checkbox"/>
Proceso:	SMAW		Automática <input type="checkbox"/>
Especificación (SFA) No.	5.1		<b>Un lado</b> <input checked="" type="checkbox"/> Dos lados
Diámetro :	3,2 mm		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Denominación AWS:	E 6011		Múltiples
Marca:	AGA		Múltiples
Denominación comercial	C - 13		Recto / Oscilante
<b>ARTÍCULO IV. GAS DE PROTECCIÓN</b>			Disco
Tipo:	N/A		Grata
Caudal:	N/A		
		<b>ARTÍCULO IX. NOTAS</b>	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Asegurar limpieza de las partes.</li> <li>Verificar alineación de la junta.</li> </ul>	

**Detalle de la Junta****ARTÍCULO X. CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN**

No de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De avance (mm/min)	Progresión	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Intensidad (Amperios)				oscilado	Recto
1	E6011	3,2	DC+	90 - 120	25 - 30	100 - 120	Arrastre		X
2	E7018	3,2	DC+	90 - 100	20 - 25	120 - 140	Arrastre	X	
3-n	E7018	3,2	DC+	90 - 100	20 - 25	120 - 140	Arrastre	X	

**ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)**

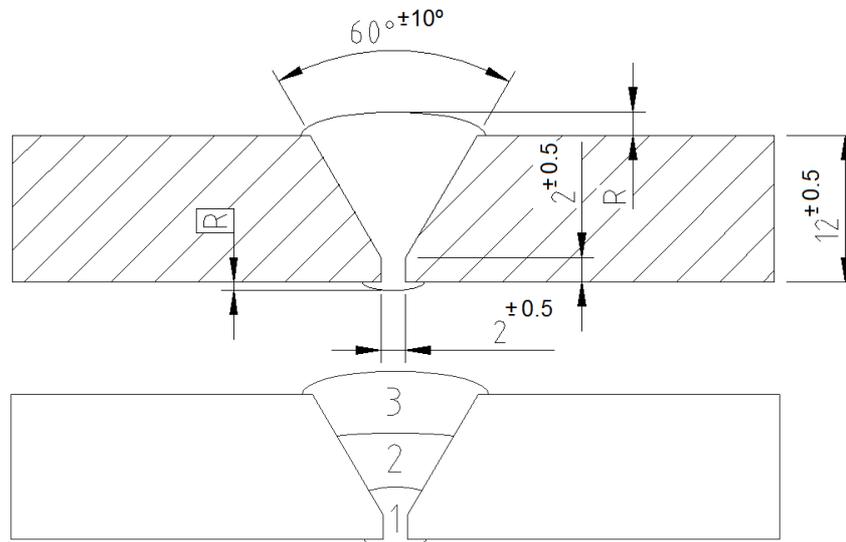
<b>Nombre Compañía:</b> TESIS-EPN-ZAC-AM		<b>WPS No.:</b> WPS - EPN - AM -015	
<b>Según norma :</b> AWS D1.1 Structural Welding Code		<b>Fecha :</b> 01-03-2010	
		<b>Realizado por:</b> Daniel Ayala Galo Mosquera	
<b>ARTÍCULO I. JUNTA UTILIZADA</b>		<b>ARTÍCULO VI. POSICIÓN DE SOLDADURA</b>	
Tipo de junta:	A TOPE	Posición de Soldadura:	<b>1G</b>
Abertura raíz:	2 +/- 0,5 mm	Progresión:	<b>Arrastre</b>
Talón:	2 +/- 0,5 mm	Técnica:	Un pase <input type="checkbox"/>
Preparar bisel:	Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>		<b>Varios pases</b> <input checked="" type="checkbox"/>
Angulo de ranura:	30° +/- 5°	<b>ARTÍCULO VII. PRECALENTAMIENTO</b>	
Espesor:	12 mm	Temperatura:	150°C
Placa de respaldo:	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>	Temperatura entre pases máx:	N/A
<b>ARTÍCULO II. METAL BASE</b>		Tiempo entre pases :	N/A
Especificación:	ASTM A36	<b>ARTÍCULO VIII. TÉCNICA DE SOLDADURA</b>	
Espesor:	12 mm	Soldadura de:	<b>RANURA</b>
Longitud:	150 mm	Proceso de soldadura:	<b>SMAW</b>
Ancho:	75 mm	Tipo de Soldadura:	<b>Manual</b> <input checked="" type="checkbox"/>
<b>ARTÍCULO III. METAL DE APORTE</b>			Semiautomática <input type="checkbox"/>
Proceso:	SMAW		Automática <input type="checkbox"/>
Especificación (SFA) No.	5.1		<b>Un lado</b> <input checked="" type="checkbox"/> Dos lados
Diámetro :	3,2 mm		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Denominación AWS:	E 6011		Múltiples
Marca:	AGA		Múltiples
Denominación comercial	C - 13		Recto / Oscilante
<b>ARTÍCULO IV. GAS DE PROTECCIÓN</b>			Disco
Tipo:	N/A		Grata
Caudal:	N/A		
		<b>ARTÍCULO IX. NOTAS</b>	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Asegurar limpieza de las partes.</li> <li>Verificar alineación de la junta.</li> </ul>	

**Detalle de la Junta****ARTÍCULO X. CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN**

No de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De avance (mm/min)	Progresión	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Intensidad (Amperios)				oscilado	Recto
1	E6011	3,2	DC+	90 - 120	25 - 30	100 - 120	Arrastre		X
2	E7018	3,2	DC+	100 - 140	20 - 25	120 - 140	Arrastre	X	
3-n	E7018	3,2	DC+	100 - 140	20 - 25	120 - 140	Arrastre	X	

**ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)**

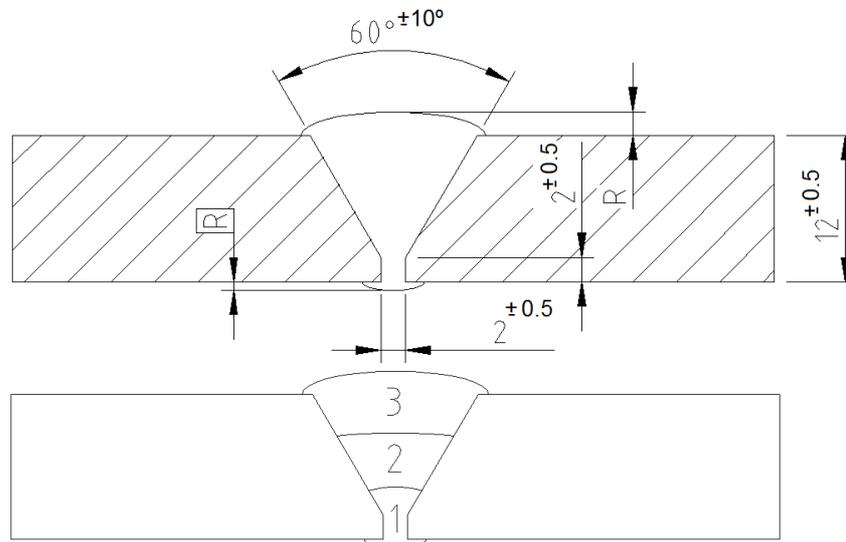
<b>Nombre Compañía:</b> TESIS-EPN-ZAC-AM		<b>WPS No.:</b> WPS - EPN – AM -016	
<b>Según norma :</b> AWS D1.1 Structural Welding Code		<b>Fecha :</b> 01-03-2010	
		<b>Realizado por:</b> Daniel Ayala Galo Mosquera	
<b>ARTÍCULO I. JUNTA UTILIZADA</b>		<b>ARTÍCULO VI. POSICIÓN DE SOLDADURA</b>	
Tipo de junta:	A TOPE	Posición de Soldadura:	<b>1G</b>
Abertura raíz:	2 +/- 0,5 mm	Progresión:	<b>Arrastre</b>
Talón:	2 +/- 0,5 mm	Técnica:	Un pase <input type="checkbox"/>
Preparar bisel:	Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>		<b>Varios pases</b> <input checked="" type="checkbox"/>
Angulo de ranura:	30° +/- 5°	<b>ARTÍCULO VII. TRATAMIENTO TÉRMICO</b>	
Espesor:	12 mm	Temperatura inicial en el horno :	300 – 315 °C
Placa de respaldo:	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>	Temperatura a mantener:	600°C
		Tiempo a mantener:	45 minutos
		Enfriamiento:	En horno cerrado
<b>ARTÍCULO II. METAL BASE</b>		<b>ARTÍCULO VIII. TÉCNICA DE SOLDADURA</b>	
Especificación:	ASTM A36	Soldadura de:	<b>RANURA</b>
Espesor:	12 mm	Proceso de soldadura:	<b>SMAW</b>
Longitud:	150 mm	Tipo de Soldadura:	<b>Manual</b> <input checked="" type="checkbox"/>
Ancho:	75 mm		Semiautomática <input type="checkbox"/>
			Automática <input type="checkbox"/>
<b>ARTÍCULO III. METAL DE APORTE</b>		Soldadura a:	<b>Un lado</b> <input checked="" type="checkbox"/> Dos lados <input type="checkbox"/>
Proceso:	SMAW	Cordón de respaldo:	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Especificación (SFA) No.	5.1	Pase multiples o simples ( por lado)	Múltiples
Diámetro :	3,2 mm	Electrodos Múltiples o únicos	Múltiples
Denominación AWS:	E 6011	Cordón Recto u Oscilante	Recto / Oscilante
Marca:	AGA	Limpieza:	Disco
Denominación comercial	C – 13	Primer pase.	Grata
		Pases siguientes.	
<b>ARTÍCULO IV. GAS DE PROTECCIÓN</b>		<b>ARTÍCULO IX. NOTAS</b>	
Tipo:	N/A	<ul style="list-style-type: none"> <li>Asegurar limpieza de las partes.</li> <li>Verificar alineación de la junta.</li> </ul>	
Caudal:	N/A		

**Detalle de la Junta****ARTÍCULO X. CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN**

No de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De avance (mm/min)	Progresión	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Intensidad (Amperios)				oscilado	Recto
1	E6011	3,2	DC+	90 – 120	25 – 30	100 - 120	Arrastre		X
2	E7018	3,2	DC+	100 – 140	20 – 25	120 - 140	Arrastre	X	
3-n	E7018	3,2	DC+	100 – 140	20 – 25	120 - 140	Arrastre	X	

**ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)**

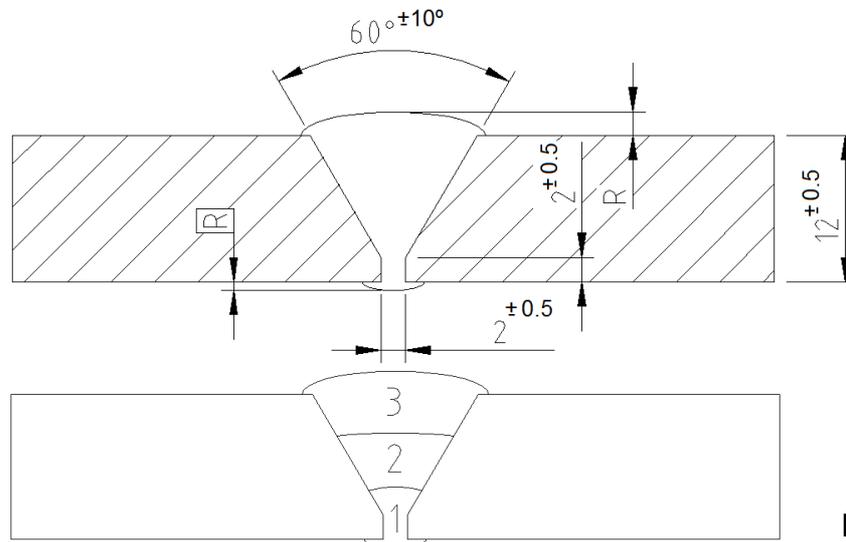
<b>Nombre Compañía:</b> TESIS-EPN-ZAC-AM		<b>WPS No.:</b> WPS - EPN – AM -017	
<b>Según norma :</b> AWS D1.1 Structural Welding Code		<b>Fecha :</b> 01-03-2010	
		<b>Realizado por:</b> Daniel Ayala Galo Mosquera	
<b>ARTÍCULO I. JUNTA UTILIZADA</b>		<b>ARTÍCULO VI. POSICIÓN DE SOLDADURA</b>	
Tipo de junta:	A TOPE	Posición de Soldadura:	<b>1G</b>
Abertura raíz:	2 +/- 0,5 mm	Progresión:	<b>Arrastre</b>
Talón:	2 +/- 0,5 mm	Técnica:	Un pase <input type="checkbox"/>
Preparar bisel:	Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>		<b>Varios pases</b> <input checked="" type="checkbox"/>
Angulo de ranura:	30° +/- 5°	<b>ARTÍCULO VII. PRECALENTAMIENTO</b>	
Espesor:	12 mm	Temperatura:	N/A
Placa de respaldo:	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>	Temperatura entre pases máx:	N/A
<b>ARTÍCULO II. METAL BASE</b>		Tiempo entre pases :	N/A
Especificación:	ASTM A36	<b>ARTÍCULO VIII. TÉCNICA DE SOLDADURA</b>	
Espesor:	12 mm	Soldadura de:	<b>RANURA</b>
Longitud:	150 mm	Proceso de soldadura:	<b>SMAW</b>
Ancho:	75 mm	Tipo de Soldadura:	<b>Manual</b> <input checked="" type="checkbox"/>
<b>ARTÍCULO III. METAL DE APORTE</b>			Semiautomática <input type="checkbox"/>
Proceso:	SMAW		Automática <input type="checkbox"/>
Especificación (SFA) No.:	5.1	Soldadura a:	<b>Un lado</b> <input checked="" type="checkbox"/> Dos lados <input type="checkbox"/>
Diámetro :	3,2 mm	Cordón de respaldo:	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Denominación AWS:	E 6011	Pase multiples o simples ( por lado)	Múltiples
Marca:	AGA	Electrodos Múltiples o únicos	Múltiples
Denominación comercial	C – 13	Cordón Recto u Oscilante	Recto / Oscilante
<b>ARTÍCULO IV. GAS DE PROTECCIÓN</b>		Limpieza:	Disco
Tipo:	N/A	Primer pase.	Grata
Caudal:	N/A	Pases siguientes.	
		<b>ARTÍCULO X. NOTAS</b>	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Asegurar limpieza de las partes.</li> <li>• Verificar alineación de la junta.</li> </ul>	

**Detalle de la Junta****ARTÍCULO X. CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN**

No de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De avance (mm/min)	Progresión	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Intensidad (Amperios)				oscilado	Recto
1	E6011	3,2	AC	90 – 120	25 – 30	100 - 120	Arrastre		X
2	E6011	3,2	AC	90 – 120	25 – 30	100 - 120	Arrastre	X	
3-n	E6011	3,2	AC	90 – 120	25 – 30	100 - 120	Arrastre	X	

**ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)**

<b>Nombre Compañía:</b> TESIS-EPN-ZAC-AM		<b>WPS No.:</b> WPS - EPN – AM -018	
<b>Según norma :</b> AWS D1.1 Structural Welding Code		<b>Fecha :</b> 01-03-2010	
		<b>Realizado por:</b> Daniel Ayala Galo Mosquera	
<b>ARTÍCULO I. JUNTA UTILIZADA</b>		<b>ARTÍCULO VI. POSICIÓN DE SOLDADURA</b>	
Tipo de junta:	A TOPE	Posición de Soldadura:	<b>1G</b>
Abertura raíz:	2 +/- 0,5 mm	Progresión:	<b>Arrastre</b>
Talón:	2 +/- 0.5 mm	Técnica:	Un pase <input type="checkbox"/>
Preparar bisel:	Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>		<b>Varios pases</b> <input checked="" type="checkbox"/>
Angulo de ranura:	30° +/- 5°	<b>ARTÍCULO VII. PRECALENTAMIENTO</b>	
Espesor:	12 mm	Temperatura:	N/A
Placa de respaldo:	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>	Temperatura entre pases máx:	N/A
<b>ARTÍCULO II. METAL BASE</b>		Tiempo entre pases :	N/A
Especificación:	ASTM A36	<b>ARTÍCULO VIII. TÉCNICA DE SOLDADURA</b>	
Espesor:	12 mm	Soldadura de:	<b>RANURA</b>
Longitud:	150 mm	Proceso de soldadura:	<b>SMAW</b>
Ancho:	75 mm	Tipo de Soldadura:	<b>Manual</b> <input checked="" type="checkbox"/>
<b>ARTÍCULO III. METAL DE APORTE</b>			Semiautomática <input type="checkbox"/>
Proceso:	SMAW		Automática <input type="checkbox"/>
Especificación (SFA) No.	5.1	Soldadura a:	<b>Un lado</b> <input checked="" type="checkbox"/> Dos lados
Diámetro :	3,2 mm	Cordón de respaldo:	Si <input type="checkbox"/> <b>No</b> <input checked="" type="checkbox"/>
Denominación AWS:	E 6011	Pase multiples o simples ( por lado)	Múltiples
Marca:	AGA	Electrodos Múltiples o únicos	Múltiples
Denominación comercial	C – 13	Cordón Recto u Oscilante	Recto / Oscilante
<b>ARTÍCULO IV. GAS DE PROTECCIÓN</b>		Limpieza:	Disco
Tipo:	N/A	Primer pase.	Grata
Caudal:	N/A	Pases siguientes.	
<b>ARTÍCULO IX. OBSERVACIONES</b>		<b>ARTÍCULO X. NOTAS</b>	
Esperar entre pases hasta la temperatura de enfriamiento.		<ul style="list-style-type: none"> <li>Asegurar limpieza de las partes.</li> <li>Verificar alineación de la junta.</li> </ul>	

**Detalle de la Junta****ARTÍCULO X. CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN**

No de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De avance (mm/min)	Progresión	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Intensidad (Amperios)				oscilado	Recto
1	E6011	3,2	AC	90 – 120	25 – 30	100 - 120	Arrastre		X
2	E6011	3,2	AC	90 – 120	25 – 30	100 - 120	Arrastre	X	
3-n	E6011	3,2	AC	90 – 120	25 – 30	100 - 120	Arrastre	X	

## WPS VARIACIÓN DE PROCESOS Y MATERIALES

Tabla A.1.- Procedimientos de soldadura variando procesos y materiales

<b>WPS</b>	<b>DESIGNACIÓN</b>
WPS - EPN – AM -1	Soldadura del acero ASTM A36, con proceso SMAW, espesor de 12mm y condiciones normales
WPS - EPN – AM -2	Soldadura del acero ASTM A131, con proceso SMAW, espesor de 12mm y condiciones normales
WPS - EPN – AM -3	Soldadura del acero ASTM A588, con proceso SMAW, espesor de 12mm y condiciones normales
WPS - EPN – AM -4	Soldadura del acero AISI/SAE 1045, con proceso SMAW, espesor de 12mm y condiciones normales
WPS - EPN – AM -5	Soldadura del acero ASTM A36, con proceso GMAW, espesor de 12mm y condiciones normales
WPS - EPN – AM -6	Soldadura del acero ASTM A131, con proceso GMAW, espesor de 12mm y condiciones normales
WPS - EPN – AM -7	Soldadura del acero ASTM A588, con proceso GMAW, espesor de 12mm y condiciones normales
WPS - EPN – AM -8	Soldadura del acero AISI/SAE 1045, con proceso GMAW, espesor de 12mm y condiciones normales
WPS - EPN – AM -9	Soldadura del acero ASTM A36, con proceso SAW, espesor de 12mm y condiciones normales
WPS - EPN – AM -10	Soldadura del acero ASTM A131, con proceso SAW, espesor de 12mm y condiciones normales
WPS - EPN – AM -11	Soldadura del acero ASTM A588, con proceso SAW, espesor de 12mm y condiciones normales
WPS - EPN – AM -12	Soldadura del acero AISI/SAE 1045, con proceso SAW, espesor de 12mm y condiciones normales

## WPS VARIACIÓN DE PROCESOS Y MATERIALES

La Norma AWS D1.1 contempla que un procedimiento válido abarca un rango de espesores desde 3mm hasta el doble del espesor. Por lo tanto, los procedimientos para la variación de espesores es el WPS - EPN – AM -1.

Tabla A.2.- Procedimiento de soldadura para espesores diferentes.

<b>WPS</b>	<b>CORRESPONDENCIA</b>
WPS - EPN – AM -1	Soldadura del acero ASTM A36, con proceso SMAW, espesor de 12mm y condiciones normales

## WPS VARIACIÓN DE NIVELES DE CORRIENTE

Tabla A.3.- Procedimientos de soldadura para diferentes niveles de corriente.

<b>WPS</b>	<b>CORRESPONDENCIA</b>
WPS - EPN – AM -13	Soldadura del acero ASTM A36, con proceso SMAW, espesor de 12mm, altos niveles de corriente y las otras condiciones normales.
WPS - EPN – AM -1	Soldadura del acero ASTM A36, con proceso SMAW, espesor de 12mm y condiciones normales
WPS - EPN – AM -14	Soldadura del acero ASTM A36, con proceso SMAW, espesor de 12mm, bajos niveles de corriente y las otras condiciones normales.

## WPS VARIACIÓN DE PRECALENTAMIENTO Y TRATAMIENTO TÉRMICO

Tabla A.4.- Procedimientos de soldadura con tratamiento térmico y precalentamiento.

WPS	CORRESPONDENCIA
WPS - EPN – AM -15	Soldadura del acero ASTM A36, con proceso SMAW, espesor de 12mm, bajos niveles de corriente y las otras condiciones normales. Adicionalmente Precalentamiento a 150°C.
WPS - EPN – AM -1	Soldadura del acero ASTM A36, con proceso SMAW, espesor de 12mm y condiciones normales
WPS - EPN – AM -16	Soldadura del acero ASTM A36, con proceso SMAW, espesor de 12mm y condiciones normales. Adicionalmente tratamiento térmico de alivio de tensiones.

## WPS VARIACIÓN DE POLARIDAD DE CORRIENTE

Tabla A.5.- Procedimientos de soldadura para diferentes polaridades de corriente.

WPS	CORRESPONDENCIA
WPS - EPN – AM -17	Soldadura del acero ASTM A36, con proceso SMAW, espesor de 12mm, polaridad AC y las otras condiciones normales.
WPS - EPN – AM -1	Soldadura del acero ASTM A36, con proceso SMAW, espesor de 12mm y condiciones normales (DC+).

## WPS VARIACIÓN DE VELOCIDAD DE SOLDADURA

La velocidad de soldadura no es una variable esencial por lo que no requiere otro procedimiento. Por lo tanto es el WPS - EPN – AM -1

Tabla A.6.- Procedimiento de soldadura para velocidades de soldadura diferentes

WPS	CORRESPONDENCIA
WPS - EPN – AM -1	Soldadura del acero ASTM A36, con proceso SMAW, espesor de 12mm y condiciones normales

## WPS CON ESPERA ENTRE PASES

La velocidad de soldadura no es una variable esencial por lo que no requiere otro procedimiento. Por lo tanto es el WPS - EPN – AM -18

Tabla A.7.- Procedimiento de soldadura para espesores diferentes.

<b>WPS</b>	<b>CORRESPONDENCIA</b>
WPS - EPN – AM -18	Soldadura del acero ASTM A36, con proceso SMAW, espesor de 12mm y condiciones normales. Se debe esperar hasta el enfriamiento a temperatura ambiente entre cordones

**ANEXO 3**  
**PROPIEDADES TÉRMICAS DE ALGUNAS ALEACIOENS**

**PROPIEDADES TERMICAS DE ALGUNAS ALEACIONES**

Propiedades a 20°C		Densidad $\rho$ Kg/m <sup>3</sup>	Calor especif J/kg <sup>o</sup> K	Conduct. k W/m <sup>o</sup> K	Difusividad $\alpha \times 10^5$ m <sup>2</sup> /seg	Conductividad térmica en (W/m <sup>o</sup> C) a la temperatura en °C:												
Aleaciones	Composición					-100	0°C	100	200	300	400	600	800	1000				
Duraluminio	94-96% Al; 3-5% Cu	2787	833	164	6,680	126	159	182	194									
Siluminio	87% Al; 1.33% Si	2659	871	164	7.100	119	137	144	152	161								
Alusil	80% Al; 20% Si	2627	854	161	7.172	144	157	168	175	178								
Al-Mg-Si	97% Al; 1% Mg; 1% Si	2707	8922	177	7.311		175	189	204									
Bronce de aluminio	95% Cu; 5% Al	8666	410	83	2,330													
Bronce	75% Cu; 25% Sn	8666	343	26	0.860													
Latón rojo	85% Cu; 9% Sn; 6% Zn	8714	385	61	1,804		59	71										
Latón	70% Cu; 30% Zn	8522	385	111	3,412	88		128	144	147	147							
Plata alemana	62% Cu; 15% Ni; 22% Zn	8618	394	24,9	0,733	19,2		31	40	45	48							
Constantán	60% Cu; 40% Ni	8922	410	22,7	0,612	21		22	26									
Fundición	4% C	7272	420	52	1,702													
Acero al carbono	0,5% C	7833	465	54	1,474		55	52	48	45	42	35	31	29				
	1% C	7801	473	43	1,172		43	43	42	40	36	33	29	28				
	1,5% C	7753	486	36	0,970		36	36	36	35	33	31	28	28				
Acero al cromo	1% Cr	7865	460	61	1,665		62	55	52	47	42	36	33	33				
	5% Cr	7833	460	40	1,110		40	38	36	36	33	29	29	29				
	20% Cr	7689	460	40	1,11		22	22	22	22	24	24	26	29				
Acero al níquel	10% Ni	7945	460	26	0,720													
	20% Ni	7993	460	19	0,526													
	40% Ni	8169	460	10	0,279													
	60% Ni	8378	460	19	0,493													
	80% Ni	8618	0,46	35	0,872													
	Invar 36% Ni	8.137	460	10,7	0,286													
Acero al Cr-Ni	15% Cr; 10% Ni	7865	460	19	0,526													
	15% Cr; 40% Ni	8073	460	11,6	0,305													
	18% Cr; 8% Ni	7817	460	16,3	0,444		16	17	17	19	19	22	27	31				
	20% Cr; 15% Ni	7833	460	15,1	0,415													
	25% Cr; 20% Ni	7865	460	12,8	0,361													
	80% Cr; 15% Ni	8522	460	17	0,444													
Acero al manganeso	1% Mn	7865	460	50	1,388													
	5% Mn	7849	460	22	0,637													
Acero al silicio	1% Si	7769	460	42	1,164													
	5% Si	7417	460	19	0,555													
Acero al tungsteno	1% W	7913	448	66	1,858													
	5% W	8073	435	54	1,525													
	10% W	8314	419	48	1,391													
Ni-Cr	90% Ni; 10% Cr	8666	444	17	0,444		17	19	21	23	25							
	80% Ni; 20% Cr	8314	444	12,6	0,343		12	14	16	17	18	23						
Mg-Al; electrol.	Mg; 7 % Al; 1,5% Zn;	1810	1000	66	3,605		52	62	74	83								

Tabla A.8.- Propiedades térmicas de algunas aleaciones. <sup>35</sup>

**ANEXO 4**  
**TABLA DE COMPOSICIÓN DEL ELECTRODO PARA**  
**SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO**

SUBMERGED ARC (SAW) ELECTRODE

# Lincolnweld® LA-75

Low Alloy Solid Electrode  
AWS ENi1K

FLUX-CORED

SUBMERGED ARC

STAINLESS &amp; NICKEL

HARDFACING

## Key Features

- ▶ A low carbon, medium manganese, high silicon, nickel-bearing electrode designed for use with Lincolnweld® neutral fluxes
- ▶ Suitable for use in applications requiring less than 1% Ni wire composition

## Conformances

AWS A5.23/A5.23M: 2007 ENi1K

## Recommended Fluxes

Lincolnweld® 860, 865, 880, 880M, 882, 888, MIL800-H, MIL800-HPNi, 960, 980

## DIAMETERS / PACKAGING

Diameter in. (mm)	60 lb (27.2 kg) Coil	1000 lb (453 kg) Speed Feed® Drum
5/64 (2.0)	ED011066	
3/32 (2.4)	ED011064	ED027225
1/8 (3.2)	ED011062	
5/32 (4.0)	ED011065	ED027224

## WIRE COMPOSITION<sup>(1)</sup> - As Required per AWS A5.23/A5.23M:2007

	%C	%Mn	%Si	%Ni	%S	%P	%Cu
Lincolnweld® LA-75	0.12	0.80 - 1.40	0.40 - 0.80	0.75 - 1.25	0.020	0.020	0.35

<sup>(1)</sup>Single values are maximums.

[276]

THE LINCOLN ELECTRIC COMPANY

## BIBLIOGRAFÍA

- 1.- ANSI/AWS A3.0-94; "Standard Welding Terms and Definitions"; American Welding Society; Estados Unidos, 1994
- 2.- O'BRIEN, Robert L.; "Jefferson's WELDING ENCYCLOPEDIA"; 8va. Edición; Sociedad Americana de Soldadura; Estados Unidos; 1997.
- 3.- INDURA; "Manual de Sistemas y Materiales de Soldadura"; Indura S.A. Industria y Comercio; Chile; 2007.
- 4.- HORWITZ, Henry; "Soldadura. Aplicaciones y práctica"; Ediciones Alfaomega; México; 1990.
- 5.- KOU, Sindo; "Welding Metallurgy"; Wiley-Interscience; Estados Unidos; 2003.
- 6.- CARY, Howard; "Manual de Soldadura Moderna"; Prentice Hall Hispanoamericana; Segunda Edición; México; 1992.
- 7.- ANSI/AWS A5.1-91; "Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding"; American Welding Society; Estados Unidos, 1991.
- 8.- OATES, William; "Welding Handbook"; American Welding Society; Octava Edición, Volumen 2: Procesos de soldadura; Estados Unidos; 1991.
- 9.- ANSI/AWS A5.18; "Specification for Carbon Steel Electrodes and rods for Gas Metal Arc Welding"; American Welding Society; Estados Unidos, 1993.
- 10.- ANSI/AWS A5.17; "Specification for Carbon Steel Electrodes and fluxes for Submerged Arc Welding"; American Welding Society; Estados Unidos, 1989.
- 11.- SMITH, William; "Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales"; Tercera edición; Mc Graw-Hill; España; 1998
- 12.- AVNER, Sidney; "Introducción a la Metalúrgica Física"; Segunda Edición; McGraw-Hill; México; 1988.
- 13.- INSPEQ Ingeniería Ltda.; "Documentación Técnica en Supervisión de Construcciones Soldadas"; Colombia; 2010.
- 14.- JASTRZEBSKI, Zbigniew; "NATURALEZA Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES PARA INGENIERÍA"; Interamericana; Segunda Edición; México; 1979.
- 15.- DARDATI; "MECÁNICA AVANZADA DE LOS MATERIALES".
- 16.- Universidad de Huelva; Ciencia de los Materiales; Ingeniería Química.

- 17.- ASKELAND, Donald; "Ciencia e Ingeniería de los Materiales"; Tercera Edición; International Thomson Editores; México.
- 18.- ASM Handbook; "Properties and selection: Iron, Steels and high performance alloys"; Volumen 1; Estados Unidos; 2005.
- 19.- CATAÑÓN, Ricardo; "Ciencia y Tecnología de los Materiales"; Universidad de Oviedo
- 20.- CALLISTER, William; "Ciencia e Ingeniería de los Materiales"; Editorial Reverté; México.
- 21.- SEFERIAN, D; "Las Soldaduras"; Urmo S.A.mde Ediciones; España; 1991.
- 22.- MANGONON, P; "Ciencia de Materiales. Selección y Diseño"; Prentice Hall; México; 2001.
- 23.- EASTERLING, K; "Introduction to the Physical Metallurgy of Welding"; Butterworth Heinemann; Inglaterra; 1992.
- 24.- LINCOLN, J; "The procedure Handbook of Arc Welding"; The James F. Lincoln Arc Welding Foundation; 14va Edición; Estados Unidos; 2000.
- 25.- ASTM A36; "Standard Specification for Carbon Structural Steel" American Society for Testing and Materials; Estados Unidos; 1997.
- 26.- AWS D1.1/D1.1M; "Structural Welding Code"; American Welding Society; 21va. Edición; Estados Unidos; 2008.
- 27.- ASTM A588; "Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Structural Steel with 50 ksi [345 MPa] Minimum Yield Point to 4-in. [100-mm] Thick"; American Society for Testing and Materials; Estados Unidos; 2001.
- 28.- ASTM A131; "Standard Specification for Structural Steel for Ships"; American Society for Testing and Materials; Estados Unidos; 2001.
- 29.- AISI 1045; "Steel, cold drawn, low temperature, stress relieved round"; American Iron And Steel Institute; Estados Unidos.
- 30.- QUEZADA, H, ZALAZAR, M.; "Métodos Para Calcular El Pre calentamiento De Uniones Soldadas"  
[http://fain.uncoma.edu.ar/materias/Metalurgica\\_de\\_la\\_soldadura/Archivos%20de%20Metsold/CUADERNO%20Temperatura%20de%20Precalentamiento.pdf](http://fain.uncoma.edu.ar/materias/Metalurgica_de_la_soldadura/Archivos%20de%20Metsold/CUADERNO%20Temperatura%20de%20Precalentamiento.pdf)

- 31.- <http://tecnologiawhite.blogspot.com/2009/02/procesos-de-obtencion-de-productos.html>
- 32.- <http://procesomecanico.blogspot.com/>
- 33.- <http://www.utp.edu.co/~publio17/aceros.htm>
- 34.- <http://www.arqhys.com/arquitectura/elacero-clasificacion.html>
- 35.- <http://materias.fi.uba.ar/6731/Tablas/Tabla5.pdf>
- 36.- EXSA; "Manual de soldadura y catálogo de productos"; OERLIKON EXSA S.A.; Perú; 1995.
- 37.- HERNÁNDEZ, R.; "Manual del soldador"; Asociación Española de Soldadura y Tecnología de Unión CESOL; España; 2005.
- 38.- VEDIA, L; SVOBODA H; "Introducción a la Metalurgia de la Soldadura"; 2004.