

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE LA INGENIERÍA MECÁNICA**

### **ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR EN EL ACERO A-516 GRADO 70 CON JUNTAS TIPO K Y ESPESOR DE 1 PULG, CON DIFERENTE ENTRADA DE CALOR (VOLTAJE Y CORRIENTE)**

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

**JUAN GABRIEL CAJAMARCA GUAMBI**

**joeyca@live.com**

**ADRIANA VICTORIA SALAZAR ESCOBAR**

**adse\_89@hotmail.com**

**DIRECTOR: MSc. CARLOS WIME DÍAZ CAMPOVERDE**

**carlos.diaz@epn.edu.ec**

**CO-DIRECTOR: MSc. GABRIEL EDMUNDO VELASTEGUÍ BALDA**

**gabriel.velastegui@epn.edu.ec**

**Quito, Septiembre 2015**

## **DECLARACIÓN**

Nosotros, Adriana Victoria Salazar Escobar y Juan Gabriel Cajamarca Guambi, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

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

---

**Adriana Victoria Salazar  
Escobar**

---

**Juan Gabriel Cajamarca  
Guambi**

## **CERTIFICACIÓN**

Certificamos que bajo nuestra dirección, el presente proyecto de titulación fue realizado en su totalidad por los señores: ADRIANA VICTORIA SALAZAR ESCOBAR y JUAN GABRIEL CAJAMARCA GUAMBI.

---

**Ing. Carlos Wime Díaz Campoverde**  
**DIRECTOR DE PROYECTO**

---

**Ing. Gabriel Edmundo Velasteguí**  
**Balda**  
**CO-DIRECTOR DE PROYECTO**

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por haberme dado la vida, por su infinito amor, por llenarme de bendiciones y por permitirme compartir la vida con personas maravillosas.

A mis amados padres Hugo y Elena, gracias por el esfuerzo, la dedicación, el amor incondicional, las lecciones aprendidas, gracias por luchar por nosotros y enseñarnos que lo más valioso es la familia y que el trabajo es la base fundamental para emprender cualquier proyecto.

A Javier, gracias mi amor por apoyarme, por enseñarme que la vida tiene sentido y que hay que luchar por tus sueños. Gracias por hacerme sentir la persona más importante de este mundo, es una bendición el haberte conocido y tenerte en mi vida.

A mis hermanos Amelia, Diego, Freddy, Hugo, Pepe y Daniel, gracias por estar ahí en las buenas y en las malas chicos, no sé qué sería la vida sin ustedes.

A mi querido tío Gonzalo Salazar un ejemplo a seguir, gracias por su apoyo para este proyecto.

A Carolina, primita gracias por tu amistad y tus consejos.

A mi querida facultad que supo acogerme en sus aulas, educarme tanto en la vida profesional como en la cotidiana.

Al Ing. Carlos Díaz y al Ing. Gabriel Velasteguí, quienes han sido unos tutores grandiosos sin ustedes este proyecto no hubiera sido llevado a cabo. Gracias por su acertada guía y su amistad.

A Juan gracias por tu amistad y por soportarme, fue un gusto trabajar contigo a pesar de todas las canas verdes que nos sacamos mutuamente.

A mis profesores, amigos y compañeros quienes han formado parte de esta hermosa etapa de la universidad.

**Adriana Victoria Salazar Escobar**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por brindarme la vida y a una gran familia.

Agradezco a mis padres Juan y Griselda por brindarme su apoyo en todo momento y por confiar en mí para alcanzar la meta de ser un profesional.

A mi tío Luis que ha sido un ejemplo de que siempre hay que salir adelante.

A mi hermana Jenny que con su alegría ha sido mi gran fortaleza para no decaer.

A mis abuelitos, tíos, primos que me apoyaron para que este sueño se cumpla.

A mis amigos de la facultad por los gratos momentos vividos dentro y fuera de las aulas.

Al Ing. Carlos Díaz y al Ing. Gabriel Velasteguí por la colaboración en el presente proyecto.

A mis profesores que me brindaron sus conocimientos a lo largo de toda la carrera.

A mi amiga Victoria por considerarme para la realización del presente proyecto y que con esfuerzo lo hemos culminado.

Al personal del laboratorio de metalografía, soldadura, maquinas herramientas y LAEV por su apoyo en la realización del proyecto

**Juan Gabriel Cajamarca Guambi**

## DEDICATORIA

Dedico la culminación de este proyecto y de esta etapa de mi vida a mis amados padres, Hugo y Elena, espero no defraudarlos y que su esfuerzo y dedicación puestos en mi rindan frutos.

A Javier, por tu amistad, tu amor, el apoyo que me brindas y por creer en mí, pero sobre todo por ser la persona que me hace feliz; corazón admiro tu valentía para enfrentar la vida a pesar de todas las cosas que han pasado conservas tu sonrisa, eres mi ejemplo a seguir.

**Adriana Victoria**

A Dios por darme la vida y la valentía de no decaer en momentos de desesperación.  
A mi padre Juan y mi madre Griselda que en los momentos alegres y tristes de mi vida fueron mi soporte para no decaer en este largo camino hasta llegar a este momento.  
A mi hermana Jenny por su apoyo incondicional.  
A mi tío Luis que es como un hermano y ha estado presente en los momentos de logros y fracasos en mi vida.  
A toda mi familia y amigos que ha confiado en que alcanzaría la meta de ser un gran profesional.

**Juan Gabriel**

## CONTENIDO

DECLARACIÓN .....	i
CERTIFICACIÓN.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIA.....	v
CONTENIDO.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xix
RESUMEN .....	xxii
PRESENTACIÓN .....	xxiii
CAPITULO 1 .....	1
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. EL ACERO .....	1
1.1.1. RESEÑA HISTÓRICA .....	1
1.1.2. DEFINICIÓN .....	2
1.1.3. CLASIFICACIÓN DEL ACERO .....	3
1.1.4. APLICACIONES DEL ACERO .....	6
1.1.5. ACERO A516 GRADO 70 .....	7
1.2. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES.....	11
1.2.1. RESISTENCIA DE LOS METALES .....	11
1.2.2. DUCTILIDAD .....	14
1.2.3. FRAGILIDAD.....	14
1.2.4. TENACIDAD.....	14
1.2.5. DUREZA .....	14

1.2.6. IMPACTO .....	14
CAPITULO 2 .....	15
2. SOLDADURA .....	15
2.1 INTRODUCCIÓN .....	15
2.2 CLASIFICACIÓN DE LA SOLDADURA.....	16
2.3 SOLDADURA DE ARCO ELÉCTRICO .....	18
2.3.1 POSICIONES DE SOLDADURA .....	19
2.3.2 TIPOS DE JUNTAS SOLDADAS .....	20
2.3.3 BISELES TÍPICOS PARA JUNTAS SOLDADAS .....	23
2.3.4 FACTORES PARA SELECCIÓN DE ELECTRODOS.....	24
2.4 DOCUMENTOS DE CALIFICACIÓN .....	25
2.4.1 ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS).....	25
2.4.2 REGISTRO DE CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO (PQR).....	26
2.4.3 REGISTRO DE CALIFICACIÓN DEL SOLDADOR (WPQ).....	26
2.5 PROCESOS DE SOLDADURA .....	26
2.5.1 SMAW .....	26
2.5.2 GMAW .....	27
2.5.3 GTAW .....	28
2.5.4 FCAW.....	29
2.5.5 SELECCIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA .....	30
2.6 SOLDADURA GMAW.....	32
2.6.1 DEFINICIÓN .....	33
2.6.2 FUNDAMENTOS DE PROCESO.....	34
2.6.3 TRANSFERENCIA DEL METAL DE APORTE .....	35
2.6.4 GASES PROTECTORES .....	37



2.6.5	ELECTRODOS .....	39
2.6.6	VARIABLES DE SOLDADURA.....	41
2.7	HEAT INPUT .....	44
2.8	PRECALENTAMIENTO .....	45
2.8.1	ECUACIÓN DE PRECALENTAMIENTO.....	46
2.9	ENSAYOS METALOGRAFICOS Y MECANICOS .....	47
2.9.1	ENSAYOS METALOGRAFICOS .....	47
2.9.2	ENSAYOS MECANICOS .....	49
CAPITULO 3 .....		53
3.	VARIABLES DE SOLDADURA Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....	53
3.1	DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES DE SOLDADURA A UTILIZAR .....	53
3.1.1	TIPO DE JUNTA .....	53
3.1.2	SELECCIÓN DE LA POSICIÓN DE SOLDADURA .....	55
3.1.3	SELECCIÓN DEL GAS PROTECTOR .....	56
3.1.4	SELECCIÓN DEL ELECTRODO ADECUADO .....	56
3.1.5	DIÁMETRO DEL ELECTRODO.....	58
3.1.6	POLARIDAD .....	59
3.1.7	PRECALENTAMIENTO.....	59
3.1.8	ORIENTACIÓN DEL ELECTRODO .....	60
3.1.9	VELOCIDAD DE AVANCE DE LA PISTOLA.....	60
3.1.10	VELOCIDAD DE ALIMENTACIÓN DEL ELECTRODO .....	61
3.1.11	CALCULO DEL HEAT INPUT .....	61
3.2	PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA.....	62
3.2.1	WPS Y PQR .....	62
3.2.2	PREPARACIÓN DE BISELES .....	62

3.2.3	PROCESO DE SOLDADURA GMAW .....	66
3.3	PROCEDIMIENTO DE LOS ENSAYOS DE SOLDADURA .....	78
3.3.1	EXTRACCIÓN DE PROBETAS.....	78
CAPITULO 4 .....		96
4.	RESULTADOS EXPERIMENTALES .....	96
4.1	PROBETAS DE CALIBRACIÓN .....	96
4.1.1	PROBETA DE CALIBRACIÓN PC1 .....	96
4.1.2	PROBETA DE CALIBRACIÓN PC2 .....	99
4.1.3	PROBETA DE CALIBRACIÓN PC3 .....	102
4.1.4	PROBETA DE CALIBRACIÓN PC4 .....	105
4.1.5	PROBETA DE CALIBRACIÓN PC5 .....	108
4.2	PROBETAS DE ESTUDIO.....	110
4.2.1	PROBETA DE ESTUDIO P1 .....	111
4.2.2	PROBETA DE ESTUDIO P2 .....	124
4.2.3	PROBETA DE ESTUDIO P3 .....	137
CAPITULO 5 .....		149
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	149
5.1	SELECCIÓN DE LA PROBETA DE CALIBRACIÓN.....	149
5.2	PROBETAS DE ESTUDIO.....	150
5.2.1	HEAT INPUT.....	150
5.2.2	MACROGRAFÍA.....	153
5.2.3	MICROGRAFÍAS.....	155
5.2.4	MICRODUREZAS.....	158
5.2.5	PROBETAS DE TRACCIÓN .....	161
5.2.6	PROBETAS DE DOBLEZ LATERAL .....	167

CAPITULO 6 .....	170
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	170
6.1 CONCLUSIONES .....	170
6.2 RECOMENDACIONES.....	173
BIBLIOGRAFÍA.....	175
ANEXOS .....	177

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.- Historia del acero .....	2
Figura 1.2.- Proceso de obtención del acero.....	3
Figura 1.3.- Curvas de transformación de fase del acero .....	5
Figura 1.4.- Probeta sometida a tracción .....	12
Figura 1.5.- Probeta a compresión.....	12
Figura 1.6.- Probeta sometida a torsión.....	13
Figura 1.7.- Probeta a corte .....	13
Figura 1.8.- Probeta a flexión.....	13
Figura 2.1.- Clasificación de la soldadura .....	16
Figura 2.2.- Esquema básico de una máquina de soldar.....	18
Figura 2.3.- Junta a traslape.....	21
Figura 2.4.- Junta a tope .....	21
Figura 2.5.- Junta de esquina.....	22
Figura 2.6.- Junta de brida.....	22
Figura 2.7.- Junta en T.....	22
Figura 2.8.- Diferentes diseños de biseles para juntas.....	23
Figura 2.9.- Soldadura GMAW .....	33
Figura 2.10.- Pistola de soldadura .....	33
Figura 2.11.- Esquema del equipo de GMAW .....	34
Figura 2.12.- Transferencia por aspersion .....	36
Figura 2.13.- Transferencia globular por gravedad .....	36
Figura 2.14.- Transferencia por cortocircuito.....	37
Figura 2.15.- Penetración con diferentes gases protectores.....	38

Figura 2.16.- Longitud efectiva de arco de soldadura .....	42
Figura 2.17.- Diferentes técnicas de soldadura.....	43
Figura 2.18.- Medidas para el cálculo de dureza Vickers .....	49
Figura 2.19.- Esquema de orden de corte de probetas para la calificación del procedimiento .	50
Figura 2.20.- Tracción; sección reducida – placa.....	51
Figura 2.21.- Doble transversal – placa .....	52
Figura 3.1.- Posición 1G.....	56
Figura 3.2.- Ubicación cabezal de la limadora a 45° .....	63
Figura 3.3.- Operador acercando la cuchilla a la placa a desbastar .....	63
Figura 3.4.- Limado de filo para junta tipo K.....	64
Figura 3.5.- Espesor de material sin desbastar .....	64
Figura 3.6.- Giro de cabezal y centrado de la cuchilla sobre la placa .....	65
Figura 3.7.- Medidas que debe cumplir el bisel .....	65
Figura 3.8.- Limpieza de la superficie a marcar .....	66
Figura 3.9.- Medida de la longitud de las probetas .....	67
Figura 3.10.- Trazo de líneas de referencia .....	67
Figura 3.11.- Alineación de la boquilla de oxicorte .....	68
Figura 3.12.- Flama de corte.....	68
Figura 3.13.- Inicio de corte de la probeta.....	69
Figura 3.14.- Desprendimiento del metal de corte por acción del chorro de O <sub>2</sub> .....	69
Figura 3.15.- Probetas cortadas y probetas por cortar .....	70
Figura 3.16.- Esmerilado de rebabas de oxicorte .....	70
Figura 3.17.- Conexión del equipo de soldadura.....	71
Figura 3.18.- Conexión de bugo (Avance automático de la antorcha de soldadura).....	71
Figura 3.19.- Determinación de las variables de soldadura para la probeta PC1 .....	72

Figura 3.20.- Alineación de la junta tipo K .....	72
Figura 3.21.- Junta armada con separación de 2 [mm] de talón.....	73
Figura 3.22.- Porta antorchas del bugo.....	73
Figura 3.23.- Alineación de la probeta respecto al desplazamiento del bugo .....	74
Figura 3.24.- Soldadura de la probeta de calibración.....	74
Figura 3.25.- Pase final con dos cordones de soldadura en filete.....	75
Figura 3.26.- Alineación de la junta tipo K con una separación entre placas de 3 [mm].....	76
Figura 3.27.- Precalentamiento de las placas .....	76
Figura 3.28.- Primer pase de raíz.....	77
Figura 3.29.- Limpieza de la junta en cada pase .....	77
Figura 3.30.- Sujeción de la probeta en las mordazas .....	78
Figura 3.31.- Corte de la probeta.....	79
Figura 3.32.- Desbaste grueso de la probeta de macrografía.....	80
Figura 3.33.- Limpieza de la probeta después del desbaste grueso.....	80
Figura 3.34.- Desbaste fino de la probeta.....	81
Figura 3.35.- Pulido fino en paño con alúmina de 1 micra .....	82
Figura 3.36.- Pulido fino con alúmina de 0,3 micras .....	82
Figura 3.37.- Pulido fino con continuo chorro de agua .....	83
Figura 3.38.- Ataque en la superficie de la probeta.....	84
Figura 3.39.- Enjuague y secado .....	84
Figura 3.40.- Distinción de las zonas de soldadura .....	85
Figura 3.41.- Nivelación de la probeta en el micro durómetro.....	86
Figura 3.42.- Selección de parámetros para el ensayo de micro dureza.....	87
Figura 3.43.- Selección de la zona de indentación .....	87
Figura 3.44.- Indentación de la probeta cada 2 [mm].....	88

Figura 3.45.- Eliminación de rebabas e impurezas de la superficie de la probeta de tracción ..	89
Figura 3.46.- Ataque con nital al 10 % en la zona del cordón de soldadura .....	89
Figura 3.47.- Distinción de la Zona de soldadura.....	90
Figura 3.48.- Medición del cuello de la probeta.....	90
Figura 3.49.- Mordazas de la máquina universal de ensayos .....	91
Figura 3.50.- Ajuste mordaza de cabezales .....	91
Figura 3.51.- Encerar la máquina .....	92
Figura 3.52.- Falla de la probeta de tracción .....	92
Figura 3.53.- Extracción de probetas y eliminación de sobremonta .....	93
Figura 3.54.- Preparación de la superficie exterior .....	94
Figura 3.55.- Equipo para las pruebas de doblado .....	94
Figura 3.56.- Doblado de la probeta.....	95
Figura 3.57.- Probetas ensayadas .....	95
Figura 4.1.- Macrografía de la probeta de calibración PC1 a 4X.....	97
Figura 4.2.- Ampliación de falta de fusión de la probeta PC1 .....	98
Figura 4.3.- Macrografía probeta PC2.....	100
Figura 4.4.- Ampliación de las zonas de falla de la probeta PC2.....	101
Figura 4.5.- Macrografía probeta PC3.....	103
Figura 4.6.- Ampliación de la probeta PC3 .....	104
Figura 4.7.- Macrografía probeta PC4.....	106
Figura 4.8.- Ampliación de la macrografía probeta PC4.....	107
Figura 4.9.- Macrografía probeta PC5.....	109
Figura 4.10.- Ampliación de la macrografía probeta PC5.....	110
Figura 4.11.- Macrografía de la probeta P1 a 4X .....	112

Figura 4.12.- Microestructura a 50X correspondiente al material base, ZAC y material de aporte de un acero de bajo contenido de carbono sin ataque químico .....	114
Figura 4.13.- Microestructura a 50X correspondiente al material base, ZAC y material de aporte de un acero de bajo contenido de carbono atacado químicamente con nital al 10 %.....	114
Figura 4.14.- Microestructura a 100X correspondiente al material base y ZAC atacado con nital al 10%. Perlita en una matriz ferrítica, la perlita alineada en dirección del laminado en el material base tiende a disociarse en la ZAC.....	115
Figura 4.15.- Microestructura a 500X correspondiente al material base y ZAC con perlita laminar en una matriz ferrítica atacado químicamente con nital al 10%.....	115
Figura 4.16.- Microestructura a 100X correspondiente a un acero de bajo contenido de carbono con perlita alineada en dirección al laminado en una matriz ferrítica atacado con nital al 10% .....	116
Figura 4.17.- Microestructura a 500X correspondiente a un acero de bajo contenido de carbono con matriz ferrítica y perlita laminar atacado con nital al 10%.....	116
Figura 4.18.- Microestructura a 100X correspondiente a la ZAC con descomposición de la perlita distribuida uniformemente .....	117
Figura 4.19.- Microestructura a 500X correspondiente a la ZAC con colonias de perlita y disminución del tamaño de grano ferrítico .....	117
Figura 4.20.- Microestructura a 100X correspondiente al material de aporte con descomposición de la perlita con presencia de ferrita acicular .....	118
Figura 4.21.- Microestructura a 500X correspondiente a la zona del material de aporte con pequeñas concentraciones de escoria atrapada, se observa la descomposición de la perlita en finas colonias en una matriz de ferrita.....	118
Figura 4.22.- Ensayo de Tracción probeta P1 – tracción T1 .....	121
Figura 4.23.- Ensayo de Tracción probeta P1 – tracción T2 .....	122
Figura 4.24.- Macrografía de la probeta P2 a 4X .....	125
Figura 4.25.- Ampliación de falta de fusión de la probeta P2 .....	126
Figura 4.26.- Microestructura a 50X correspondiente al material base, ZAC y material de aporte de un acero de bajo contenido de carbono sin ataque químico .....	127
Figura 4.27.- Microestructura a 50X correspondiente al material base, ZAC y material de aporte de un acero de bajo contenido atacado con nital al 10 %.....	127



Figura 4.28.- Microestructura a 100X de un acero de bajo contenido de carbono correspondiente al material base y ZAC atacado con nital al 10%. Se observa perlita laminar en una matriz ferrítica, en la zona de la ZAC la perlita tiende a hacerse más delgada. Se presentan marchas circulares no metálicas uniformemente distribuidas en la probeta.....	128
Figura 4.29.- Microestructura a 500X correspondiente al material base y ZAC atacado con nital al 10%, con perlita laminar en una matriz ferrítica, el tamaño de grano de la ferrita disminuye en la ZAC .....	128
Figura 4.30.- Microestructura a 100X correspondiente a un acero de bajo contenido de carbono con perlita laminar en una matriz ferrítica atacado con nital al 10%, se presenta manchas de alcohol .....	129
Figura 4.31.- Microestructura a 500X correspondiente a un acero de bajo contenido de carbono con matriz ferrítica y perlita laminar atacado con nital al 10%.....	129
Figura 4.32.- Microestructura a 100X correspondiente a la ZAC con descomposición de la perlita distribuida uniformemente .....	130
Figura 4.33.- Microestructura a 500X correspondiente a la ZAC con colonias de perlita y disminución del tamaño de grano ferrítico .....	130
Figura 4.34.- Microestructura a 100X correspondiente al material de aporte con descomposición de la perlita con presencia de ferrita acicular .....	131
Figura 4.35.- Microestructura a 500X correspondiente a la zona del material de aporte con pequeñas concentraciones de escoria atrapada, se observa la descomposición de la perlita en finas colonias en una matriz de ferrita.....	131
Figura 4.36.- Ensayo de Tracción probeta P2 – tracción T1 .....	134
Figura 4.37.- Ensayo de Tracción probeta P2 – tracción T2 .....	135
Figura 4.38.- Macrografía de la probeta P3 a 4X.....	138
Figura 4.39.- Microestructura a 50X correspondiente al material base, ZAC y material de aporte de un acero de bajo contenido de carbono sin ataque químico .....	139
Figura 4.40.- Microestructura correspondiente a un acero de bajo contenido de carbono atacado con nital al 10 %. Se observa las zonas de material base, ZAC y material de aporte. ....	140
Figura 4.41.- Microestructura a 100X correspondiente al material base y ZAC atacado con nital al 10%, con perlita laminar en una matriz ferrítica, en la zona de la ZAC la perlita tiende a disociarse. ....	140

Figura 4.42.- Microestructura a 500X correspondiente al material base y ZAC atacado con nital al 10%, con perlita laminar en una matriz ferrítica, en la zona de la ZAC se aprecia la disminución del tamaño de grano ferrítico.....	141
Figura 4.43.- Microestructura a 100X correspondiente al material base de un acero de bajo contenido de carbono con perlita en dirección al laminado en una matriz ferrítica. ....	141
Figura 4.44.- Microestructura a 100X correspondiente a la ZAC atacada con nital al 10%...	142
Figura 4.45.- Microestructura a 500X correspondiente a la ZAC atacada con nital al 10%, la perlita se deposita en los bordes de grano de la ferrita, el tamaño de grano disminuye.....	142
Figura 4.46.- Microestructura a 100X correspondiente al material de aporte atacada con nital al 10%.....	143
Figura 4.47.- Microestructura a 100X correspondiente al material de aporte atacado con nital al 10%, con ferrita acicular, presencia de escoria atrapada y perlita depositada en los bordes de grano de la ferrita.....	143
Figura 4.48.- Ensayo de Tracción probeta P3 – tracción T1 .....	146
Figura 4.49.- Ensayo de Tracción probeta P3 – tracción T2 .....	147
Figura 5.1.- Comparación del Heat Input vs Velocidad de Avance en las probetas de estudio .....	150
Figura 5.2.- Comparación del Heat Input en cada pase.....	152
Figura 5.3.- Comparación a 500X de la ZAC de la probeta P1(a) y P2 (b); se observa que hay una mayor descomposición de la perlita en granos más finos (b). Además en la probeta P2 (b) se observa una inclusión no metálica de sulfuro de manganeso.....	156
Figura 5.4.- Comparación a 500X de la ZAC de la probeta P1 (a) y P3 (b); el tamaño de grano es más pequeño y la perlita comienza a depositarse en los bordes de grano de la ferrita (b)..	156
Figura 5.5.- Comparación a 500X del material de aporte de la probeta P1 (a) y P2 (b); hay mayor presencia de ferrita acicular con perlita depositada en los bordes de grano (b).....	157
Figura 5.6.- Comparación a 500X del material de aporte de la probeta P1 (a) y P3 (b); se observa zonas con mayor presencia de ferrita acicular, presencia de escoria atrapada y perlita depositada en los bordes de grano de la ferrita (b). ....	158
Figura 5.7.- Dureza de la probeta P1 – Posición de indentación.....	159
Figura 5.8.- Dureza de la probeta P2 – Posición de Indentación.....	160
Figura 5.9.- Dureza de la probeta P3 – Posición de Indentación.....	161

Figura 5.10.- Comparación del Diagrama Esfuerzo-Deformación para las probetas P1T1 y P1T2 .....	162
Figura 5.11.- Comparación del Diagrama Esfuerzo-Deformación para las probetas P2T1 y P2T2 .....	163
Figura 5.12.- Comparación del diagrama Esfuerzo – Deformación para las probetas P1 y P2 .....	164
Figura 5.13.- Comparación del Diagrama Esfuerzo-Deformación para las probetas P3T1 y P3T2 .....	165
Figura 5.14.- Comparación del diagrama Esfuerzo – Deformación para las probetas P1 y P3 .....	166

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1.- Grados del acero vs resistencia a la tensión .....	7
Tabla 1.2.- Grados del acero vs espesor máximo de la plancha .....	8
Tabla 1.3.- Composición química del acero de acuerdo al grado de dureza y espesor .....	9
Tabla 1.4.- Propiedades mecánicas del acero A516 .....	10
Tabla 2.1.- Posiciones de soldadura en placas con soldadura de ranura .....	19
Tabla 2.2.- Posiciones de soldadura en placas con soldadura de filete .....	20
Tabla 2.3.- Calificación de alternativas en base a los criterios de Selección .....	31
Tabla 2.4.- Ponderación de la calificación de los Criterios de Selección.....	31
Tabla 2.5.- Selección de la mejor alternativa .....	32
Tabla 2.6.- Gases y mezclas de gases para GMAW.....	38
Tabla 2.7.- Nomenclatura de electrodos GMAW.....	39
Tabla 2.8.- Composición química del electrodo.....	39
Tabla 2.9.- Número de pruebas requeridas dependiendo del espesor del material .....	49
Tabla 3.1.- Calificación de alternativas de tipos de juntas en base a los criterios de selección	54
Tabla 3.2.- Ponderación de la calificación de los criterios de selección .....	55
Tabla 3.3.- Selección de la mejor alternativa .....	55
Tabla 3.4.- Clasificación de alternativas de los electrodos en base a los criterios de selección	57
Tabla 3.5.- Ponderación de la calificación de los criterios de selección .....	58
Tabla 3.6.- Selección de la mejor alternativa .....	58
Tabla 3.7.- Diámetros del electrodo ER 70 S-6.....	58
Tabla 3.8.- Corriente para distintas velocidades de alimentación y diámetros de hilo .....	61
Tabla 4.1.- Parámetros del cordón de soldadura para la probeta PC1 .....	96
Tabla 4.2.- Cálculo del Heat Input para la probeta PC1.....	97

Tabla 4.3.- Variables de soldadura relevantes de la probeta PC1 .....	98
Tabla 4.4.- Parámetros del cordón de soldadura para la probeta PC2.....	99
Tabla 4.5.- Cálculo del Heat Input para la probeta PC2.....	99
Tabla 4.6.- Variables de soldadura relevantes de la probeta PC2 .....	101
Tabla 4.7.- Parámetros del cordón de soldadura para la probeta PC3 .....	102
Tabla 4.8.- Cálculo del Heat Input para la probeta PC3.....	102
Tabla 4.9.- Variables de soldadura relevantes de la probeta PC3 .....	104
Tabla 4.10.- Parámetros del cordón de soldadura para la probeta PC4.....	105
Tabla 4.11.- Cálculo del Heat Input para la probeta PC4.....	105
Tabla 4.12.- Variables de soldadura relevantes de la probeta PC4 .....	107
Tabla 4.13.- Parámetros del cordón de soldadura para la probeta PC5.....	108
Tabla 4.14.- Cálculo del Heat Input para la probeta PC5.....	108
Tabla 4.15.- Variables de soldadura relevantes de la probeta PC5 .....	110
Tabla 4.16.- Parámetros del cordón de soldadura para la probeta de estudio P1 .....	111
Tabla 4.17.- Cálculo del Heat Input para la probeta P1 .....	111
Tabla 4.18.- Variables relevantes de soldadura para la probeta P1 .....	113
Tabla 4.19.- Áreas de la ZAC y Cordón de Soldadura de la probeta P1 .....	113
Tabla 4.20.- Macrografía de la probeta P1 a 50X – zona de microdureza y puntos de microdureza .....	119
Tabla 4.21.- Durezas de la probeta P1 en Vickers y Rowell C .....	120
Tabla 4.22.- Ensayo de doblado lateral de la probeta P1 .....	123
Tabla 4.23.- Parámetros del cordón de soldadura para la probeta de estudio P2 .....	124
Tabla 4.24.- Cálculo del Heat Input para la probeta P2 .....	124
Tabla 4.25.- Variables relevantes de soldadura para la probeta P2.....	126
Tabla 4.26.- Áreas de la ZAC y Cordón de Soldadura de la probeta P2.....	126

Tabla 4.27.- Macrografía de la probeta P2 a 50X – zona de microdureza y puntos de microdureza .....	132
Tabla 4.28.- Durezas de la probeta P2 en Vickers y Rowell C .....	133
Tabla 4.29.- Ensayo de doblado lateral de la probeta P2 .....	136
Tabla 4.30.- Parámetros del cordón de soldadura para la probeta de estudio P3 .....	137
Tabla 4.31.- Cálculo del Heat Input para la probeta P3 .....	137
Tabla 4.32.- Variables relevantes de soldadura para la probeta P3 .....	139
Tabla 4.33.- Áreas de la ZAC y Cordón de Soldadura de la probeta P3 .....	139
Tabla 4.34.- Macrografía de la probeta P3 a 50X – zona de microdureza y puntos de microdureza .....	144
Tabla 4.35.- Durezas de la probeta P3 en Vickers y Rowell C .....	145
Tabla 4.36.- Ensayo de doblado lateral de la probeta P3 .....	148
Tabla 5.1.- Porcentaje de Variación del Heat Input .....	151
Tabla 5.2.- Porcentaje de Variación Voltaje – Amperaje P2_P1 .....	152
Tabla 5.3.- Porcentaje de Variación Voltaje – Amperaje P3_P1 .....	153
Tabla 5.4.- Porcentaje de variación del área de la ZAC de la probeta PC5 y P1 .....	154
Tabla 5.5.- Porcentaje de Variación de áreas de Soldadura P2_P1 .....	154
Tabla 5.6.- Porcentaje de Variación de áreas de Soldadura P3_P1 .....	155
Tabla 5.7.- Datos obtenidos en el ensayo de Tensión .....	167
Tabla 5.8.- Probetas de doblado lateral que presentan discontinuidades abiertas .....	168
Tabla 5.9.- Resultados del Ensayo de Doblado Lateral.....	169

## RESUMEN

En la industria metalúrgica utilizan el acero por sus excelentes propiedades mecánicas, el método más utilizado para la unión de estos materiales es la soldadura. El estudio de la ZAC a diferentes condiciones de Heat Input con sus respectivas pruebas, es de gran ayuda para determinar los parámetros más idóneos en el uso del proceso GMAW en espesores de 25,4 [mm].

El Capítulo 1, abarca conceptos básicos del acero, su clasificación y sus aplicaciones; además se estudian las propiedades del material utilizado en la parte experimental del presente proyecto que es el acero A 516 Grado 70 bajo la norma ASTM. También se estudian las propiedades mecánicas de los materiales.

El Capítulo 2, contiene conceptos generales de soldadura, además se realiza un análisis de selección de proceso de soldadura y se estudia el proceso elegido. En este capítulo también se encuentran los parámetros que indica la norma ASME sección IX para las pruebas que se deben realizar.

En el Capítulo 3, se determinan las variables de soldadura a utilizar para el proceso GMAW, además de todo el procedimiento empleado para la realización de las placas de estudio.

El Capítulo 4, se detallan los resultados de las macrografías de las probetas de calibración. Para las probetas de estudio se detallan resultados de macrografías, micrografías, microdurezas, ensayos de tracción y doblado lateral.

En el Capítulo 5, se realiza un análisis de resultados de la probeta de calibración seleccionada y de las probetas de estudio. Se compara los resultados de las probetas P2 y P3 respecto a la probeta de referencia P1, de esta última se varió el voltaje y amperaje para el presente estudio.

En el Capítulo 6, se describen conclusiones y recomendaciones del proyecto.

## PRESENTACIÓN

En las industrias químicas, petroleras, hidroeléctricas utilizan materiales de gran espesor, resistentes a la corrosión para elaboración de tanques, tuberías, estructuras, calderas, etc. El método más utilizado para la unión de estos materiales es la soldadura de arco eléctrico.

Las propiedades de los materiales varían de acuerdo a la entrada de calor; en el material base presenta una zona denominada Zona Afectada por el Calor (ZAC), en la que hay cambio microestructural. El análisis de esta zona es de vital importancia para determinar si un material presenta buenas características.

El objetivo del presente proyecto es realizar el estudio de la ZAC del acero ASTM A516 grado 70 de 25,4 [mm] (1 [pulg]) de espesor, con diferentes entradas de voltaje y amperaje. Para cumplir con este objetivo se realizaron probetas de estudio soldadas por un soldador calificado con el proceso GMAW, para comprobar su validez se realizaron ensayos destructivos y no destructivos que permitan analizar la misma.



# CAPITULO 1

## 1. GENERALIDADES

El acero es una aleación de hierro - carbono, constituye uno de los metales aleados más usados en la industria, gracias a sus excelentes propiedades mecánicas. En este capítulo se estudia el acero A516 grado 70 con espesor de 25,4 [mm], que posee un 0,28 % de carbono y además otros componentes como el manganeso y silicio que mejoran las propiedades mecánicas; también se encuentra impurezas como el fosforo y azufre, en un porcentaje bajo.

### 1.1.EL ACERO

#### 1.1.1. RESEÑA HISTÓRICA

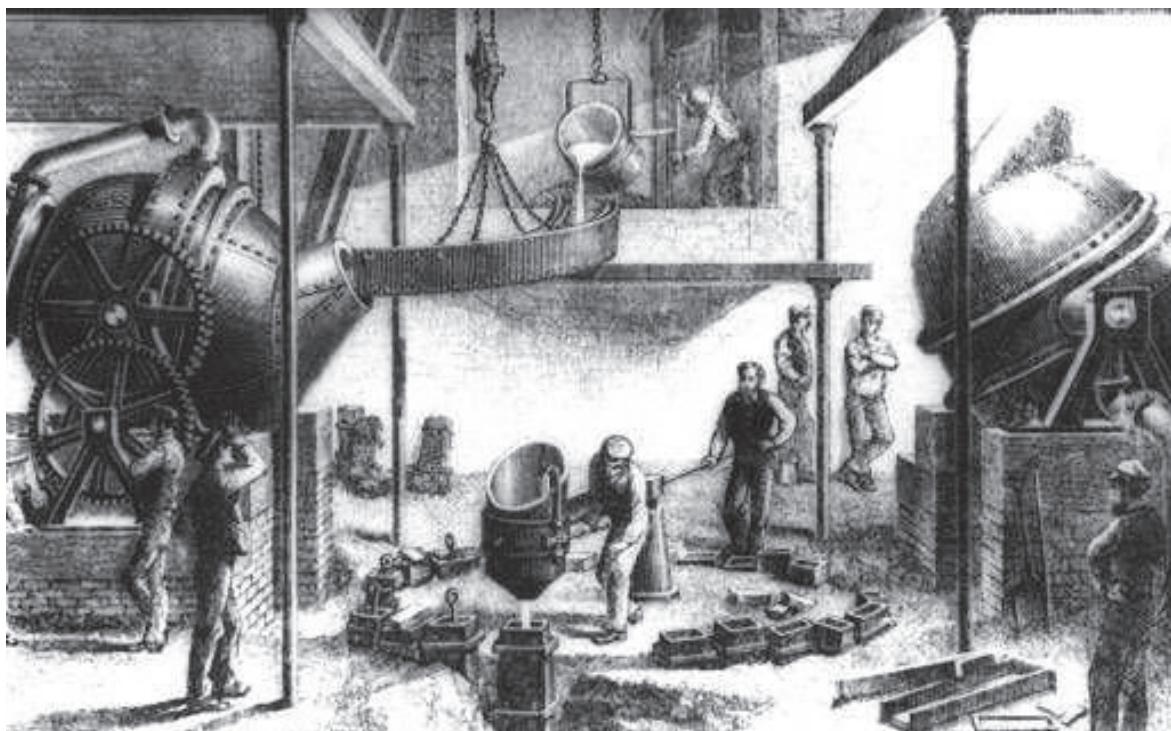
El hierro es el metal más común y se encuentra en grandes cantidades en la corteza terrestre formando parte de diversos materiales (óxidos, minerales hidratados, carbonatos, sulfuros, silicatos, etc.).

El descubrimiento del hierro es uno de los pasos más importantes dados por el hombre en su avance hacia la civilización. A lo largo de la historia muchos países han desarrollado una prospera industria siderúrgica, basándose en los suministros locales y en la proximidad de los bosques para la obtención del carbón vegetal que era utilizado como combustible.

A inicios del siglo XVIII, se descubrió el uso del coque como combustible en lugar del carbón vegetal, esto revolucionó la industria, haciendo posible un rápido desarrollo de la misma y sentó las bases para los demás avances de la revolución industrial. La fabricación del acero se desarrolló básicamente en el siglo XIX, al inventarse los procesos de fusión.

Desde mediados del siglo XX, el tratamiento con oxígeno, principalmente el proceso de LINZ-DONAWITZ (LD) de lanza de oxígeno, hizo posible la fabricación de aceros

de alta calidad a un costo de producción relativamente bajo. La producción del acero, hoy en día es indicativo de la prosperidad de una nación y es la base fundamental para la producción en serie de muchas industrias, como la industria naval, la construcción de edificios, la fabricación de automóviles, maquinaria, herramientas, equipos domésticos, etc.



**Figura 1.1.-** Historia del acero

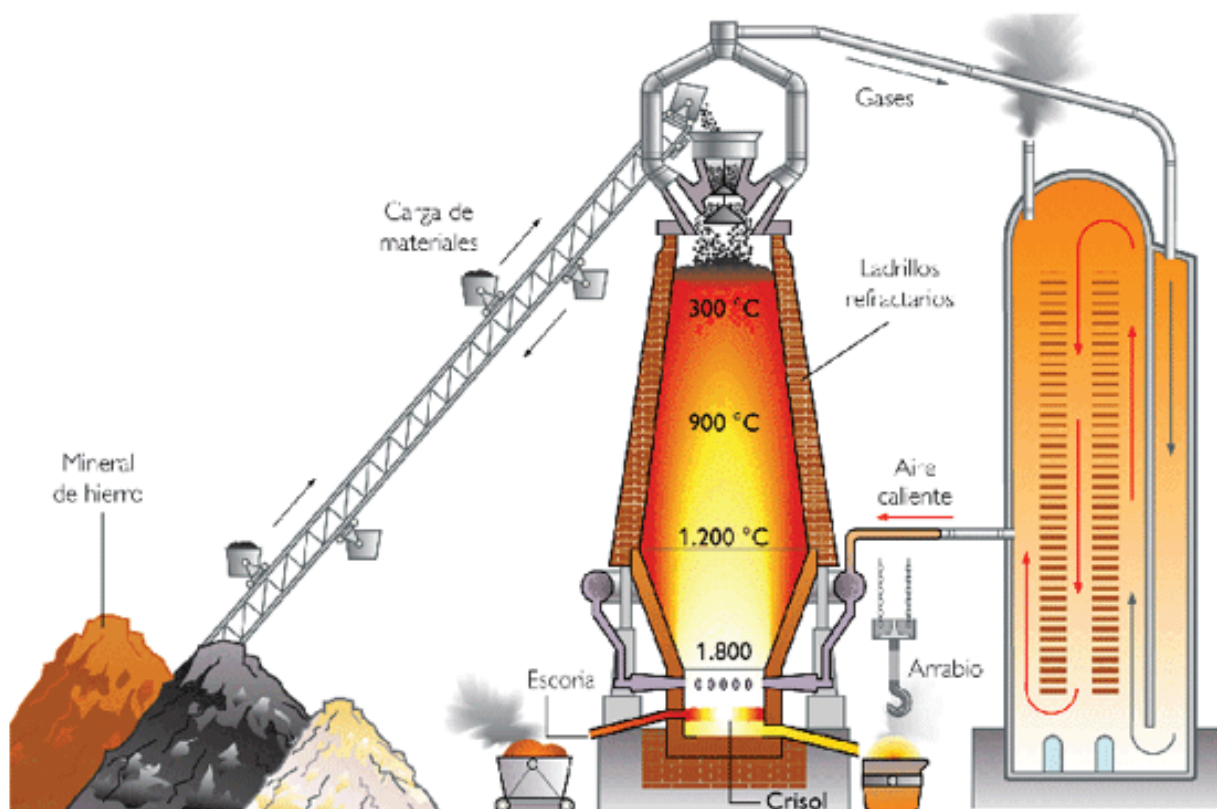
**Fuente:** <http://jahesa.com/acerca-del-acero1/>

### **1.1.2. DEFINICIÓN**

Se conoce al acero como un metal, pero en realidad es una aleación de un metal (hierro) con un no metal (carbono).

Como regla, en la composición del acero entran el carbono, manganeso, silicio, azufre y el fósforo. Para obtener un acero de propiedades especiales en el metal se introducen elementos de aleación: cromo, níquel, molibdeno, wolframio, cobre, niobio, vanadio, etc., así como la cantidad elevada de manganeso y silicio.

Las propiedades mecánicas del acero, son considerablemente más altas que del hierro puro. El carbono es el principal elemento que entra en la composición del acero, en gran medida éste determina las propiedades del acero y según su contenido, las ferroaleaciones al carbono se dividen en acero y fundiciones. (Kudrin, 1984)



**Figura 1.2.-** Proceso de obtención del acero

**Fuente:** (<http://www.arqhys.com/arquitectura/acero-composicion.html>)

### 1.1.3. CLASIFICACIÓN DEL ACERO

Esto comprende las aleaciones de hierro-carbono, con un nivel de carbono casi tan bajo como el hierro dulce (el cual prácticamente no contiene nada de carbono) hasta el hierro fundido (que contiene más de 1,7% de carbono). (Horwitz, 1976)

### 1.1.3.1. Definiciones (Ruiz, 2009)

#### 1.1.3.1.1. Estructuras monofásicas

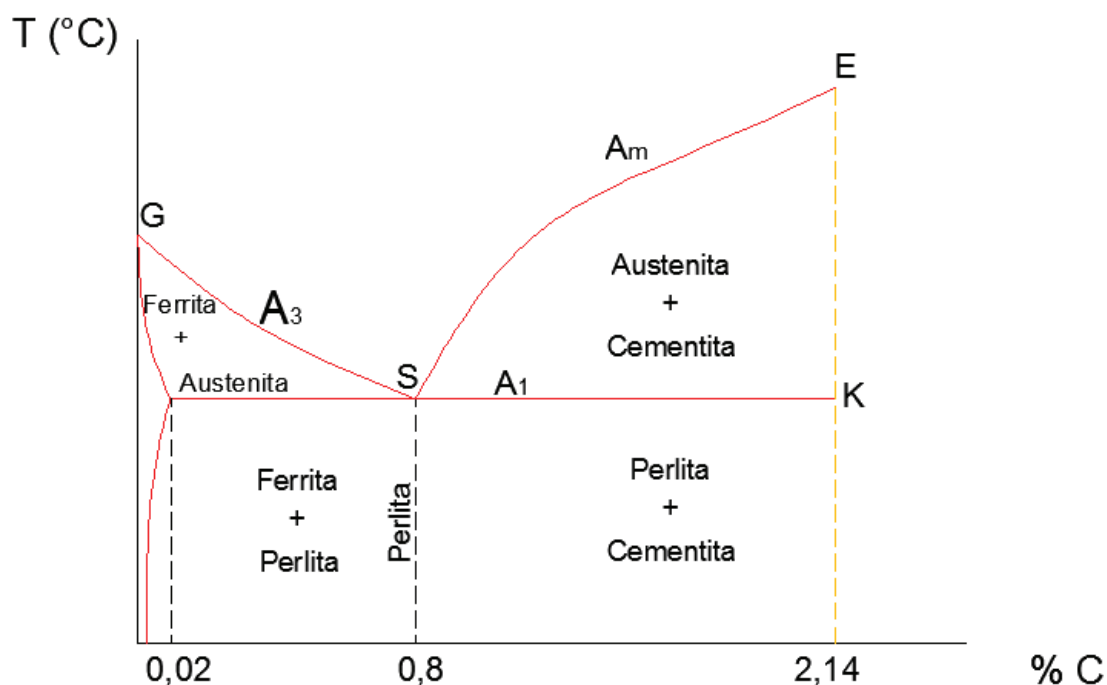
- **Ferrita:** Es una solución sólida intersticial de carbono en el hierro alfa  $Fe_{\alpha}(C)$ , en una estructura BCC. La solubilidad máxima de carbono en la ferrita es aproximadamente de 0,008 % de C a 20 °C y a 0,03% de C a 723°C. Tiene una dureza HB 80 – 100. La ferrita es el más blando y dúctil constituyente de los aceros y presenta propiedades magnéticas. En los aceros aleados, la ferrita suele contener Ni, Mn, Cu, Si, Al en solución sólida sustitucional.
- **Austenita:** Es una solución intersticial de carbono en el hierro gamma  $Fe_{\gamma}(C)$ , en una estructura FCC. La solubilidad máxima de carbono en la austenita es 2,14 % de C a 1147 °C y a 0,8% de C a 723°C. Esta fase se encuentra sólo a temperaturas altas y a 723°C es el límite de la existencia estable de la austenita en las aleaciones de hierro – carbono. Tiene una dureza HB de 180 – 200.
- **Cementita:** El compuesto químico de hierro en carbono ( $Fe_3C$ ), tiene una red cristalina rómbica; es una sustancia dura y quebradiza, donde la temperatura de fusión es de 1600 °C.
- **Grafito:** Es el carbono libre, blando (HB 3) y posee una baja resistencia. En las fundiciones de hierro y el acero grafitizado se halla en inclusiones de diversas formas (laminar, globular, nodular, etc.). Al variar la forma de las inclusiones de grafito, cambian las propiedades mecánicas y tecnológicas.

#### 1.1.3.1.2. Estructuras bifásicas

- **Perlita:** Mezcla mecánica de ferrita y cementita, que contiene el 0,8 % de C. la perlita puede ser laminar o globular, que depende de la forma de la cementita.
- **Bainita:** Se forma en la transformación isoterma de la austenita, en un rango de temperaturas de 250 a 550 °C, el proceso consiste en enfriar rápidamente a la austenita hasta una temperatura constante, manteniéndose dicha temperatura hasta la transformación total de la austenita en bainita.

### 1.1.3.2. Clasificación

En la Figura 1.3, se observa que los aceros (aleaciones de hierro – carbono), se encuentran en un intervalo desde 0,008 % de C y no superan el 2,14 % de C y se clasifican en:



**Figura 1.3.-** Curvas de transformación de fase del acero

**Fuente:** Folleto de Tratamientos Térmicos

#### 1.1.3.2.1. Aceros hipoeutectoides

Los aceros hipoeutectoides son aquellos que contienen un porcentaje de carbono que está entre el 0,008 % y 0,8 %. Estos aceros están formados por una mezcla de ferrita y perlita en su microestructura.

#### *1.1.3.2.2. Aceros eutectoides*

Los aceros eutectoides contienen un 0,8 % de C, su estructura está formada por perlita (ferrita + cementita) en un 100 %, la misma que puede ser laminar con una dureza de 300 HRB o globular con una dureza de 140 HRB.

#### *1.1.3.2.3. Aceros hipereutectoides*

Los aceros hipereutectoides se encuentran entre  $0,8 < \% C < 2,14 \%$ . Su constituyente principal es la cementita. El material presenta características de alta dureza y difícil maquinabilidad. La microestructura de la fase gamma es homogénea con granos orientados al azar.

### **1.1.4. APLICACIONES DEL ACERO**

A continuación se detalla la clasificación de los aceros en base al contenido de carbono que presentan, así como la aplicación general de los mismos en las diversas empresas del sector metalúrgico.

#### **1.1.4.1. Aceros de bajo contenido de carbono**

Estos aceros tienen hasta un 0,25% de C, aproximadamente. Siendo los más dúctiles y blandos de los aceros; no responden de manera apreciable al calentamiento y al enfriamiento por inmersión y generalmente no se endurecen por medio de estos métodos. Las secciones ligeras, incluyendo las barras y los lingotes, se fortalecen con frecuencia por medio de los trabajos en frío.

Las aplicaciones típicas del acero de bajo contenido de carbono son las piezas de carrocerías, el chasis de los automóviles, que requieren gran ductilidad y facilidad para ser soldadas; asimismo, se usa en grandes cantidades para la producción de recipientes, para estructuras metálicas y para piezas mecanizadas.

#### 1.1.4.2. Aceros de medio contenido de carbono

Tienen de 0,30 a 0,50% de C, aproximadamente. Cantidad suficiente de carbono para permitir el endurecimiento, por lo tanto, pueden ser sometidas a tratamientos térmicos, para mejorar sus propiedades.

Los aceros de este tipo se utilizan para las vías y ruedas de ferrocarril, varillas de conexión, cigüeñales, etc.

#### 1.1.4.3. Aceros de alto contenido de carbono

Tienen más del 0,55% de carbono, son los aceros al carbono más duros, fuertes y menos dúctiles, y los que mejor responden al tratamiento térmico. Por esta razón no pueden soldarse con facilidad. Casi siempre se utilizan en el estado templado, con el fin de que desarrollen su mejor combinación de dureza, resistencia, tenacidad y ductilidad.

Se utilizan para herramientas agrícolas de corte, alambre de alta resistencia a la tracción, resortes, herramientas y dados.

### 1.1.5. ACERO A516 GRADO 70

#### 1.1.5.1. Alcance

Las placas bajo esta especificación están disponibles en 4 grados, como se puede observar en la Tabla 1.1.

**Tabla 1.1.-** Grados del acero vs resistencia a la tracción

<b>Grado SI (U.S.)</b>	<b>Resistencia a la tracción MPa (Ksi)</b>
380 (55)	380-515 (55-75)
415 (60)	415-550 (60-80)
450 (65)	450-585 (65-85)
485 (70)	485-620 (70-90)

**Fuente:** ASTM A516: Standard Specification for Pressure Vessel, Plates, Carbon Steel, for Moderate and Lower-Temperature Service

El espesor máximo de la placa está limitada bajo las especificaciones que se indican en la Tabla 1.2.

**Tabla 1.2.-** Grados del acero vs espesor máximo de la plancha

<b>Grado SI (U.S.)</b>	<b>Espesor Máximo mm, [in]</b>
380 (55)	305 (12)
415 (60)	205 (8)
450 (65)	205 (8)
485 (70)	205 (8)

**Fuente:** ASTM A516: Standard Specification for Pressure Vessel, Plates, Carbon Steel, for Moderate and Lower-Temperature Service

**Nota:** Los valores indicados en cada sistema no son exactamente equivalentes, por lo tanto cada sistema puede usarse independientemente del otro.

#### **1.1.5.2. Requisitos generales e información adicional**

El material dado para estas especificaciones puede cumplir adicionalmente con la especificación A 20 / A 20M. Estos requisitos describen pruebas, métodos, calidad y reparación de los defectos, cargas, etc.

#### **1.1.5.3. Fabricación**

El acero debe ser calmado y de grano fino austenítico.

El acero calmado es aquel que ha sido desoxidado por completo, mediante la adición de magnesio, silicio o aluminio antes de la colada. Esto permite conseguir piezas perfectas pues no produce gases durante la solidificación impidiendo la formación de sopladuras.

#### **1.1.5.4. Tratamiento Térmico**

Las placas de espesor menor o igual a 40 [mm] (1.50 [pulg.]) son suministrados normalmente en condiciones de laminado. En estas se pueden realizar tratamientos de alivios de esfuerzos y/o normalizarlas.



Las placas que están por encima del espesor de 40 [mm] (1.50 [pulg.]) deben ser normalizadas.

Cuando se requiere la prueba de tenacidad en placas de espesor menor o igual a 40 [mm] (1.5 [pulg.]), estas deben ser normalizadas, a menos que se especifique lo contrario por parte del comprador.

De ser aprobado por el comprador, se permite realizar un enfriamiento más rápido que el enfriamiento en el aire para el mejoramiento de la dureza, siempre y cuando las placas sean templadas en el rango de temperaturas de 595 a 705 [°C] (1100 a 1300 [F]).

#### 1.1.5.5. Requerimientos Químicos

El acero debe presentar los requerimientos de composición indicados en la Tabla 1.3.

**Tabla 1.3.-** Composición química del acero de acuerdo al grado de dureza y espesor

Elementos	Composición, %			
	US (Gr.55) SI(Gr. 380)	US(Gr. 60) SI(Gr. 415)	US(Gr.65) SI(Gr. 450)	US(Gr. 70) SI(Gr. 485)
<b>Carbono, máximo. <sup>A</sup></b>				
- Hasta 12.5 [mm] (½ [pulg])	0,18	0,21	0,24	0,27
- 12.5 a 50 [mm] (½ a 2 [pulg.])	0,20	0,23	0,26	0,28
- 50 a 100 [mm] (2 a 4 [pulg.])	0,22	0,25	0,28	0,30
- 100 a 200 [mm] (4 a 8 [pulg.])	0,24	0,27	0,29	0,31
- Arriba de 200[mm] (8 [pulg.])	0,26	0,27	0,29	0,31
<b>Manganeso, máx.</b>				
- Hasta 12.5 [mm] (½ [pulg.]				
Colado <sup>B</sup>	0,60-0,90	0,60-0,90	0,85-1,20	0,85-1,20
Producto <sup>B</sup>	0,55-0,98	0,55-0,98	0,79-1,30	0,79-1,30
- Arriba de 12.5 [mm] (½ [pulg.])				

(Continúa)

Colado	0,60-1,20	0,85-1,20	0,85-1,20	0,85-1,20
Producto	0,55-1,30	0,79-1,30	0,79-1,30	0,79-1,30
<b>Fósforo, máx.,<sup>A</sup></b>	0,035	0,035	0,035	0,035
<b>Azufre, máx.,<sup>A</sup></b>	0,035	0,035	0,035	0,035
<b>Silicio</b>				
Colado	0,15-0,40	0,15-0,40	0,15-0,40	0,15-0,40
Producto	0,13-0,45	0,13-0,45	0,13-0,45	0,13-0,45

<sup>A</sup> Aplica para análisis de colado y producto

<sup>B</sup> Placas de grado 60; 12,5 [mm] (½ [pulg]) y de menor espesor pueden tener 0,85 - 1,20 % de manganeso sobre el análisis de colado y 0,79-1,30 % sobre análisis de producto.

**Fuente:** ASTM A516: Standard Specification for Pressure Vessel, Plates, Carbon Steel, for Moderate and Lower-Temperature Service

#### 1.1.5.6. Requerimientos Mecánicos

Las probetas de prueba de tracción cumplirán los requisitos que se muestra en la Tabla 1.4.

**Tabla 1.4.-** Propiedades mecánicas del acero A516

Propiedades Mecánicas	Grado			
	380 (55)	415 (60)	450 (65)	485 (70)
Resistencia a la tracción, [MPa], ([ksi])	380-515 (55-75)	415-550 (60-80)	450-585 (65-85)	485-620 (70-90)
Limite elástico, min, <sup>A</sup> [MPa], ([ksi])	205 (30)	220 (32)	240 (35)	260 (38)
Elongación en 200 [mm] (8[pulg,]), min, %	23	21	19	17
Elongación en 50 [mm] (2 [pulg,]), min, %	27	25	23	21

<sup>A</sup> Determinada por el 0,2 % del método del desplazamiento o por el 0,5% de la extensión bajo carga

**Fuente:** ASTM A516: Standard Specification for Pressure Vessel, Plates, Carbon Steel, for Moderate and Lower-Temperature Service

### **1.1.5.7. Aplicaciones del acero A516 grado 70**

Los aceros en calidad ASTM A 516 Gr. 70, se caracterizan por poseer grano fino, tiene buena soldabilidad y alta resistencia al agrietamiento por fragilidad.

Se utiliza sobre todo para la fabricación de recipientes para gas (GLP, butano y los tanques de propano), piezas de calderas de vapor, tuberías de presión, compresores, etc., su uso más extendido es en ambientes de aplicación inferiores a -20 [°C], además se suministra normalizado. La temperatura de normalización se encuentra entre 900 y 950 [°C], el tiempo que se mantendrá el material en el horno después de que la temperatura se estabilice será de aproximadamente 1 minuto por cada mm de espesor de la placa. Por este motivo el material ofrece buenas propiedades de conformación en frío y en caliente, sin afectar negativamente a sus características.

## **1.2. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES**

Son aquellas que revelan el comportamiento elástico y no elástico cuando se aplica una fuerza. Estas son: resistencia, elasticidad, ductilidad, fragilidad, tenacidad y dureza.

### **1.2.1. RESISTENCIA DE LOS METALES**

Es la capacidad de un metal para oponerse a la destrucción bajo la acción de cargas externas. El valor de la resistencia indica la fuerza que se requiere para vencer los ligamentos que mantienen unidas los átomos que forman las estructuras de los cristales. (H, 1976)

#### **1.2.1.1. Tracción**

Es el esfuerzo que se presenta cuando sobre un elemento actúan dos fuerzas iguales pero en sentido contrario y tienden a alargar el material. Al referirse a tracción el esfuerzo debe situarse en el centro de gravedad de la sección.

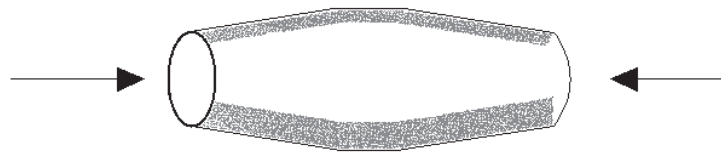


**Figura 1.4.-** Probeta sometida a tracción

**Fuente:** Propia

#### 1.2.1.2. Compresión

La compresión se presenta cuando sobre un elemento actúan dos fuerzas iguales pero en sentido contrario, estas fuerzas tienden a acortar el material. Esta carga se determina por medio de la máquina universal de pruebas, la misma que se lleva a cabo de manera similar a la de tracción. Una pequeña probeta es sometida a cargas de compresión y la resistencia de compresión final se alcanza cuando la probeta falla por aplastamiento.

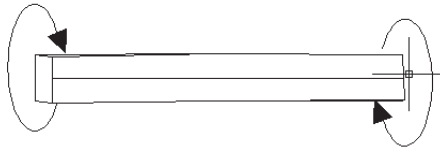


**Figura 1.5.-** Probeta a compresión

**Fuente:** Propia

#### 1.2.1.3. Torsión

Se presenta cuando se aplica un momento sobre el eje longitudinal de un elemento constructivo como pueden ser ejes o, en general, elementos donde una dimensión predomina sobre las otras dos.

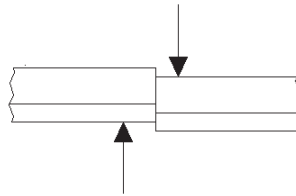


**Figura 1.6.-** Probeta sometida a torsión

**Fuente:** Propia

#### 1.2.1.4. Corte o cizalla

Los esfuerzos de corte provocan la aparición de tensiones de corte dentro de la sección en la que actúan. Las tensiones de corte no provocan cambio de volumen, sólo producen deformación angular.

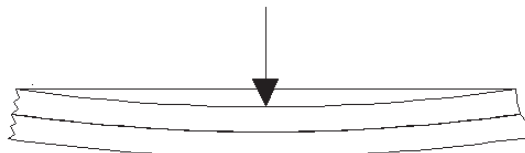


**Figura 1.7.-** Probeta a corte

**Fuente:** Propia

#### 1.2.1.5. Flexión

Es la deformación que se presenta sobre un elemento estructural cuando sobre este actúan fuerzas en dirección perpendicular al eje longitudinal.



**Figura 1.8.-** Probeta a flexión

**Fuente:** Propia

### **1.2.2. DUCTILIDAD**

La ductilidad es la propiedad de un material que sometido a cargas externas, pueden deformarse sin llegar a la fractura.

### **1.2.3. FRAGILIDAD**

Propiedad contraria a la ductilidad, los materiales frágiles fallan sin deformación permanente apreciable. Estos materiales tienen baja resistencia al choque o al impacto.

### **1.2.4. TENACIDAD**

Es la capacidad de un material en absorber energía antes de la fractura, es decir soporta esfuerzos considerables, aplicados lenta o súbitamente, en forma continua o intermitente y le permite deformarse antes de que ocurra la falla.

### **1.2.5. DUREZA**

Es la resistencia que presenta un material a la rayadura o penetración en la superficie del mismo en presencia de esfuerzos locales inferidos por otro cuerpo de mayor dureza, el cual no sufre deformaciones residuales.

### **1.2.6. IMPACTO**

Es la capacidad de un metal para absorber la energía de una carga instantánea aplicada al miembro.

## **CAPITULO 2**

### **2. SOLDADURA**

En el presente capítulo se realiza una introducción a la soldadura, se detallan conceptos básicos, además se realiza la selección del tipo de proceso de soldadura que se emplea en el presente estudio. Una vez seleccionado el proceso, se detallan los fundamentos del mismo y las variables más relevantes. También se detallan los ensayos a realizar de acuerdo al requerimiento de la norma.

#### **2.1 INTRODUCCIÓN**

La soldadura es el proceso de unión de dos o más metales que puede producirse por aplicación de calor (mediante una llama, un arco, resistencia al paso de una corriente eléctrica, energía radiante) o por medios mecánicos (fricción, presión) con o sin aporte de otro metal, llamado metal de aportación, cuya temperatura de fusión es inferior a la de las piezas que han de soldarse.

Otro concepto define a la soldadura como el proceso de unión rígida de dos o más materiales sólidos sin la utilización de un elemento mecánico adicional. Este proceso puede llevarse a cabo con o sin temperatura, con o sin presión, con o sin fusión, con o sin material de aporte, etc. (Soldadura, 2012)

Se han desarrollado más de 40 procedimientos de soldadura basados en el calor, que se sub dividen en tres grupos: el proceso de soldadura de arco, que obtiene calor de un arco eléctrico y lo mantiene entre 2 electrodos o entre un electrodo y la pieza de trabajo; el proceso de soldadura a gas, que obtiene el calor en forma de una llama mediante la mezcla de oxígeno y algún gas combustible, que generalmente es el acetileno; y el proceso de soldadura por resistencia, que obtiene el calor de la resistencia que ofrece la pieza de trabajo al paso de una corriente eléctrica. (Horwitz, 1976)

## 2.2 CLASIFICACIÓN DE LA SOLDADURA

Los procesos de soldadura pueden clasificarse de la siguiente manera:

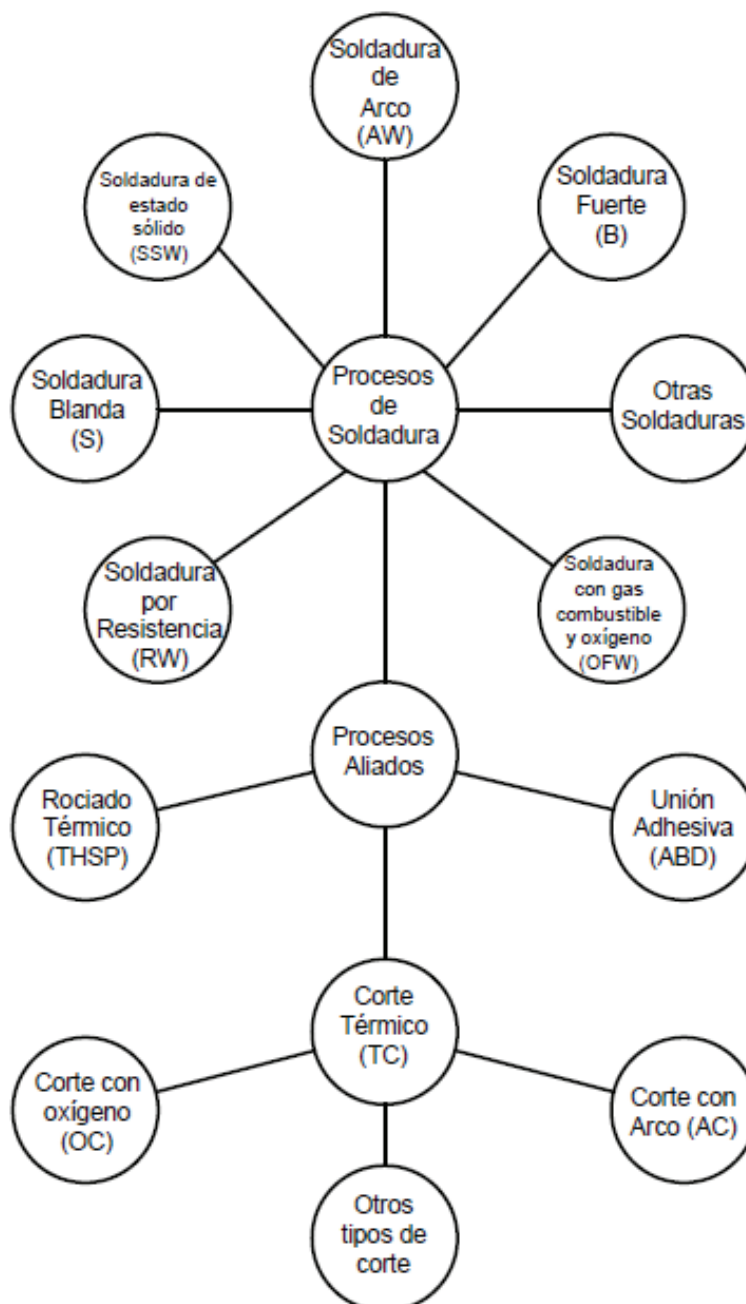


Figura 2.1.- Clasificación de la soldadura

Fuente: (Horwitz, 1976)



### Soldadura de Arco (AW):

- Soldadura con hidrógeno atómico (AHW)
- Soldadura con arco metálico con electrodo desnudo (BMAW)
- Soldadura con arco de carbón (CAW)
  - Con gas (CAW-S)
  - Con arco protegido (CAW-S)
- Soldadura de arco con núcleo de fundente (FCAW)
  - Electrogas (FCAW-EG)
- Soldadura con arco metálico y gas (GMAW)
  - Electrogas (GMAW-EG)
  - Arco pulsado (GMAW-P)
  - Arco en corto circuito (GMAW-S)
- Soldadura de arco de tungsteno y gas (GTAW)
  - Arco pulsado (GTAW-P)
- Soldadura de arco con plasma (PAW)
- Soldadura de arco metálico protegido (SMAW)
- Soldadura de arco de espárragos (SW)
- Soldadura de Arco sumergido (SAW)

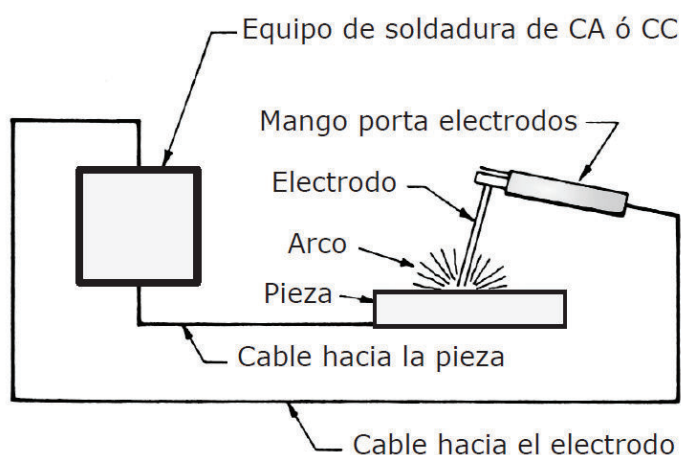
Para observar el resto de la clasificación de la soldadura referirse al ANEXO 1.

## 2.3 SOLDADURA DE ARCO ELÉCTRICO

La soldadura eléctrica (o de arco) es el proceso con más amplia aceptación como el mejor, más económico, natural y práctico para unir metales, ya que es la forma más fácil de producir una alta intensidad de calor, que se genera por la resistencia al paso de la electricidad entre el electrodo y la pieza de trabajo.

El aire es un mal conductor de la electricidad; casi puede clasificarse como no conductor. La corriente de soldadura que pasa a través de este entrehierro de aire de alta resistencia genera un calor muy intenso en el arco, el cual puede ser de 3316 °C a 5538 °C. Como resultado, el metal base se funde en el punto en el que lo toca el arco y el electrodo se funde (y se convierte en metal de aporte en el punto que el arco toca la punta del electrodo).

Para mantener el arco estable y consistente, se incorporan ciertas substancias químicas en los recubrimientos de los electrodos, las que ayudan a contener y dirigir el arco, sirviendo también para proteger el metal de aporte fundido del contacto con el aire, mientras aquel pasa a través del arco.



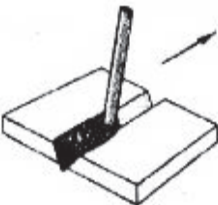

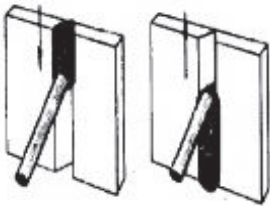

**Figura 2.2.-** Esquema básico de una máquina de soldar

**Fuente:** <http://www.demaquinasyherramientas.com/soldadura/tecnologia-inversora-inverter-para-soldadura>

### 2.3.1 POSICIONES DE SOLDADURA

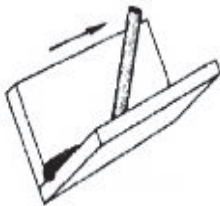
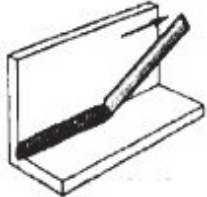
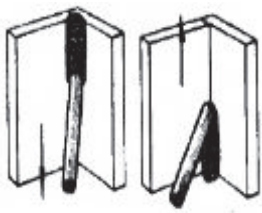
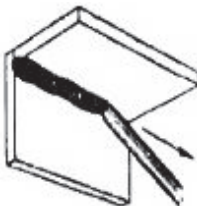
Las posiciones de soldadura son las diferentes ubicaciones del soldador respecto a la junta soldada. En la tabla 2.1 y 2.2 se pueden apreciar las diferentes posiciones de soldadura para placas.

**Tabla 2.1.-** Posiciones de soldadura en placas con soldadura de ranura

Gráfico	Posición	Descripción
	1G	Chapas horizontales, soldadura plana o sobremesa
	2G	Chapas verticales con eje de soldadura horizontal
	3G	Soldadura vertical descendente Soldadura vertical ascendente
	4G	Soldadura sobre cabeza

**Fuente:** *(Soldadura, 2012)*

**Tabla 2.2.-** Posiciones de soldadura en placas con soldadura de filete

Gráfico	Posición	Descripción
	1F	Soldadura plana
	2F	Soldadura horizontal
	3F	Soldadura vertical descendente Soldadura vertical ascendente
	4F	Soldadura sobre cabeza

Fuente: (Soldadura, 2012)

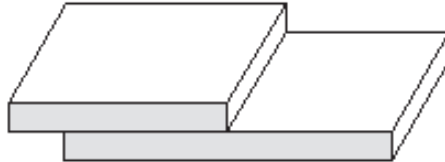
### 2.3.2 TIPOS DE JUNTAS SOLDADAS

Las juntas se refieren a la orientación y el arreglo de las partes a ser soldadas. Se diseñan principalmente por la resistencia y seguridad que requieren los servicios a los que se les va a destinar, también se toma en cuenta la economía, la accesibilidad durante la construcción.

Existen cinco tipos de juntas:

### 2.3.2.1 Junta a traslape

Formadas por dos piezas de metal soldadas o traslapadas, que se unen por fusión mediante soldadura de puntos, de filete, de tapón o de agujero alargado.

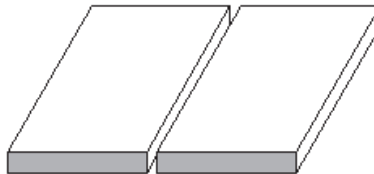


**Figura 2.3.-** Junta a traslape

**Fuente:** Propia

### 2.3.2.2 Junta a tope

Esta entre la superficie de las dos piezas, pueden ser simples, escuadradas, biseladas en V, K, de ranuras de una sola J, de ranuras de una sola U, o dobles.

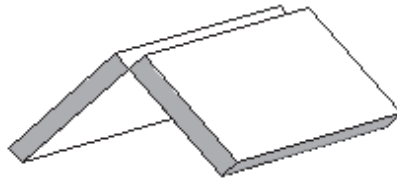


**Figura 2.4.-** Junta a tope

**Fuente:** Propia

### 2.3.2.3 Junta de esquina

Son soldaduras hechas entre dos partes situadas entre un ángulo de  $90^\circ$ . Pueden ser de medio traslape, de esquina a esquina o de inserción completa, y pueden prepararse para formar un solo bisel, una sola V o ranuras de una sola U.

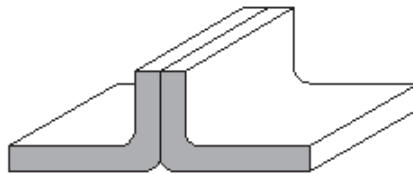


**Figura 2.5.-** Junta de esquina

**Fuente:** Propia

#### **2.3.2.4 Junta de brida**

Resultan de la fusión de la superficie adyacente de cada parte, de manera que la soldadura quede dentro de los planos superficiales de ambas partes.

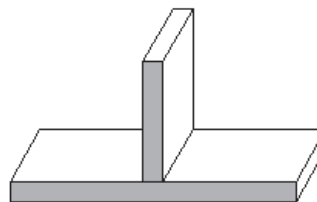


**Figura 2.6.-** Junta de brida

**Fuente:** Propia

#### **2.3.2.5 Junta en T**

Son precisamente lo que su nombre lo indica, pero también puede ser de un solo bisel, de doble bisel, de una sola J y de doble J.

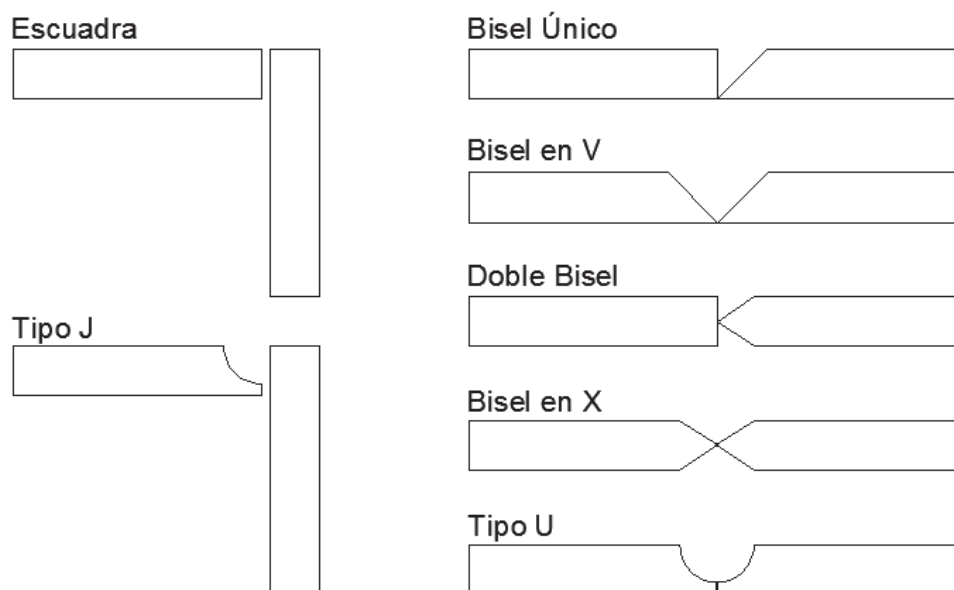


**Figura 2.7.-** Junta en T

**Fuente:** Propia

### 2.3.3 BISELES TÍPICOS PARA JUNTAS SOLDADAS

Como se puede observar en la Figura 2.8, existen diferentes diseños de bordes que se emplean para soldadura, entre los que se puede encontrar.



**Figura 2.8.-** Diferentes diseños de biseles para juntas

**Fuente:** <http://estefaniacero.blogspot.com/2012/02/tipos-de-uniones-en-acero.html>

Las ranuras pueden prepararse por corte de llama, esmerilado, frezado o cizallado.

#### 2.3.3.1 Geometría de la Junta

El diseño de la junta a soldar dependerá del proceso seleccionado, espesor, composición del metal base, tipo de electrodo, costo de preparación, facilidad de acceso, adaptabilidad al producto que se trata de fabricar, tipos de cargas que debe soportar la soldadura, técnica de soldadura, tipo de transferencia del metal de aporte.

La geometría de la junta se basa en los siguientes principios: (Giachino, 1988)

1. La preparación debe ser uniforme a lo largo de toda la junta: en las uniones a tope debe vigilarse la uniformidad de chaflanes y separaciones.

2. Es fundamental un ángulo de chaflán suficiente para conseguir un cordón bien hecho y adecuada penetración.
3. Una abertura excesiva desperdicia material de aporte.
4. Una separación suficiente permite una penetración completa.
5. Para obtener una unión de calidad con una buena velocidad de soldeo, deben prepararse los bordes con un talón adecuado.

### **2.3.4 FACTORES PARA SELECCIÓN DE ELECTRODOS**

El electrodo ideal es aquel que suministra una buena estabilidad de arco, un cordón de soldadura liso y bien presentado, una buena velocidad de depósito, escasez de salpicaduras, máxima resistencia y fácil eliminación de la escoria.” (Giachino, 1988)

#### **2.3.4.1 Características del metal base**

La soldadura debe tener la misma resistencia que el metal base, se debe asegurar la composición química del metal base y seleccionar el material de aporte adecuado.

#### **2.3.4.2 Diámetro del electrodo**

Este dependerá del espesor del metal base a soldar, al aumentar el espesor aumentará el diámetro del electrodo para compensar el aporte del material y el heat input.

#### **2.3.4.3 Tipo de junta y preparación de bordes**

Las uniones con abertura de chaflán insuficiente exigirán empleo de electrodos de gran poder de penetración. Los electrodos que reúnen estas características suelen exigir mayor habilidad del soldador. Por el contrario, para preparación de bordes muy separados, será conveniente el empleo de electrodos de penetración media para que se quede entre los bordes.

#### **2.3.4.4 Posición de soldadura**

Algunos electrodos están diseñados para diferentes posiciones, pero en general dan mejores resultados cuando se aplican en posición plana.



#### **2.3.4.5 Rendimiento en el trabajo**

La velocidad de aporte es un factor muy importante, a mayor velocidad, menor es el costo. Para obtener una alta velocidad de aporte debe escogerse el electrodo adecuado para que la soldadura presente buenas características.

#### **2.3.4.6 Condiciones de servicio**

Estas determinan las características de la soldadura, es decir si se requiere resistencia a la corrosión, alta ductilidad, alta resistencia a la tracción, etc.

### **2.4 DOCUMENTOS DE CALIFICACIÓN**

La documentación de calificación del proceso de soldadura lo conforman el WPS, PQR y WPQ. Estos son documentos en los cuales se comprueba que el procedimiento de soldadura fue realizado bajo las normas establecidas según la ASME sección IX, con un soldador calificado y además que la soldadura cumpla con las propiedades mecánicas requeridas según su aplicabilidad.

#### **2.4.1 ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)**

WPS (Welding Procedure Specification) es un documento de soldadura que provee dirección para realizar soldaduras de producción en conformidad con requerimientos del Código. Este documento se usa para que el soldador u operario de soldadura asegure el cumplimiento del requerimiento de la norma ASME IX.

##### **2.4.1.1 P Number**

Para reducir el número de procedimientos que requieren calificación se asignan números P a los materiales base dependiendo de sus características tales como: composición química, soldabilidad y propiedades mecánicas.

##### **2.4.1.2 A Number**

Es la identificación de la composición química del metal de soldadura.

### **2.4.1.3 F Number**

Agrupan electrodos y varillas de soldar, se debe tener en cuenta que no se puede reemplazar el material de aporte dentro de un grupo sin considerar compatibilidad de los metales base y los metales de aporte desde el punto de vista de las propiedades metalúrgicas, requerimientos de diseño y de servicio, tratamiento térmico después de la soldadura y propiedades mecánicas.

### **2.4.2 REGISTRO DE CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO (PQR)**

PQR (Procedure Qualification Record) es un registro de los datos de soldadura usados para soldar una probeta, en este documento se registran las variables de soldadura, además contiene los resultados de las pruebas realizadas a las probetas.

### **2.4.3 REGISTRO DE CALIFICACIÓN DEL SOLDADOR (WPQ)**

WPQ (Welder Performance Qualification) es un registro de pruebas de calificación de la habilidad del soldador. En este se incluirá las variables esenciales, el tipo de prueba y los resultados de las pruebas.

## **2.5 PROCESOS DE SOLDADURA**

En esta sección se determinará el tipo de proceso de soldadura a utilizar, para ello se describen las ventajas y limitaciones de cada uno y se realizarán los cuadros de evaluación que determina el proceso más adecuado; teniendo en cuenta los cuatro procesos con los que cuenta el laboratorio de soldadura de la Escuela Politécnica Nacional.

### **2.5.1 SMAW**

Es un proceso en el que se produce coalescencia de metales por medio del calor de un arco eléctrico que se mantiene entre la punta de un electrodo cubierto y la superficie del metal base en la unión que se está soldando. (AWS, 1996)

#### **2.5.1.1 Ventajas**

- Equipo relativamente simple, económico y portátil.

- El electrodo es el encargado de suministrar el metal de aporte y la protección del arco.
- No requieren ni de flujo adicional, ni de gases de protección.
- El proceso es menos sensible al viento y corrientes de aire que los protegidos por gas.
- Permite el uso en áreas de acceso limitado.
- Es adecuado para la mayoría de los metales y aleaciones.

#### **2.5.1.2 Limitaciones**

- No pueden soldarse metales o aleaciones de bajo punto de fusión, ejemplo: Pb, Sn y Zn.
- No pueden soldarse metales reactivos, ejemplo: Titanio, Zirconio, Tantalio.
- Alta dependencia del soldador.
- Bajo rendimiento y velocidad de aportación.
- Alto nivel de desperdicio.
- Mayor grado de escoria.
- Mayor limpieza.

#### **2.5.2 GMAW**

Es un proceso que emplea un arco entre un electrodo continuo de metal de aporte y el charco de soldadura. El proceso se realiza bajo un escudo de gases suministrado externamente y sin aplicación de presión. (AWS, 1996)

##### **2.5.2.1 Ventajas**

- Es el único proceso de electrodo consumible que puede servir para soldar todos los metales y aleaciones comerciales.
- Puede soldarse en todas las posiciones.
- Se logran tasas de aportación más altas que con soldadura SMAW.
- Las velocidades de soldadura son más altas que con soldadura SMAW gracias a la alimentación continua del electrodo y a las mayores tasas de aportación del metal de aporte.

- Como la alimentación de alambre es continua, es posible depositar soldaduras largas sin parar y volver a comenzar.
- Cuando se usa transferencia por aspersion, es posible lograr mayor penetración que con SMAW, lo que puede permitir el uso de soldaduras de filete más pequeñas para obtener una resistencia mecánica equivalente.
- Casi no se requiere limpieza después de la soldadura porque no se produce mucha escoria.

#### **2.5.2.2 Limitaciones**

- El equipo de soldadura es más complejo, más costoso y menos transportable que el de SMAW.
- GMAW es más difícil de usar en lugares de difícil acceso por que la pistola soldadora es más grande que un porta-electrodos de SMAW, además esta debe estar cerca de la unión [entre 10 y 19 [mm] (3/8 y 3/4) [pulg]] para asegurar que el metal de soldadura este bien protegido.
- El arco de soldadura debe protegerse contra corrientes de aire que puedan dispersar el gas protector. Esto limita las aplicaciones en exteriores a menos que se coloquen barreras protectoras alrededor del área de soldadura.
- Los niveles relativamente altos de calor radiado y la intensidad del arco pueden hacer que los operadores se resistan a utilizar el proceso.

#### **2.5.3 GTAW**

Es un proceso que utiliza un arco entre un electrodo de tungsteno (no consumible) y el charco de soldadura. El proceso se emplea con un gas protector y sin aplicación de presión. La adición del metal de aporte es opcional. (AWS, 1996)

##### **2.5.3.1 Ventajas**

- Produce soldaduras de muy buena calidad, generalmente libres de defectos.
- Está libre de salpicaduras que ocurren con otros procesos de soldadura por arco.

- Puede usarse con metal de aporte o sin él, según requiera la aplicación específica.
- Ofrece un control excelente de la penetración de la pasada de raíz.
- Puede producir soldaduras económicas a altas velocidades.
- Puede usar fuentes de potencia de costo relativamente bajo.
- Permite controlar de manera precisa las variables de soldadura.
- Sirve para soldar casi todos los metales, incluso la unión de metales disímiles.
- Permite controlar en forma independiente la fuente de calor y las adiciones de metal de aporte.

#### **2.5.3.2 Limitaciones**

- Las tasas de aportación son más bajas que las que pueden alcanzarse con procesos de soldadura por arco con electrodo consumible.
- El soldador requiere un poco más de destreza y coordinación que con la soldadura por arco de metal y gas o la de arco de metal protegido cuando suelda manualmente.
- Para espesores de más de 10 [mm] (3/8 [pulg.]) resulta menos económico que los procesos de soldadura por arco con electrodo consumible.
- Puede haber inclusiones de tungsteno, si se permite que el electrodo haga contacto con el charco de soldadura.
- El metal de soldadura puede contaminarse si no se mantiene como es debido el escudo de gas protector alrededor del metal de aporte.
- No se tolera mucha contaminación de los metales base o de aporte.
- Puede haber contaminación o porosidad causadas por fugas del refrigerante en sopletes enfriados por agua.

#### **2.5.4 FCAW**

Es un proceso que aprovecha un arco entre un electrodo continuo de metal de aporte y el charco de soldadura. Este proceso se emplea con protección de un fundente contenido dentro del electrodo tubular, con o sin un escudo adicional de gas de procedencia externa y sin aplicación de presión. (AWS, 1996)

#### **2.5.4.1 Ventajas**

- La productividad de la soldadura de alambre continuo es mayor que en el proceso SMAW.
- Combina características del SMAW, GMAW y SAW.
- La escoria sustenta y moldea la franja de soldadura.
- Tasas de aportación elevadas.
- Factores de operación alto y mayores eficiencias de aportación.
- Amplia aplicación en trabajos de fabricación, mantenimiento y construcción en el campo.

#### **2.5.4.2 Limitaciones**

- Mayor costo del equipo.
- Relativa complejidad de la configuración y control del equipo.
- Restricción en cuanto a la distancia de operación respecto del alimentador al electrodo de alambre.
- Se debe eliminar la escoria entre una pasada y otra, sobre todo en las pasadas de raíz.

### **2.5.5 SELECCIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA**

Respecto a las ventajas y limitaciones de cada proceso anteriormente mencionados, se han determinado los siguientes criterios de selección que se describen a continuación:

#### **2.5.5.1 Criterios de selección**

- I. Rapidez
- II. Costo de productividad
- III. Limpieza
- IV. Dificultad
- V. Tasa de aportación

### 2.5.5.2 Alternativas

- A. SMAW
- B. GMAW
- C. GTAW
- D. FCAW

El método que se utiliza para la selección de la mejor alternativa es el de evaluar la misma en base los criterios de selección con una calificación que está en una escala de 1 a 10, siendo 1 el valor más bajo y 10 el más alto. Por ejemplo para la alternativa de la soldadura SMAW (alternativa A) la rapidez de soldadura (criterio de selección I) se evalúa con una calificación de 5, ya que hay que reemplazar el electrodo cada vez que el mismo se consume. En la columna de ponderación el valor de criterio de selección se evalúa de acuerdo a la importancia que tenga uno respecto a otro y la sumatoria total debe ser igual a 100.

**Tabla 2.3.-** Calificación de alternativas en base a los criterios de Selección

Criterios de Selección	Alternativas					Ponderación	
	I	II	III	IV	V		
A	5	6	5	7	5	25	I
B	9	9	8	7	8	15	II
C	8	8	8	7	8	15	III
D	9	8	8	6	8	20	IV
						25	V
$\Sigma$	31	31	29	27	29	100	

**Tabla 2.4.-** Ponderación de la calificación de los Criterios de Selección

Criterios de Selección	Alternativas					Ponderación	
	1	2	3	4	5		
A	0,16	0,19	0,17	0,26	0,17	0,25	I
B	0,29	0,29	0,28	0,26	0,28	0,15	II
C	0,26	0,26	0,28	0,26	0,28	0,15	III
D	0,29	0,26	0,28	0,22	0,28	0,2	IV
						0,25	V
$\Sigma$	1	1	1	1	1	1	

Fuente: Propia

Tal como se observa en la tabla 2.4, se divide cada valor para el total de su respectiva columna. Solo se muestra dos decimales.

A continuación en la tabla 2.5 se muestra dos columnas, la primera en la que están las alternativas y la segunda que muestra la ponderación. El primer valor de ponderación se obtiene de realizar una multiplicación de las matrices de la primera fila de la alternativa A con la columna de ponderación (tabla 2.4). Se escoge el valor con ponderación más alta.

Una realizada esta evaluación se determina que el proceso más adecuado para realizar la soldadura de las probetas para el presente estudio es el proceso GMAW.

**Tabla 2.5.-** Selección de la mejor alternativa

<b>Alternativas</b>	<b>Ponderación</b>
A	0,1902
<b>B</b>	<b>0,2783</b>
C	0,2654
D	0,2661

**Fuente:** Propia

## **2.6 SOLDADURA GMAW**

La soldadura GMAW (Gas Metal Arc Welding) o también conocida como MIG (Metal Inert Gas) - MAG (Metal Active Gas), es el proceso más difundido y altamente posicionado en la industria metalmecánica, gracias a que incrementa la productividad, mejora la presentación de los cordones de soldadura, produce menos escoria y cumple con las medidas para la protección ambiental. Se pueden soldar en cualquier posición con este proceso, escogiendo el gas protector, electrodo y variables de soldadura apropiadas.



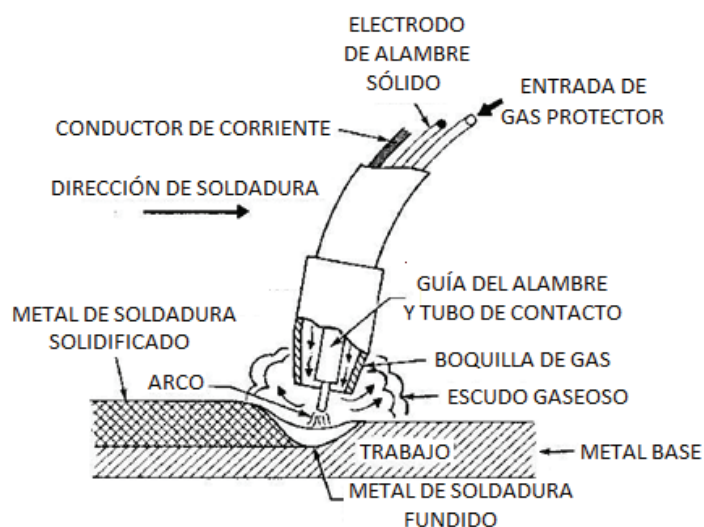


**Figura 2.9.- Soldadura GMAW**

**Fuente:** <http://webdelprofesor.ula.ve/arquitectura/lvergara/Autogena.htm>

### 2.6.1 DEFINICIÓN

La soldadura por arco de metal y gas (GMAW) es un proceso de soldadura, de corriente directa (CD) con polaridad invertida, que emplea un arco eléctrico entre un electrodo continuo de metal de aporte (consumible, sólido y desnudo) y el charco de soldadura. El proceso se realiza bajo un escudo protector de gas (en general de dióxido de carbono, de mezclas de argón y bióxido de carbono, o de gases con base de helio) suministrado externamente y sin aplicación de presión.



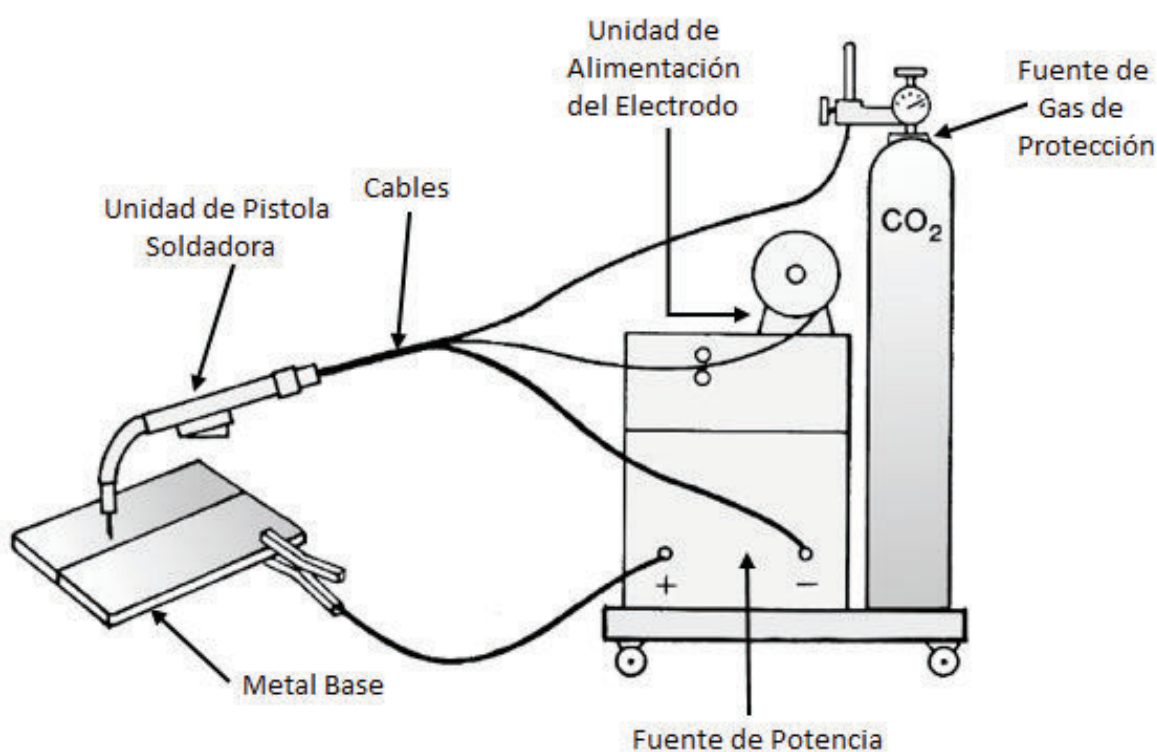
**Figura 2.10.- Pistola de soldadura**

**Fuente:** [http://www.tecnoficio.com/soldadura/soldadura\\_electrica4.php](http://www.tecnoficio.com/soldadura/soldadura_electrica4.php)

## 2.6.2 FUNDAMENTOS DE PROCESO

### 2.6.2.1 Principios de operación

Este proceso se basa en la alimentación automática de un electrodo continuo consumible que se protege mediante un gas de procedencia externa. Una vez que se realizan los ajustes iniciales, el equipo puede regular automáticamente las características eléctricas del arco. Los únicos controles manuales que el soldador requiere para la operación semi-automática son la velocidad de avance, la dirección del desplazamiento y la posición de la pistola. Cuando se cuenta con equipo y ajustes apropiados, la longitud del arco y la corriente (es decir, la velocidad de alimentación del alambre) se mantienen constantes.



**Figura 2.11.-** Esquema del equipo de GMAW

**Fuente:** <http://www.demaquinasyherramientas.com/soldadura/soldadura-mig>

Como se muestra en la figura 2.11, los componentes básicos del equipo GMAW son: fuente de potencia, unidad de alimentación del electrodo, fuente de gas de protección, unidad de pistola soldadora y los cables. La pistola conduce la corriente eléctrica, el gas de protección y guía el electrodo consumible, de manera que proporciona la energía para establecer, mantener el arco y fundir el electrodo, además de la protección necesaria contra la atmósfera del entorno.

### **2.6.3 TRANSFERENCIA DEL METAL DE APORTE**

Cuando el alambre electrodo se funde, las gotas de metal se transfieren directamente a través del arco a la pileta. Los tipos de transferencia del metal de electrodo son:

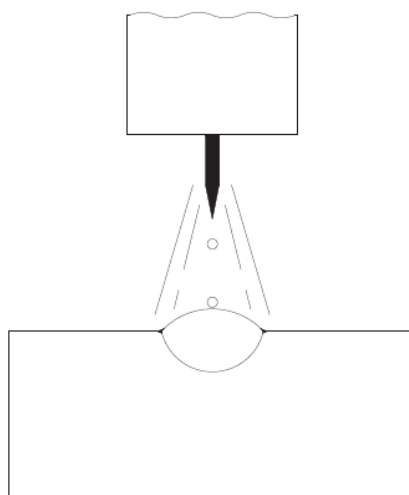
- Transferencia por aspersion.
- Transferencia globular.
- Transferencia por cortocircuito

El tipo de transferencia depende de varios factores importantes que se mencionan a continuación:

- Magnitud y tipo de corriente de soldadura
- Diámetro del electrodo
- Composición del electrodo
- Extensión del electrodo
- Gas de protección

#### **2.6.3.1 Transferencia por aspersion**

Con una protección rica en argón y con el uso de corriente continua con electrodo positivo (CCEP), es posible producir una modalidad de transferencia de “rocío axial” muy estable y libre de salpicaduras (como se ilustra en la figura 2.12).

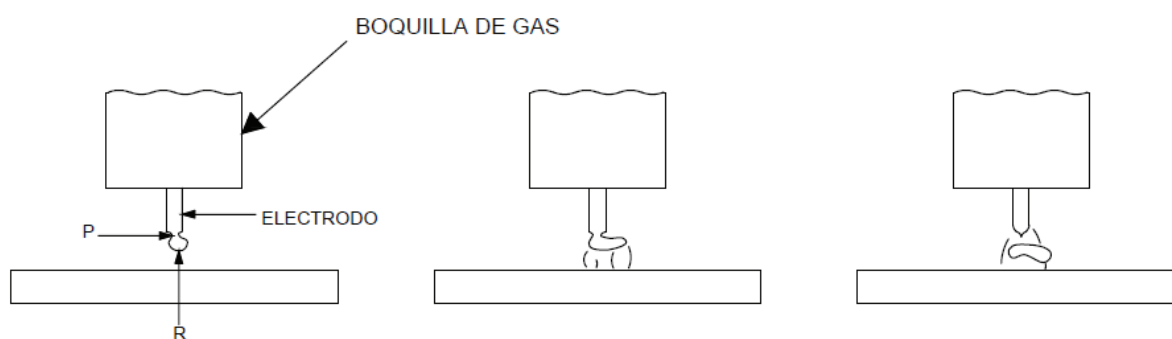


**Figura 2.12.-** Transferencia por aspersión

**Fuente:** [http://www.tecnoficio.com/soldadura/soldadura\\_electrica4.php](http://www.tecnoficio.com/soldadura/soldadura_electrica4.php)

### 2.6.3.2 Transferencia globular

El metal se transfiere en gotas de gran tamaño y ocurre por gravedad cuando el peso de éstas excede la tensión superficial. Se usan gases ricos en dióxido de carbono y argón, produce altas corrientes que posibilitan mayor penetración de la soldadura y mayores velocidades que las que se alcanzan con la transferencia por corto circuito y aspersión. También, se producen bastantes salpicaduras y por ello no es recomendable soldar sobre cabeza.



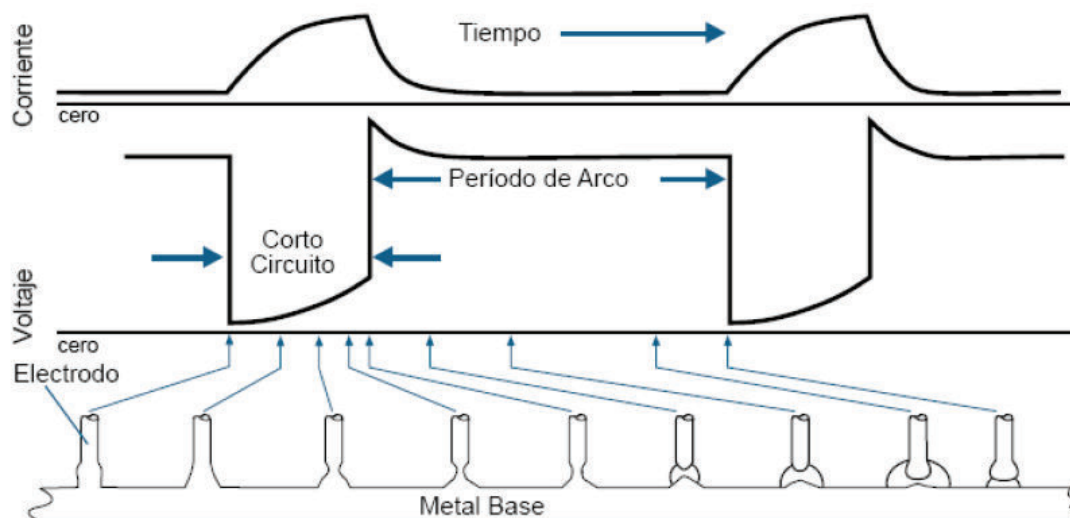
**Figura 2.13.-** Transferencia globular por gravedad

**Fuente:** [http://www.tecnoficio.com/soldadura/soldadura\\_electrica4.php](http://www.tecnoficio.com/soldadura/soldadura_electrica4.php)

### 2.6.3.3 Transferencia por cortocircuito

La transferencia en cortocircuito produce un charco de soldadura pequeño, de rápida solidificación, que generalmente es apropiado para unir secciones delgadas, soldar fuera de posición y tapan aberturas de raíz anchas.

El metal se transfiere del electrodo al metal base sólo durante el periodo en que el primero está en contacto con el charco de soldadura; no se transfiere metal a través del espacio del arco.



**Figura 2.14.-** Transferencia por cortocircuito

**Fuente:** (Saunders, 1997)

### 2.6.4 GASES PROTECTORES

Los gases protectores evitan la contaminación del metal de soldadura, también influyen en el arco, profundidad de penetración y en la cantidad de salpicaduras del metal que se produzcan. El gas protector depende del proceso de soldadura, metal base y de los resultados que se desean obtener.

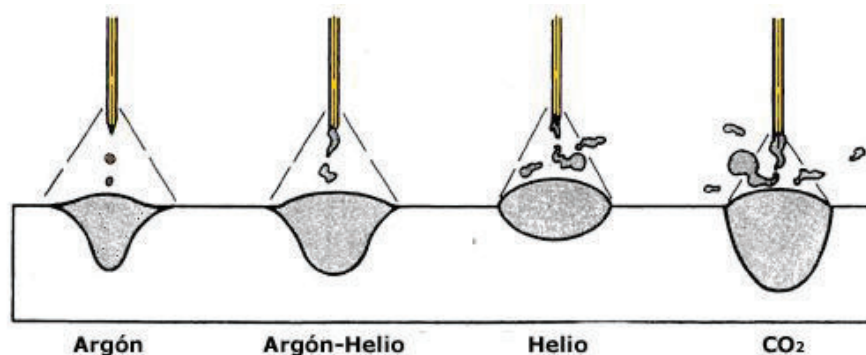
Como se puede observar en la Tabla 2.6, los tres principales gases que se emplea en GMAW son el Argón (Ar), Helio (He) y CO<sub>2</sub>, o una mezcla de estos. (Saunders, 1997)

**Tabla 2.6.-** Gases y mezclas de gases para GMAW

Gas protector	Acción química	Usos - Observaciones
Argón (Ar)	Inerte	Para soldar la mayoría de metales
Helio (He)	Inerte	En aleaciones de Al y Cu para máximo calor y minimizar la porosidad.
Ar y He (20-80 a 50-50 %)	Inerte	Aleaciones de Al y Cu para mayor aplicación de calor y minimizar la porosidad. Arco más silencioso y estable que sólo con He.
Ar + 3-5% CO <sub>2</sub>	Oxidante	Aceros al carbono, aleaciones de acero y acero inoxidable, se requiere electrodo desoxidado.
Ar + 20-30% CO <sub>2</sub>	Oxidante	Diversos aceros; se usa principalmente con arco en cortocircuito.
CO <sub>2</sub>	Oxidante	Aceros al carbono y de baja aleación.

**Fuente:** (Saunders, 1997)

El costo del Helio es elevado, seguido por el Argón y el CO<sub>2</sub>. El dióxido de carbono produce un cordón más ancho que el Argón y más delgado que el Helio.



**Figura 2.15.-** Penetración con diferentes gases protectores

**Fuente:** (AWS, 1996)

Una desventaja al emplear solamente dióxido de carbono es que se produce un arco brusco con muchas salpicaduras, por lo que al mezclarlo con Ar se estabilizará el arco y disminuirán las salpicaduras.

### 2.6.5 ELECTRODOS

En la tabla 2.7 se observa la nomenclatura que identifica a los electrodos GMAW.

**Tabla 2.7.-** Nomenclatura de electrodos GMAW

<b>ER XX S – Y</b>	
E	Electrodo
R	Varilla de Aporte
XX	Multiplicado por 1000 la Resistencia Mínima a la Tracción en psi Ej. ER70S = 70000 psi
S	Sólido
Y	Dígito que representa la composición química del electrodo, puede valer “2”, “3”, “4”, “6” o “7” y corresponde a cantidades variables de carbono, manganeso y silicio, además de cantidades fijas de fósforo, azufre, níquel, cromo, molibdeno, cobre y otros.

**Fuente:** Propia

En la tabla 2.8 se observa el digito correspondiente a la composición química de los electrodos GMAW.

**Tabla 2.8.-** Composición química del electrodo

<b># Dígito</b>	<b>Composición química del electrodo</b>
2	Buena soldadura con el gas C-25 (75% argón + 25% CO <sub>2</sub> ) Soldadura en acero inoxidable Contiene zirconio, titanio y aluminio Carece de fluidez El charco no tiende a desplazarse lateralmente y puede no pegar correctamente en materiales pesados.

Continúa

3	Con más desoxidantes Charco más fluido que forma un cordón más amplio. Se ha utilizado con éxito durante años en automóviles, maquinaria agrícola y electrodomésticos.
4	Adecuado para casi todas las soldaduras de acero. Ofrece una buena fluidez y mejores características de arco que el E70S-3. Tiene más salpicaduras y se utiliza en acero estructural, embarcaciones, tuberías y recipientes de calderas.
6	Mejor rendimiento y mayor costo. Tienen los mayores niveles de silicio y manganeso como desoxidantes. Son adecuados para la soldadura de casi todos los aceros, desde acero al carbono fino hasta placas de 1/2 pulgada (con el diámetro apropiado de alambre), Funciona con las mezclas de gases más usadas.
7	El charco posee una buena fluidez. Sus aplicaciones incluyen la fabricación de carrocerías, muebles, extinguidores, recipientes a presión y soldadura de cañerías, entre otras.

**Fuente:** (Horwitz, 1976)

Para la selección de los alambres se deben tener en cuenta los siguientes factores importantes:

- Metal Base: Propiedades mecánicas o composición del metal base
- Propiedades que debe tener la soldadura: Dependiendo de la composición del material depositado dependerá la resistencia, ductilidad, fragilidad, etc.
- Condición y limpieza del metal base: Si tiene costras, óxidos, grasas, aceites.
- Tipo de servicio o requisito de especificación aplicable: Estas pueden ser determinantes, de lo contrario analizar las condiciones de servicio.
- Posición de soldadura: Influye en el metal depositado en la junta soldada.
- Modalidad de transferencia de metal que se piensa usar: Dependiendo del espesor del metal base, se puede aplicar los diferentes tipos de transferencia del metal de aporte.



## **2.6.6 VARIABLES DE SOLDADURA**

Las variables que afectan la penetración de la soldadura, la geometría de la franja y la calidad de la soldadura son:

### **2.6.6.1 Corriente de soldadura**

El amperaje de soldadura varía con la velocidad de alimentación del electrodo o con la rapidez de fusión, al variarse la velocidad de alimentación, el amperaje varía de manera similar como si se empleara una fuente de potencia constante.

Un aumento en la corriente de soldadura producirá lo siguiente:

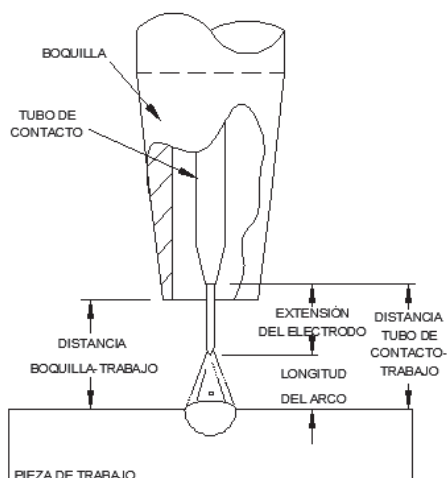
- Aumento en la profundidad y anchura de penetración de la soldadura.
- Un incremento en la tasa de aportación.
- Un aumento en el tamaño de la franja de soldadura.

### **2.6.6.2 Polaridad**

Describe la conexión eléctrica de la pistola soldadora en relación con las terminales de una fuente de potencia de corriente continua. Si el cable de potencia de la pistola se conecta a la terminal positiva, la polaridad se designa como corriente continua con el electrodo positivo (CCEP), es decir polaridad inversa. Cuando la pistola se conecta a la terminal negativa, la polaridad se designa como corriente continua con el electrodo negativo (CCEN), es decir polaridad directa.

### **2.6.6.3 Longitud de Arco**

Es una variable crítica que debe controlarse cuidadosamente, se relaciona directamente con el voltaje de arco, un incremento en el voltaje tiende a aplanar la franja de soldadura y aumenta la anchura de la zona de fusión. Si el voltaje es excesivo puede causar porosidad, salpicaduras y socavamiento.



**Figura 2.16.-** Longitud efectiva de arco de soldadura

**Fuente:** (Saunders, 1997)

#### 2.6.6.4 Velocidad de Recorrido

Es la tasa de movimiento lineal del arco a lo largo de la unión que se va a soldar; la penetración de la soldadura es máxima a una velocidad de recorrido intermedio. A velocidades muy bajas el arco actúa sobre el charco de soldadura, no sobre el metal base, reduciendo la penetración efectiva, dando como consecuencia una franja de soldadura ancha. Al incrementarse la velocidad de recorrido se impartirá al metal base menos energía térmica por unidad de longitud de la soldadura, por tanto la fusión del metal, primero aumenta y luego disminuye; apareciendo socavamiento a lo largo de los bordes de la franja de soldadura, porque no se depositara suficiente metal de aporte para rellenar el trayecto fundido por el arco.

#### 2.6.6.5 Extensión del electrodo

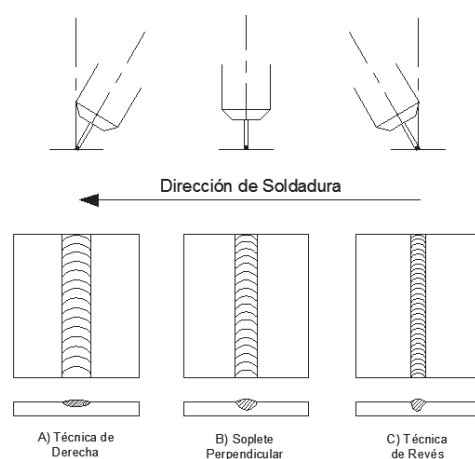
Extensión del electrodo o Stickout es la distancia entre el extremo del tubo de contacto y la punta del electrodo. Un aumento en la extensión del electrodo produce un aumento en su resistencia eléctrica.

La extensión del electrodo deseable está entre 6 y 13 [mm] (1/4 y 1/2 [pulg]) para la transferencia en cortocircuito y entre 13 y 25 [mm] (1/2 y 1 [pulg]) para los demás tipos de transferencia de metal.

#### 2.6.6.6 Orientación del electrodo

La orientación del electrodo con respecto a la unión por soldar afecta la forma y la penetración de la franja de soldadura y este efecto es mayor que el voltaje del arco o de la velocidad de recorrido.

Si el electrodo apunta en dirección opuesta a la dirección del desplazamiento, se denomina soldadura de revés con ángulo de arrastre. Pero si el electrodo apunta en la dirección del desplazamiento, se denomina soldadura de derecha con ángulo de ataque.



**Figura 2.17.-** Diferentes técnicas de soldadura

**Fuente:** Propia

Cuando el electrodo se saca de la perpendicularidad dándole un ángulo de ataque, la penetración disminuye y la franja de soldadura se hace más ancha y plana. La penetración máxima en la posición plana se obtiene con la técnica de arrastre, empleando un ángulo de unos 25 grados con respecto a la perpendicular. También produce una franja más convexa y angosta, un arco más estable y menos salpicaduras en la pieza de trabajo.

#### **2.6.6.7 Posición de la unión para soldar**

Casi todas las soldaduras con GMAW en la modalidad de aspersion se efectúan en las posiciones plana u horizontal; pero si el nivel de energía es bajo, se puede usar soldadura en cortocircuito para todas las posiciones.

#### **2.6.6.8 Tamaño del electrodo**

Este influye en la configuración de la franja de soldadura. Un electrodo de mayor tamaño requiere una corriente más alta que un electrodo pequeño con las mismas características de transferencia de metal. Las corrientes altas a su vez, producen mayor fusión del electrodo y depósitos de soldadura más grandes y fluidos. Otra consecuencia de las corrientes altas es el aumento de la tasa de deposición y en la penetración. No obstante en posición vertical por lo regular se efectúa con electrodos de menor diámetro y con corrientes más bajas.

#### **2.6.6.9 Gas protector**

Además de proporcionar un entorno protector, el gas protector y la tasa del flujo tienen un efecto importante sobre lo siguiente:

- Características del arco
- Modalidad de transferencia del metal
- Penetración y perfil de la franja de soldadura
- Velocidad de soldadura
- Tendencia al socavamiento
- Propiedades mecánicas del metal de soldadura

### **2.7 HEAT INPUT**

“Heat Input” es la energía transferida del electrodo al metal base por medio de un arco eléctrico. Cuando el soldador inicia el arco, tanto el metal base como el metal de aporte se funden para crear la soldadura. Esta fusión se lleva a cabo ya que una cantidad suficiente de energía (energía transferida por unidad de tiempo) y densidad de energía son suministradas por el electrodo.

El “Heat Input” es una medida relativa de la energía transferida por longitud unitaria de soldadura. Esta es una importante característica porque, tanto como el precalentamiento y la temperatura entre pasadas, influyen en la velocidad de enfriamiento, que puede afectar las propiedades mecánicas y la estructura metalúrgica de la soldadura y la ZAC (Zona Afectada por el Calor). El “Heat Input” se calcula como la proporción de la energía (Voltaje por corriente) para la velocidad de la fuente de calor (el arco), como se indica a continuación: (Funderburk, 1999)

$$H = \frac{60 \cdot E \cdot I}{S} \quad (1)$$

Donde:

H = Heat Input [J/in o J/mm]

E = Voltaje de Arco [Voltios]

I = Corriente [Amperios]

S = Velocidad de avance [mm/min ó in/min]

## 2.8 PRECALENTAMIENTO

La velocidad de enfriamiento controla la microestructura de la ZAC y depende del espesor del metal base, la geometría de la unión, el calor aportado y la temperatura de precalentamiento.

El precalentamiento es la mínima temperatura que debe ser alcanzada en todo el espesor y en una zona suficientemente ancha a ambos lados de la junta del metal base antes de que comience el proceso de soldadura y que normalmente debe mantenerse entre las diversas pasadas, en caso de soldadura de pasadas múltiples. (Quesada, 2002)

Su objetivo principal es producir un enfriamiento lento y uniforme. El precalentamiento varía con el análisis, tamaño y forma de la pieza de trabajo. (Horwitz, 1976)

Para realizar este proceso se aplica calor localmente por resistencia eléctrica o llama de gas; la medición de la temperatura se realiza en la cara opuesta a la superficie que se está aplicando el calor, por medio de termocuplas o lápices termo-indicadores. (Quesada, 2002)

### 2.8.1 ECUACIÓN DE PRECALENTAMIENTO

Para calcular esta temperatura mediante ecuaciones químicas existe el método de carbono equivalente. Para este cálculo se debe seguir los siguientes pasos: (Horwitz, 1976) (Quesada, 2002)

1. Determinar el equivalente químico en carbono del acero, mediante la siguiente ecuación, según Seferian:

$$C_q[\%] = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7 Mo}{90} \quad (2)$$

2. Determinar el equivalente en carbono para el espesor de la placa. Se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$C_e [\%] = 0,005 \cdot C_q \cdot e \quad (3)$$

Donde el espesor (e) está en milímetros [mm].

3. Determinar el equivalente total en carbono, mediante la siguiente ecuación:

$$C_T[\%] = C_q + C_e \quad (4)$$

4. Determinar la temperatura de precalentamiento, mediante la siguiente ecuación:

$$T_{\circ C} = 350 \cdot \sqrt{C_T - 0,25} \quad (5)$$

## **2.9 ENSAYOS METALOGRÁFICOS Y MECÁNICOS**

### **2.9.1 ENSAYOS METALOGRÁFICOS**

Estudia microscópicamente las características estructurales de un metal. Para esto se utiliza un microscopio, que hace posible determinar el tamaño de grano y la forma, tamaño y distribución de varias fases e inclusiones que tienen gran efecto sobre las propiedades mecánicas del metal.

#### **2.9.1.1 Proceso de obtención de la muestra metalográfica**

El objetivo de la preparación de la muestra es obtener una superficie plana, sin rayaduras, semejante a un espejo, donde esta microestructura revelará el tratamiento mecánico y térmico del metal y bajo un conjunto de condiciones dadas, podrá predecirse su comportamiento esperado.

##### **2.9.1.1.1 Muestreo**

La selección de la muestra es muy importante y se lo puede realizar con una segueta si el material es suave (metales y aleaciones no ferrosas y aceros no tratados térmicamente), pero si el metal es duro, se utiliza un disco cortador abrasivo de tipo adecuado, que gira a alta velocidad, teniendo en cuenta que durante la operación, la muestra debe permanecer fría.

##### **2.9.1.1.2 Desbaste Grueso**

La muestra debe tener un tamaño fácil de manipular, además debe esmerilarse sobre una lija de banda y con un chorro de agua constante para evitar el calentamiento. El esmerilado continúa hasta que la superficie quede plana y libres de rebabas, mellas, etc., y otras líneas que se forman debido al corte manual o al disco cortador.

##### **2.9.1.1.3 Desbaste Fino**

La muestra se pule sobre una serie de hojas de lijas de agua con un chorro de agua constante y de manera sucesiva. El primer papel es generalmente No. 240, luego 320, 400, 600 y finalmente 1500.

#### 2.9.1.1.4 Pulido fino

Mediante una rueda giratoria húmeda cubierta con un paño especial cargado con partículas abrasivas cuidadosamente seleccionadas se obtiene una superficie plana libre de rayaduras. Para materiales ferrosos es preferible utilizar óxido de aluminio.

Una muestra preparada adecuadamente mostrará únicamente las inclusiones no metálicas, estará libre de rayaduras y colas de cometa.

#### 2.9.1.1.5 Ataque químico

El propósito del ataque químico es hacer visibles las características estructurales del metal. En este proceso se debe evidenciar claramente las partes de la microestructura, esto se logra mediante un reactivo apropiado que se somete a la superficie pulida a una acción química. La selección del reactivo de ataque está determinada por el metal o aleación y la estructura específica que se desea ver. Para los aceros de bajo carbono por lo general se emplea Nital al 10% de concentración. Una vez que se finalice el ataque químico la probeta se deben enjuagar y secar con un flujo de aire caliente.

### 2.9.1.2 Macrografía y Micrografía

Una vez preparadas las probetas de metalografía se podrán realizar:

**Macrografías:** La macrografía es un examen que comprueba la calidad de la soldadura y en la que se hace visible la ZAC. Este ensayo consiste en cortar la probeta de soldadura por la sección transversal, que afecte a todo el cordón de soldadura. Después se realiza en la superficie de corte el desbaste grueso y fino, finalmente se ataca la superficie pulida con nital al 10 % de concentración. (Giachino, 1988)

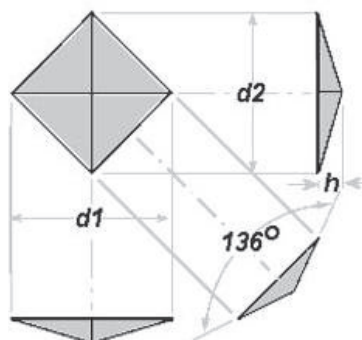
**Micrografías:** Es un examen donde se puede apreciar la microestructura de las tres zonas de soldadura, con ello se determina el cambio micro-estructural que sufre el material al ser soldado.

### 2.9.1.3 Microdurezas

El ensayo Vickers utiliza un indentador de diamante muy pequeño y de geometría piramidal que es forzado en la superficie de la muestra. Las cargas aplicadas son



menores que en las técnicas Brinell y Rockwell, están comprendidas entre 1 y 1000 g. La marca resultante se observa al microscopio y se mide. Para ello es necesario que la superficie de la muestra haya sido preparada cuidadosamente (mediante desbaste y pulido) para poder asegurar una huella que pueda ser medida con exactitud. (Callister, 2002)



**Figura 2.18.-** Medidas para el cálculo de dureza Vickers

**Fuente:** Struers Ensuring Certainty

## 2.9.2 ENSAYOS MECÁNICOS

En la tabla 2.9 se presenta el número de probetas de tracción y doblado lateral que se extraen de las placas soldadas.

**Tabla 2.9.-** Número de pruebas requeridas dependiendo del espesor del material

Espesor T de muestra de prueba soldadura [mm] ([pulg])	Orden de espesor T de metal base calificado [mm] ([pulg])		Espesor t de metal de soldadura depositado calificado, [mm] ([pulg])	Tipo y número de pruebas requeridas Pruebas de tracción y de doblado guiado			
	Mín.	Máx.		Máx.	Tracción	Doblez lateral	Doblez de cara
19 ≤ T ≤ 38 (3/4 ≤ T ≤ 1 1/2)	5 [mm] (3/16 [pulg])	2T	2t cuando t ≥ 19 [mm] (3/4 pulg)	2	4	.....	.....

**Fuente:** (ASME, 2013)

Como se puede observar para el espesor de 25,4 [mm] se requieren dos probetas de tracción y cuatro probetas de doblez lateral, las mismas deben ser cortadas tal como se muestra en la Figura 2.20.

MATERIAL BASE	C O R D Ó N D E S O L D A D U R A	MATERIAL BASE
DESCARTE		ESTA PIEZA
PROBETA PARA		DOBLEZ LATERAL
PROBETA DE TENSIÓN		PARA SECCIÓN REDUCIDA
PROBETA PARA		DOBLEZ LATERAL
PROBETA PARA		DOBLEZ LATERAL
PROBETA DE TENSIÓN		PARA SECCIÓN REDUCIDA
PROBETA PARA		DOBLEZ LATERAL
DESCARTE		ESTA PIEZA

**Figura 2.19.-** Esquema de orden de corte de probetas para la calificación del procedimiento

**Fuente:** (ASME, 2013)

### 2.9.2.1 Pruebas de tracción

Estas pruebas determinan la resistencia máxima a la tracción de las juntas de soldadura en ranura. A continuación se detalla las especificaciones bajo las cuales deben ser elaboradas las probetas y los criterios de aceptación que deben cumplir las mismas una vez que se realiza la prueba.

#### 2.9.2.1.1 Especificaciones de prueba

En la figura 2.21, se presentan las dimensiones de las probetas para las pruebas requeridas en la calificación del procedimiento y habilidad del soldador.

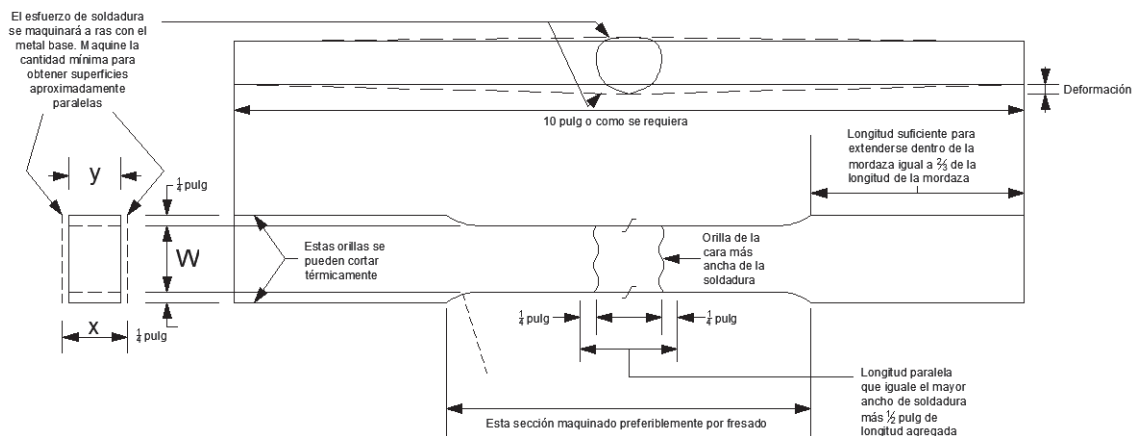
En donde:

x = espesor de la muestra con inclusión de refuerzo

y = espesor del espécimen

T = espesor de la muestra con exclusión de refuerzo

W = ancho del espécimen 19 [mm] ( $\frac{3}{4}$  [pulg])



**Figura 2.20.-** Tracción; sección reducida – placa

**Fuente:** (ASME, 2013)

#### 2.9.2.1.2 Criterios de aceptación

Para pasar la prueba de tracción, la probeta tendrá una resistencia de tracción que no sea menor que:

- La mínima resistencia de tracción especificada del metal base.
- La mínima resistencia a la tracción especificada del metal de soldadura cuando la sección aplicable da disposiciones para el uso del metal de soldadura que tiene resistencia a la temperatura ambiente inferior que el metal base.
- Si la probeta se rompe en el metal afuera de la soldadura o de la línea de fusión de prueba será aceptada como que satisface los requerimientos, siempre y cuando la resistencia no esté más del 5% abajo de la mínima resistencia de tracción especificada del metal base.

#### 2.9.2.2 Prueba de doblez guiado

Esta prueba determina el grado de solidez y ductilidad de la junta soldada en ranura, además permite visualizar discontinuidades que pueden estar presentes en la junta.

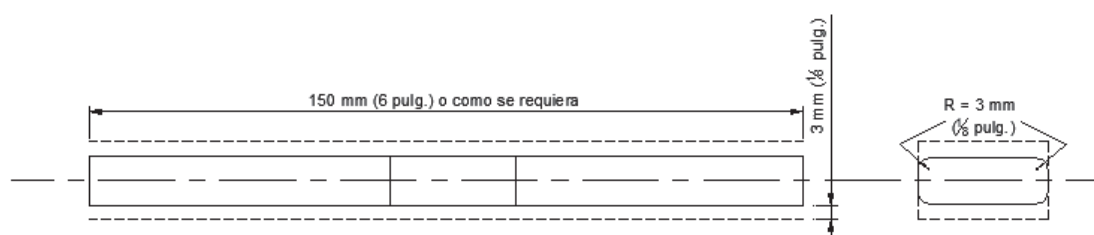
En los siguientes puntos se especifica el corte que debe realizarse a las probetas, las dimensiones que deben tener y los criterios de aceptación que deben pasar las probetas después de realizada la prueba de doblez transversal.

#### 2.9.2.2.1 Probetas

Se preparan las probetas mediante el corte de las placas soldadas para formar probetas de sección recta aproximadamente rectangular. Las superficies de corte indicarán los lados de la probeta.

#### 2.9.2.2.2 Dobleza transversal lateral

La soldadura es transversal al eje longitudinal de la probeta, el cual se dobla de modo que una de las superficies laterales se vuelve la superficie convexa de la probeta de doblez. Las dimensiones se muestran en la Figura 2.22.



**Figura 2.21.-** Dobleza transversal – placa

**Fuente:** (ASME, 2013)

#### 2.9.2.2.3 Criterios de aceptación

Las probetas de doblez guiado no deberán tener defectos abiertos en la soldadura o en la ZAC que excedan de 3,2 [mm] (1/8 [pulg]), medido en cualquier dirección sobre la superficie convexa de la probeta después del doblado. Los defectos abiertos, que ocurran en las esquinas de la probeta durante la prueba no se tomarán en cuenta a menos que haya evidencia precisa de que ellos resultan por falta de fusión, Inclusiones de escoria u otros defectos internos.

## **CAPITULO 3**

### **3. VARIABLES DE SOLDADURA Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

En este capítulo se desarrolla la selección de las variables de soldadura que se consideran importantes para el proceso GMAW. También se detalla el procedimiento seguido para el proceso de soldadura GMAW de las probetas de calibración y de estudio, así como la obtención de las probetas para los ensayos tanto metalográficos como mecánicos.

#### **3.1 DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES DE SOLDADURA A UTILIZAR**

Como se menciona en el capítulo 2 existen diferentes variables de soldadura que se deben controlar para que el proceso de soldadura GMAW arroje buenos resultados, a continuación se detalla las variables más importantes.

##### **3.1.1 TIPO DE JUNTA**

En esta sección se identifica los criterios más importantes usados para seleccionar la geometría de la junta soldada.

###### **3.1.1.1 Selección del tipo de junta**

###### **3.1.1.1.1 Criterios de Selección**

En general, se pueden citar siete consideraciones básicas para la selección de cualquier junta soldada:

- I. Costos de preparación de la junta
- II. Respuestas a condiciones de carga
- III. Espesor de las piezas
- IV. Facilidad de preparación de la junta

- V. Ahorro material de aporte
- VI. Reducción de deformaciones
- VII. Facilidad para soldar

Entonces con los criterios anteriores, se procederá a tomar una decisión sobre el tipo de junta a utilizar.

#### 3.1.1.1.2 Alternativas

- A. Bordes Rectos
- B. Bordes en V
- C. Bordes en X
- D. Bordes en U
- E. Bordes en doble U
- F. Bordes en K

La escala va de 1 a 10 siendo uno lo más bajo y 10 lo más alto.

**Tabla 3.1.-** Calificación de alternativas de tipos de juntas en base a los criterios de selección

Criterios de Selección \ Alternativas	Criterios de Selección							Ponderación	
	I	II	III	IV	V	VI	VII		
<b>A</b>	2	2	3	10	7	2	8	10	<b>I</b>
<b>B</b>	5	5	5	7	3	4	8	25	<b>II</b>
<b>C</b>	7	8	8	7	5	7	5	20	<b>III</b>
<b>D</b>	8	8	8	5	6	7	4	15	<b>IV</b>
<b>E</b>	9	8	8	4	6	7	3	10	<b>V</b>
<b>F</b>	6	9	9	7	8	7	7	10	<b>VI</b>
								10	<b>VII</b>
<b>Σ</b>	37	40	41	40	35	34	35	100	

Fuente: Propia

**Tabla 3.2.-** Ponderación de la calificación de los criterios de selección

<b>Criterios de Selección</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>	<b>VI</b>	<b>VII</b>	<b>Ponderación</b>	
<b>Alternativas</b>									
A	0,05	0,05	0,07	0,25	0,20	0,06	0,23	0,10	<b>I</b>
B	0,14	0,12	0,12	0,18	0,09	0,12	0,23	0,25	<b>II</b>
C	0,19	0,20	0,20	0,18	0,14	0,21	0,14	0,20	<b>III</b>
D	0,22	0,20	0,20	0,13	0,17	0,21	0,11	0,15	<b>IV</b>
E	0,24	0,20	0,20	0,10	0,17	0,21	0,09	0,10	<b>V</b>
F	0,16	0,23	0,22	0,18	0,23	0,21	0,20	0,10	<b>VI</b>
								0,10	<b>VII</b>
<b>Σ</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	

**Fuente:** Propia

Realizada la evaluación de los criterios de selección se elige la junta tipo K como la más óptima para el espesor empleado en este estudio, tal como se indica en la tabla 3.3.

**Tabla 3.3.-** Selección de la mejor alternativa

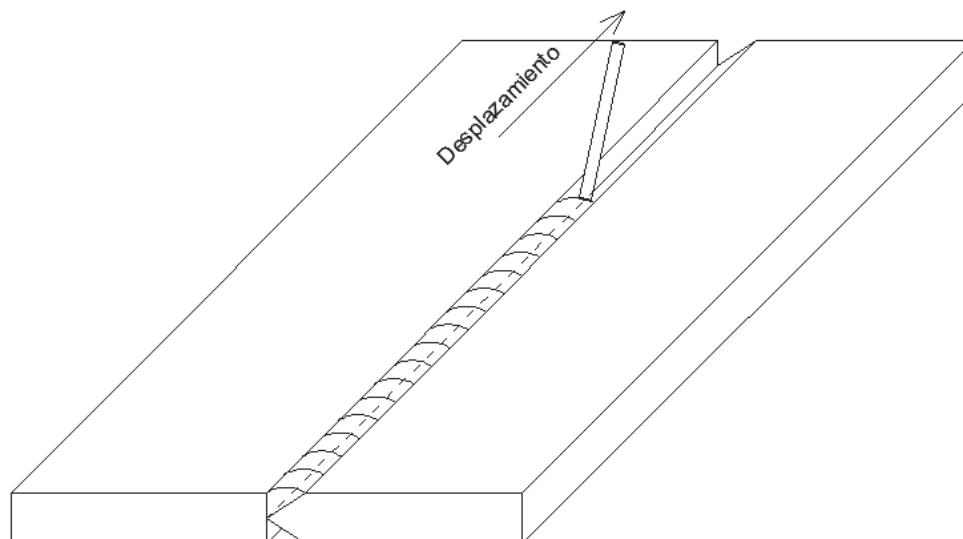
<b>Alternativas</b>	<b>Ponderación</b>
A	0,1188
B	0,1386
C	0,1834
D	0,1786
E	0,1747
F	0,2061

**Fuente:** Propia

### 3.1.2 SELECCIÓN DE LA POSICIÓN DE SOLDADURA

Ya que el material A516 grado 70 para la industria se suministra en planchas de 1,80 m x 6 m y el análisis se realiza para planchas, la manera más fácil de realizar la soldadura será en la posición 1G, ya que en esta posición, el baño de soldadura tiene menos tendencia a caerse por lo que resulta más fácil su control, aumenta la velocidad

de soldadura, es más fácil obtener la penetración correcta, se le facilita el trabajo al soldador al momento de alinear las juntas.



**Figura 3.1.-** Posición 1G

**Fuente:** Propia

### **3.1.3 SELECCIÓN DEL GAS PROTECTOR**

Para seleccionar el gas de protección se basó en el parámetro económico, como se explicó en el capítulo 2, en el punto 2.6.5 de gases protectores; el CO<sub>2</sub> es más accesible. Además el CO<sub>2</sub> permite obtener penetraciones más profundas y anchas, ayuda al trabajo del soldador y evita defectos de soldadura como falta de penetración, falta de fusión; también mejora el contorno del cordón y reduce las mordeduras. (Giachino, 1988)

### **3.1.4 SELECCIÓN DEL ELECTRODO ADECUADO**

Dependiendo de los electrodos de venta en el mercado Ecuatoriano se seleccionará el más adecuado. Para esto se cuenta con el "Catálogo de electrodos comunes, especiales y gases para corte & soldadura" de Linde S.A. – AGA.



### 3.1.4.1 Selección del tipo de electrodo

#### 3.1.4.1.1 Alternativas de selección

A. ER 70S-3

B. ER 70S-6

#### 3.1.4.1.2 Criterios de selección

- I. Contenido de desoxidantes
- II. CO<sub>2</sub> como gas protector
- III. Para posición plana
- IV. Aceros de alto espesor
- V. Cordón de soldadura uniforme
- VI. Reducción de operaciones de limpieza

La escala va de 1 a 10 siendo uno lo más bajo y 10 lo más alto.

**Tabla 3.4.-** Calificación de alternativas de los electrodos en base a los criterios de selección

<b>Criterios de Selección</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>	<b>VI</b>	<b>Ponderación</b>	
<b>Alternativas</b>								
<b>A</b>	9	10	10	8	8	8	15	<b>I</b>
<b>B</b>	9	10	10	9	9	8	15	<b>II</b>
							20	<b>III</b>
							20	<b>IV</b>
							20	<b>V</b>
							10	<b>VI</b>
<b>Σ</b>	18	20	20	17	17	16	100	

**Fuente:** Propia

**Tabla 3.5.-** Ponderación de la calificación de los criterios de selección

Criterios de Selección Alternativas	I	II	III	IV	V	VI	Ponderación	
	<b>A</b>	0,50	0,50	0,50	0,47	0,47	0,50	0,15
<b>B</b>	0,50	0,50	0,50	0,53	0,53	0,50	0,15	<b>II</b>
							0,2	<b>III</b>
							0,2	<b>IV</b>
							0,2	<b>V</b>
							0,1	<b>VI</b>
<b>Σ</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1	

**Fuente:** Propia

Después de evaluados los criterios de selección, se determina que el electrodo ER 70S – 6 es el adecuado para la soldadura del material A516 Gr 70, tal como se indica en la tabla 3.6

**Tabla 3.6.-** Selección de la mejor alternativa

Alternativas	Ponderación
A	0,4882
<b>B</b>	<b>0,5118</b>

**Fuente:** Propia

### 3.1.5 DIÁMETRO DEL ELECTRODO

En la Tabla 3.7 se presenta los valores de diámetros de electrodos disponibles en el mercado ecuatoriano.

**Tabla 3.7.-** Diámetros del electrodo ER 70 S-6

Proceso GMAW					
Diámetro		Amperaje [A]	Voltaje [V]	Flujo gas [lt/min]	Vel. Alim. Alambre [cm/min]
Mm	Pulg				
0,8	0,030	90 -110	15 - 21	8 – 15	500-860

Continúa

0,9	0,035	90 -110	16 - 22	8 - 15	400-760
1,0	0,040	100 -120	17 - 22	8 -15	310-630
1,2	0,045	100 -130	17 - 22	8 - 15	250-560

Fuente: Propia

A mayor espesor de la placas a soldar se requiere mayor diámetro del electrodo, por lo tanto, se escoge el electrodo de diámetro de 1,2 [mm] ya que el espesor del material base es de 25,4 [mm].

### 3.1.6 POLARIDAD

El proceso de soldadura GMAW trabaja con corriente continua electrodo positivo. Esto garantiza máximo aprovechamiento del material de aporte.

### 3.1.7 PRECALENTAMIENTO

#### 3.1.7.1 Cálculo del precalentamiento

Los porcentajes de C, Mn y Si se obtuvieron de la Tabla 1.3 (composición química del acero) y se escogieron los valores más altos. (Quesada, 2002)

Los valores de estos elementos son:

$$C [\%] = 0,28$$

$$Mn [\%] = 1,30$$

$$Si [\%] = 0,45$$

Para la suma del equivalente químico se emplea la ecuación (2), reemplazando los valores se obtiene:

$$C_q [\%] = 0,28 + \frac{1,30}{9}$$

$$C_q [\%] = 0,4244$$

Para calcular el equivalente total del carbono (suma del equivalente químico y el equivalente en carbono del espesor) se reemplaza la ecuación (2) y (3) en la ecuación (4), y se obtendrá:

$$C_T[\%] = C_q(1 + 0,005 \cdot e) \quad (6)$$

$$C_T[\%] = 0,4244 (1 + 0,005 \cdot 26)$$

$$C_T[\%] = 0,4796$$

El cálculo del carbono equivalente químico indica que los elementos aleantes influyen térmicamente sobre la templabilidad de los aceros, es decir, la composición química del acero se relaciona con las transformaciones estructurales y las propiedades químicas del mismo después de ser soldadas.

Para calcular la temperatura de precalentamiento se utiliza la ecuación (5):

$$T_{\circ C} = 350 \cdot \sqrt{0,4796 - 0,25}$$

$$T_{\circ C} = 167,71 [^{\circ}C]$$

### **3.1.8 ORIENTACIÓN DEL ELECTRODO**

Para ofrecer una máxima penetración, se debe usar la técnica de arrastre del electrodo en un ángulo de 15° a 25 °, con ello se minimizan las salpicaduras, se logra un arco más estable y un cordón más uniforme.

### **3.1.9 VELOCIDAD DE AVANCE DE LA PISTOLA**

La velocidad de avance depende del Heat Input y de la experiencia (habilidad) del soldador.

### 3.1.10 VELOCIDAD DE ALIMENTACIÓN DEL ELECTRODO

La velocidad de alimentación del electrodo, va a variar según el Heat input (voltaje y corriente) que se aplique al proceso de soldadura. En la tabla 3.8 se puede observar una referencia para estos valores.

**Tabla 3.8.-** Corriente para distintas velocidades de alimentación y diámetros de hilo

Velocidad de alimentación del hilo [m/min]	Intensidad media de corriente en aceros al carbono e inoxidables		
	0,8 Ø	1,2 Ø	1,6 Ø
1,8	-	70	115
2,3	-	90	175
2,7	50	105	215
3,2	60	125	-
3,4	70	135	-
3,9	80	155	-
4,7	90	185	-
5,6	110	220	-

Fuente: (Giachino, 1988)

### 3.1.11 CALCULO DEL HEAT INPUT

Para el cálculo del Heat Input se utiliza la ecuación (1) del Capítulo 2.

$$H = \frac{60 \cdot E \cdot I}{S}$$

Al realizar la Soldadura de la probeta de calibración PC1 primera pasada, se obtuvieron los siguientes datos:

$$E = 24,1 [V]$$

$$I = 154 [A]$$

$$S = 165 [mm/min]$$

$$H = \frac{60 \cdot 24,1[V] \cdot 154[A]}{165 [mm/min]}$$

$$H = 1349,60 [J/min]$$

## **3.2 PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA**

Esta sección habla sobre todo el proceso de soldadura: elaborar los documentos de soldadura (WPS, PQR, WPQ), el biselado de las placas, extracción de probetas de calibración (voltaje/corriente/velocidad de alimentación), soldadura de las probetas de calibración, revisión de defectos, selección de parámetros adecuados para la soldadura las placas de análisis, soldadura en las placas de análisis, macrografías, micrografías, determinación de la ZAC, calificación del procedimiento/operador. Todo esto a realizarse bajo la norma ASME IX.

### **3.2.1 WPS Y PQR**

La documentación de soldadura para este proceso se encuentra en el ANEXO 2. En los WPS se especifica el procedimiento de soldadura, tipo de junta, posición de soldadura, la especificación del metal base y del metal de aporte, gas de protección que se utiliza, temperatura de precalentamiento, también se presenta una ilustración de la junta y los pases de soldadura. En este documento se observa el amperaje, voltaje, velocidad de avance y técnica de soldadura de acuerdo al número de pases.

En el PQR se registran las variables de soldadura, como el proceso de soldadura, la posición de soldadura, el metal de aporte, gas de protección, precalentamiento, tipo de máquina de soldar, el detalle de la junta; además se muestran los resultados de los ensayos de tracción y de doblado.

### **3.2.2 PREPARACIÓN DE BISELES**

En esta sección se detallará los pasos a seguir para la preparación del borde tipo K en las probetas, para esto se utilizó una limadora hidráulica marca KLOPP.

- Disponer del EPI (Equipo de Protección Individual) necesario antes de empezar el trabajo.
- Colocar la cuchilla en el porta-cuchillas y ubicar la placa en el tornillo de banco.
- Mover el cabezal y ubicarlo en posición de 45°.
- Encender la máquina y ponerla en marcha.

- Calibrar el recorrido del cabezal, de modo que abarque la longitud total de la placa (Figura 3.2).



**Figura 3.2.-** Ubicación cabezal de la limadora a 45°

**Fuente:** Propia

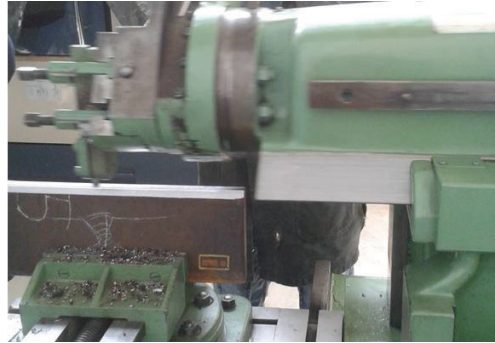
- Acercar cuidadosamente la cuchilla a la placa, hasta que se cree una línea fina sobre la superficie de esta.



**Figura 3.3.-** Operador acercando la cuchilla a la placa a desbastar

**Fuente:** Propia

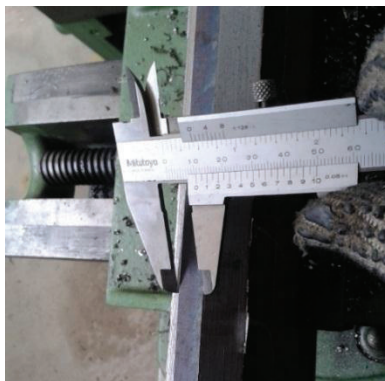
- Colocar el desplazamiento automático de la mesa y bajar el porta cuchillas en 1 [mm], asegurar esta para que no desplace y para iniciar con la operación de planeado, esto elimina imperfecciones y crea una superficie de referencia.
- Al finalizar esta operación, ubicar la cuchilla en el filo de la placa e iniciar el desbaste para dar la forma al bisel.



**Figura 3.4.-** Limado de filo para junta tipo K

**Fuente:** Propia

- En cada pasada medir el espesor sobrante con un calibrador vernier, teniendo en cuenta que el espesor de la placa es de 25,4 [mm] y desbastar hasta que esté con un ancho de 12,7 [mm] (este espesor es medido desde el filo sin desbastar hasta el centro).



**Figura 3.5.-** Espesor de material sin desbastar

**Fuente:** Propia



- Al concluir el desbaste en un lado, girar el cabezal en  $45^\circ$  en sentido contrario para realizar el mismo procedimiento.

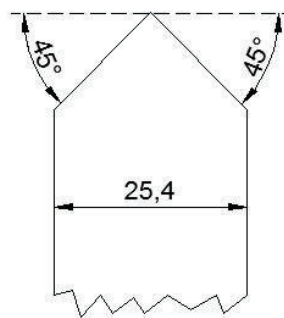
No se gira la placa porque se desalinea y no se consiguen lados paralelos.



**Figura 3.6.-** Giro de cabezal y centrado de la cuchilla sobre la placa

**Fuente:** Propia

- Comenzar la operación de desbaste.
- Verificar las medidas del bisel.



**Figura 3.7.-** Medidas que debe cumplir el bisel

**Fuente:** Propia

- Obtenido el bisel, retirar la placa del tornillo de banco, con ello se concluye el proceso de limado
- Realizar el mismo procedimiento para las demás placas.

### 3.2.3 PROCESO DE SOLDADURA GMAW

Se realizó un estudio previo de soldadura de probetas de calibración con el objetivo de determinar las variables iniciales de soldadura y obtener un cordón de buena calidad; para posteriormente realizar las placas de estudio.

#### 3.2.3.1 Soldadura de probetas

Las probetas de calibración serán utilizadas para deducir las mejores variables de soldadura a aplicar al momento de realizar el proceso de soldadura en las placas de estudio, estas variables se determinan de manera experimental y dependen de la calidad de soldadura y los defectos que presenten.

Con ello se consigue unos valores óptimos de voltaje, intensidad, velocidad de alimentación, velocidad de flujo de gas, velocidad de avance.

##### 3.2.3.1.1 Extracción de las probetas de calibración

1. Colocarse el EPI antes de comenzar a realizar el proceso.
2. Con un cepillo de alambre limpiar la superficie eliminando la capa de óxido para que el marcador raye de mejor manera la superficie.



**Figura 3.8.-** Limpieza de la superficie a marcar

**Fuente:** Propia

3. Con un flexómetro dividir en 2 secciones de 9,5 [cm] de longitud.



**Figura 3.9.-** Medida de la longitud de las probetas

**Fuente:** Propia

4. Con el marcador realizar los trazos sobre las probetas a cortar.



**Figura 3.10.-** Trazo de líneas de referencia

**Fuente:** Propia

5. Con las líneas marcadas, dirigirse al lugar donde se encuentra el equipo de oxicorte.

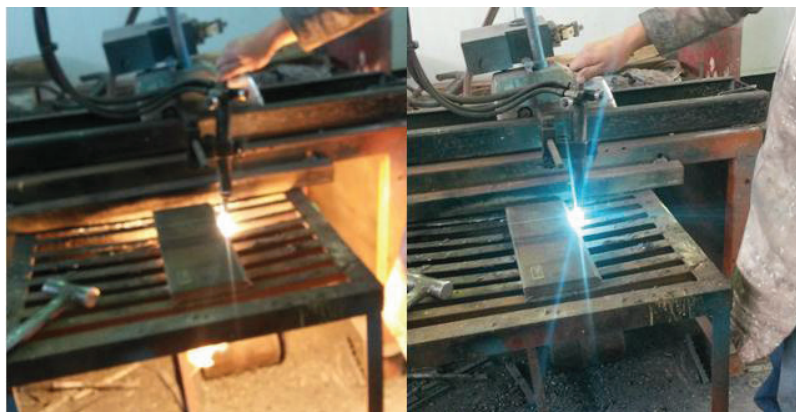
- Colocar las probetas sobre la mesa de trabajo y alinear la boquilla de la cortadora con la línea de referencia, esto garantiza una sección uniforme de probeta.



**Figura 3.11.-** Alineación de la boquilla de oxicorte

**Fuente:** Propia

- Encender la boquilla y regular la flama (oxígeno y acetileno) para ello se abre la válvula de acetileno y con un chispero se enciende, esta tomará un color amarillo intenso, luego se abre la válvula de oxígeno para regular la temperatura, en donde la flama pasará de un color amarillo a un azul intenso.



**Figura 3.12.-** Flama de corte

**Fuente:** Propia

8. Luego acercar la llama a la pieza y esperar hasta alcanzar la temperatura de ignición, cuando se alcanza esta temperatura, el material se torna de un color naranja y se observa el salto de chispas.



**Figura 3.13.-** Inicio de corte de la probeta

**Fuente:** Propia

9. En ese momento, se abre la válvula de  $O_2$ , este cortará a la placa, adicionalmente se conecta el desplazamiento del carro que mueve la boquilla a lo largo del metal a cortar.



**Figura 3.14.-** Desprendimiento del metal de corte por acción del chorro de  $O_2$

**Fuente:** Propia

10. Al finalizar el proceso, se retiran las placas de la mesa de trabajo para continuar con las probetas faltantes por cortar.



**Figura 3.15.-** Probetas cortadas y probetas por cortar

**Fuente:** Propia

11. Una vez finalizado el corte de todas las probetas, se espera hasta que se enfríe y con la ayuda de un tornillo de banco y una amoladora, se procede a retirar las rebabas provocadas por el oxígeno, con ello se obtiene superficies uniformes y listas para la prueba de soldadura.



**Figura 3.16.-** Esmerilado de rebabas de oxígeno

**Fuente:** Propia

### 3.2.3.1.2 Probetas de Calibración obtenidas con soldadura automática.

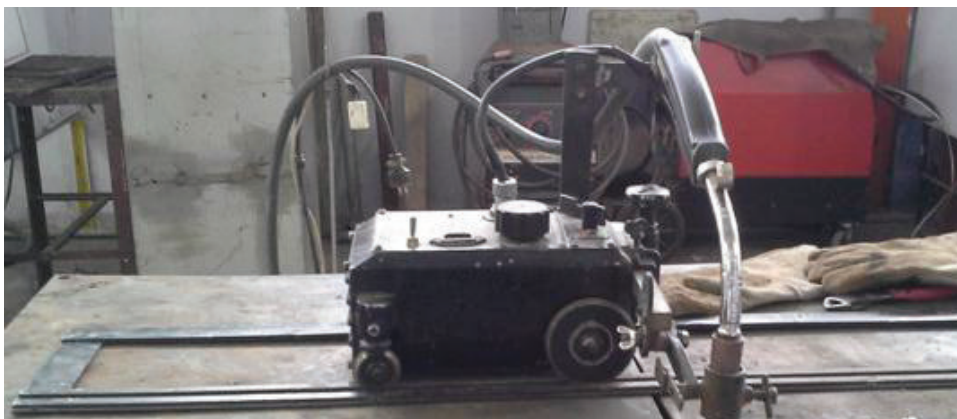
1. Realizar la conexión del equipo de soldadura para el proceso GMAW: fuente de poder, unidad de alimentación del electrodo, pistola, rollo de alambre, sistema de protección (gas CO<sub>2</sub>).



**Figura 3.17.-** Conexión del equipo de soldadura

**Fuente:** Propia

2. Conectar el bugo para adaptar al proceso GMAW, este equipo permitirá obtener una velocidad de avance de soldadura constante.



**Figura 3.18.-** Conexión de bugo (Avance automático de la antorcha de soldadura)

**Fuente:** Propia

3. Una vez realizada la conexión se procede a tomar las variables de soldadura. Con valor de referencia de voltaje de 20 [V], se suelda en una placa de desperdicio de  $\frac{1}{4}$  [pulg] de espesor, tratando que el arco se estabilice y haya buena penetración, al lograr esto se determina el amperaje, alimentación de alambre, flujo del gas protector, stick out, velocidad de avance.



**Figura 3.19.-** Determinación de las variables de soldadura para la probeta PC1

**Fuente:** Propia

4. Elegida las variables con las que se produjo un cordón de soldadura aceptable se procede a armar la junta. Primero alinear la junta sobre una superficie plana y dejar una separación de 2 [mm].

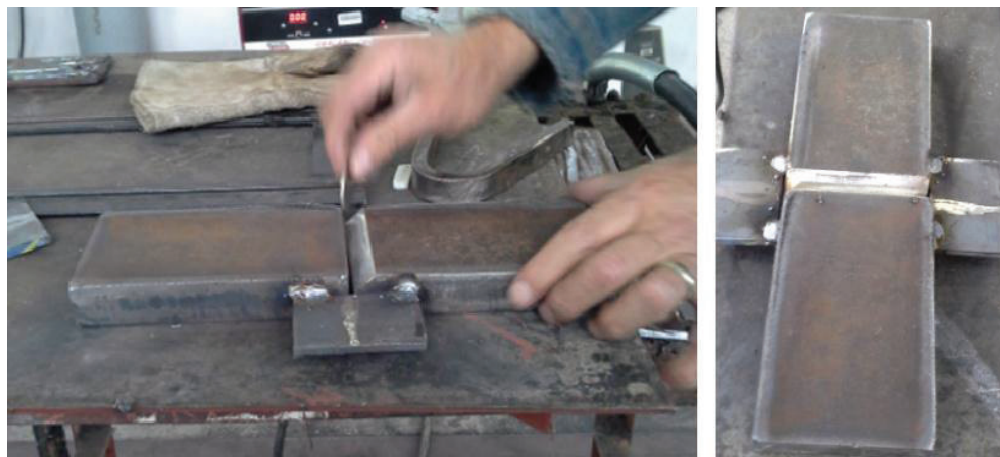


**Figura 3.20.-** Alineación de la junta tipo K

**Fuente:** Propia



5. Soldar unas pequeñas platinas en la mitad del espesor de la junta, tener en cuenta la separación de raíz (2 [mm]), además ayuda a comenzar el cordón y evita la separación fortuita de la junta.



**Figura 3.21.-** Junta armada con separación de 2 [mm] de talón

**Fuente:** Propia

6. Colocar la pistola del equipo de GMAW en el porta antorcha del bugo.



**Figura 3.22.-** Porta antorchas del bugo

**Fuente:** Propia

7. Alinear la junta armada con respecto al desplazamiento del bugo para asegurar que el metal depositado cubra por igual a las 2 partes a soldar.



**Figura 3.23.-** Alineación de la probeta respecto al desplazamiento del bugo

**Fuente:** Propia

8. Colocar el bugo al inicio de la junta, y encender para iniciar el avance.
9. El operador presiona el gatillo de la pistola para iniciar el arco de soldadura y el pase, ya que el avance se da a una velocidad constante y de forma automática.



**Figura 3.24.-** Soldadura de la probeta de calibración

**Fuente:** Propia

10. Al finalizar el pase, soltar el gatillo y cortar el alambre que queda pegado a la platina para iniciar un nuevo pase.
11. Voltar la probeta para realizar el siguiente pase, para ello realizar los pasos 7, 8, 9 y 10.
12. Realizar lo mismo que el paso 11 para los demás pases que se den a la junta en su totalidad.
13. En el pase final y en los dos lados de la junta, como no se logra cubrir en su totalidad la unión se da 2 cordones en filete, con ello se asegura la unión perfecta del metal base.



**Figura 3.25.-** Pase final con dos cordones de soldadura en filete

**Fuente:** Propia

#### 3.2.3.1.3 Probetas obtenidas con soldadura manual

1. Realizar la conexión del equipo de soldadura para el proceso GMAW y tomar las variables de referencia de soldadura en una placa desperdicio, tratar que el arco se estabilice y haya buena penetración.
2. Alinear y armar la junta dejando la separación 3 [mm] (figura 3.26).



**Figura 3.26.-** Alineación de la junta tipo K con una separación entre placas de 3 [mm]

**Fuente:** Propia

3. Precalear las placas hasta la temperatura de 160 [°C].



**Figura 3.27.-** Precalear las placas

**Fuente:** Propia

4. Una vez que se precalienta el material base, se procede a realizar el primer pase de raíz (figura 3.28).



**Figura 3.28.-** Primer pase de raíz

**Fuente:** Propia

5. Después de realizar cada pase de soldadura, desbastar con la amoladora los defectos del pase y con el cepillo de limpieza eliminar impurezas para obtener mejores resultados de fusión en la zona de la junta tipo K.



**Figura 3.29.-** Limpieza de la junta en cada pase

**Fuente:** Propia

6. Para las probetas finales realizar el procedimiento descrito anteriormente.

### 3.3 PROCEDIMIENTO DE LOS ENSAYOS DE SOLDADURA

#### 3.3.1 EXTRACCIÓN DE PROBETAS

1. Trazar líneas de referencia en la probeta, de acuerdo a la prueba a realizar.
2. Colocar la probeta de soldadura en la máquina cortadora, debe asegurarse que esté bien sujeta a la prensa y que el disco de corte vaya por la marca de referencia.



**Figura 3.30.-** Sujeción de la probeta en las mordazas

**Fuente:** Propia

3. Encender la máquina cortadora, abrir la llave de flujo de agua, la misma refrigera tanto a la probeta como al disco de corte durante el proceso. Desplazar la mesa móvil tanto longitudinal como transversalmente hasta que el disco de corte roce con la probeta de soldadura.
4. Comprobar que las medidas deseadas sean las correctas.
5. Realizar una carrera de trabajo de forma manual de izquierda a derecha; cuando se encuentre en el extremo izquierdo desplazar 1 [mm] el cabezal de corte hacia abajo, aproximadamente.



**Figura 3.31.-** Corte de la probeta

**Fuente:** Propia

6. Realizar el paso 3, 4 y 5 para los demás cortes de la probeta y obtener las dimensiones deseadas.
7. Repetir el mismo procedimiento para las demás probetas

### **3.3.1.1 Ensayos metalográficos**

#### **3.3.1.1.1 Macrografía y Micrografía**

1. Realizar el desbaste grueso en la lija número 100, eliminando las rebabas del proceso anterior. Dejar la superficie de la probeta en un solo plano para pasar al desbaste fino.



**Figura 3.32.-** Desbaste grueso de la probeta de macrografía

**Fuente:** Propia

2. Enjuagar las superficies de las probetas en el chorro de agua y atacarlas con alcohol al 99,8 % de pureza, secar las superficies con aire caliente.



**Figura 3.33.-** Limpieza de la probeta después del desbaste grueso

**Fuente:** Propia

3. A continuación se procede a realizar el desbaste fino, en donde las superficies de cada probeta deberán ser desbastadas en la lija número 240, 320, 400, 600 y 1500, respectivamente. Se pasará a la próxima lija siempre y cuando cada



superficie de la probeta quede en un solo plano y se hayan eliminado las líneas que se formaron en el desbaste anterior.



**Figura 3.34.-** Desbaste fino de la probeta

**Fuente:** Propia

4. Una vez finalizado el desbaste fino, enjuagar las probetas con agua, atacarlas con alcohol al 99,8% y secarlas con aire caliente.

**Nota:** Solamente para las probetas de calibración se realiza el procedimiento anteriormente descrito.

5. En la máquina de pulido, colocar un paño nuevo para asegurar la completa eliminación de las líneas que se formaron al pulir en lija 1500.
6. Una vez colocado el paño, proceder a encender la máquina de desbaste fino.
7. Abrir la válvula de paso de agua, dejar caer un chorro y con la ayuda de un cepillo mojar y eliminar las impurezas que se encuentren sobre el paño.
8. Cerrar la válvula de paso de agua y proceder al pulido fino en el paño solo con una solución de agua-alúmina de 1 micra, hasta eliminar todas las líneas que dejó la lija 1500.



**Figura 3.35.-** Pulido fino en paño con alúmina de 1 micra

**Fuente:** Propia

9. Dispersar la solución en el paño constantemente para evitar que la probeta se queme, si la probeta se quema se repite nuevamente desde el paso # 5 incluyendo el pulido con lija 1500.
10. Una vez que se han eliminado estas líneas, limpiar de nuevo el paño con agua y un cepillo eliminando el resto de la alúmina de 1 micra
11. Para el siguiente pulido, utilizar la solución agua alúmina de 0,3 micras y a su vez girar la probeta en 90 grados para eliminar las líneas que dejó la pulida anterior.



**Figura 3.36.-** Pulido fino con alúmina de 0,3 micras

**Fuente:** Propia

12. De igual manera dispersar la solución en el paño para evitar que la probeta se queme.

13. Cuando las líneas del pulido anterior desaparezcan, limpiar nuevamente el paño con agua y un cepillo, hasta que ésta quede sin ningún rastro de alúmina
14. Para el pulido final solo se debe utilizar agua.
15. Abrir la válvula de paso de agua y dejar caer un pequeño chorro constante sobre el paño.
16. Proceder al pulido final, esto se hará de forma circular sobre todo el paño, hasta eliminar las líneas formadas por la alúmina de 0,3 micras y las colas de cometa en los granos (estas se ven con la ayuda del microscopio)



**Figura 3.37.-** Pulido fino con continuo chorro de agua

**Fuente:** Propia

17. Al finalizar el pulido, enjuagar la probeta con agua y algodón.
18. Colocar alcohol sobre la cara pulida y secar con aire caliente (secadora).

Una vez que la probeta este completamente pulida, realizar lo siguiente

19. En un vidrio de reloj, poner nital al 10% y con la ayuda de una mota de algodón proceder a realizar el ataque en la superficie de la probeta.



**Figura 3.38.-** Ataque en la superficie de la probeta

**Fuente:** Propia

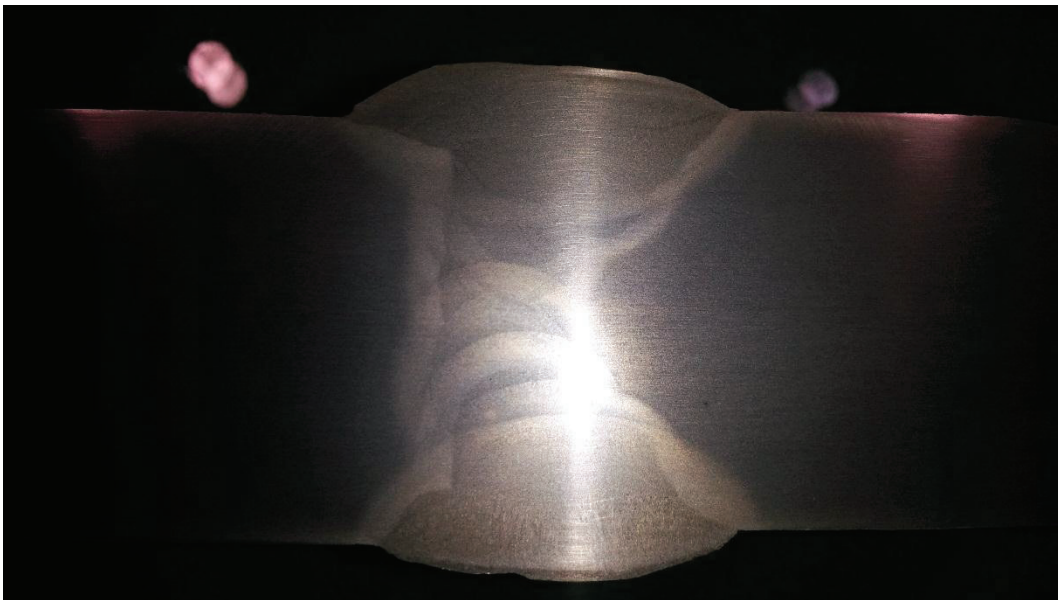
20. Observar que el nital actúe sobre la superficie evitando un sobre ataque en la misma.
21. Enjuagar con agua y algodón la superficie para neutralizar el efecto del nital.
22. Colocar alcohol en la superficie y secar.



**Figura 3.39.-** Enjuague y secado

**Fuente:** Propia

23. Llevar la probeta al microscopio y observar si se distingue claramente la microestructura de las zonas de la soldadura, por seguridad se realizarán las micrografías de estas zonas, debido que al momento de atacar puede haber un sobre ataque y se dañe la probeta.
24. Una vez realizadas estas micrografías, si no se distinguen las zonas de soldadura, volver a realizar los pasos 19, 20, 21 y 22.
25. Al momento que se logran diferenciar estas zonas realizar nuevamente las micrografías.
26. Después de realizar las micrografías se procede a realizar las macrografías donde se puede apreciar los cordones de soldadura, defectos, ZAC y sobremonta.



**Figura 3.40.-** Distinción de las zonas de soldadura

**Fuente:** Propia

27. Realizar todos los pasos anteriormente descritos para las demás probetas.

### 3.3.1.1.2 Micro durezas

Una vez realizadas las micrografías y macrografías se procede a realizar las microdurezas.

1. Con la ayuda de un nivel de burbuja verificar que la superficie a realizar micro dureza esté completamente nivelada.
2. De no cumplir con el paso anterior, desbastar en la máquina de desbaste grueso la superficie contraria a la que se realiza la micro dureza, hasta que la probeta este completamente nivelada.
3. Una vez que la probeta este completamente nivelada, enjuagar con agua y algodón para eliminar impurezas de la superficie a analizar.
4. Lavar con alcohol y secar la superficie.
5. Llevar la probeta al equipo de micro durezas
6. Colocar la probeta en el micro durómetro.



**Figura 3.41.-** Nivelación de la probeta en el micro durómetro

**Fuente:** Propia

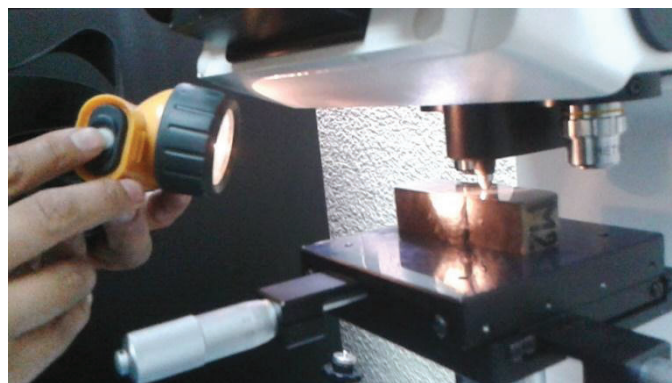
7. Seleccionar la carga de 500 gr y el tiempo de indentación en un intervalo de 10 a 15 segundos.



**Figura 3.42.-** Selección de parámetros para el ensayo de micro dureza

**Fuente:** Propia

8. Seleccionar una zona óptima de la probeta donde se pueda apreciar el material base, la zona afectada por el calor y el material de aporte.



**Figura 3.43.-** Selección de la zona de indentación

**Fuente:** Propia

9. Colocar esta zona sobre el indentador y aplicar la primera carga en el metal base en un intervalo de tiempo.
10. Desplazar la probeta en el eje x con la ayuda de los reguladores de posición de tal manera que el indentador se mueva 2 [mm] hacia la zona afectada por el calor y a la zona de soldadura.



**Figura 3.44.-** Indentación de la probeta cada 2 [mm]

**Fuente:** Propia

11. Repetir el paso 10 hasta llegar nuevamente al material base.
12. Una vez realizada la indentación, observar en el microdurómetro las indentaciones y medir las diagonales para obtener la dureza Vickers.
13. Realizar todos los pasos anteriormente descritos para las demás probetas de micro dureza.



### 3.3.1.2 Ensayos destructivos

#### 3.3.1.2.1 Pruebas de tracción

Para este ensayo las probetas deben ser maquinadas bajo las especificaciones dadas en el punto 2.9.2.1.1.

1. Como el maquinado deja una superficie basta, con la ayuda de una amoladora eliminar las imperfecciones de la superficie.



**Figura 3.45.-** Eliminación de rebabas e impurezas de la superficie de la probeta de tracción

**Fuente:** Propia

2. Cuando la superficie este sin rugosidades, atacar con nital al 10% para observar la zona donde se encuentra la soldadura.



**Figura 3.46.-** Ataque con nital al 10 % en la zona del cordón de soldadura

**Fuente:** Propia

3. Una vez identificada la zona de soldadura y con la ayuda de un marcador señalar la misma, esto permite observar si la falla se presenta en el cordón o en el material base.



**Figura 3.47.-** Distinción de la Zona de soldadura

**Fuente:** Propia

4. Tomar las medidas del cuello de la probeta.



**Figura 3.48.-** Medición del cuello de la probeta

**Fuente:** Propia

5. Encender la máquina universal de ensayos.

6. Colocar las mordazas en los dos cabezales de la máquina, además observar si las mordazas sujetan a la probeta, de no ser así colocar unas platinas en los costados de las mordazas hasta que aprieten ligeramente a la probeta.



**Figura 3.49.-** Mordazas de la máquina universal de ensayos

**Fuente:** Propia

7. Primero colocar la probeta en la mordaza de sujeción inferior.
8. Desplazar el cabezal móvil hacia arriba para colocar la probeta en el cabezal superior fijo.
9. Con la ayuda de un mango apretar las mordazas contra la probeta para evitar el que el cabezal resbale.



**Figura 3.50.-** Ajuste mordaza de cabezales

**Fuente:** Propia

10. Encerar el display de carga y desplazamiento.



**Figura 3.51.-** Encerar la máquina

**Fuente:** Propia

11. Verificar que la probeta este bien sujeta e iniciar la prueba de tracción.
12. Observar el comportamiento de la probeta en toda la prueba de tracción.
13. Esperar hasta que se forme el cuello en la probeta y falle.



**Figura 3.52.-** Falla de la probeta de tracción

**Fuente:** Propia

14. Una vez que falla, parar la prueba y retirar los pedazos de la probeta de las mordazas
15. Anotar los valores de carga máxima y de deformación total.
16. Repetir el procedimiento anterior para el resto de las probetas de tracción.

#### 3.3.1.2.2 Pruebas doblado transversal

Para el doblado transversal de las probetas, se realizarán los siguientes pasos:

1. Las probetas de doblado transversal se extraen de acuerdo a la norma ASME XI, deben ser de sección transversal rectangular de 10 [mm] de espesor. En estas probetas se debe eliminar la sobremonta de los dos lados de la soldadura.



**Figura 3.53.-** Extracción de probetas y eliminación de sobremonta

**Fuente:** Propia

2. Con la ayuda de un disco de pulido, se prepara la cara a la que se va a analizar, para ello se verifica que no haya imperfecciones en el cordón de soldadura y se eliminan óxidos u otras impurezas.



**Figura 3.54.-** Preparación de la superficie exterior

**Fuente:** Propia

3. Conectar la prensa a una línea de alimentación de 220 V
4. Desplazar el cabezal de la prensa hacia abajo, para colocar la probeta entre las matrices.
5. Colocar la probeta de tal manera que la cara preparada este en la parte externa del doblado transversal (superficie de inspección)



**Figura 3.55.-** Equipo para las pruebas de doblado

**Fuente:** Propia

6. Desplazar el cabezal hacia arriba para iniciar el proceso de doblado lateral de las probetas.



**Figura 3.56.-** Doblado de la probeta

**Fuente:** Propia

7. Una vez dobladas, con la ayuda de un martillo retirar de la matriz dichas probetas.
8. Realizar este procedimiento para las demás probetas de doblado transversal.



**Figura 3.57.-** Probetas ensayadas

**Fuente:** Propia

9. Verificar la existencia de fisuras en la superficie de inspección, de presentarse alguna, aplicar los criterios de aceptación.

## CAPITULO 4

### 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de todos los ensayos que se realizaron. En las probetas de calibración se realizó un control visual y la macrografía del cordón para determinar si existe falta de fusión y penetración; en las probetas de estudio se realizó los ensayos metalográficos como son: macrografía, micrografía y microdureza y los ensayos destructivos de tracción y doblado.

#### 4.1 PROBETAS DE CALIBRACIÓN

Como se mencionó anteriormente las variables de las probetas de calibración son una referencia para realizar las probetas de estudio. A continuación se enlistan cinco probetas de calibración con sus propiedades de Heat Input y con los resultados de las macrografías.

##### 4.1.1 PROBETA DE CALIBRACIÓN PC1

###### 4.1.1.1 Heat Input PC1

La probeta de calibración PC1 se realizó con el bugo (equipo para mantener la velocidad de avance de la pistola constante). Las características del cordón de soldadura se observan en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1.-** Parámetros del cordón de soldadura para la probeta PC1

Voltaje [V]	Amperaje [A]	Stick Out [mm]	Velocidad alimentación electrodo [mm/min]	Velocidad de avance [mm/min]	Flujo de gas [lt/min]
20	150-154	12	4064	165	25

Fuente: Propia

Las variables de soldadura y el cálculo del Heat Input para la probeta de calibración PC1 se presenta en la Tabla 4.2.



**Tabla 4.2.-** Cálculo del Heat Input para la probeta PC1

N° Pase	t [s]	Voltaje [V]	Amperaje [A]	Flujo de gas [lt/min]	Velocidad de alimentación [mm/min]	Velocidad de avance [mm/min]	Heat Input [J/mm]
1	32	24,1	154	25	4064	165	1349,60
2	32	24,1	154	25	4064	165	1349,60
3	32	24,1	158	25	4064	165	1384,65
4	32	24,1	152	25	4064	165	1332,07
5	32	24,1	150	25	4064	165	1314,55
6	32	24,1	152	25	4064	165	1332,07
7	32	24,1	154	25	4064	165	1349,60
8	32	24,1	156	25	4064	165	1367,13
9	32	24,1	152	25	4064	165	1332,07

Fuente: Propia

#### 4.1.1.2 Macrografía de la Probeta de Calibración PC1



**Figura 4.1.-** Macrografía de la probeta de calibración PC1 a 4X

Fuente: Propia

En la macrografía de la probeta PC1 (Figura 4.1) se puede observar dos zonas. En la zona A existe falta de fusión de una longitud de 2,128 [mm] en la parte central del bisel recto. La longitud de la falta de fusión en la zona B es de 1,799 [mm]. Además existen inclusiones de escoria. En la figura 4.2 se observa la ampliación de las zonas A y B.



**Figura 4.2.-** Ampliación de falta de fusión de la probeta PC1

**Fuente:** Propia

Cabe recalcar que en la zona A en la cual existe falta de fusión el ancho de la ZAC es 1,4 [mm].

En la Tabla 4.3, se presenta los valores más relevantes del cordón de soldadura.

**Tabla 4.3.-** Variables de soldadura relevantes de la probeta PC1

<b>Partes del Cordón</b>	<b>Medida [mm]</b>
Ancho ZAC Bisel Recto	2,73
Ancho ZAC Bisel en K Sup.	3,07
Ancho ZAC Bisel en K Inf.	3,64
Sobremonta Superior	3,29
Sobremonta Inferior	2,43

**Fuente:** Propia

## 4.1.2 PROBETA DE CALIBRACIÓN PC2

### 4.1.2.1 Heat Input PC2

De igual manera para la probeta PC2 se utilizó el bugo, donde se obtuvo los siguientes parámetros indicados en la tabla 4.4:

**Tabla 4.4.-** Parámetros del cordón de soldadura para la probeta PC2

Voltaje [V]	Amperaje [A]	Stick Out [mm]	Velocidad alimentación electrodo [mm/min]	Velocidad de avance [mm/min]	Flujo de gas [lt/min]
26	177-182	12	5334	254	25

Fuente: Propia

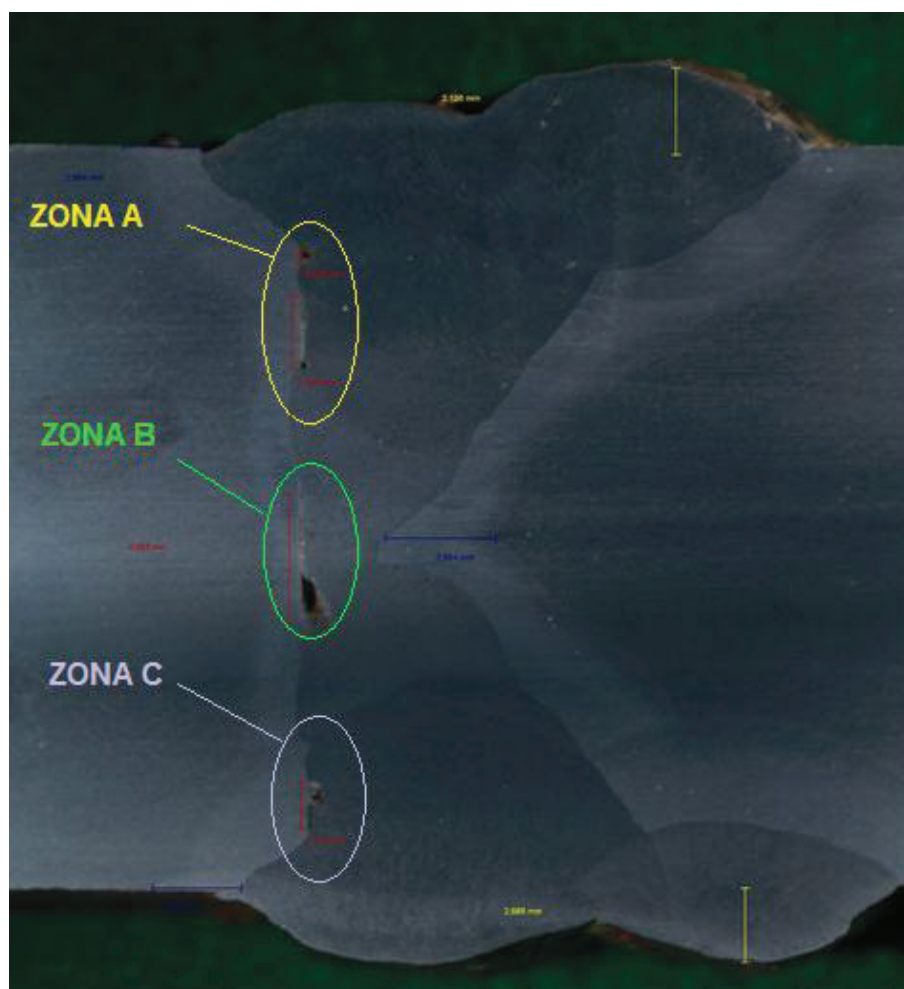
En la tabla 4.5 se presentan las variables de soldadura y el valor del Heat Input para cada uno de los pases realizados en la probeta de calibración PC2:

**Tabla 4.5.-** Cálculo del Heat Input para la probeta PC2

N° Pase	t [s]	Voltaje [V]	Amperaje [A]	Flujo de gas [lt/min]	Velocidad de alimentación [mm/min]	Velocidad de avance [mm/min]	Heat Input [J/mm]
1	25	26	175	25	5334	264	1034,09
2	25	26	175	25	5334	264	1034,09
3	25	26	173	25	5334	264	1022,27
4	25	26	183	25	5334	264	1081,36
5	25	26	183	25	5334	264	1081,36
6	25	26	179	25	5334	264	1057,73
7	25	26	182	25	5334	264	1075,45
8	25	26	177	25	5334	264	1045,91
9	25	26	175	25	5334	264	1034,09
10	25	26	175	25	5334	264	1034,09
11	25	26	173	25	5334	264	1022,27

Fuente: Propia

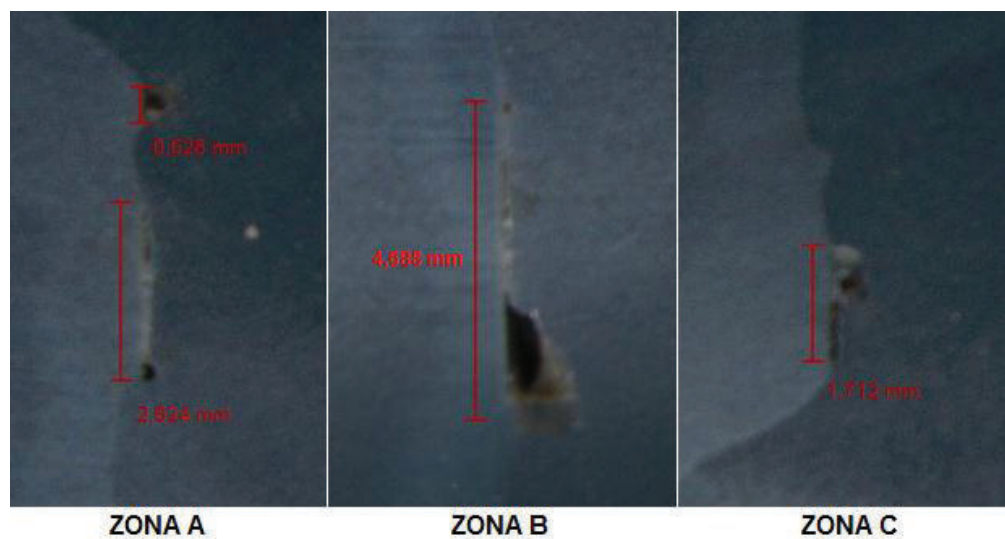
#### 4.1.2.2 Macrografía de la Probeta de Calibración PC2



**Figura 4.3.-** Macrografía probeta PC2

**Fuente:** Propia

En la zona A las longitudes de falta de fusión son 0,528 [mm] y 2,624 [mm]. En la zona B la falta de fusión es casi completa, de longitud de 4,688 [mm]. En la C la longitud de falta de fusión es 1,712 [mm]. En la Figura 4.4, se presenta la ampliación de las zonas de falla.



**Figura 4.4.-** Ampliación de las zonas de falla de la probeta PC2

**Fuente:** Propia

En la Tabla 4.6, se presenta los valores más relevantes del cordón de soldadura.

**Tabla 4.6.-** Variables de soldadura relevantes de la probeta PC2

<b>Partes del Cordón</b>	<b>Medida [mm]</b>
Ancho ZAC Bisel Recto	1,71
Ancho ZAC Bisel en K Sup.	2,36
Ancho ZAC Bisel en K Inf.	2,84
Sobremonta Superior	3,29
Sobremonta Inferior	3,14

**Fuente:** Propia

### 4.1.3 PROBETA DE CALIBRACIÓN PC3

#### 4.1.3.1 Heat Input PC3

La probeta PC3 se realizó con la ayuda de un soldador y con el proceso GMAW semiautomático, en donde se obtuvieron los parámetros presentados en la tabla 4.7

**Tabla 4.7.-** Parámetros del cordón de soldadura para la probeta PC3

Voltaje [V]	Amperaje [A]	Stick Out [mm]	Velocidad alimentación electrodo [mm/min]	Velocidad de avance [mm/min]	Flujo de gas [lt/min]
26	175-183	12	5334	165	25

Fuente: Propia

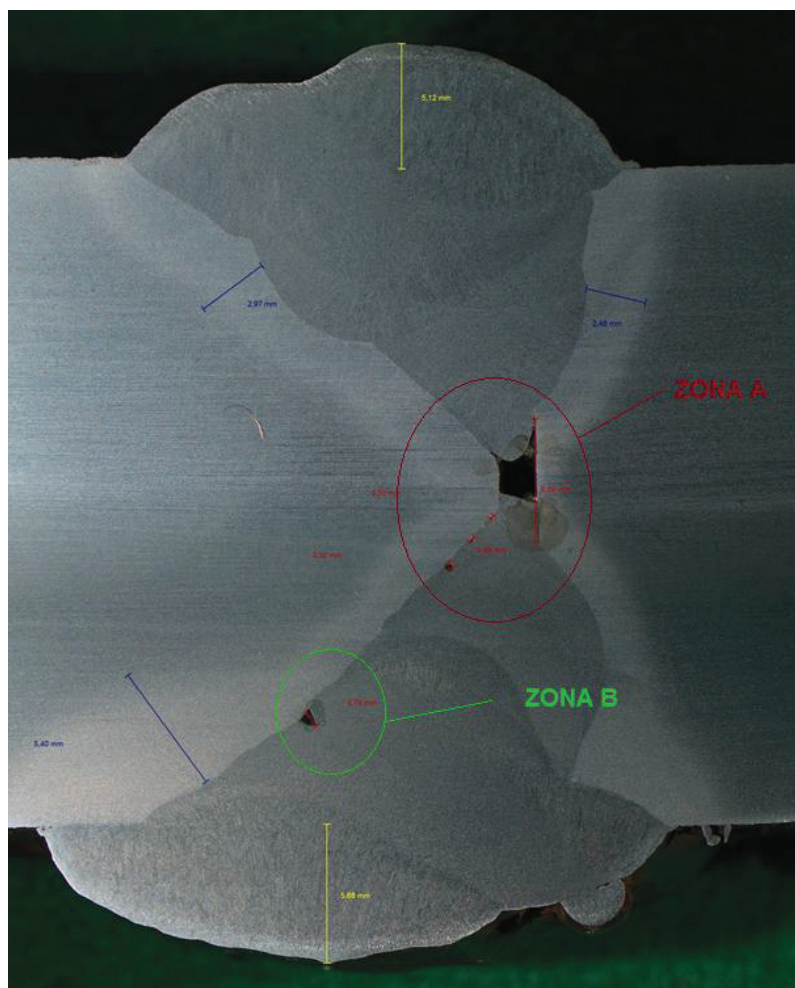
En la tabla 4.8 se presentan los valores de las variables de soldadura, así como el Heat Input de cada pase dado en el cordón.

**Tabla 4.8.-** Cálculo del Heat Input para la probeta PC3

N° Pase	t [s]	Voltaje [V]	Amperaje [A]	Flujo de gas [lt/min]	Velocidad de alimentación [mm/min]	Velocidad de avance [mm/min]	Heat Input [J/mm]
1	30	26	179	25	5334	165	1692,36
2	30	26	175	25	5334	165	1654,55
3	30	26	173	25	5334	165	1635,64
4	30	26	171	25	5334	165	1616,73
5	30	26	173	25	5334	165	1635,64
6	30	26	158	25	5334	165	1493,82
7	30	26	160	25	5334	165	1512,73
8	30	26	177	25	5334	165	1673,45
9	30	26	173	25	5334	165	1635,64

Fuente: Propia

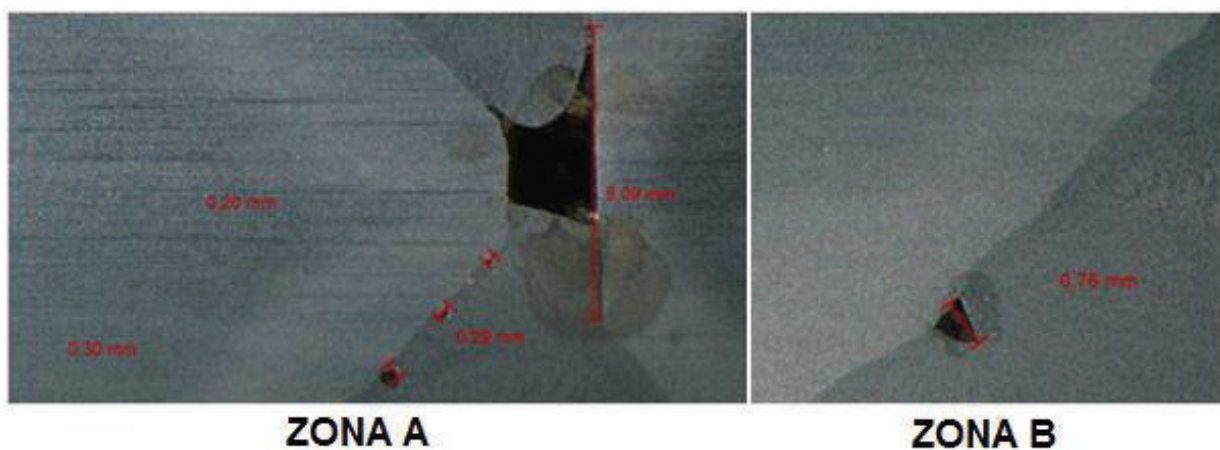
#### 4.1.3.2 Macrografía de la Probeta de Calibración PC3



**Figura 4.5.-** Macrografía probeta PC3

**Fuente:** Propia

En la macrografía de la probeta de calibración PC3, que se realizó con la ayuda de un soldador y con proceso GMAW semiautomático, presenta una zona A, en la que existe una completa falta de fusión en el pase de raíz con una longitud de 5,09 [mm] y en la parte inferior central de la junta tipo K con una longitud de 0,20 [mm], 0,29 [mm] y 0,30 [mm]. En la zona B parte inferior hay falta de fusión con una longitud de 0,76 [mm]. En la Figura 4.6, se observa una ampliación de las fallas.



**Figura 4.6.-** Ampliación de la probeta PC3

**Fuente:** Propia

En la Tabla 4.9, se presenta los valores más relevantes del cordón de soldadura.

**Tabla 4.9.-** Variables de soldadura relevantes de la probeta PC3

<b>Partes del Cordón</b>	<b>Medida [mm]</b>
Ancho ZAC Bisel Recto	2,42-1,88
Ancho ZAC Bisel en K Sup.	2,97
Ancho ZAC Bisel en K Inf.	2,07
Sobremonta Superior	5,12
Sobremonta Inferior	5,68

**Fuente:** Propia



#### 4.1.4 PROBETA DE CALIBRACIÓN PC4

##### 4.1.4.1 Heat Input PC4

La probeta PC4 se realizó con la ayuda de un soldador de campo y con el proceso GMAW semiautomático, en donde se obtuvieron los parámetros presentados en la tabla 4.10

**Tabla 4.10.-** Parámetros del cordón de soldadura para la probeta PC4

Voltaje [V]	Amperaje [A]	Stick Out [mm]	Velocidad alimentación electrodo [mm/min]	Velocidad de avance [mm/min]	Flujo de gas [lt/min]
24	155	12	8890	160	25

Fuente: Propia

En la tabla 4.11 se presentan las variables de soldadura y el Heat Input de cada pase dado en el cordón.

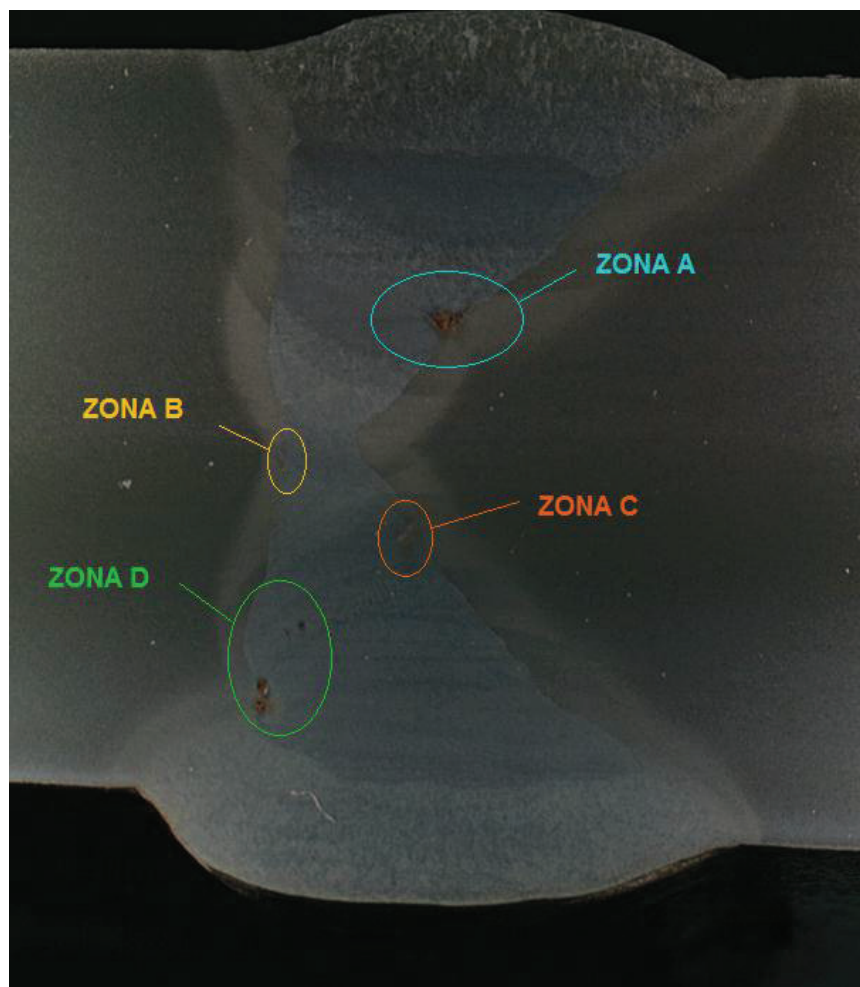
**Tabla 4.11.-** Cálculo del Heat Input para la probeta PC4

N° Pase	t [s]	Voltaje [V]	Amperaje [A]	Flujo de gas [lt/min]	Velocidad de alimentación [mm/min]	Velocidad de avance [mm/min]	Heat Input [J/mm]
1	30	24	155	25	8890	160	1395,00
2	30	24	155	25	8890	160	1395,00
3	30	24	155	25	8890	160	1395,00
4	30	24	155	25	8890	160	1395,00
5	30	24	155	25	8890	160	1395,00
6	30	24	155	25	8890	160	1395,00
7	30	24	155	25	8890	160	1395,00
8	30	24	155	25	8890	160	1395,00
9	30	24	155	25	8890	160	1395,00
10	30	24	155	25	8890	160	1395,00
11	30	24	155	25	8890	160	1395,00

Fuente: Propia

#### 4.1.4.2 Macrografía de la Probeta de Calibración PC4

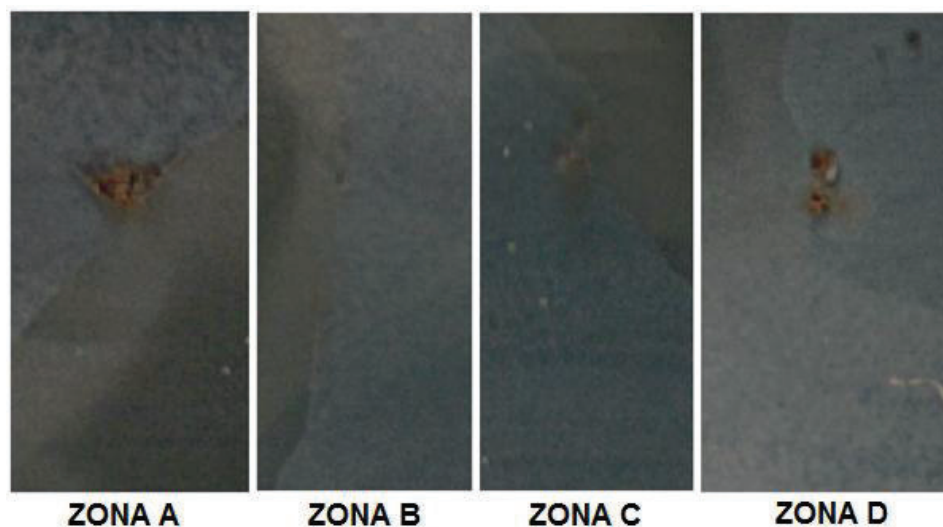
En la soldadura de la probeta de calibración PC4 se tiene:



**Figura 4.7.-** Macrografía probeta PC4

**Fuente:** Propia

En la Figura 4.7, se observa la macrografía de la probeta PC4 tomada a 4X. Existe cuatro zonas de falla, en la zona A se observa falta de fusión en la parte superior de la K con una longitud de 1,40 [mm]. En la zona B se observa una pequeña falta de fusión de 0,30 [mm] y en la zona C se presentan unas picaduras pequeñas. En la zona D, en la parte recta de la K se observa falta de fusión de 0,42 [mm], 0,74 [mm] y unas pequeñas salpicaduras. En la Figura 4.8, se amplían las zonas de falla.



**Figura 4.8.-** Ampliación de la macrografía probeta PC4

**Fuente:** Propia

En la Tabla 4.12 se presenta los valores más relevantes del cordón de soldadura.

**Tabla 4.12.-** Variables de soldadura relevantes de la probeta PC4

<b>Partes del Cordón</b>	<b>Medida [mm]</b>
Ancho ZAC Bisel Recto	1,39
Ancho ZAC Bisel en K Sup.	2,42
Ancho ZAC Bisel en K Inf.	1,81
Sobremonta Sup.	2,56
Sobremonta Inf.	4,26

**Fuente:** Propia

## 4.1.5 PROBETA DE CALIBRACIÓN PC5

### 4.1.5.1 Heat Input PC5

La probeta PC5 se realizó con la ayuda de un soldador calificado y con el proceso GMAW semiautomático, en donde se obtuvieron los parámetros presentados en la tabla 4.13

**Tabla 4.13.-** Parámetros del cordón de soldadura para la probeta PC5

Voltaje [V]	Amperaje [A]	Stick Out [mm]	Velocidad alimentación electrodo [mm/min]	Velocidad de avance [mm/min]	Flujo de gas [lt/min]
27,7-32,5	138-202	12	6350-9906	103,38-224	42

Fuente: Propia

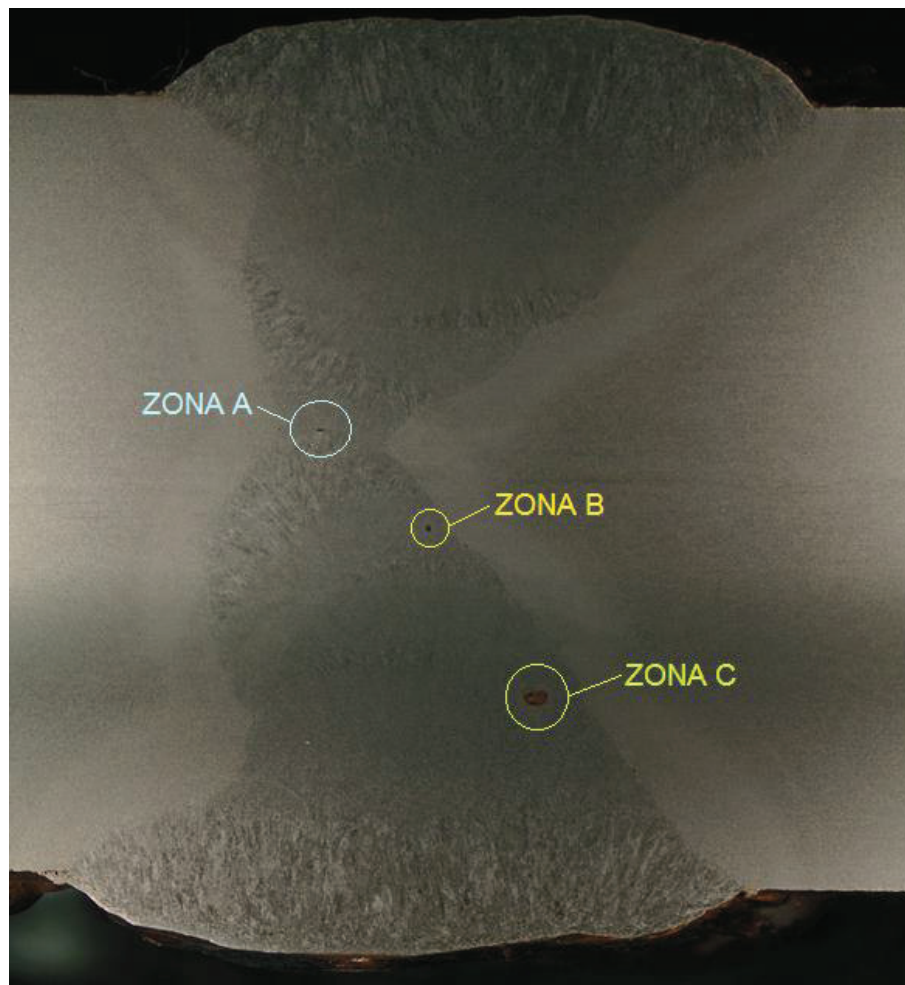
En la tabla 4.14 se presenta el Heat Input y las variables de soldadura que se obtiene en cada pase que se da en el cordón.

**Tabla 4.14.-** Cálculo del Heat Input para la probeta PC5

N° Pase	t [s]	Voltaje [V]	Amperaje [A]	Flujo de gas [lt/min]	Velocidad de alimentación [mm/min]	Velocidad de avance [mm/min]	Heat Input [J/mm]
1	33	27,2	138	42	6350	203,64	1105,97
2	35	31,8	202	42	7620	192,00	2007,38
3	36	29,9	168	42	9906	186,67	1614,60
4	30	29,9	162	42	8255	224,00	1297,45
5	33	29,9	178	42	8128	203,64	1568,15
6	34	29,9	172	42	8128	197,65	1561,21
7	36	29,9	176	42	8128	186,67	1691,49
8	35	29,9	180	42	8128	192,00	1681,88
9	36	29,9	154	42	8128	186,67	1480,05
10	40	29,9	158	42	8128	168,00	1687,21
11	60	30,4	148	42	7620	112,00	2410,29
12	65	30,5	150	42	7620	103,38	2655,13

Fuente: Propia

#### 4.1.5.2 Macrografía de la Probeta de Calibración PC5



**Figura 4.9.-** Macrografía probeta PC5

**Fuente:** Propia

En la Figura 4.9, se presenta la probeta PC5 a 4x. En la zona A y B se observa unas pequeñas faltas de fusión en el material de aporte y en la zona C se presenta una incrustación de escoria, pero ninguno de los defectos anteriores sobrepasa el 1 [mm]. En la Figura 4.10, se hace una ampliación de las zonas de falta de fusión e incrustaciones de escoria.



**Figura 4.10.-** Ampliación de la macrografía probeta PC5

**Fuente:** Propia

En la Tabla 4.15, se presenta los valores más relevantes del cordón de soldadura.

**Tabla 4.15.-** Variables de soldadura relevantes de la probeta PC5

<b>Partes del Cordón</b>	<b>Medida [mm]</b>
Ancho ZAC Bisel Recto	4,30
Ancho ZAC Bisel en K Sup.	3,98
Ancho ZAC Bisel en K Inf.	3,87
Sobremonta Sup.	3,06
Sobremonta Inf.	3,42

**Fuente:** Propia

## 4.2 PROBETAS DE ESTUDIO

Para realizar el estudio se soldaron tres pares de placas de las siguientes dimensiones: 380 mm x 150 mm x 25,4 mm, con la ayuda de un soldador calificado en el proceso GMAW, mismo que soldó la última probeta de calibración. De estas placas soldadas con diferente Heat Input, se obtendrán 4 probetas de doblado lateral, 2 probetas de tracción y 1 probeta para realizar la macrografía, micrografía y ensayo de micro-dureza según se especifica en la norma ASME XI.

#### 4.2.1 PROBETA DE ESTUDIO P1

Las variables de soldadura de la probeta de calibración PC5 que se presentan en la Tabla 4.14 (sección 4.1.5.1) sirven de referencia para variar los parámetros de voltaje, amperaje, velocidad de alimentación del alambre y velocidad de avance para las otras probetas de estudio.

##### 4.2.1.1 Variables de Soldadura y Heat Input de la probeta P1

Para la probeta de estudio P1 se obtienen los siguientes resultados de las variables, que se presentan en la tabla 4.16

**Tabla 4.16.-** Parámetros del cordón de soldadura para la probeta de estudio P1

Voltaje [V]	Amperaje [A]	Stick Out [mm]	Vel. alimentación electrodo [mm/min]	Vel. avance [mm/min]	Flujo de gas [lt/min]
28,6-35,3	210-310	12	8255-10795	201,77-542,86	42

Fuente: Propia

La Tabla 4.17 presenta el Heat Input y los parámetros de soldadura.

**Tabla 4.17.-** Cálculo del Heat Input para la probeta P1

N° Pase	t [s]	Voltaje [V]	Amperaje [A]	Flujo de gas [lt/min]	Velocidad de alimentación [mm/min]	Velocidad de avance [mm/min]	Heat Input [J/mm]
1	76	28,6	210	42	8255	300,00	1201,20
2	62	35	215	42	8636	367,74	1227,76
3	63	35,3	260	42	8890	361,90	1521,62
4	67	35,2	270	42	8890	340,30	1675,71
5	42	35,1	299	42	9525	542,86	1159,96
6	46	35,1	310	42	10160	495,65	1317,17
7	54	34,8	300	42	10160	422,22	1483,58
8	48	34,5	281	42	10795	475,00	1224,57
9	113	31,4	240	42	8255	201,77	2240,97
10	110	31,4	250	42	8255	207,27	2272,37

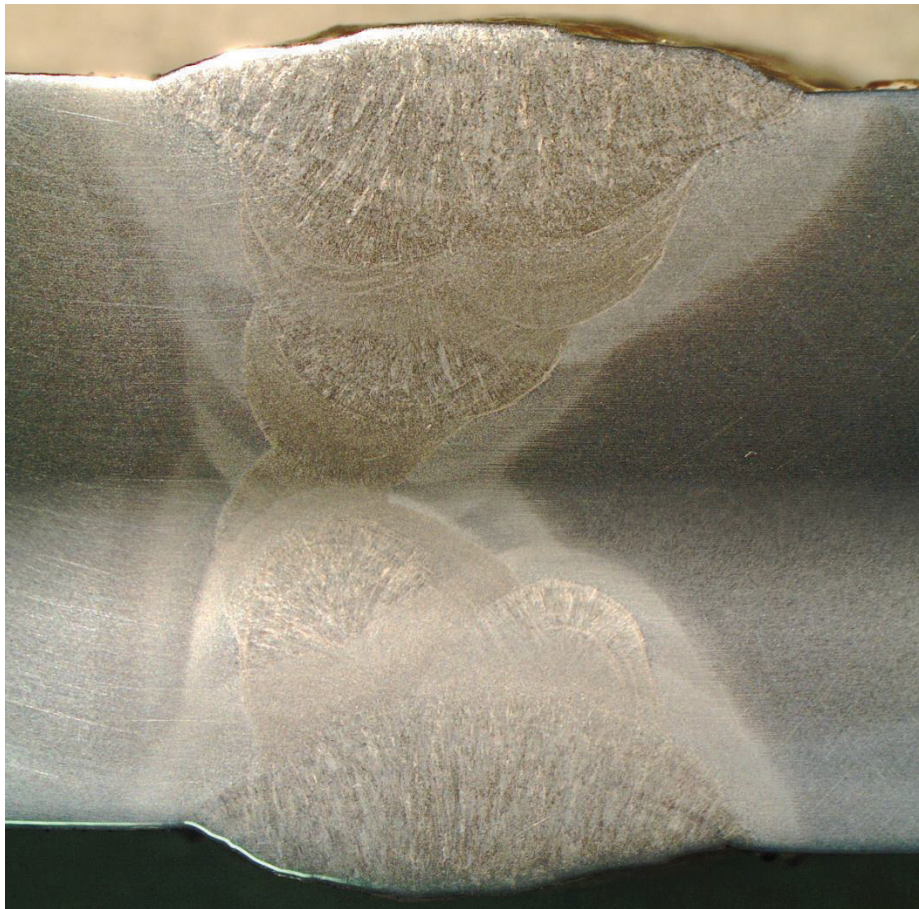
Fuente: Propia

#### 4.2.1.2 Ensayos metalográficos de la probeta P1

Para las macrografías se utilizó el microscopio Olympus SZX7, para las micrografías se utilizó el microscopio Olympus GX41 y para las microdurezas se utilizó un microdurómetro DUROLINE-M

##### 4.2.1.2.1 Macrografía

En la Figura 4.11 se puede apreciar que no existe ningún defecto presente en el cordón de soldadura, también se observa los diez pases que realizó el soldador en la junta y tanto los cordones, como los pases y la ZAC están bien definidos.



**Figura 4.11.-** Macrografía de la probeta P1 a 4X

**Fuente:** Propia



En la Tabla 4.18, se presenta las variables más relevantes del cordón de soldadura.

**Tabla 4.18.-** Variables relevantes de soldadura para la probeta P1

<b>Partes del Cordón</b>	<b>Medida [mm]</b>
Ancho ZAC Bisel Recto	4,60
Ancho ZAC Bisel en K Sup.	2,98
Ancho ZAC Bisel en K Inf.	2,93
Sobremonta Sup.	2,32
Sobremonta Inf.	2,21

**Fuente:** Propia

En la Tabla 4.19, se presenta las áreas de la ZAC y del cordón de soldadura.

**Tabla 4.19.-** Áreas de la ZAC y Cordón de Soldadura de la probeta P1

<b>Áreas de la ZAC y Cordón de Soldadura</b>	<b>Medida [mm<sup>2</sup>]</b>
Área ZAC Bisel Recto	113,82
Área ZAC Biseles en K	82,48
Área Material de Aporte	418,53

**Fuente:** Propia

#### 4.2.1.2.1 Micrografías de la probeta P1



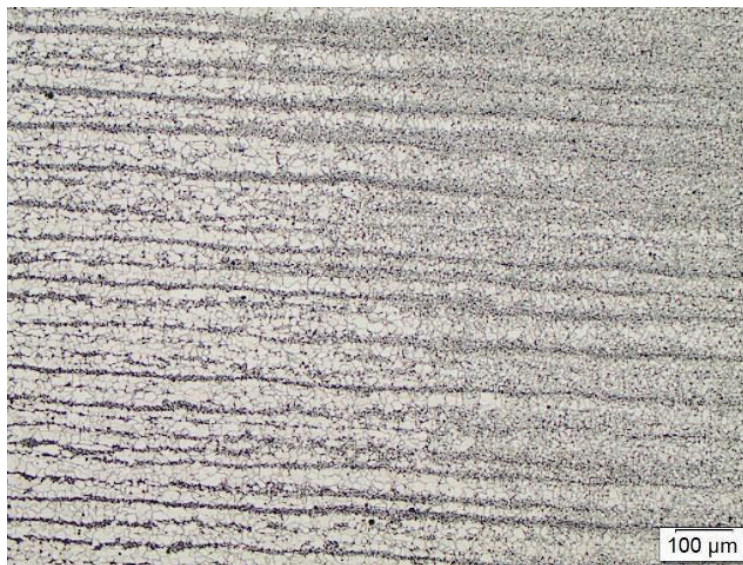
**Figura 4.12.-** Microestructura a 50X correspondiente al material base, ZAC y material de aporte de un acero de bajo contenido de carbono sin ataque químico

**Fuente:** Propia



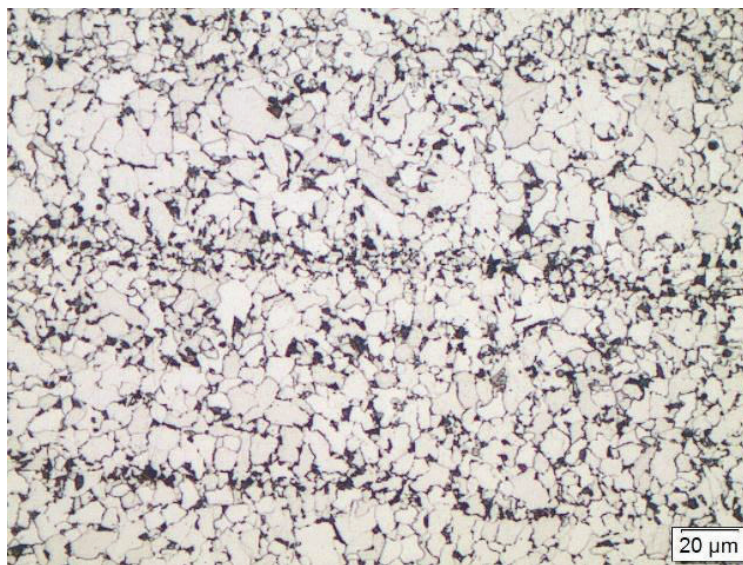
**Figura 4.13.-** Microestructura a 50X correspondiente al material base, ZAC y material de aporte de un acero de bajo contenido de carbono atacado químicamente con nital al 10 %

**Fuente:** Propia



**Figura 4.14.-** Microestructura a 100X correspondiente al material base y ZAC atacado con nital al 10%. Perlita en una matriz ferrítica, la perlita alineada en dirección del laminado en el material base tiende a disociarse en la ZAC

**Fuente:** Propia



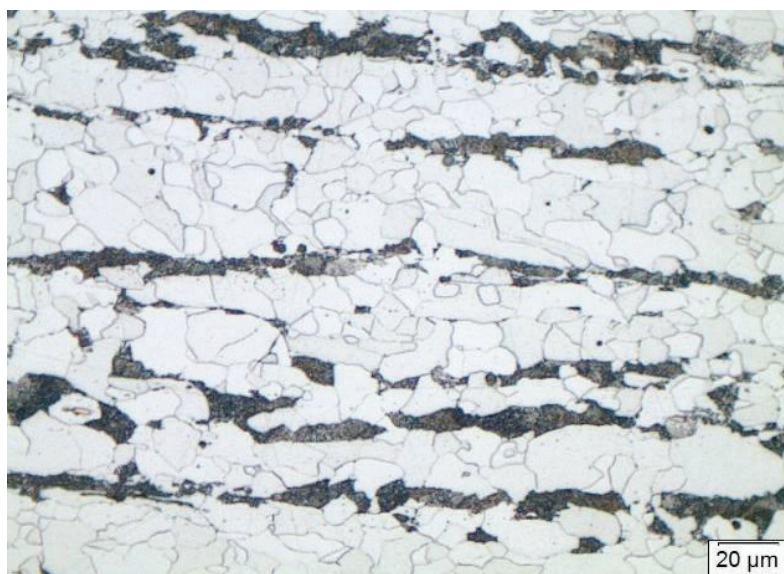
**Figura 4.15.-** Microestructura a 500X correspondiente al material base y ZAC con perlita laminar en una matriz ferrítica atacado químicamente con nital al 10%

**Fuente:** Propia



**Figura 4.16.-** Microestructura a 100X correspondiente a un acero de bajo contenido de carbono con perlita alineada en dirección al laminado en una matriz ferrítica atacado con nital al 10%

**Fuente:** Propia



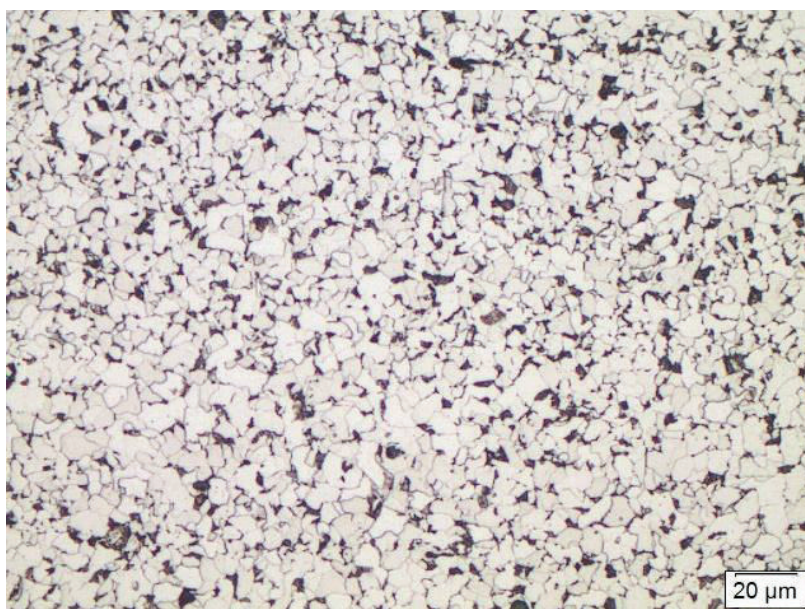
**Figura 4.17.-** Microestructura a 500X correspondiente a un acero de bajo contenido de carbono con matriz ferrítica y perlita laminar atacado con nital al 10%

**Fuente:** Propia



**Figura 4.18.-** Microestructura a 100X correspondiente a la ZAC con descomposición de la perlita distribuida uniformemente

**Fuente:** Propia



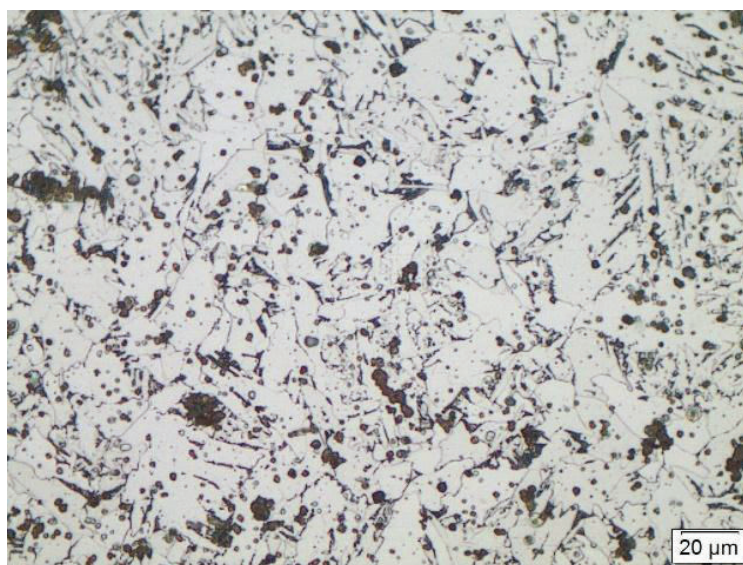
**Figura 4.19.-** Microestructura a 500X correspondiente a la ZAC con colonias de perlita y disminución del tamaño de grano ferrítico

**Fuente:** Propia



**Figura 4.20.-** Microestructura a 100X correspondiente al material de aporte con descomposición de la perlita con presencia de ferrita acicular

**Fuente:** Propia



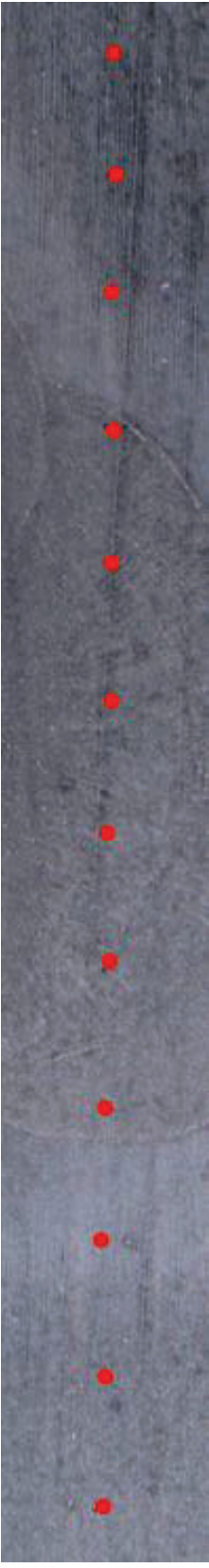

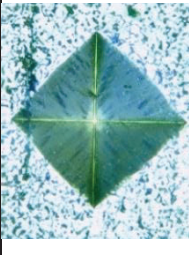
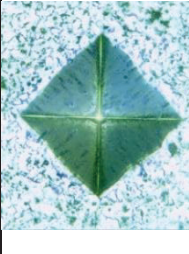
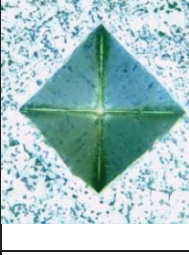
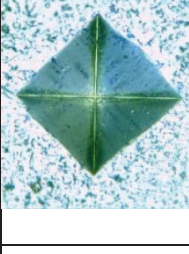
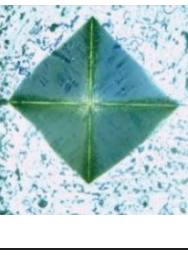
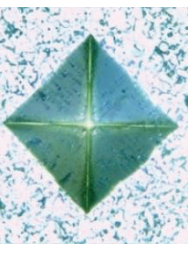
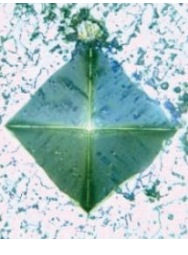
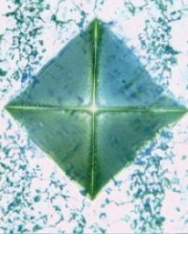


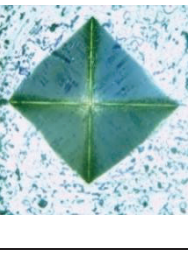
**Figura 4.21.-** Microestructura a 500X correspondiente a la zona del material de aporte con pequeñas concentraciones de escoria atrapada, se observa la descomposición de la perlita en finas colonias en una matriz de ferrita

**Fuente:** Propia

4.2.1.2.2 Microdurezas

El proceso para la obtención de las microdurezas se detalla en la sección 3.3.1.1.2

**Tabla 4.20.-** Macrografía de la probeta P1 a 50X – zona de microdureza y puntos de microdureza

Punto de microdureza											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
											
Ampliación punto de microdureza											
2		3		4		5		6		7	
8		9		10		11		12		13	
											
											

Fuente: Propia

**Tabla 4.21.-** Durezas de la probeta P1 en Vickers y Rowell C

<b>Probeta P1</b>		
<b>#</b>	<b>Dureza HV</b>	<b>Dureza HRC</b>
1	197,48	12,696
2	194,66	12,132
3	214,92	16,184
4	245,54	22,197
5	231,87	19,574
6	243,03	21,745
7	231,60	19,520
8	207,11	14,622
9	214,48	16,096
10	196,09	12,418
11	208,19	14,838
12	201,38	13,476

**Fuente:** Propia



#### 4.2.1.3 Ensayos destructivos de la probeta P1

El proceso para la obtención de las pruebas de tracción se encuentra especificado en la sección 3.3.1.2.1 y se realizó en la máquina universal de ensayos marca Tinius Olsen y para las pruebas de doblado lateral se usó una prensa ubicada en el laboratorio de soldadura.

##### 4.2.1.3.1 Ensayos de tracción

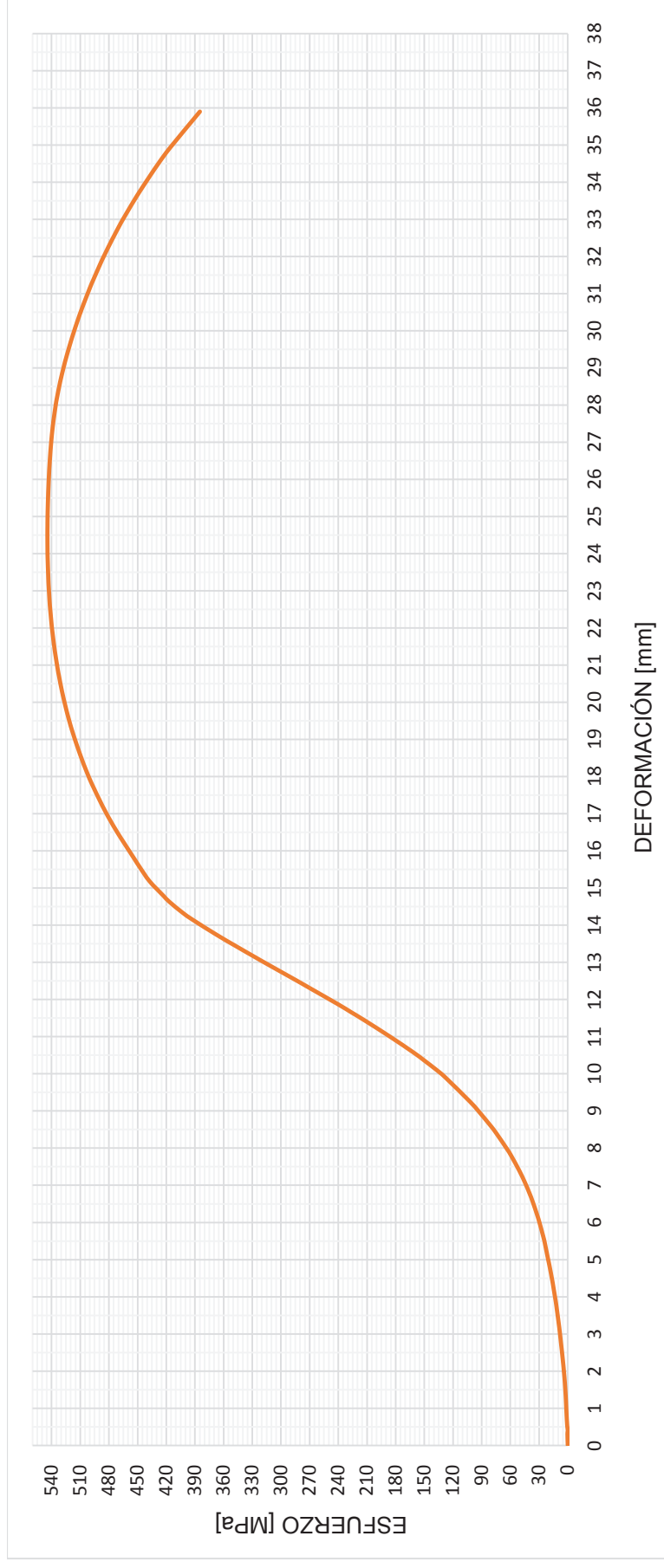
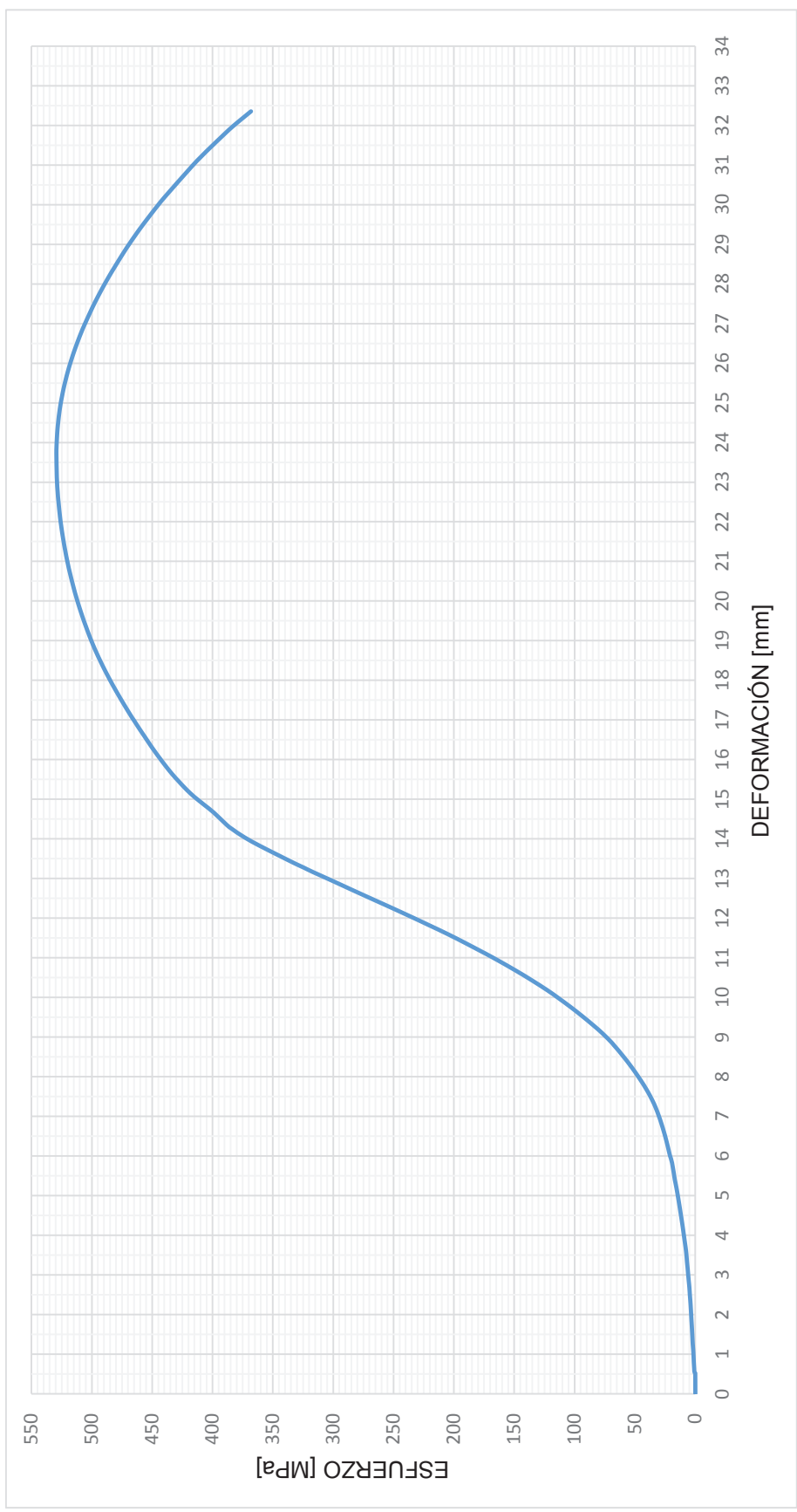


Figura 4.22.- Ensayo de Tracción probeta P1 – tracción T1



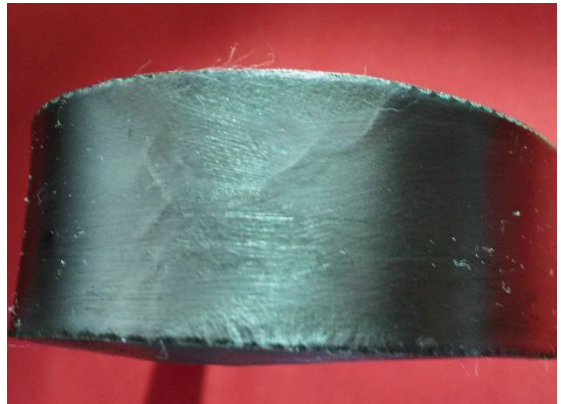
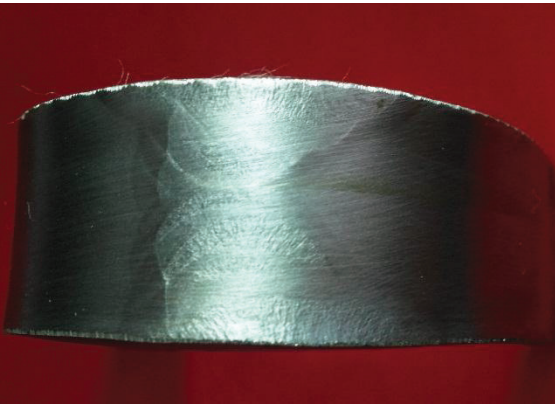


**Figura 4.23.-** Ensayo de Tracción probeta P1 – tracción T2

**Fuente:** Propia

## 4.2.1.3.2 Ensayo de doblado

**Tabla 4.22.-** Ensayo de doblado lateral de la probeta P1

<b>Doblado lateral probeta P1</b>	
Doblado lateral 1 – P1DL1	Doblado lateral 2 – P2DL2
	
Doblado lateral 3 – P1DL3	Doblado lateral 4 – P1DL4
	

Fuente: Propia

En la probeta P1 doblado lateral 2 P1DL2 existe una discontinuidad abierta de 1,40 [mm] en la parte centro del bisel recto de la junta tipo K, mientras que en la parte centro del bisel en doble V presenta el ancho de la discontinuidad es de 1,10 [mm].

## 4.2.2 PROBETA DE ESTUDIO P2

### 4.2.2.1 Variables de Soldadura y Heat Input de la probeta P2

Partiendo de los parámetros de soldadura de la probeta P1, se disminuyó el voltaje, amperaje, velocidad de alimentación del electrodo y velocidad de avance. En la Tabla 4.23, se observa los parámetros generales.

**Tabla 4.23.-** Parámetros del cordón de soldadura para la probeta de estudio P2

Voltaje [V]	Amperaje [A]	Stick Out [mm]	Velocidad alimentación electrodo [mm/min]	Velocidad de avance [mm/min]	Flujo de gas [lt/min]
24,5 - 36,8	160 - 277	12	5842 - 7620	100 - 422,22	25

Fuente: Propia

En la Tabla 4.24, se presenta el Heat Input y los parámetros de soldadura de acuerdo al número pases que se realizaron.

**Tabla 4.24.-** Cálculo del Heat Input para la probeta P2

N° Pase	t [s]	Voltaje [V]	Amperaje [A]	Flujo de gas [lt/min]	Velocidad de alimentación [mm/min]	Velocidad de avance [mm/min]	Heat Input [J/mm]
1	130	24,5	160	42	5842	175,38	1341,05
2	57	35,6	241	42	5842	400,00	1286,94
3	100	27,6	218	42	7620	228,00	1583,37
4	85	27,8	225	42	7620	268,24	1399,14
5	55	28,6	226	42	7620	414,55	935,52
6	54	28,6	226	42	7620	422,22	918,51
7	228	25,9	184	42	6350	100,00	2859,36
8	92	28,2	202	42	7239	247,83	1379,13
9	63	28	204	42	7239	361,90	946,99
10	65	36,8	277	42	7239	350,77	1743,64
11	161	26,3	187	42	6350	141,61	2083,72

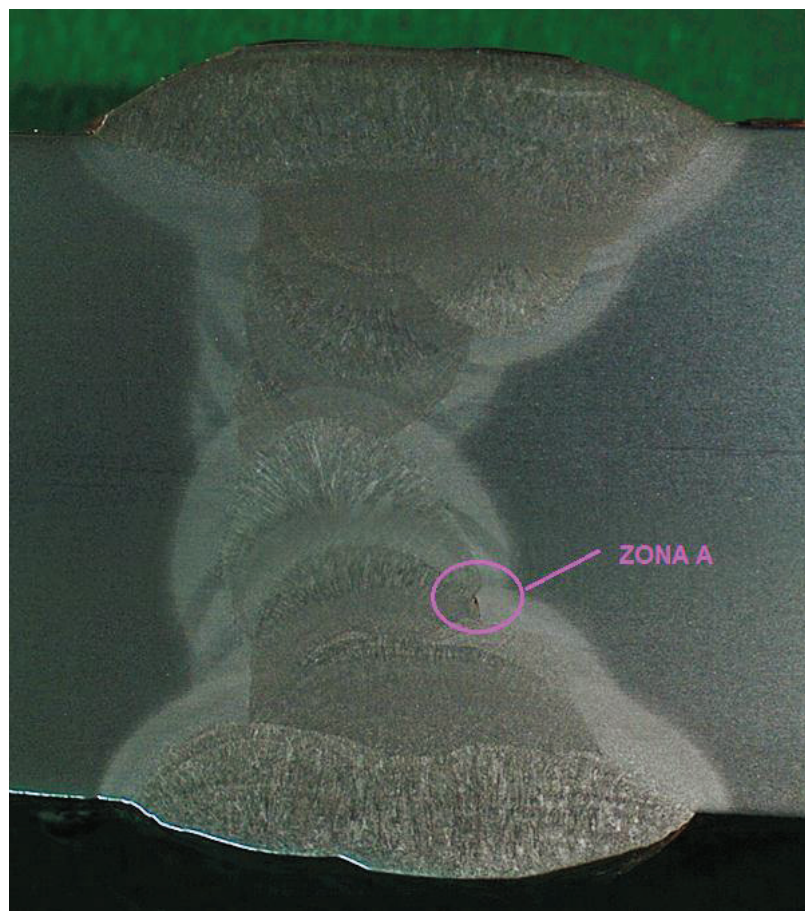
Fuente: Propia

#### 4.2.2.2 Ensayos metalográficos de la probeta P2

Para las macrografías se utilizó el microscopio Olympus SZX7, para las micrografías se utilizó el microscopio Olympus GX41 y para las microdurezas se utilizó un microdurómetro DUROLINE-M

##### 4.2.2.2.1 Macrografía

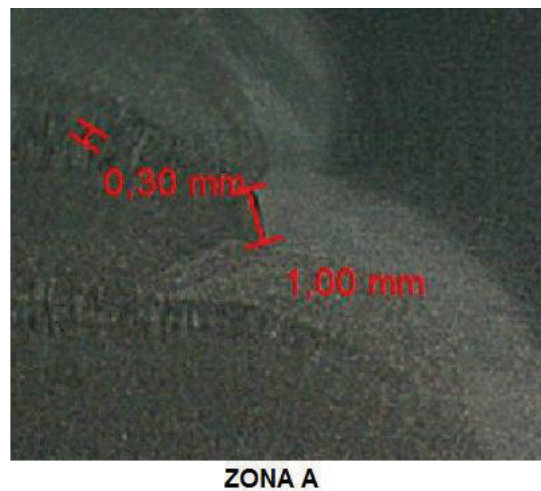
En la macrografía de la probeta P2 (figura 4.24) se observa 11 cordones de soldadura, además en la zona A donde existe falta de fusión del material y el metal de aporte de 1 [mm] medido en la grieta más grande.



**Figura 4.24.-** Macrografía de la probeta P2 a 4X

**Fuente:** Propia

En la Figura 4.25, se observa una ampliación de la zona de la falta de fusión.



**Figura 4.25.-** Ampliación de falta de fusión de la probeta P2

**Fuente:** Propia

En la Tabla 4.25 y 4.26, se presentan los valores más relevantes del cordón de soldadura.

**Tabla 4.25.-** Variables relevantes de soldadura para la probeta P2

<b>Partes del Cordón</b>	<b>Medida[mm]</b>
Ancho ZAC Bisel Recto	2,00
Ancho ZAC Bisel en K Superior	2,40
Ancho ZAC Bisel en K Inferior	3,40
Sobremonta Superior	3,62
Sobremonta Inferior	2,85

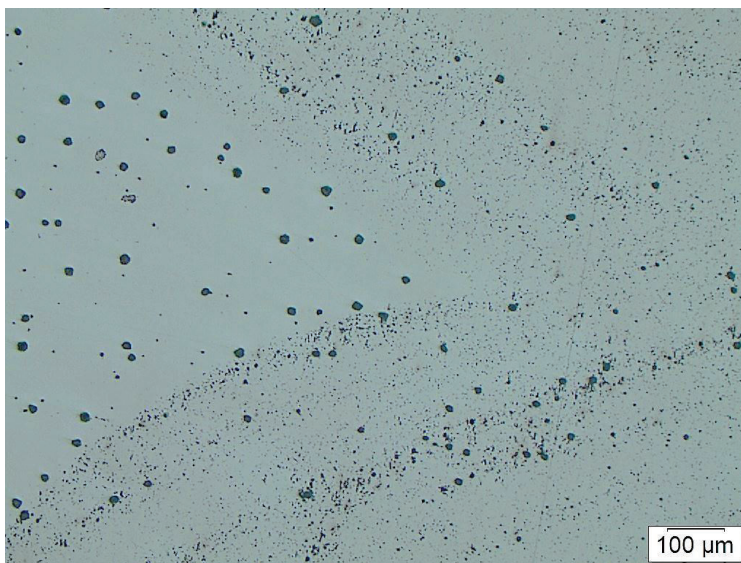
**Fuente:** Propia

**Tabla 4.26.-** Áreas de la ZAC y Cordón de Soldadura de la probeta P2

<b>Áreas de la ZAC y Cordón de Soldadura</b>	<b>Medida [mm<sup>2</sup>]</b>
Área ZAC Bisel Recto	66,70
Área ZAC Biseles en K	63,86
Área Material de Aporte	453,32

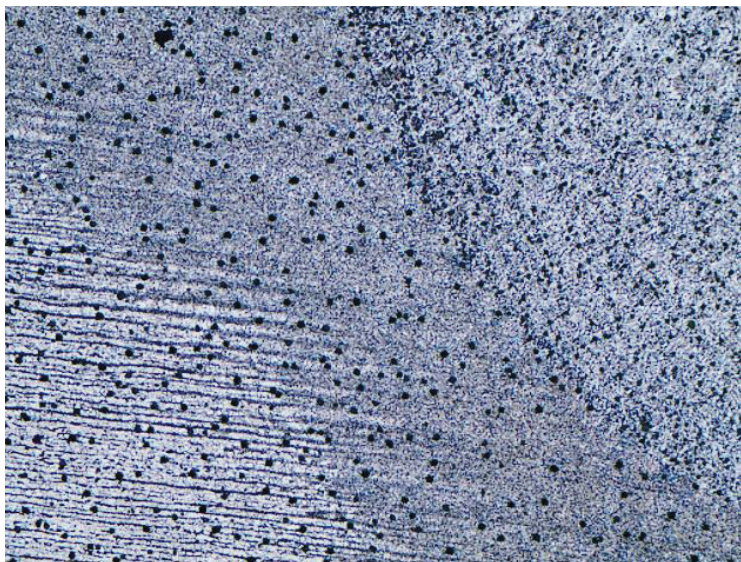
**Fuente:** Propia

#### 4.2.2.2.1 Micrografías de la probeta P2



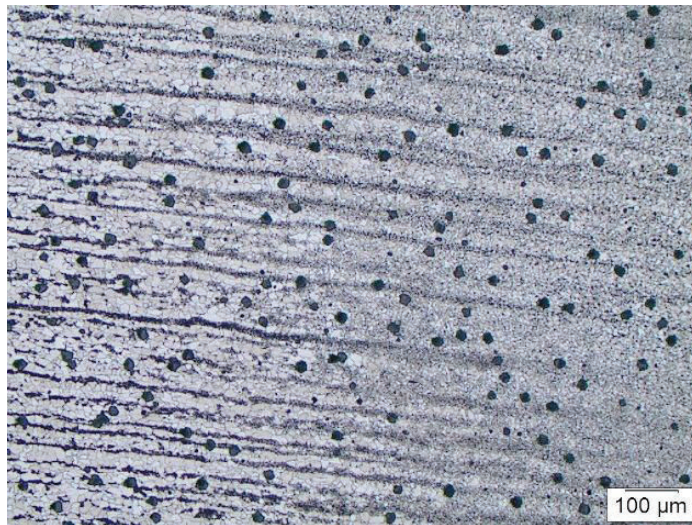
**Figura 4.26.-** Microestructura a 50X correspondiente al material base, ZAC y material de aporte de un acero de bajo contenido de carbono sin ataque químico

**Fuente:** Propia



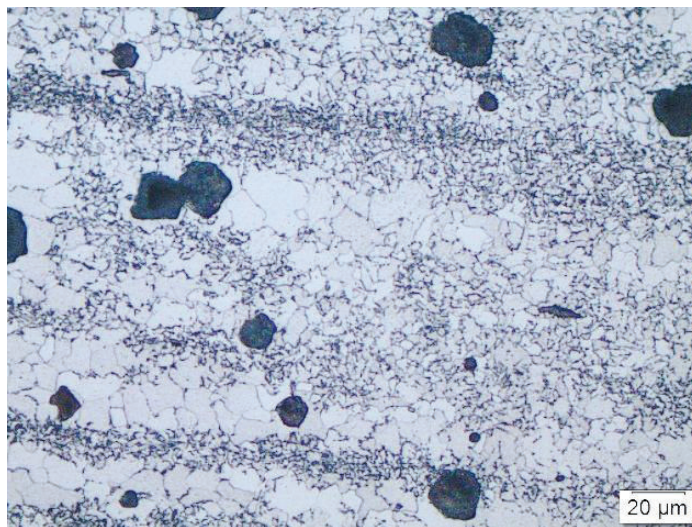
**Figura 4.27.-** Microestructura a 50X correspondiente al material base, ZAC y material de aporte de un acero de bajo contenido atacado con nital al 10 %

**Fuente:** Propia



**Figura 4.28.-** Microestructura a 100X de un acero de bajo contenido de carbono correspondiente al material base y ZAC atacado con nital al 10%. Se observa perlita laminar en una matriz ferrítica, en la zona de la ZAC la perlita tiende a hacerse más delgada. Se presentan marchas circulares no metálicas uniformemente distribuidas en la probeta

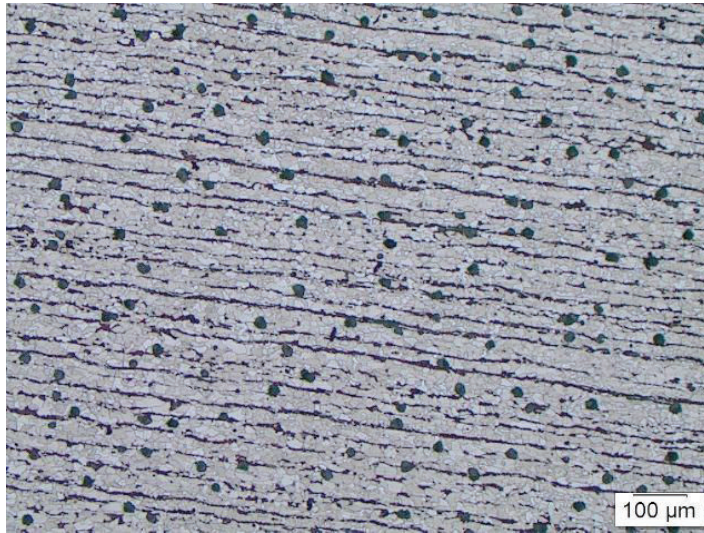
**Fuente:** Propia



**Figura 4.29.-** Microestructura a 500X correspondiente al material base y ZAC atacado con nital al 10%, con perlita laminar en una matriz ferrítica, el tamaño de grano de la ferrita disminuye en la ZAC

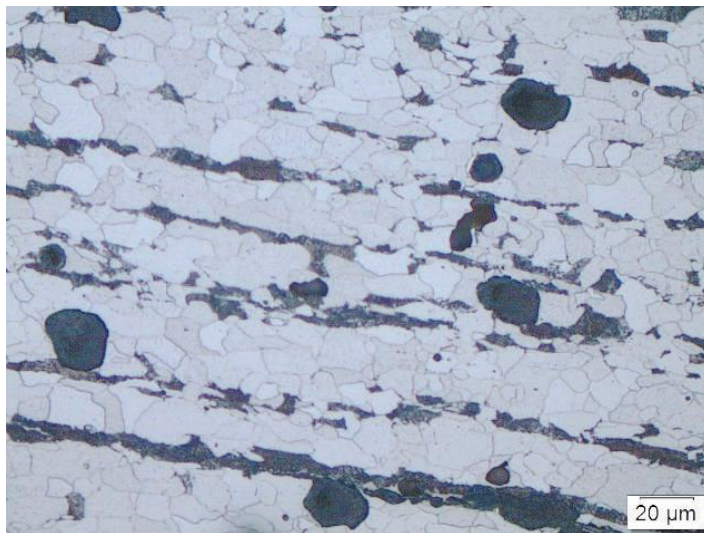
**Fuente:** Propia





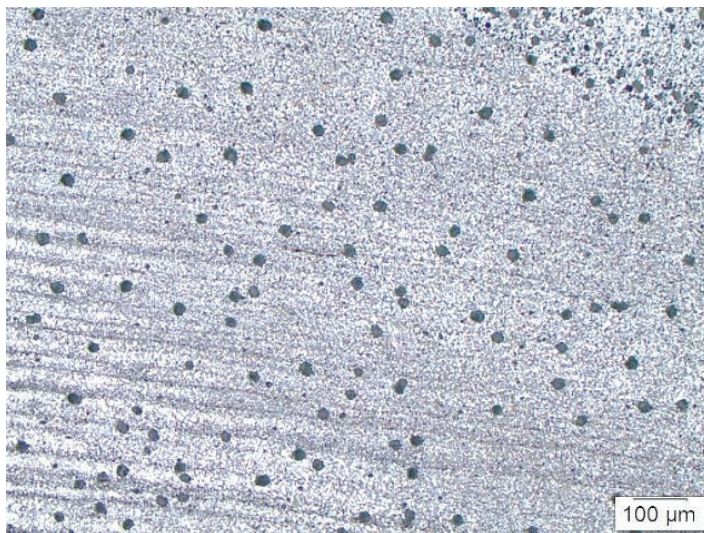
**Figura 4.30.-** Microestructura a 100X correspondiente a un acero de bajo contenido de carbono con perlita laminar en una matriz ferrítica atacado con nital al 10%, se presenta manchas de alcohol

**Fuente:** Propia



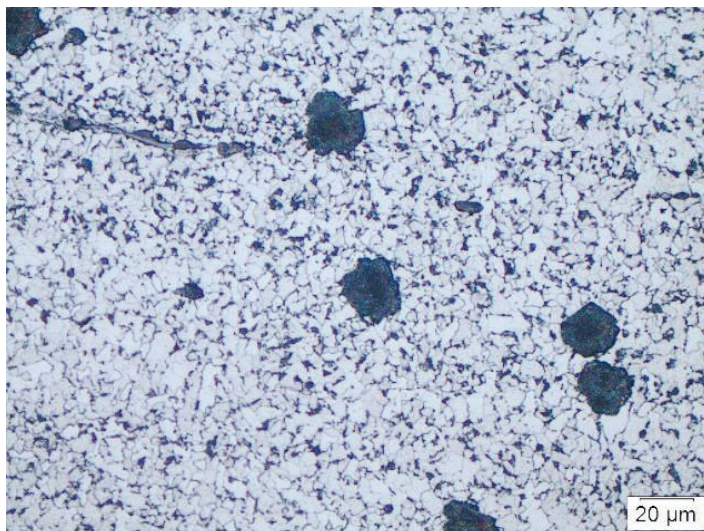
**Figura 4.31.-** Microestructura a 500X correspondiente a un acero de bajo contenido de carbono con matriz ferrítica y perlita laminar atacado con nital al 10%

**Fuente:** Propia



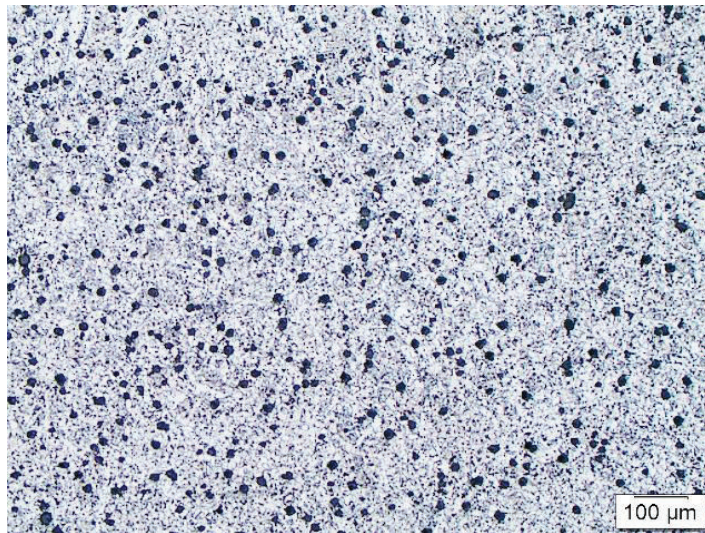
**Figura 4.32.-** Microestructura a 100X correspondiente a la ZAC con descomposición de la perlita distribuida uniformemente

**Fuente:** Propia



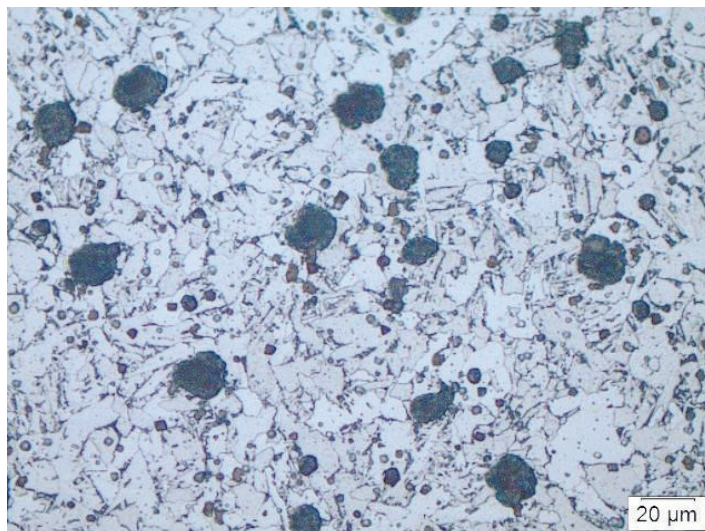
**Figura 4.33.-** Microestructura a 500X correspondiente a la ZAC con colonias de perlita y disminución del tamaño de grano ferrítico

**Fuente:** Propia



**Figura 4.34.-** Microestructura a 100X correspondiente al material de aporte con descomposición de la perlita con presencia de ferrita acicular

**Fuente:** Propia




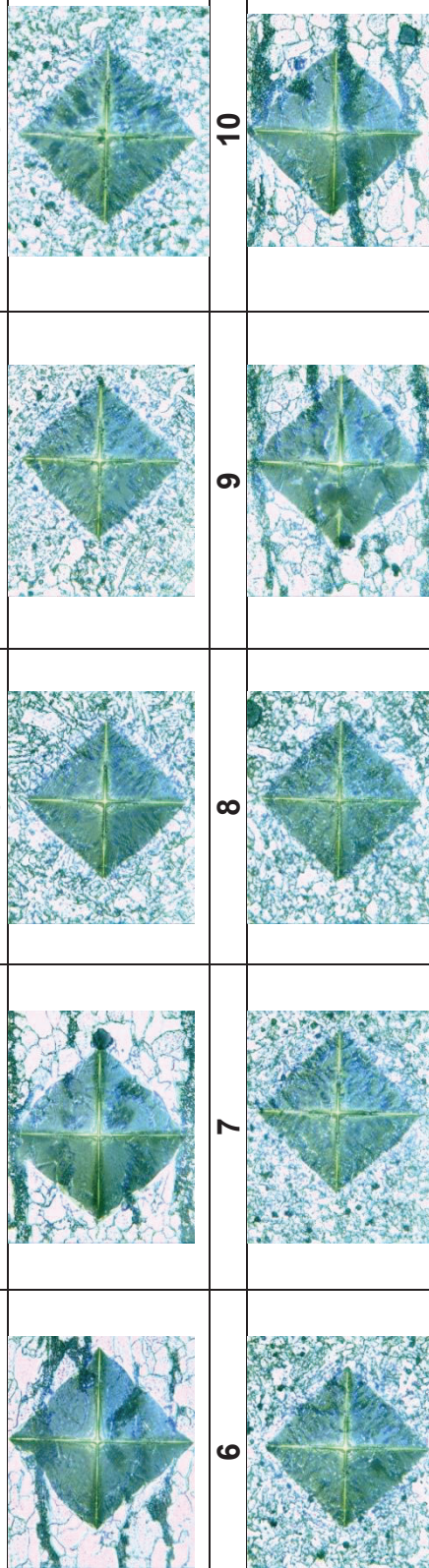
**Figura 4.35.-** Microestructura a 500X correspondiente a la zona del material de aporte con pequeñas concentraciones de escoria atrapada, se observa la descomposición de la perlita en finas colonias en una matriz de ferrita

**Fuente:** Propia

4.2.2.2.2 Microdurezas

El proceso para la obtención de las microdurezas se detalla en la sección 3.3.1.1.2

**Tabla 4.27.-** Macrografía de la probeta P2 a 50X – zona de microdureza y puntos de microdureza

Punto de microdureza									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
									
Ampliación punto de microdureza									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
									

Fuente: Propia

**Tabla 4.28.-** Durezas de la probeta P2 en Vickers y Rowell C

<b>Probeta P2</b>		
<b>#</b>	<b>dureza HV</b>	<b>Dureza HRC</b>
1	187,42	10,684
2	216,81	16,562
3	251,51	23,242
4	251,79	23,286
5	223,86	17,972
6	233,67	19,934
7	238,16	20,832
8	245,51	22,192
9	212,43	15,686
10	211,96	15,592

**Fuente:** Propia

#### 4.2.2.3 Ensayos destructivos de la probeta P2

El proceso para la obtención de las pruebas de tracción se encuentra especificado en la sección 3.3.1.2.1 y se realizó en la máquina universal de ensayos marca Tinius Olsen y para las pruebas de doblado lateral se usó una prensa ubicada en el laboratorio de soldadura.

##### 4.2.2.3.1 Ensayo de Tracción

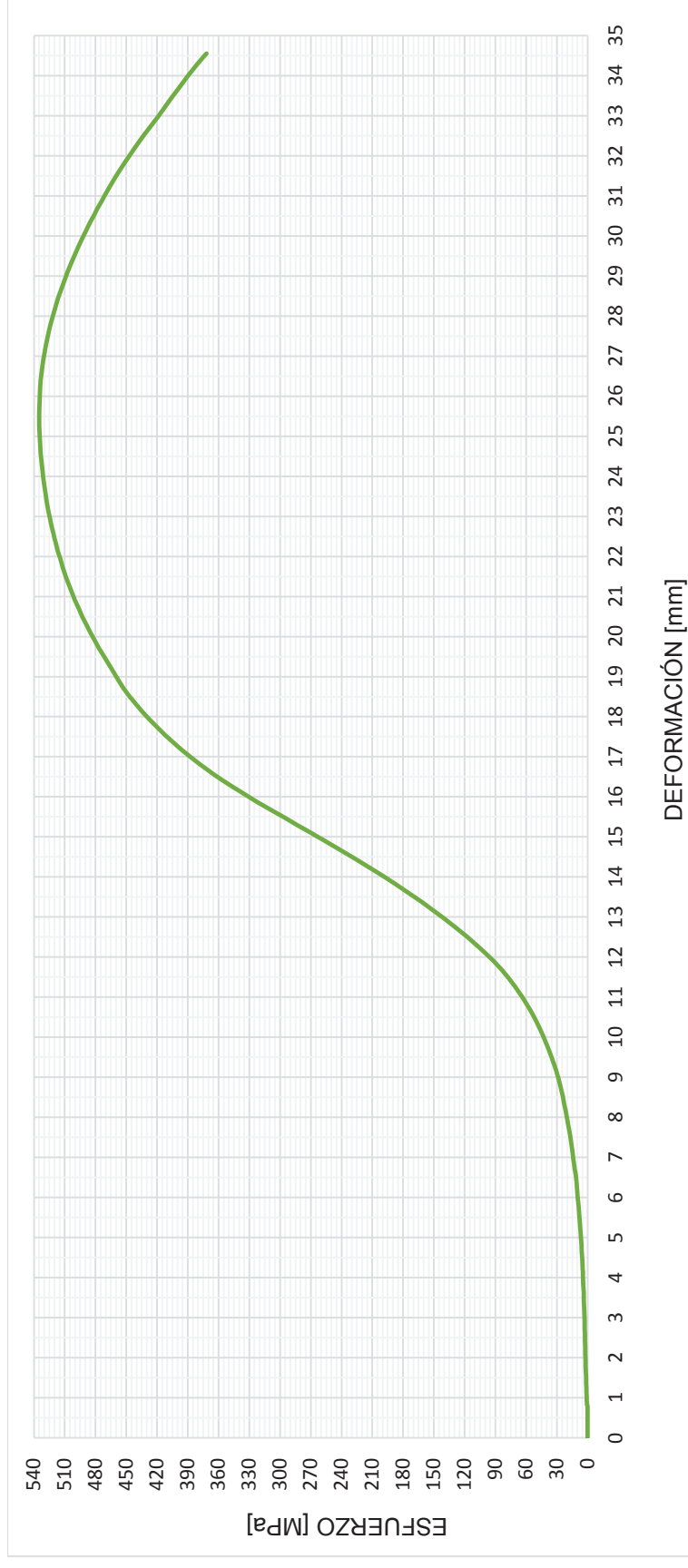


Figura 4.36.- Ensayo de Tracción probeta P2 – tracción T1

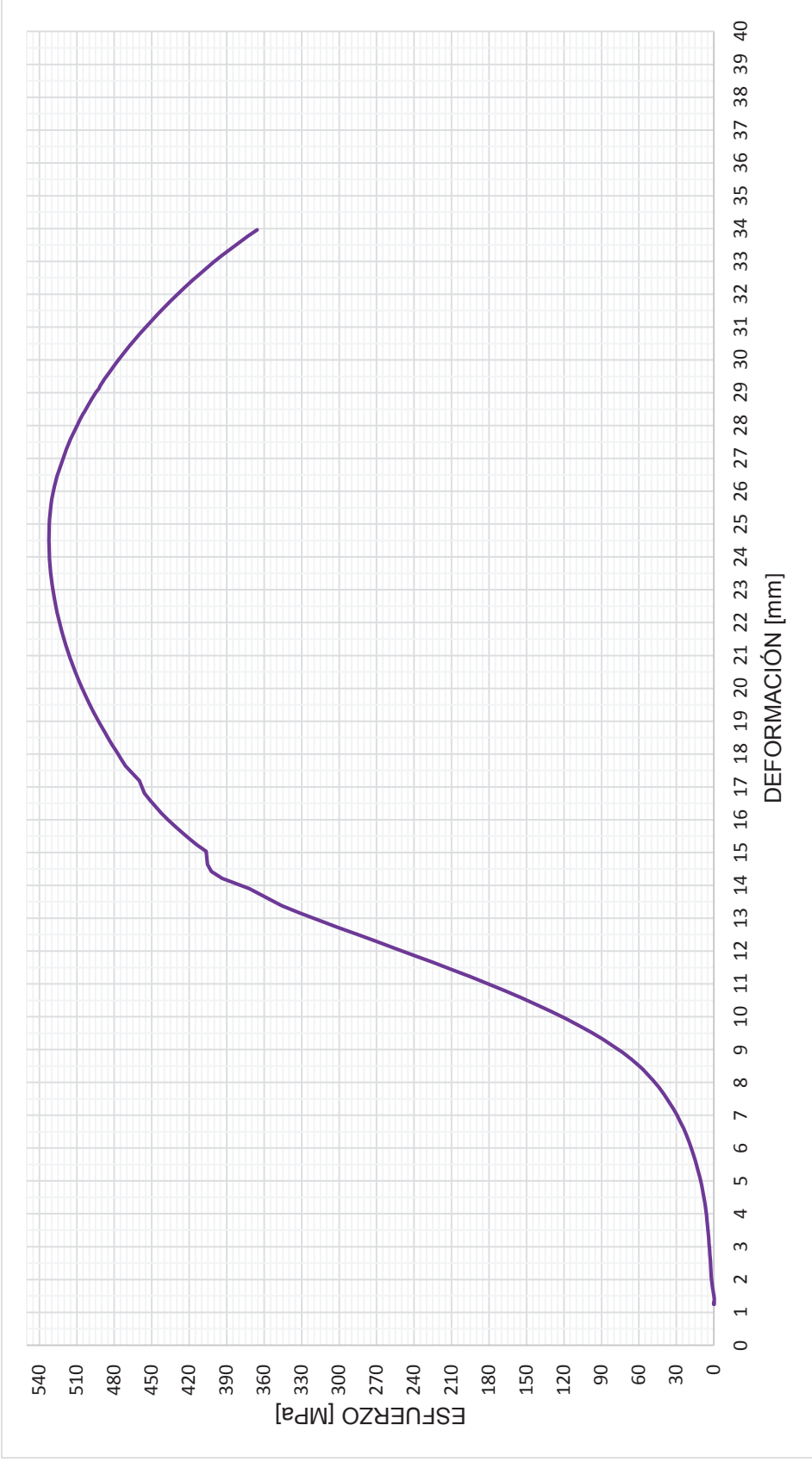






Figura 4.37.- Ensayo de Tracción probeta P2 -- tracción T2

Fuente: Propia

## 4.2.2.3.2 Ensayo de doblado

**Tabla 4.29.-** Ensayo de doblado lateral de la probeta P2

<b>Doblado lateral probeta P2</b>	
Doblado lateral 1 – P2DL1	Doblado lateral 2 – P2DL2
	
Doblado lateral 3 – P2DL3	Doblado lateral 4 – P2DL4
	

**Fuente:** Propia

En la probeta 2 doblado lateral 2 P2DL2 hay una discontinuidad abierta ubicada en la parte superior del bisel de la junta tipo K de 1,95 [mm]. En la probeta 2 doblado lateral 3 P2DL3 la discontinuidad es de 2,70 [mm] en la parte inferior del bisel de la junta tipo K.



### 4.2.3 PROBETA DE ESTUDIO P3

#### 4.2.3.1 Variables de Soldadura y Heat Input

De la misma manera partiendo de los parámetros de soldadura de la probeta P1, se aumentó el voltaje, amperaje, velocidad de alimentación del electrodo y velocidad de avance. En la Tabla 4.30, se observa los parámetros generales de la probeta P3.

**Tabla 4.30.-** Parámetros del cordón de soldadura para la probeta de estudio P3

Voltaje [V]	Amperaje [A]	Stick Out [mm]	Velocidad alimentación electrodo [mm/min]	Velocidad de avance [mm/min]	Flujo de gas [lt/min]
29,9 - 37,7	230 - 325	12	9652 – 11430	253,33 - 542,86	42

Fuente: Propia

En la Tabla 4.31, se presenta el Heat Input y los parámetros de soldadura de acuerdo al número pases que se realizaron.

**Tabla 4.31.-** Cálculo del Heat Input para la probeta P3

N° Pase	t [s]	Voltaje [V]	Amperaje [A]	Flujo de gas [lt/min]	Velocidad de alimentación [mm/min]	Velocidad de avance [mm/min]	Heat Input [J/mm]
1	60	29,9	230	42	9652	380,00	1085,84
2	54	35,2	269	42	11430	422,22	1345,57
3	70	36,3	282	42	11430	325,71	1885,69
4	45	36,3	301	42	10795	506,67	1293,90
5	42	36,8	296	42	10795	542,86	1203,94
6	60	36,5	274	42	11430	380,00	1579,11
7	60	37,7	302	42	11430	380,00	1797,69
8	50	37,7	325	42	11430	456,00	1612,17
9	86	34,5	278	42	10160	265,12	2170,59
10	90	34,4	275	42	10160	253,33	2240,53

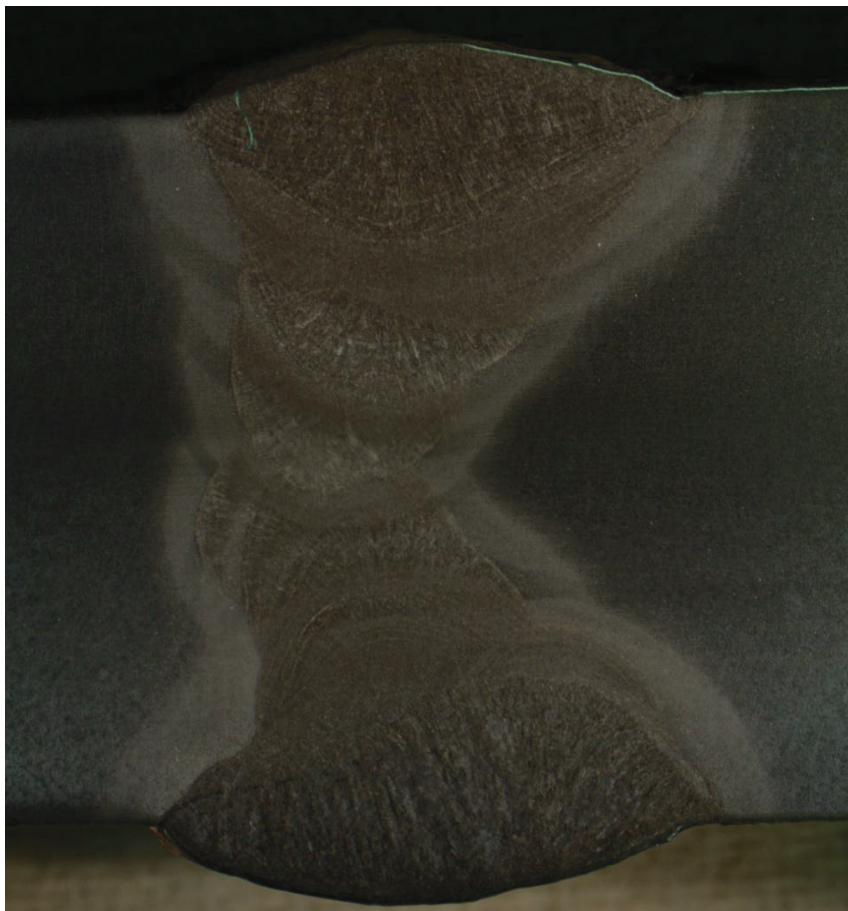
Fuente: Propia

#### 4.2.3.2 Ensayos metalográficos de la probeta P3

Para las macrografías se utilizó el microscopio Olympus SZX7, para las micrografías se utilizó el microscopio Olympus GX41 y para las microdurezas se utilizó un microdurómetro DUROLINE-M

##### 4.2.3.2.1 Macrografía

En esta macrografía se observa claramente 10 cordones de soldadura y la ZAC, además el cordón no presenta defectos visibles en todo el tramo de soldadura.



**Figura 4.38.-** Macrografía de la probeta P3 a 4X

**Fuente:** Propia

**Tabla 4.32.-** Variables relevantes de soldadura para la probeta P3

<b>Partes del Cordón</b>	<b>Medida [mm]</b>
Ancho ZAC Bisel Recto	2,53
Ancho ZAC Bisel en K Superior	2,02
Ancho ZAC Bisel en K Inferior	2,49
Sobremonta Superior	2,27
Sobremonta Inferior	2,93

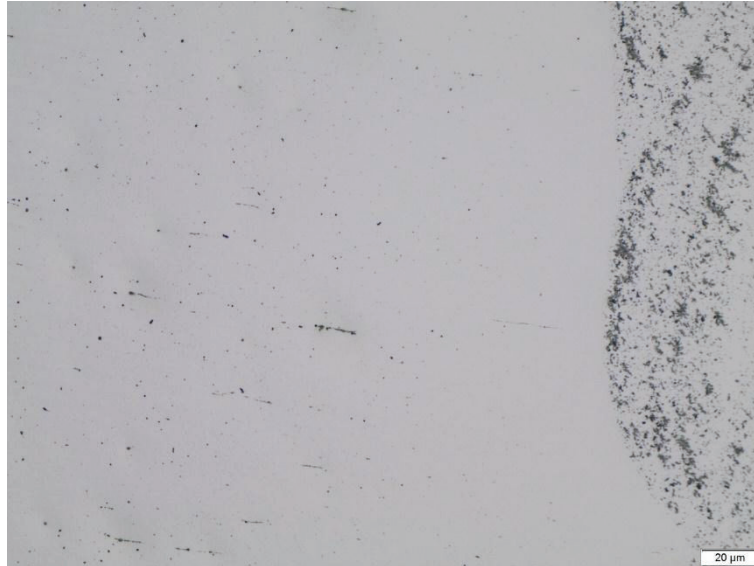
**Fuente:** Propia

**Tabla 4.33.-** Áreas de la ZAC y Cordón de Soldadura de la probeta P3

<b>Áreas de la ZAC y Cordón de Soldadura</b>	<b>Medida [mm<sup>2</sup>]</b>
Área ZAC Bisel Recto	67,82
Área ZAC Biseles en K	76,23
Área Material de Aporte	430,59

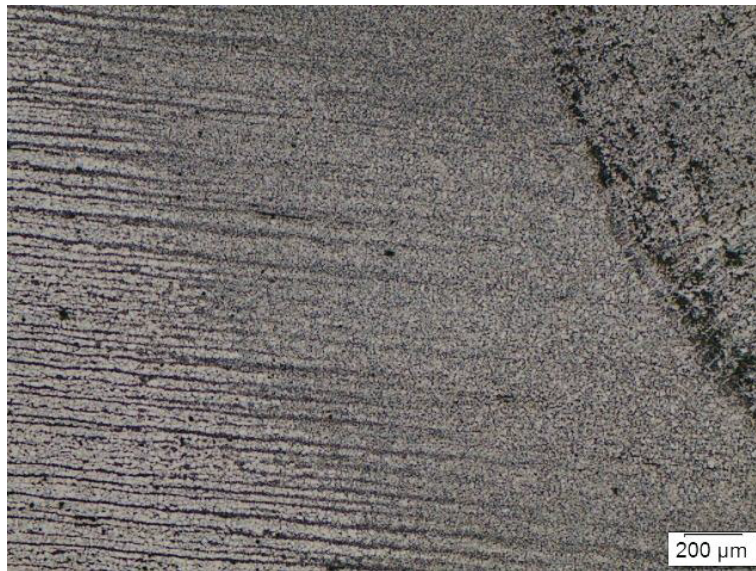
**Fuente:** Propia

#### 4.2.3.2.1 Micrografía de la probeta P3



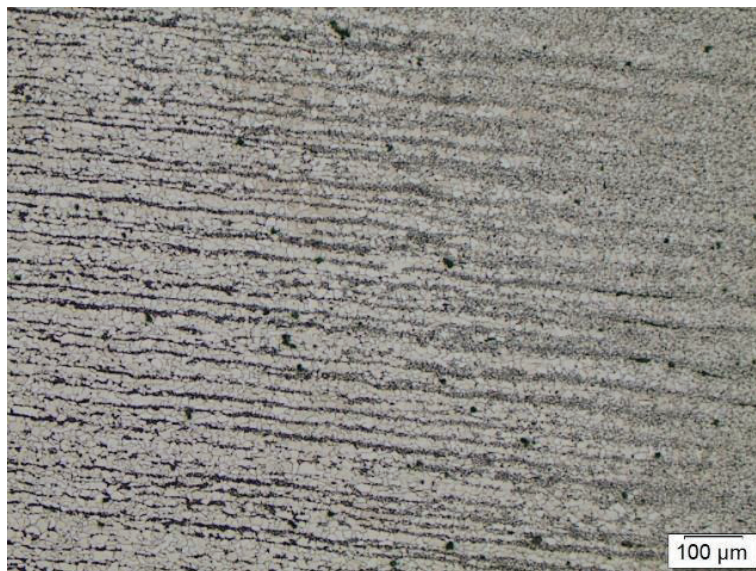
**Figura 4.39.-** Microestructura a 50X correspondiente al material base, ZAC y material de aporte de un acero de bajo contenido de carbono sin ataque químico

**Fuente:** Propia



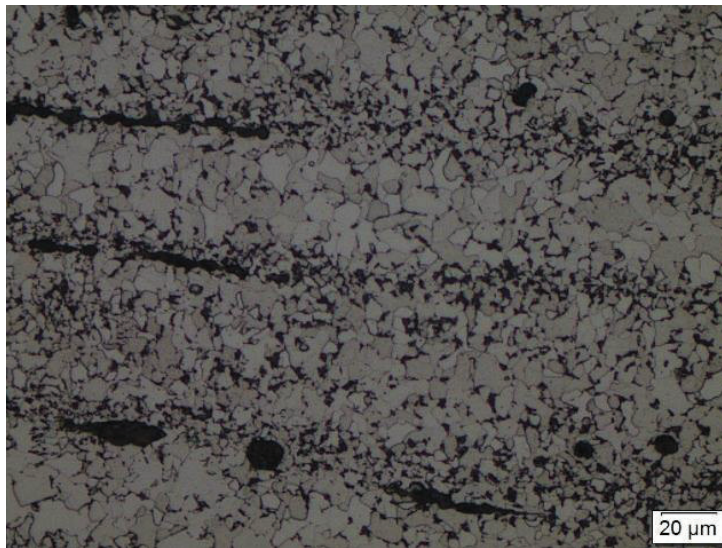
**Figura 4.40.-** Microestructura correspondiente a un acero de bajo contenido de carbono atacado con nital al 10 %. Se observa las zonas de material base, ZAC y material de aporte.

**Fuente:** Propia



**Figura 4.41.-** Microestructura a 100X correspondiente al material base y ZAC atacado con nital al 10%, con perlita laminar en una matriz ferrítica, en la zona de la ZAC la perlita tiende a disociarse.

**Fuente:** Propia



**Figura 4.42.-** Microestructura a 500X correspondiente al material base y ZAC atacado con nital al 10%, con perlita laminar en una matriz ferrítica, en la zona de la ZAC se aprecia la disminución del tamaño de grano ferrítico.

**Fuente:** Propia



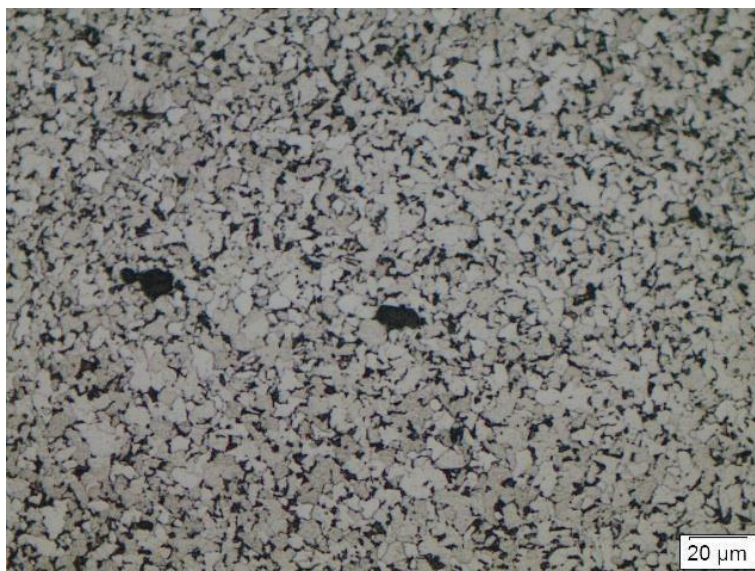
**Figura 4.43.-** Microestructura a 100X correspondiente al material base de un acero de bajo contenido de carbono con perlita en dirección al laminado en una matriz ferrítica.

**Fuente:** Propia



**Figura 4.44.-** Microestructura a 100X correspondiente a la ZAC atacada con nital al 10%

**Fuente:** Propia



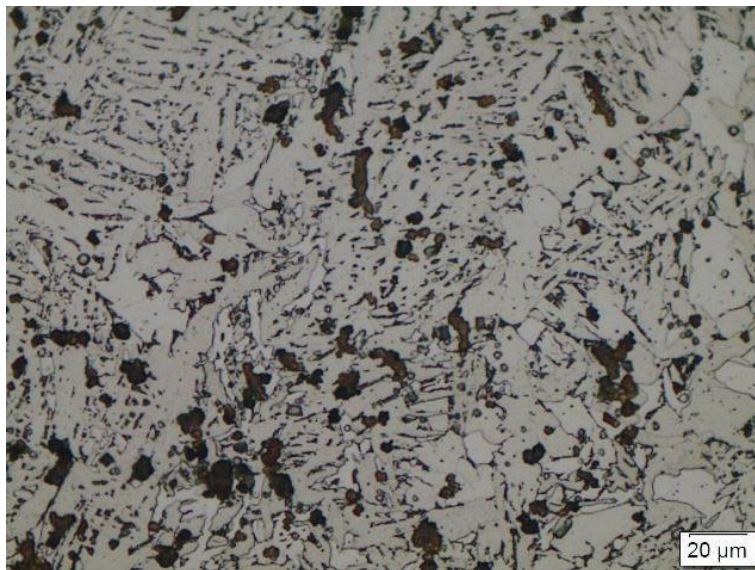
**Figura 4.45.-** Microestructura a 500X correspondiente a la ZAC atacada con nital al 10%, la perlita se deposita en los bordes de grano de la ferrita, el tamaño de grano disminuye.

**Fuente:** Propia



**Figura 4.46.-** Microestructura a 100X correspondiente al material de aporte atacada con nital al 10%

**Fuente:** Propia



**Figura 4.47.-** Microestructura a 100X correspondiente al material de aporte atacado con nital al 10%, con ferrita acicular, presencia de escoria atrapada y perlita depositada en los bordes de grano de la ferrita.

**Fuente:** Propia

4.2.3.2.2 Microdurezas

El proceso para la obtención de las microdurezas se detalla en la sección 3.3.1.1.2

**Tabla 4.34.-** Macrografía de la probeta P3 a 50X – zona de microdureza y puntos de microdureza

Punto de microdureza										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ampliación punto de microdureza										
1	2	3	4	5	6					
			7	8	9	10	11			

Fuente: Propia



**Tabla 4.35.-** Durezas de la probeta P3 en Vickers y Rowell C

<b>Probeta P3</b>		
<b>#</b>	<b>Dureza HV</b>	<b>Dureza HRC</b>
1	194,32	12,064
2	193,50	11,900
3	214,44	16,088
4	243,29	21,792
5	254,69	23,750
6	234,47	20,094
7	209,98	15,196
8	216,30	16,460
9	230,35	19,270
10	197,71	12,742
11	192,18	11,636

**Fuente:** Propia

### 4.2.3.3 Ensayos destructivos

El proceso para la obtención de las pruebas de tracción se encuentra especificado en la sección 3.3.1.2.1 y se realizó en la máquina universal de ensayos marca Tinius Olsen y para las pruebas de doblado lateral se usó una prensa ubicada en el laboratorio de soldadura.

#### 4.2.3.3.1 Ensayo de Tracción

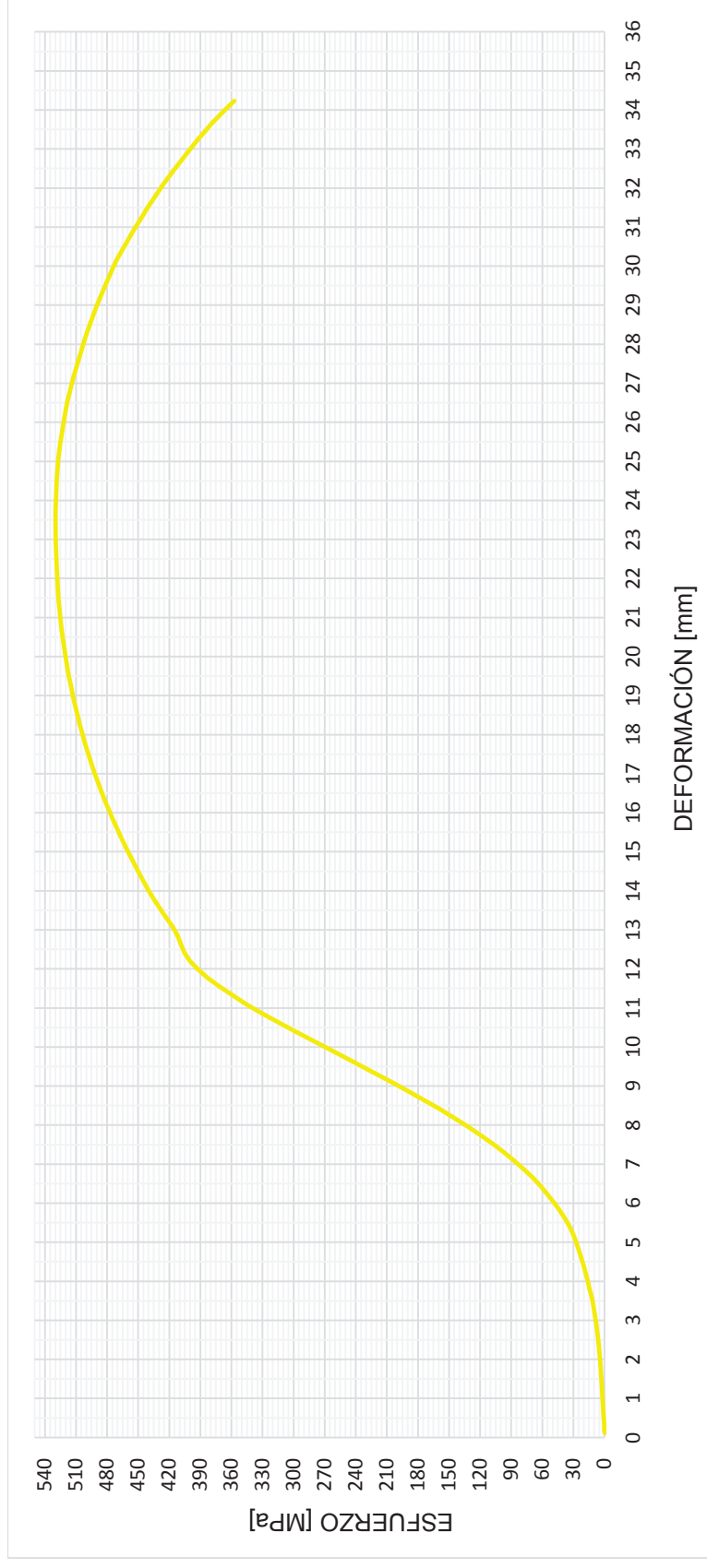
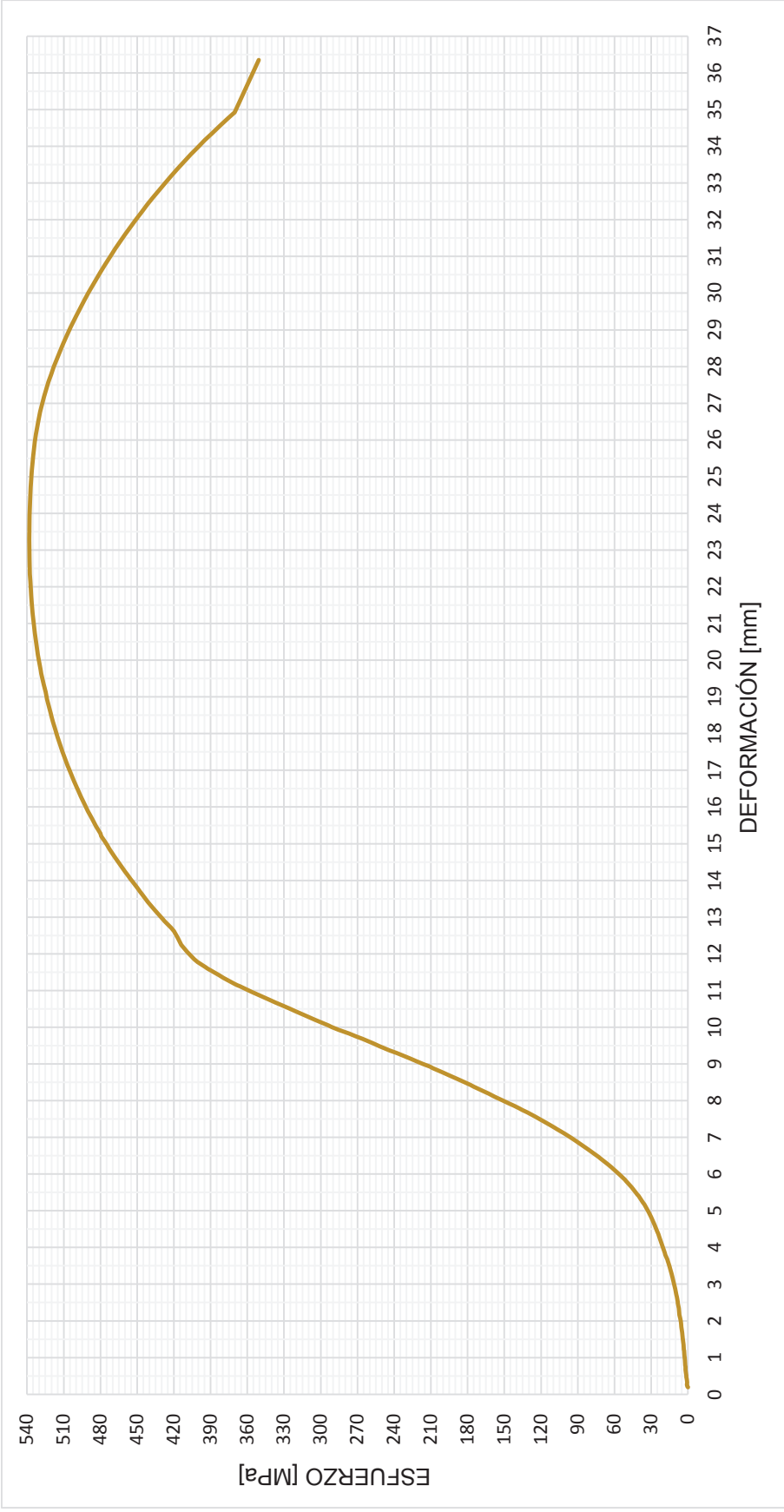


Figura 4.48.- Ensayo de Tracción probeta P3 – tracción T1



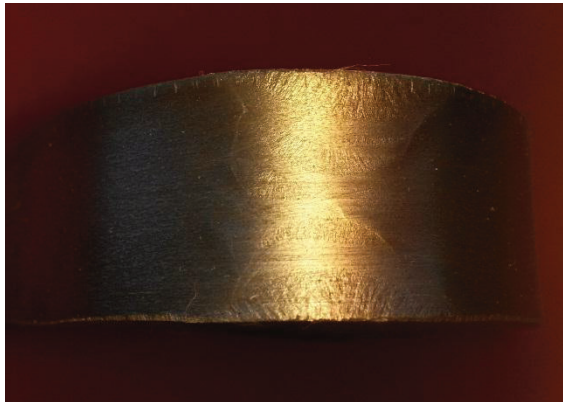



**Figura 4.49.-** Ensayo de Tracción probeta P3 – tracción T2

**Fuente:** Propia

## 4.2.3.3.2 Ensayo de doblado

**Tabla 4.36.-** Ensayo de doblado lateral de la probeta P3

<b>Doblado lateral probeta 3</b>	
Doblado lateral 1 – P3DL1	Doblado lateral 2 – P3DL2
	
Doblado lateral 3 – P3DL3	Doblado lateral 4 – P3DL4
	

**Fuente:** Propia

En las ilustraciones de la Tabla 4.36, se observa que ninguna probeta de doblez lateral presenta discontinuidades abiertas.

## CAPITULO 5

### 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 5.1 SELECCIÓN DE LA PROBETA DE CALIBRACIÓN

La selección de la probeta de calibración que presentó las mejores características se escogió en base a dos parámetros, el primero por inspección visual del cordón de soldadura y el segundo por los defectos encontrados en las macrografías.

Se realizaron cinco probetas de calibración, las dos primeras fue GMAW automática con un bugo, donde la función del soldador era presionar el gatillo de la pistola de soldadura para que exista alimentación de alambre y se cierre el circuito. Como se observó en las macrografías de las probetas de calibración PC1 (Figura 4.1) y PC2 (Figura 4.3), este método no funcionó, debido a que existe falta de fusión en la zona recta de la junta tipo K y en la zona de los biseles de la primera probeta; esto pudo ser causado debido a que el bugo impide el movimiento oscilatorio de la antorcha llevando la misma en línea recta. Por este motivo no se puede controlar la penetración, fusión y acabado del cordón de soldadura.

La tercera y cuarta probeta fueron realizadas con soldadura GMAW semiautomática, con un soldador, pero de igual manera presenta varias zonas con defectos; en la probeta PC3 (Figura 4.5) existe una clara falta de penetración en el pase de raíz a los dos lados de la junta tipo K, además una pequeña falta de fusión en uno de los biseles. En la probeta PC4 (Figura 4.7) se observa pequeñas zonas con falta de fusión, al igual que salpicaduras, esto pudo ocurrir por el empleo de voltaje y corriente bajos, así también la falta de experiencia del soldador en el manejo tanto del equipo como del proceso GMAW.

La quinta probeta PC5 (Figura 4.9) se realizó con otro soldador, el cual tenía experiencia en el proceso GMAW, al aumentar un porcentaje en las variables de soldadura, se observó pequeñas zonas donde existe falta de fusión pero solo en el material de aporte y una pequeña inclusión de escoria (Figura 4.10). En cuanto a la

parte recta y la zona de los biseles de la junta tipo K presentan una correcta fusión del material base con el material de aporte.

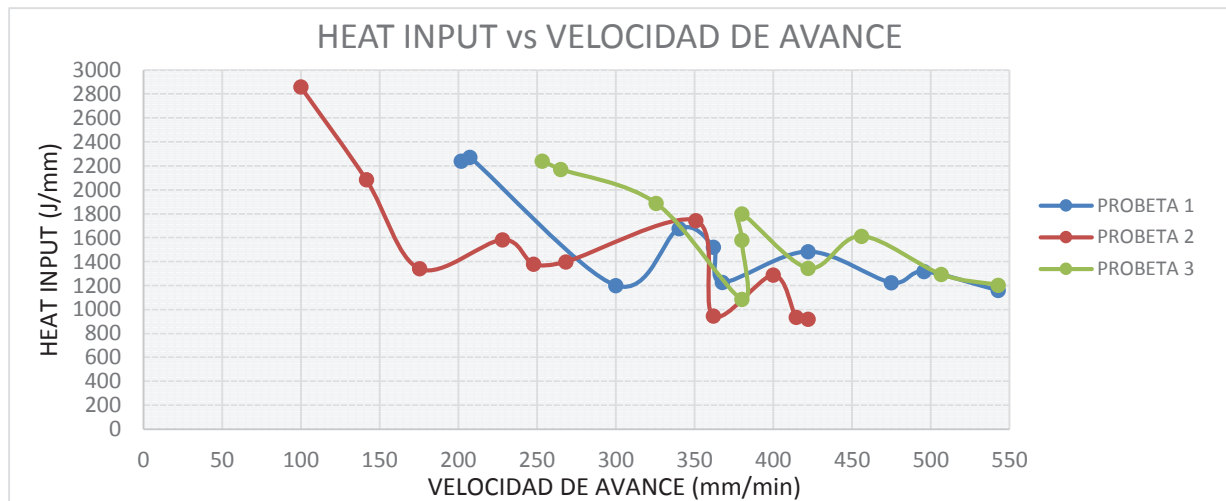
Tanto la inclusión de escoria como la falta de fusión se pueden corregir con una limpieza más adecuada en cada pase y aumentando un porcentaje más las variables de soldadura con ello garantizar que estos defectos desaparezcan por completo.

Las variables encontradas en la probeta PC5 son las que se emplean como referencia para realizar las probetas de estudio, ya que presenta las mejores características del cordón y buena fusión del material base con el material de aporte.

## 5.2 PROBETAS DE ESTUDIO

### 5.2.1 HEAT INPUT

Con las variables ya definidas, se soldó la probeta P1, la cual presenta un Heat Input promedio de 1351,44 [J/min], sin considerar los pases de presentación. Con este aporte de calor se garantiza que existe una correcta fusión entre el material base y el material de aporte, además esta probeta sirve de referencia para modificar las variables de soldadura en las demás probetas.



**Figura 5.1.-** Comparación del Heat Input vs Velocidad de Avance en las probetas de estudio

**Fuente:** Propia

Como se aprecia en la Figura 5.1, el Heat Input depende también de la velocidad de avance del soldador, ya que si esta velocidad es baja, habrá más material depositado, mayor Heat Input y por ende el área de la ZAC se incrementa en el material base.

Comparando la velocidad de avance de las probetas (Figura 5.1) se observa claramente que en la probeta P2 tiene la velocidad de avance más baja, motivo por el cual, en este punto el Heat Input es mayor, esto se debe a que el soldador en este pase lo hizo más lento para garantizar una fusión completa del material base con el material de aporte, además este cordón es el de presentación, motivo por el cual se lo realiza con más cuidado para evitar salpicaduras y mordeduras que afectan la calidad del cordón de soldadura. También se observa que P2 presenta el Heat Input más bajo, ya que este pase es de relleno y se lo hace con una velocidad de avance más alta, para evitar un depósito exagerado de material de aporte, que da como resultado zonas de incorrecta fusión, inclusiones de partículas no metálicas y porosidades. En cuanto a la probeta P3 se aprecia que tiene una velocidad de avance mayor que P1 en todo el proceso de soldadura, pero que el Heat Input en comparación con P1 se encuentra en el mismo rango. Esto se debe a que en esta probeta se incrementó los valores de voltaje y amperaje, para compensar este incremento se aumenta la velocidad de avance, con ello se evita defectos de falta de fusión, porosidad, grietas, ya que el material de aporte no desliza del material base.

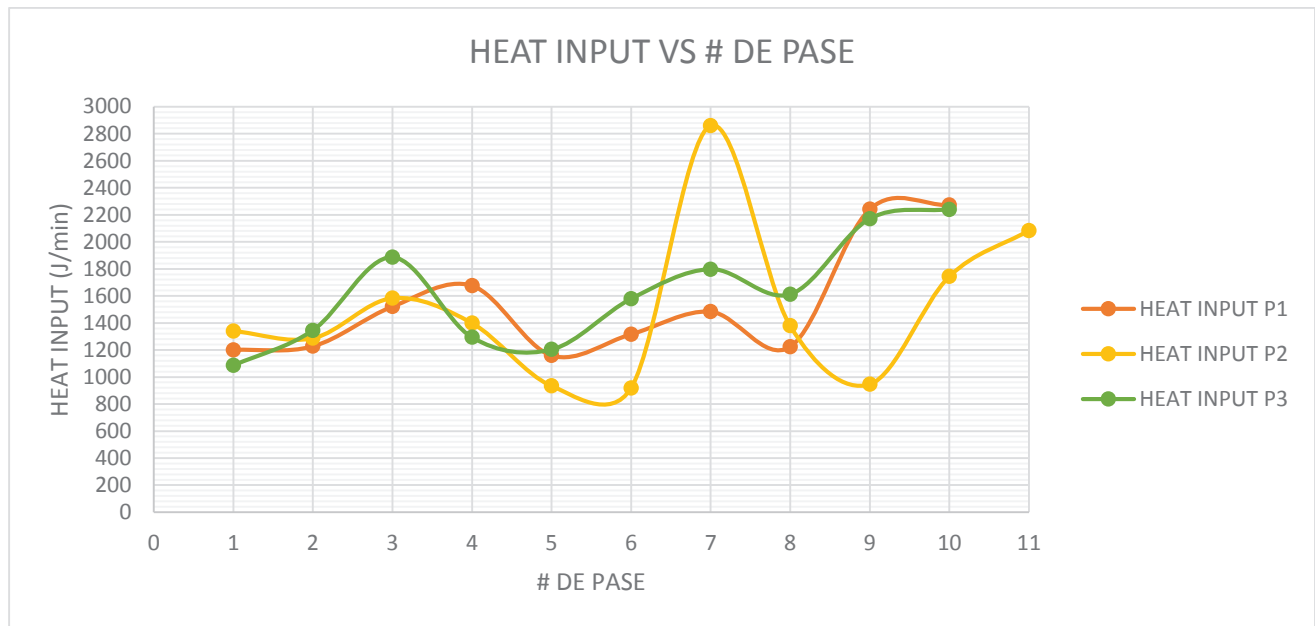
Para las siguientes probetas el Heat Input se va a reducir e incrementar respectivamente como se muestra en la Tabla 5.1.

**Tabla 5.1.-** Porcentaje de Variación del Heat Input

	<b>Heat input</b>	<b>% de variación</b>	<b>Acción</b>
Probeta 1	1351,45	0,00	Referencia
Probeta 2	1281,59	5,17	Reducción
Probeta 3	1475,49	9,18	Aumento

**Fuente:** Propia

En la Figura 5.2 se aprecia la variación del Heat Input en cada pase de las tres probetas.



**Figura 5.2.-** Comparación del Heat Input en cada pase

**Fuente:** Propia

Para apreciar de manera más clara la variación del Heat Input, se compara el voltaje y el amperaje de la probeta P2 y P3 con respecto a la P1, obteniendo los resultados que se indican en la Tabla 5.2 y en la Tabla 5.3.

**Tabla 5.2.-** Porcentaje de Variación Voltaje – Amperaje P2\_P1

Probeta 1		Probeta 2		% de comparación	
Voltaje [V]	Amperaje [A]	Voltaje [V]	Amperaje [A]	% voltaje	% amperaje
28,6	210	24,5	160	14,34	23,81
35	215	35,6	241	1,71	12,09
35,3	260	27,6	218	21,81	16,15
35,2	270	27,8	225	21,02	16,67
35,1	299	28,6	226	18,52	24,41
35,1	310	28,6	226	18,52	27,10
34,8	300	25,9	184	25,57	38,67
34,5	281	28,2	202	18,26	28,11
31,4	240	28	204	10,82	15,00
31,4	250	36,8	277	17,19	10,8

**Fuente:** Propia



**Tabla 5.3.-** Porcentaje de Variación Voltaje – Amperaje P3\_P1

Probeta 1		Probeta 3		% de comparación	
Voltaje [V]	Amperaje [A]	Voltaje [V]	Amperaje [A]	% voltaje	% amperaje
28,6	210	29,9	230	4,35	8,70
35	215	35,2	269	0,57	20,07
35,3	260	36,3	282	2,75	7,80
35,2	270	36,3	301	3,03	10,30
35,1	299	36,8	296	4,62	1,01
35,1	310	36,5	274	3,84	13,14
34,8	300	37,7	302	7,69	0,66
34,5	281	37,7	325	8,49	13,54
31,4	240	34,5	278	8,99	13,67
31,4	250	34,4	275	8,72	9,09

Fuente: Propia

Como se puede apreciar la variación del voltaje y amperaje es más significativo de probeta a probeta que la variación del Heat Input.

En conclusión el incremento o reducción del Heat Input va a afectar a las propiedades tanto mecánicas como microestructurales del material base, del cordón y de la ZAC, Motivo por el cual al final del estudio se encontrarán los mejores parámetros de soldadura en este material que ofrezca rapidez de operación en el trabajo

### 5.2.2 MACROGRAFÍA

El cordón de soldadura de la probeta P1 mostrado en la Figura 4.11, presenta unas excelentes características, ya que existe una buena fusión del material base con el material de aporte, no presenta porosidades, inclusiones de escoria, fisuras o falta de fusión. El área de la ZAC de la probeta P1 aumenta un 18 % en comparación al área de la probeta PC5. En la Tabla 5.4 se observa el porcentaje de variación del área de la ZAC de la probeta de calibración PC5 con respecto a la probeta de referencia P1.

**Tabla 5.4.-** Porcentaje de variación del área de la ZAC de la probeta PC5 y P1

	<b>PC5</b>	<b>P1</b>	<b>% de variación</b>
<b>Área parte recta</b>	83,72	113,82	35,95
<b>Área bisel</b>	82,28	82,48	0,24
<b>Área total</b>	166	196,3	18,25

**Fuente:** Propia

El área de P1 es mayor con respecto a PC5 debido a que se aumenta el Heat Input, para asegurar que existe una fusión completa entre el material base y el material de aporte.

En la macrografía de la probeta P2 (Figura 4.27) hay falta de fusión en la parte inferior de la K debido al bajo voltaje y amperaje utilizado.

En la macrografía de la probeta P3 (Figura 4.44) presenta excelente soldabilidad, material base y material de aporte completamente fusionados ya que con esta probeta se trabajó con mayor Heat Input.

En la tabla 5.5 se presenta la variación de las áreas de la ZAC y material de aporte de la probeta P2 con respecto a P1.

**Tabla 5.5.-** Porcentaje de Variación de áreas de Soldadura P2\_P1

	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>% de variación</b>
<b>Área parte recta</b>	113,82	66,70	41,40
<b>Área bisel</b>	82,48	63,86	22,58
<b>Área total</b>	196,3	130,56	33,49

**Fuente:** Propia

La probeta P2 presenta una reducción del área total de la ZAC en un 33,49 % en comparación con la probeta P1, esto es debido a la reducción de las variables de soldadura con respecto a la probeta P1.

En la tabla 5.6 se presenta la variación de las áreas de la ZAC y material de aporte de la probeta P3 con respecto a P1.

**Tabla 5.6.-** Porcentaje de Variación de áreas de Soldadura P3\_P1

	<b>P1</b>	<b>P3</b>	<b>% de variación</b>
<b>Área parte recta</b>	113,82	67,82	40,41
<b>Área bisel</b>	82,48	76,23	7,58
<b>Área total</b>	196,3	144,05	26,62

Fuente: Propia

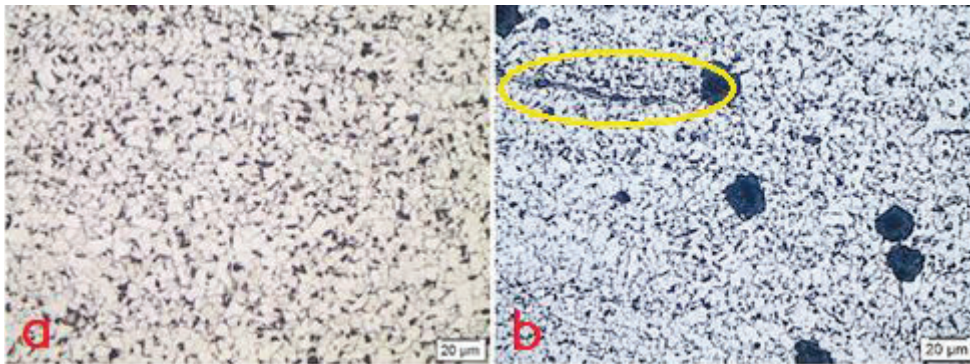
La probeta P3 presenta una reducción del área total de la ZAC en un 26,62 % en comparación con la probeta P1, esto es debido a la que la velocidad de avance aumento para compensar el incremento en las variables de soldadura.

### 5.2.3 MICROGRAFÍAS

Como se puede observar en la metalografía a 100X de la P1 del material base (figura 4.16), la perlita está en dirección al laminado de la placa ocurrido en el momento de fabricación. En la figura 4.17 se observan la matriz ferrítica con granos bien definidos, presentan un tamaño de grano de 10,89, medidos en base a la norma ASTM E112, mediante el método de intercepción.

Al comparar el mismo material base de la P1 (figura 4.16) con la P2 (figura 4.30) se observa la misma estructura cristalina, pero en estas se presentan unas manchas debidas al alcohol y al comparar con la P3 (figura 4.43) se observa la misma estructura cristalina. Esto se debe a que el material base en el momento de soldar no recibe ningún tratamiento que afecte a su estructura cristalina.

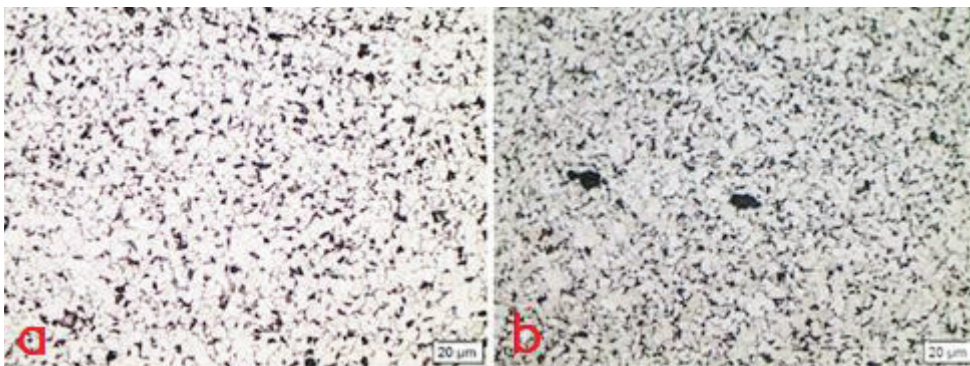
En la ZAC de la P1 (figura 4.19) se da la descomposición de la perlita en colonias y con una disminución de tamaño de grano ferrítico de 10,89 a 12,40 esto es debido a que esta zona es afectada por el Heat Input entregado en el momento de la soldadura, lo que produce la aparición de un mayor número de granos cuando comienza la segregación de la perlita en la ferrita, debido a la presencia de un mayor número de granos, esta zona presenta una mayor dureza en comparación al material base y al material de aporte.



**Figura 5.3.-** Comparación a 500X de la ZAC de la probeta P1(a) y P2 (b); se observa que hay una mayor descomposición de la perlita en granos más finos (b). Además en la probeta P2 (b) se observa una inclusión no metálica de sulfuro de manganeso.

**Fuente:** Propia

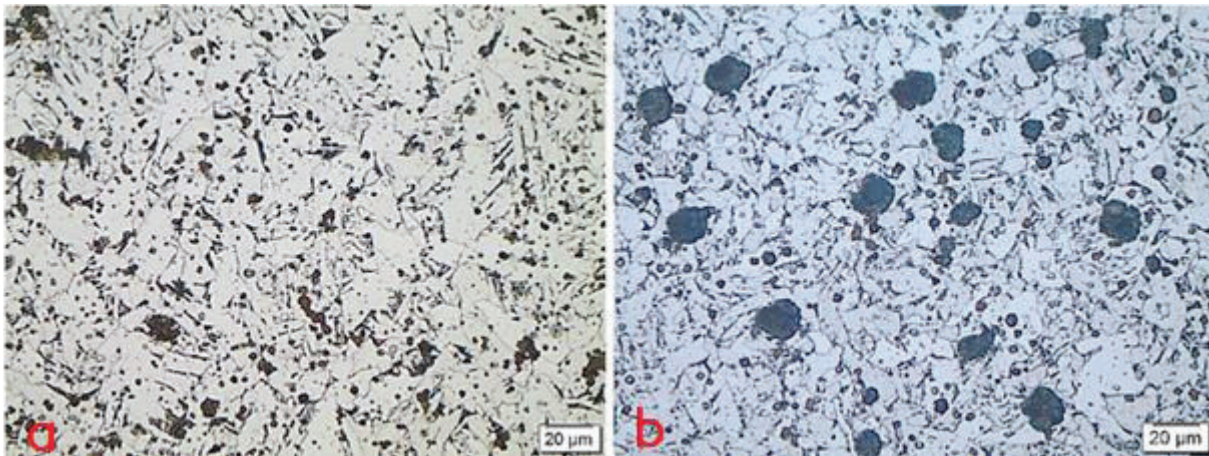
Al comparar la ZAC de la P1 con la ZAC de la P2 (figura 5.3) se observa que no hay una variación significativa en el aumento del tamaño de grano, estando este en 12,34. Y al comparar la ZAC de la P1 con la ZAC de la P3 (figura 5.4) se observa que el tamaño de grano disminuye pero no de manera considerable, permaneciendo en un valor de 12,72. Esto se debe a la cantidad de calor aportado tanto a P1, P2 y P3 varía, por lo tanto el comportamiento de esta zona cambia pero no de manera significativa.



**Figura 5.4.-** Comparación a 500X de la ZAC de la probeta P1 (a) y P3 (b); el tamaño de grano es más pequeño y la perlita comienza a depositarse en los bordes de grano de la ferrita (b).

**Fuente:** Propia

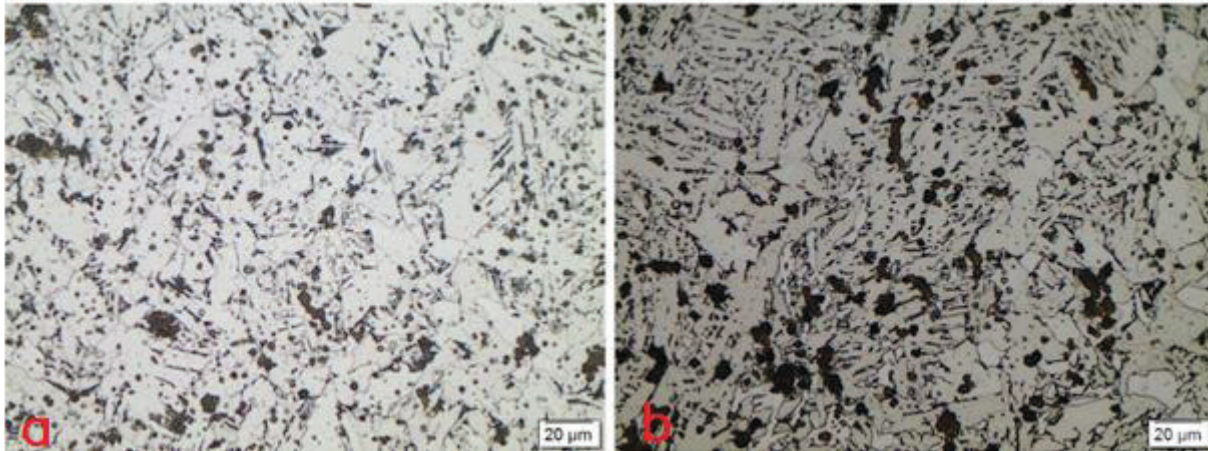
En el material de aporte de la P1 (figura 4.21) se observa colonias de perlita dispersas en la matriz ferrítica, el tamaño de grano a comparación con la ZAC de esta misma probeta aumenta levemente a un 12,34, pero en comparación con el tamaño de grano del material base ha disminuido de 10,89 a 12,34. Esto se debe a que en el material de aporte el electrodo se funde por el calor que es generado por el arco eléctrico. Además como hay un precalentamiento en el material a soldar, esto evita que exista un choque térmico y ayuda a un enfriamiento más uniforme.



**Figura 5.5.-** Comparación a 500X del material de aporte de la probeta P1 (a) y P2 (b); hay mayor presencia de ferrita acicular con perlita depositada en los bordes de grano (b).

**Fuente:** Propia

Al comparar el material de aporte de la P1 con la de P2 (figura 5.5), se observa una metalografía similar, pero con unas pequeñas manchas de alcohol. El tamaño de grano aumenta ligeramente a 12,06. Y al comparar con el material de aporte de la P3 (figura 5.6) el tamaño de grano ha aumentado a un 11,56. Esto se debe al aumento en el Heat Input de esta probeta, ya que empieza a formarse ferrita acicular y la perlita empieza a depositarse en los bordes de los granos ferríticos.



**Figura 5.6.-** Comparación a 500X del material de aporte de la probeta P1 (a) y P3 (b); se observa zonas con mayor presencia de ferrita acicular, presencia de escoria atrapada y perlita depositada en los bordes de grano de la ferrita (b).

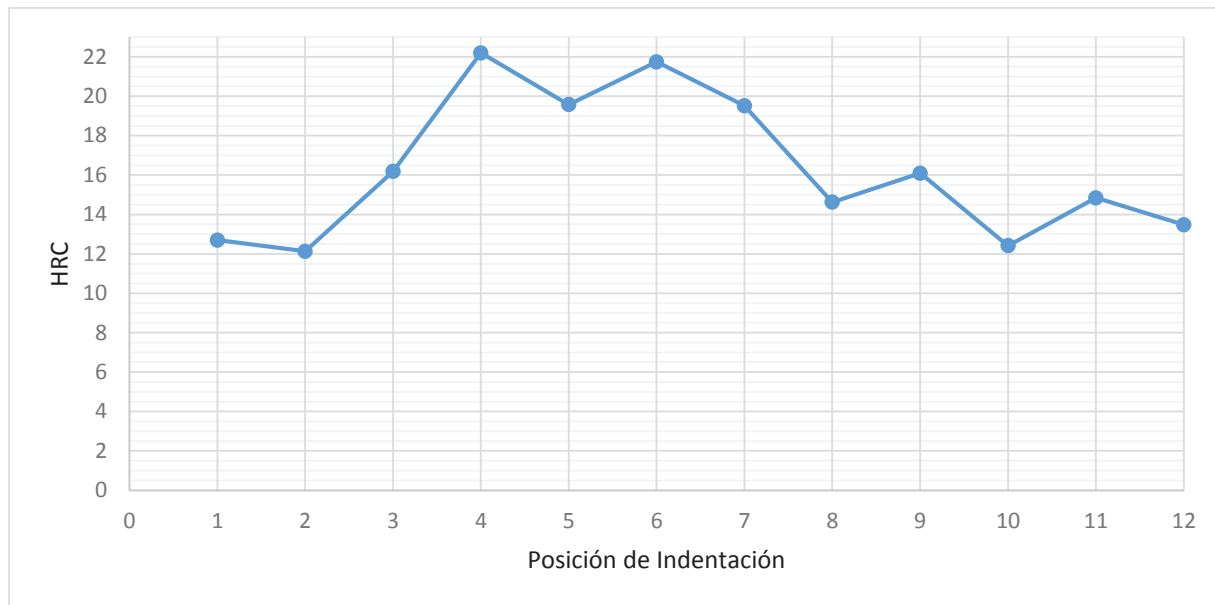
**Fuente:** Propia

## 5.2.4 MICRODUREZAS

### 5.2.4.1 Probeta P1

En la tabla 4.20 de la sección 4.2.1.2.2, se observa la zona de indentación en el material soldado y cada punto de indentación donde se puede diferenciar claramente el material base, la ZAC y el material de aporte.

En la figura 5.7 se presenta la variación de dureza respecto a la posición de indentación; desde la parte recta de la K (punto 1), en el material base la dureza es menor que en la ZAC, esto se debe a que en la zona afectada por el calor existe un cambio microestructural del material por el aporte de calor al soldar. El material de aporte presenta mayor dureza comparada con la ZAC y el material base, ya que en esta zona el material de aporte se funde y forma una nueva microestructura.

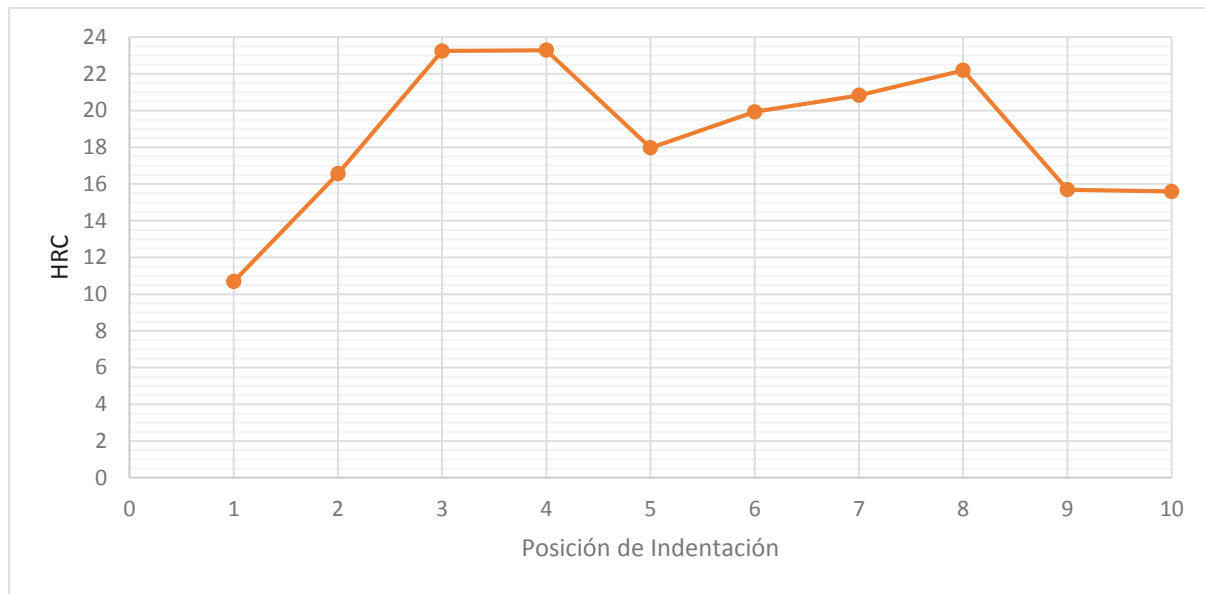


**Figura 5.7.- Dureza de la probeta P1 – Posición de indentación**

**Fuente:** Propia

#### 5.2.4.2 Probeta P2

En la tabla 4.27 de la sección 4.2.2.2.2, se observan los puntos de indentación y se diferencia claramente el material base, la ZAC y el material de aporte de la probeta P2. En la figura 5.8 se muestra la variación de dureza respecto a la posición de indentación; el primer punto tomado lejos de la ZAC presenta la menor de todas las medidas de dureza, por lo que se puede reconfirmar que la dureza aumenta conforme se acerca a la ZAC y al material de aporte. En el material de aporte se observa que presenta valores de dureza ligeramente mayores a los de la P1 esto pudo deberse a que el Heat Input de la probeta P2 es menor al de la probeta P1, pero en compensación la velocidad de avance disminuyó para evitar faltas de fusión.



**Figura 5.8.-** Dureza de la probeta P2 – Posición de Indentación

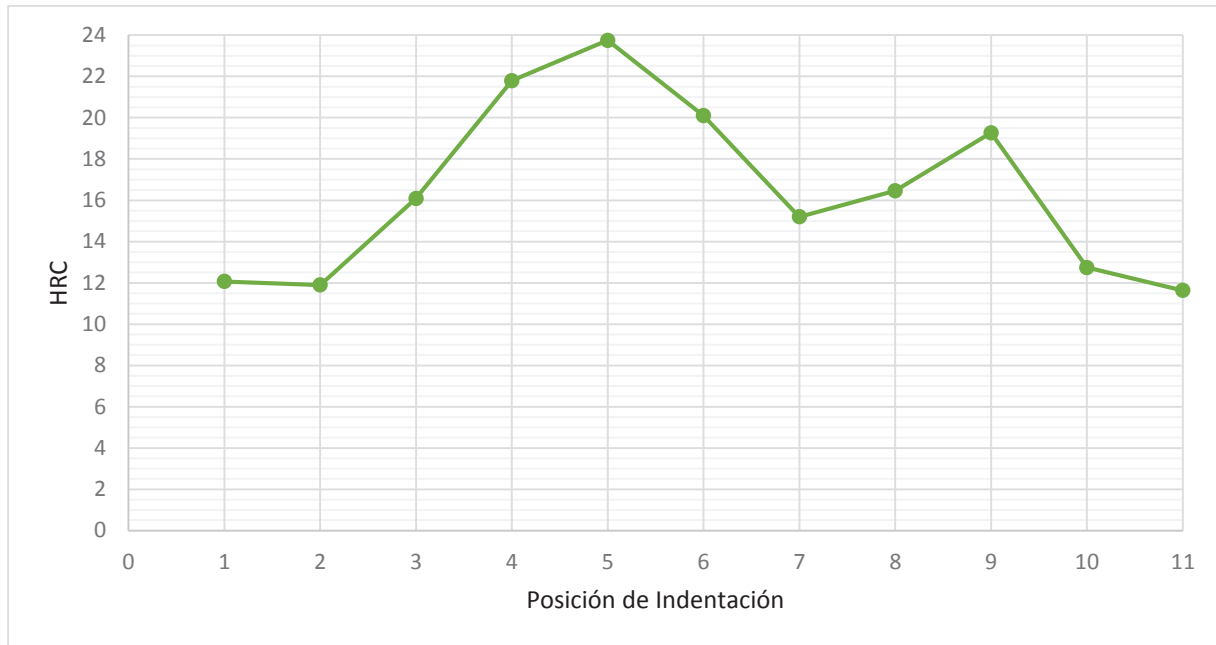
**Fuente:** Propia

### 5.2.4.3 Probeta P3

En la tabla 4.34 de la sección 4.2.3.2.2, se observan los puntos de indentación de la probeta P3 y se diferencia claramente la zona del material base, la ZAC y el material de aporte.

La figura 5.9 presenta la variación de dureza respecto a la posición de indentación; los dos primeros y dos últimos puntos corresponden al material base en donde la dureza es menor al resto de la soldadura. Los puntos 3 y 9 que se encuentran en la ZAC presentan una mayor dureza respecto a los del material base, como ya se mencionó anteriormente, este incremento en el valor de dureza se debe a que existe cambio microestructural en la ZAC. En los puntos 4, 5 y 6 correspondientes al material de aporte se observan los valores más altos de la dureza sin embargo en los puntos 7 y 8 que deberían ser valores similares en esta zona presentan una variación brusca, esto se debe a que el enfriamiento de las placas no fue el adecuado.





**Figura 5.9.- Dureza de la probeta P3 – Posición de Indentación**

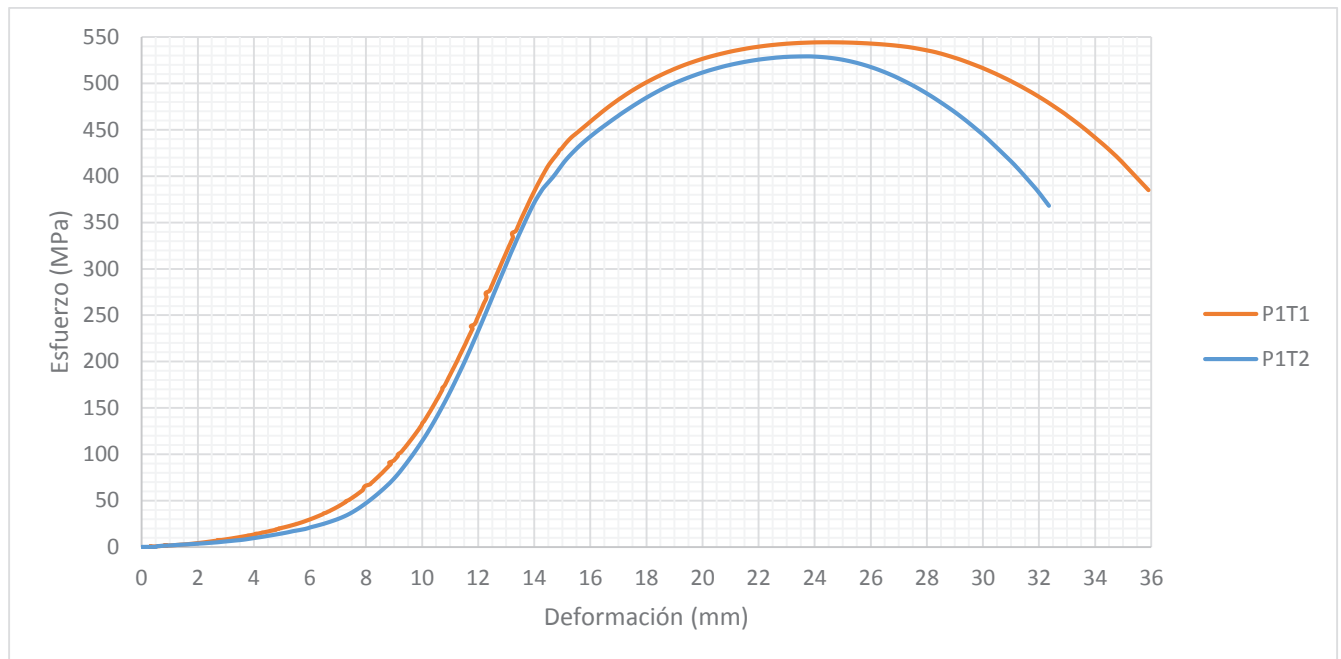
**Fuente:** Propia

## 5.2.5 PROBETAS DE TRACCIÓN

### 5.2.5.1 Probeta P1

Como se puede observar la falla ocurre en el material base, dando como resultado que el cordón de soldadura presenta unas excelentes características de fusión, como de resistencia y dureza.

Al momento de realizar la curva esfuerzo-deformación (figura 5.10) se observa que la resistencia máxima que soporta la probeta es del material base, que está dentro del rango que especifica la norma.



**Figura 5.10.-** Comparación del Diagrama Esfuerzo-Deformación para las probetas P1T1 y P1T2

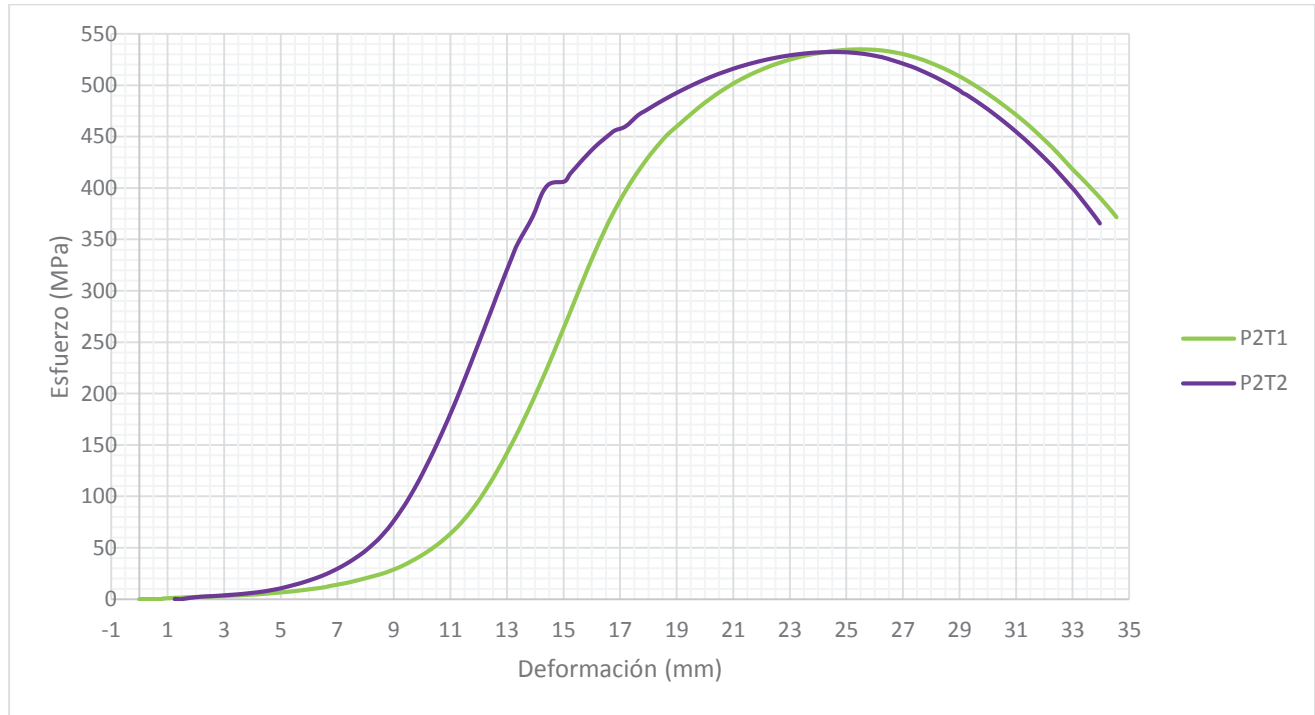
**Fuente:** Propia

Al comparar las curvas de Esfuerzo – Deformación de las probetas P1T1 y P1T2, se observa que el comportamiento al inicio de las curvas no varía significativamente, pero al superar el límite de proporcionalidad, la P1T1 tiene un valor de resistencia máxima, valores de deformación y resistencia a la rotura mucho más alto que la P1T2. Esto se debe a que al momento de maquinar no se logró obtener una medida similar en el cuello de la probeta, ya que en esta dimensión varía en 1 [mm]. Pero como la falla ocurre en el material base, cualquiera de las dos curvas sirve de referencia para la posterior comparación con las demás probetas ya que estas son las que presentan mejores características en el cordón de soldadura.

#### 5.2.5.2 Probeta P2

Estas probetas se realizaron con una reducción del 5,47% del Heat Input utilizado en la soldadura de la P1. Como se puede apreciar, de igual manera la falla ocurre en el

material base, lo que significa que al reducir el Heat Input, el cordón no presento defectos que afecten a la resistencia del mismo.



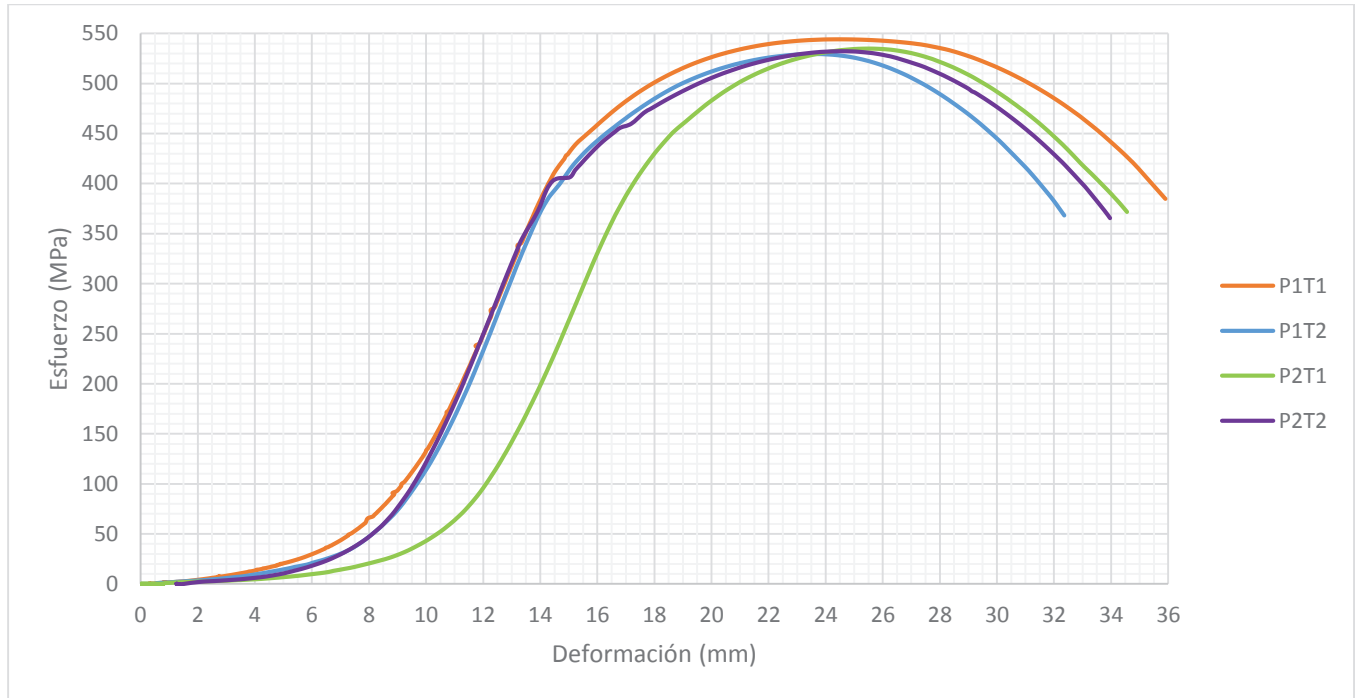
**Figura 5.11.-** Comparación del Diagrama Esfuerzo-Deformación para las probetas P2T1 y P2T2

**Fuente:** Propia

Al realizar la comparación de las curvas de P2T1 y P2T2 (Figura 5.11), se observa claramente que la probeta P2T1 tiene una resistencia a la deformación mayor que P2T2, pero en sí la pendiente de la zona elástica es igual para las dos curvas. En la zona plástica la resistencia máxima, la resistencia a la rotura y la deformación son muy similares. En la curva P2T1 no se aprecia claramente el fin del límite elástico, ni el punto de fluencia, esto se debe a que las curvas se realizaron con datos tomados manualmente, ya que la máquina universal de ensayos no contaba con el software para la realización de estas gráficas.

En cuanto a la variación de la zona elástica se debe a que de igual manera el cuello de la probeta no tiene las mismas dimensiones, variando en 0,8 [mm].

### 5.2.5.3 Comparación de las curvas esfuerzo – deformación probeta 1 y probeta 2



**Figura 5.12.-** Comparación del diagrama Esfuerzo – Deformación para las probetas P1 y P2

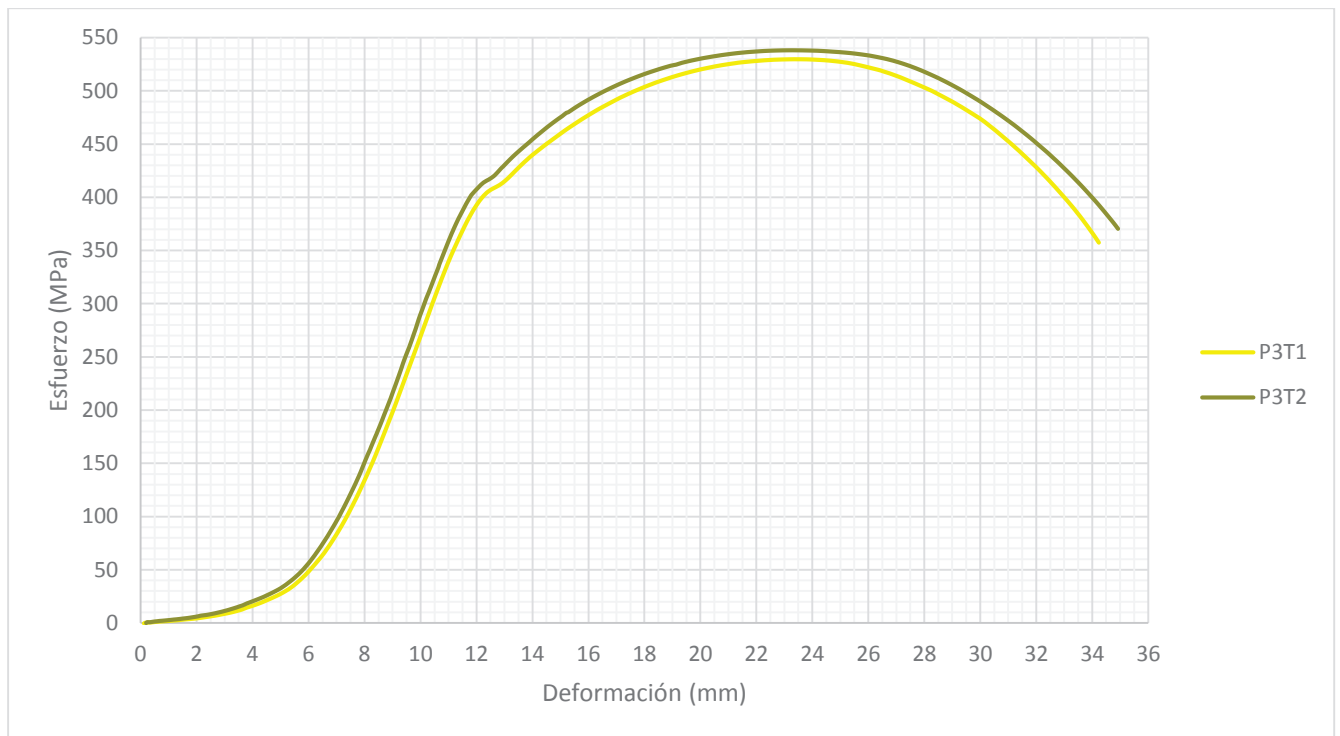
**Fuente:** Propia

Como se puede observar en la Figura 5.12, las curvas esfuerzo deformación de las probetas P2T1 y P2T2 tienen una menor deformación que la curva P1T1, pero mayor que la curva P1T2, así como la carga máxima está entre las dos curvas de comparación y la resistencia a la rotura casi está en el mismo nivel. En cuanto a la zona elástica se aprecia que las tres curvas son similares y que solo una de ellas empieza en una deformación más alta pero la pendiente es similar en las cuatro curvas.

De esto se concluye que la reducción del Heat Input en este caso no afectó al material base significativamente, dando resultados correctos comprendidos entre las probetas de referencia.

### 5.2.5.4 Probeta 3

Estas probetas se realizaron con un incremento del Heat Input del 9,18% con respecto a P1. Como se aprecia, la falla vuelve a ocurrir en el material base, lo que significa que al incrementar el Heat Input, el cordón incremento su resistencia y por ende no presenta fallas en el tramo de este, es decir que está correctamente fusionado con el material base.

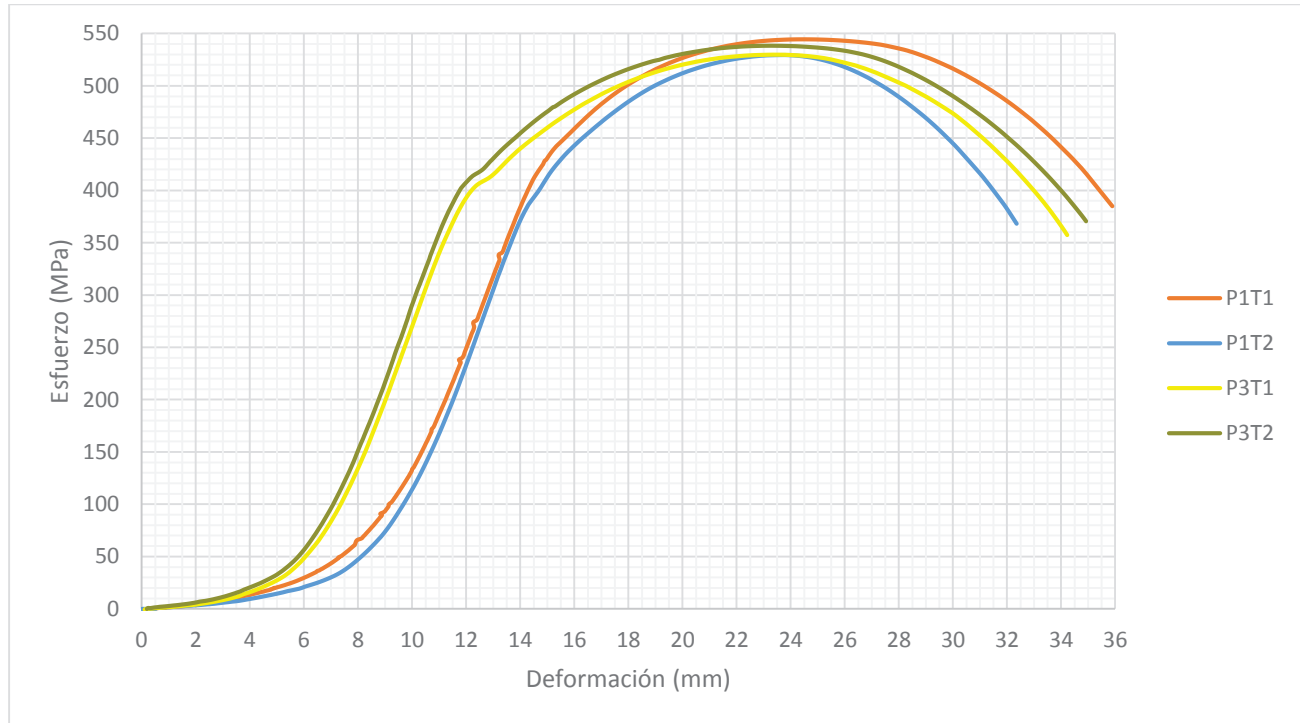


**Figura 5.13.-** Comparación del Diagrama Esfuerzo-Deformación para las probetas P3T1 y P3T2

**Fuente:** Propia

Como se aprecia en la Figura 5.13, las curvas P3T1 y P3T2 son muy similares y solo al final de las mismas en la zona de ruptura varían un poco, uno de los factores es la dimensión del cuello de la probeta ya que hay una variación de 0,47 [mm]. En estas gráficas también se diferencia de excelente manera la zona elástica de la zona plástica, así como el límite de fluencia del material, ya que los datos fueron más claros por lo que la zona de fluencia es más notoria.

### 5.2.5.5 Comparación de las curvas esfuerzo – deformación probeta 1 y probeta 3



**Figura 5.14.-** Comparación del diagrama Esfuerzo – Deformación para las probetas P1 y P3

**Fuente:** Propia

Como se aprecia en la zona plástica de la Figura 5.14, la resistencia máxima que soportan las probetas son similares. En la zona elástica, la pendiente de las curvas de la probeta P3 inicia a un menor valor de deformación en comparación con las de la P1, además se diferencia de mejor manera el punto de fluencia. Pero al final en la zona de estricción, las curvas de P3 están entre las curvas de P1 (referencia), lo que nos da de conclusión, que al incrementar el Heat Input, las propiedades mecánicas del material no se alteran considerablemente, además el cordón de soldadura presenta una mayor resistencia, dureza y una correcta fusión con el material base, sin tener ninguna discontinuidad que afecte la resistencia del mismo.

**Tabla 5.7.-** Datos obtenidos en el ensayo de Tracción

Probeta	Ancho Promedio	Espesor Promedio	Carga Máxima		Resistencia a la Tracción		Obs. 1	Deforma_ ción Unitaria
	[mm]	[mm]	N	lbf	MPa	Ksi		
P1T1	17,51	25,64	244474,3	54960	544,5	78978,7	FMB	0,3196
P1T2	18,40	25,65	249847,7	56168	529,4	76780,5	FMB	0,3396
P2T1	19,39	25,36	263023,3	59130	534,9	77579,7	FMB	0,3862
P2T2	18,60	25,65	254011,2	57104	532,4	77220,7	FMB	0,3772
P3T1	18,99	25,62	257716,6	57937	529,7	76828,0	FMB	0,4164
P3T2	18,52	25,43	253490,8	56987	538,2	78064,9	FMB	0,418

<sup>1</sup> FMB= Falla en el Material Base

**Fuente:** Propia

Como se aprecia en la Tabla 5.7, todas las probetas de tracción aprueban, ya que la falla ocurre en el material base. También se observa que la deformación unitaria aumenta en las probetas en donde se varía el Heat Input. Esto se debe a que el tamaño del cuello de la probeta no era regular. Además las probetas que presentan un mayor grado de deformación unitaria son las P3T1 y P3T2, ya que en esta se incrementó el calor de entrada al momento de soldar por lo que la microestructura del material cambia.

### **5.2.6 PROBETAS DE DOBLEZ LATERAL**

La norma ASME sección XI especifica que los defectos abiertos en la soldadura o en la ZAC no deben ser mayores a 3,2 [mm] (1/8 [pulg]). Las probetas que presentan discontinuidades abiertas se muestran en la tabla 5.8 y el resultado de todas las probetas se muestran en la tabla 5.9

**Tabla 5.8.-** Probetas de doblado lateral que presentan discontinuidades abiertas

<b>Doblado lateral probeta P1</b>		
<b>Probeta 1 doblado lateral 2</b>	<b>Discontinuidades [mm]</b>	<b>Aprueba</b>
	<p>1,40 [mm], en la parte central del bisel recto de la junta</p> <p>1,10 [mm], en la parte central del bisel de la junta</p>	SI
<b>Probeta 2 doblado lateral 2</b>		
	<p>1,95 [mm] en la parte superior del bisel en la junta tipo K</p>	SI
<b>Probeta 2 doblado lateral 3</b>		
	<p>2,70 [mm] en la parte inferior del bisel de la junta tipo K</p>	

Fuente: Propia



**Tabla 5.9.-** Resultados del Ensayo de Doblado Lateral

	<b>Código</b>	<b>Resultado</b>	<b>Observación</b>
<b>Probeta P1</b>	P1DL1	APRUEBA	Ninguna
	P1DL2	APRUEBA	Referirse a la Tabla 5.8
	P1DL3	APRUEBA	Ninguna
	P1DL4	APRUEBA	Ninguna
<b>Probeta P2</b>	P2DL1	APRUEBA	Ninguna
	P2DL2	APRUEBA	Referirse a la Tabla 5.8
	P2DL3	APRUEBA	Referirse a la Tabla 5.8
	P2DL4	APRUEBA	Ninguna
<b>Probeta P3</b>	P3DL1	APRUEBA	Ninguna
	P3DL2	APRUEBA	Ninguna
	P3DL3	APRUEBA	Ninguna
	P3DL4	APRUEBA	Ninguna

**Fuente:** Propia

El ancho de la discontinuidad abierta en la probeta P1DL2, P2DL2 y P2DL3 es menor al valor que se especifica en la norma como se observa en la Tabla 5.8; razón por la cual, todos los ensayos de doblez lateral aprueban.

La probeta P2 que se soldó con menor Heat Input presenta mayor cantidad de discontinuidades abiertas, mientras que la probeta P3 que se soldó con mayor Heat Input no presenta ninguna discontinuidad.

## CAPITULO 6

### 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 CONCLUSIONES

- Si se lograron cumplir los objetivos planteados ya que se determinó las características de la ZAC a través de los ensayos metalográficos y destructivos para diferentes parámetros de soldadura de voltaje y amperaje para las probetas P1, P2 y P3.
- Para encontrar las variables más adecuadas, se soldaron varias placas de prueba, de las cuales en base a probetas metalográficas (macrografías) se escogió la que mejor características presentó, tanto de fusión como de presentación del cordón de soldadura.
- Las pruebas que se realizaron en las probetas P1, P2 y P3, determinan que el material estuvo correctamente soldado y la ZAC no afecta considerablemente a las propiedades mecánicas, ya que en la prueba de tracción la falla tiene lugar en el material base y en la prueba de doblado lateral aunque se presentan discontinuidades en las probetas P1DL2, P2DL2 Y P2DL3, las mismas no exceden los 3.2 [mm] que especifica la norma; de tal manera que todas las probetas de los ensayos destructivos aprueban.
- La junta tipo K empleada en el presente estudio requiere que el soldador sea calificado en el proceso GMAW, de no ser así presentan problemas de falta de fusión.
- El empleo del bugo en las probetas de calibración impide que el cordón de soldadura sea uniforme en todo el tramo de la junta dando como resultados falta de fusión en los biseles y un depósito de material excesivo creando discontinuidades en el cordón de soldadura.
- El proceso de soldadura GMAW automático realizado con el bugo no da buenos resultados ya que el soldador controla la velocidad de alimentación del alambre

y además como el equipo de velocidad de avance se trababa en las guías la soldadura no era continua.

- La microestructura de la ZAC varía entre las probetas P1, P2 y P3 y se observa que el tamaño de grano de las probetas P2 y P3 es más pequeño en comparación con P1, esto se debe a que se realizó un correcto precalentamiento, así se evitó que en esta zona el material aumente su dureza y por consiguiente sea más frágil, ya que la ferrita no se transforma en ferrita acicular que es peligrosa en este tipo de uniones soldadas.
- El precalentamiento para este tipo de espesores es muy aconsejable, ya que disminuye el choque térmico entre el material base con el material de aporte, pero el excesivo precalentamiento es muy perjudicial, ya que el material de aporte no se funde con el material base, creándose un efecto de chorreo que trae consigo los defectos más dañinos para el cordón como son: grietas, faltas de fusión, porosidades que dan lugar a que la junta soldada falle.
- Al emplear voltajes y corrientes bajas de soldadura, crea defectos de falta de fusión en la parte recta de la junta tipo K, ya que con el poco calor suministrado por el arco eléctrico no logra fundir al material base con el material de aporte
- El empleo de CO<sub>2</sub> como gas protector da a lugar a una tasa de salpicaduras mayor que al empleo de un gas inerte como el argón o una mezcla entre el argón y el CO<sub>2</sub>.
- El tamaño del electrodo influye en la correcta fusión entre el MB y el MA ya que a mayor tamaño de alambre mayor voltaje/amperaje se puede emplear sin que el electrodo embote en el MB, además se consigue un mayor grado de aporte de material entre menos pasadas de cordón.
- En la micrografía (figura 4.55) muestra que en el material de aporte de la probeta P3 hay una mayor formación de ferrita acicular, esta endurece el material y a su vez lo vuelve más frágil, pero no presenta efectos sobre las pruebas mecánicas que se realizaron a las probetas tanto de tracción como de doblado lateral.
- En las microdurezas se muestra claramente que el material con mayor entrada de calor (P3) presenta un mayor grado de dureza en comparación a la probeta

de referencia (P1), debido al cambio microestructural que sufre tanto el material de aporte como el material base.

- Al comparar los valores del Heat Input en las probetas de estudio, no se aprecia de gran manera que esta variación sea significativa, en cambio al comparar los valores de voltaje/amperaje, se observa que hay una variación muy considerable, razón por la cual el soldador debe aumentar/disminuir la velocidad de avance para que el cordón de soldadura mantenga un aspecto uniforme, evite discontinuidades y que garantice la correcta fusión del material de aporte con el material base.
- En las gráficas esfuerzo deformación, como los datos fueron tomados manualmente y con la ayuda de una filmadora, no se logra la correcta distinción de la zona de fluencia del material base, pero en si los valores de carga máxima que soportan las probetas son muy similares entre sí.
- Las probetas de doblado lateral muestran las discontinuidades que pueden presentarse en el cordón de soldadura, con ello se determina si dichas discontinuidades son o no perjudiciales, empleando los criterios de la Norma utilizada para este fin.

## 6.2 RECOMENDACIONES

- Contratar un soldador que conozca del proceso GMAW y tenga experiencia en el mismo, para evitar que se presente faltas de fusión en los biseles de la junta tipo K y además garantice un buen acabado de presentación.
- Evitar el sobre ataque con nital en la probeta de micrografía, de no ser así, la probeta se daña y es necesario repetir todo el proceso metalográfico de preparación de la muestra.
- Utilizar voltajes y corrientes altos para garantizar la total fusión del material base con el material de aporte.
- Evitar el sobrecalentamiento en las probetas de estudio, ya que el material de aporte se chorrea con demasiado calor, generando fallas en el cordón.
- Mantener constantemente refrigeradas las probetas de ensayos metalográficos para evitar cambios microestructurales que arrojen datos irreales.
- Realizar la nivelación de las probetas de metalografía antes de realizar todos los pulidos, ya que al realizarlo al final puede dañar la probeta dando resultados no correspondiente a los reales.
- Verificar de acuerdo al catálogo del micro-durómetro el tiempo y la carga de indentación dependiendo del tipo del material a indentar.
- Realizar las pruebas metalográficas de las probetas inmediatamente después de realizar el ataque con nital para evitar que la contaminación con algún cuerpo extraño afecte a la visualización en el microscopio de las diversas zonas del cordón.
- Implementar el software en la maquina universal de ensayos para obtener una gráfica bien definida de esfuerzo-deformación.
- Verificar que el display de la maquina universal de ensayos este encendida, para evitar que los valores obtenidos de dicho ensayo sean errados.
- Para evitar una tasa de salpicaduras alta y obtener un arco de soldadura más estable se recomienda usar una mezcla de gases de Ar + 20-30%CO<sub>2</sub>.

- Para evitar socavamientos, salpicaduras y dar un buen acabado al cordón de soldadura se disminuye el voltaje, amperaje y la velocidad de alimentación del alambre.

## BIBLIOGRAFÍA

1. AGA. (2008). *Catálogo de electrodos comunes, especiales y gases para corte y soldadura*. Quito: LINDE GROUP.
2. Apraiz, J. (1968). *Tratamientos Térmicos de los Aceros (6ta Ed.)*. España: Dossat.
3. ASME. (2013). *Boiler and pressure vessel code IX*. USA: ASME.
4. Avner, S. (1988). *Introducción a la metalurgia física (2da Ed.)*. México: McGraw Hill.
5. AWS. (1996). *Manual de Soldadura (8va Ed., Tomo 1)*. México: Pearson Educación.
6. Callister, W. (2002). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Mexico: Ed. Reverté.
7. Funderburk, R. (1999). Key Concepts in Welding Engineering. *Welding Innovation Vol. XVI*, 1-4.
8. Giachino, J. W. (1988). *Técnica y Práctica de la Soldadura (2da Ed.)*. España: Reverté S.A.
9. Gonzáles, J. (1985). *Manual de Soldadura Eléctrica (4ta Ed.)*. España: CEAC.
10. Horwitz, H. (1976). *Soldadura: Aplicaciones y práctica*. México: Alfaomega.
11. Houldcroft, P. (1980). *Tecnología de los procesos de soldadura*. España: Cambridge University.
12. Kudrin, V. (1984). *Metalurgia del Acero*. Moscú: MIR.
13. Morsy, M., Mahdy, A., & Al-Hameed. (2014). Prevention of cold cracking in ASTM A 516 gr.70 steel weldment. *Journal American Science*, 111-118.
14. Moya, C. (n.d.). *Modelo predictivo de la tenacidad en la zona afectada por el calor en soldaduras de aceros al C-Mn*. TENCUN, E.S.D.I.

15. Pender, J. (1989). *Soldadura (3ra Ed.)*. México: McGraw Hill.
16. Quesada, H. Z. (2002). Métodos para calcular el precalentamiento de uniones soldadas. *Cuaderno F1*, 1, 2.
17. Ruiz, R. (2009). *"Folleto de Tratamientos Térmicos"*. Quito: FIM-EPN.
18. Saunders, H. (1997). *"MIG/MAG Welding Guide, For Gas Metal Arc Welding (GMAW)"*. USA: The James Lincoln Arc Welding Foundation.
19. Soldadura, L. d. (1012). *Folleto de Tecnología de Soldadura*. Quito: FIM-EPN.
20. West-Arco. (1992). *Catálogo de electrodos y productos West-Arco*. Colombia: Electromanufacturas S.A.
21. Autor: Struers Ensuring Certainty  
Título: Breve historia de los ensayos de Microdureza  
Obtenido de:  
[http://www.struers.dk/default.asp?top\\_id=0&main\\_id=0&sub\\_id=0&doc\\_id=470&admin\\_language=8](http://www.struers.dk/default.asp?top_id=0&main_id=0&sub_id=0&doc_id=470&admin_language=8)  
Última actualización: 17-08-2015



## **ANEXOS**

## **ANEXO 1**

### **CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA**

Soldadura en Estado Sólido (SSW):

- Soldadura en frío (CW)
- Soldadura por difusión (DEW)
- Soldadura por explosión (EXW)
- Soldadura por forjado (FOW)
- Soldadura por fricción (FRW)
- Soldadura por presión en caliente (HPW)
- Soldadura con rodillos (ROW)
- Soldadura ultrasónica (USW)

Soldadura Fuerte (B):

- Soldadura fuerte de arco (AB)
- Soldadura fuerte de bloque (BB)
- Soldadura fuerte por difusión (DFB)
- Soldadura fuerte por inmersión (DB)
- Soldadura fuerte de flujo (FLB)
- Soldadura fuerte en horno (FB)
- Soldadura fuerte por inducción (IB)

- Soldadura fuerte infrarroja (IRB)
- Soldadura fuerte por resistencia (RB)
- Soldadura fuerte a soplete (TB)
- Soldadura fuerte con arco de carbones gemelos (TCAB)

#### Soldadura Blanda (S):

- Soldadura blanda por inmersión (DS)
- Soldadura blanda en horno (FS)
- Soldadura blanda por inducción (IS)
- Soldadura blanda infrarrojo (IRS)
- Soldadura blanda con caudín (soldador) (INS)
- Soldadura blanda por resistencia (RS)
- Soldadura blanda con soplete (TS)
- Soldadura blanda por ondas (WS)

#### Soldadura por resistencia (RW):

- Soldadura por arco con presión (FW)
- Soldadura por resistencia con alta frecuencia (HFRW)
- Soldadura por percusión (PEW)
- Soldadura de resalto (RPW)
- Soldadura de costura por resistencia (RSEW)

- Soldadura de puntos por resistencia (RSW)
- Soldadura recalcada (UW)

Soldadura con gas combustible y oxígeno (OFW):

- Soldadura con aire y acetileno (AAW)
- Soldadura oxiacetilénica (OAW)
- Soldadura con oxihidrógeno (OHW)
- Soldadura a gas con presión (PGW)

Otras soldaduras:

- Soldadura por haz de electrones (EBW)
- Soldadura de electroescoria (ESW)
- Soldadura de flujo (FLOW)
- Soldadura por inducción (IW)
- Soldadura por haz de rayos laser (LBW)
- Soldadura por termita (TW)

Rociado térmico (THSP)

- Rociado por arco eléctrico (EASP)
- Rociado a la llama (FLSP)

Corte con oxígeno (OC):

- Corte con fundente químico (FOC)

- Corte con polvo metálico (POC)
- Corte con gas combustible y oxígeno (OFC)
  - Corte oxiacetilénico (OFC-A)
  - Corte con oxihidrógeno (OFC-H)
  - Corte con oxígeno y gas natural (OFC-N)
  - Corte con oxipropano (PFC\_P)
- Corte con arco y oxígeno (AOC)
- Corte con lanza de oxígeno (LOC)

Corte con arco (AC):

- Corte con arco de carbón y aire (AAC)
- Corte con arco de carbón (CAC)
- Corte con arco metálico y gas (GMAC)
- Corte con arco de tungsteno y gas (GTAC)
- Corte con arco metálico (MAC)
- Corte con arco y plasma (PAC)
- Corte con arco metálico protegido (SMAC)

Otros tipos de corte:

- Corte con haz de electrones (EBC)
- Corte con haz de rayos laser (LBC)\

## **ANEXO 2**

**WPS Y PQR PARA LAS PROBETAS DE ESTUDIO P1, P2 Y P3**



Nombre Compañía:	E.P.N.	No. Identificación:	TESIS001
PQR No.:	TEST001	Fecha:	
Según Norma:	ASME IX	Realizado por:	Salazar Escobar Adriana Victoria Cajamarca Guambi Juan Gabriel
		Organización:	

<b>Artículo I.</b>	<b>Junta Utilizada</b>	<b>Artículo V.</b>	<b>Técnica de Soldadura</b>
Tipo de Junta:	Junta en K	Proceso de Soldadura:	GMAW
Abertura raíz:	3 [mm]	Tipo de Soldadura:	Manual      Semiautomática      X      Automática
Talón:	N/A	Soldadura a:	Un lado      Dos lados      X
Ángulo de ranura:	45°	Cordón de respaldo:	Sí      No      X
Placa de respaldo:	N/A	Limpieza:	
Preparar bisel:	Sí	Pase raíz:	Disco y grata
Método:	Limado	Pase siguientes:	Disco y grata

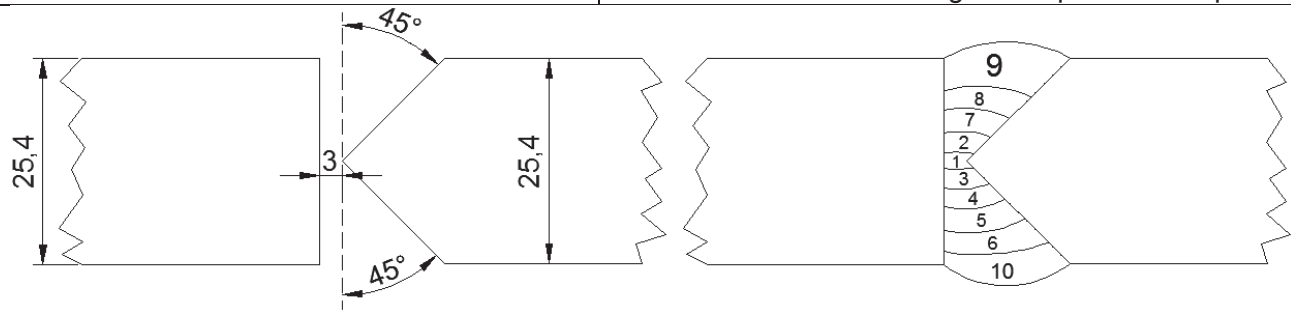
<b>Artículo III.</b>	<b>Metal Base</b>
Especificación:	A 516 Grado 70
Espesor:	25,4 [mm]
Diámetro:	N/A
P. N°:	1
Grupo N°:	2

<b>Artículo III.</b>	<b>Metal Aporte</b>
Diámetro:	1.2 [mm]
Denominación AWS:	ER 70 S-6
Casa Comercial:	Linde S.A.
Denominación comercial:	ER 70 S-6
A. N°:	1
F. N°:	6

<b>Artículo VI.</b>	<b>Posición de Soldadura</b>
Posición de Soldadura:	1G
Progresión:	De derecha a izquierda
Técnica:	Arrastre:      Empuje:      X
Un Pase:	Varios pases:      X
<b>Pre calentamiento:</b>	167 °C
<b>Tiempo entre pases:</b>	1:00 min

<b>Artículo IV.</b>	<b>Gas Protección</b>
Tipo:	CO2
Caudal:	25 lt/min

<b>Artículo VII.</b>	<b>Notas</b>
Asegurar alineación de las juntas	
Asegurar limpieza de las piezas	



No de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De Avance (mm/min)	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro	Tipo y polaridad	Intensidad (Amperios)			Oscilado	Recto
1	ER 70S-6	1.2	DC+	210	28,6	300	X	
2	ER 70S-6	1.2	DC+	215	35	367,74	X	
3	ER 70S-6	1.2	DC+	260	35,3	361,90	X	
4	ER 70S-6	1.2	DC+	270	35,2	340,30	X	
5	ER 70S-6	1.2	DC+	299	35,1	542,86	X	
6	ER 70S-6	1.2	DC+	310	35,1	495,65	X	
7	ER 70S-6	1.2	DC+	300	34,8	422,22	X	
8	ER 70S-6	1.2	DC+	281	34,5	475	X	
9	ER 70S-6	1.2	DC+	240	31,4	201,77	X	
10	ER 70S-6	1.2	DC+	250	31,4	207,27	X	

**FIM-EPN****LABORATORIO DE SOLDADURA****Registro de calificación del procedimiento (PQR)**Nombre Compañía: E.P.N  
Según norma: ASME IXInspector: Salazar Escobar Adriana Victoria  
Cajamarca Guambi Juan GabrielWPS No: TESIS001  
Fecha:

Nombre del Soldador: Abel Llambo

Proceso de soldadura: MANUAL SEMIAUTOMATICO AUTOMATICO  
SMAW: FCAW: GMAW: X SAW:Tipo y grado del metal base: Especificación: A516 G.70 Diámetro: N/A Espesor: 25,4 [mm]  
P No.: 1 Grupo No.: 2

Juntas Utilizadas: Tipo de junta: K Abertura de raíz: 3 [mm] Ángulo de ranura: 45° Respaldo: N/A

Posición de soldadura: 1G Dirección de soldadura: Izquierda a derecha Tiempo de soldadura: 00:10:17

Metal de aporte: Denominación AWS: ER 70S-6 SFA No.: A5.18 Diámetro: 1,2 mm  
Denominación Comercial: ER 70S-6 Marca: AGA

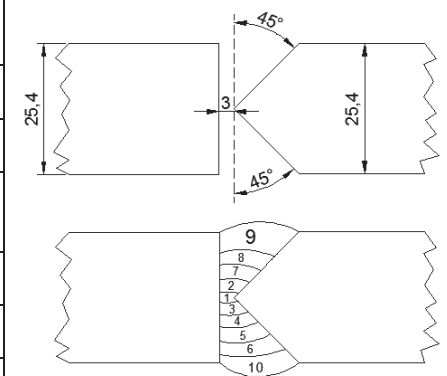
Gas de protección: Activo Tipo: CO2 Caudal: 25 lt/min

Precalentamiento: 160 °C Temperatura entre pases: 145 °C

Tipo de máquina de soldador: Lincoln Electric

**PARAMETROS DE SOLDADURA**

Pases No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Proceso	GMAW SEMIAUTOMATICO									
Tipo de electrodo (AWS):	ER 70S-6									
Especificación (SFA) No.	A5.18									
Diámetro (mm):	1,2									
Velocidad de soldadura (mm/min):	300,00	367,74	361,90	340,30	542,86	495,65	422,22	475,00	201,77	207,27
Voltaje:	28,6	35	35,3	35,2	35,1	35,1	34,8	34,5	31,4	31,4
Amperaje:	210	215	260	270	299	310	300	281	240	250
Dirección:	De izquierda a derecha									
Tipo de corriente y polaridad:	DC +									
Código de soldador:	ABELTESIS001									

**Detalle de la Junta****EXAMENES****ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS**

INSPECCIÓN VISUAL: CALIFICADO: SI DESCALIFICADO:

**ENSAYOS DESTRUCTIVOS****RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN**

Muestra No.	Identificación de Laboratorio	Aprobación	OBSERVACIÓN
P1T1	LAEV	SI	Falla material base
P1T2	LAEV	SI	Falla material base

**RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DOBLADO**

Muestra No.	Identificación de Laboratorio	Aprobación	OBSERVACIÓN
P1DL1	LABSOLDADURA	SI	No presenta novedades
P1DL2	LABSOLDADURA	SI	Presentan unas pequeñas fisuras que no sobrepasan la medida permitida en la norma.
P1DL3	LABSOLDADURA	SI	No presenta novedades
P1DL4	LABSOLDADURA	SI	No presenta novedades





# FIM-EPN

## Especificación de procedimiento de soldadura (WPS)

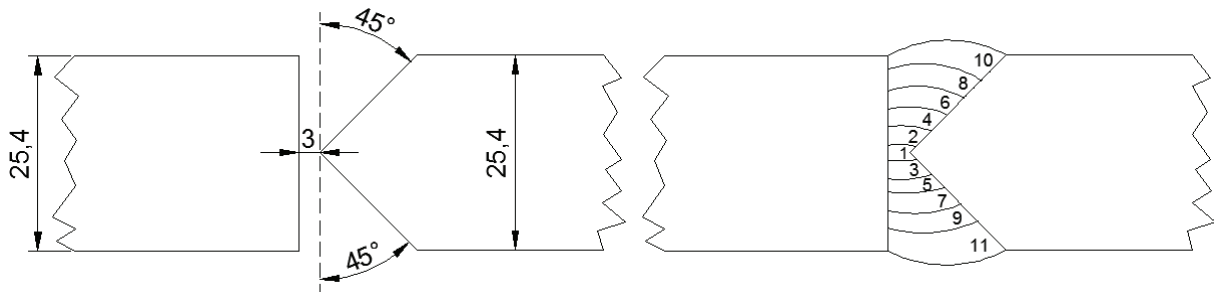
Nombre Compañía:	E.P.N.	No. Identificación:	TESIS002
PQR No.:	TEST002	Fecha:	
Según Norma:	ASME IX	Realizado por:	Salazar Escobar Adriana Victoria Cajamarca Guambi Juan Gabriel
		Organización:	

<b>Artículo I.</b>	<b>Junta Utilizada</b>	<b>Artículo V.</b>	<b>Técnica de Soldadura</b>
Tipo de Junta:	Junta en K	Proceso de Soldadura:	GMAW
Abertura raíz:	3 [mm]	Tipo de Soldadura:	
Talón:	N/A	Manual	Semiautomática X Automática
Ángulo de ranura:	45°	Soldadura a:	Un lado Dos lados X
Placa de respaldo:	N/A	Cordón de respaldo:	Sí No X
Preparar bisel:	Si	Limpieza:	
Método:	Limado	Pase raíz:	Disco y grata
		Pase siguientes:	Disco y grata

<b>Artículo II.</b>	<b>Metal Base</b>
Especificación:	A 516 Grado 70
Espesor:	25,4 [mm]
Diámetro:	N/A
P. N°:	1
Grupo N°:	2

<b>Artículo III.</b>	<b>Metal Aporte</b>	<b>Artículo VI.</b>	<b>Posición de Soldadura</b>
Diámetro:	1.2 [mm]	Posición de Soldadura:	1G
Denominación AWS:	ER 70 S-6	Progresión:	De derecha a izquierda
Casa Comercial	Linde S.A.	Arrastre:	Empuje: X
Denominación comercial:	ER 70 S-6	Un Pase:	Varios pases: X
A. N°:	1	<b>Pre calentamiento:</b>	167 °C
F. N°:	6	<b>Tiempo entre pases:</b>	1:00 min

<b>Artículo IV.</b>	<b>Gas Protección</b>	<b>Artículo VII.</b>	<b>Notas</b>
Tipo	CO2	Asegurar alineación de las juntas	
Caudal	25 lt/min	Asegurar limpieza de las piezas	



No de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De Avance (mm/min)	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro	Tipo y polaridad	Intensidad (Amperios)			Oscilado	Recto
1	ER 70S-6	1.2	DC+	160	24,5	175,38	X	
2	ER 70S-6	1.2	DC+	241	35,6	400,00	X	
3	ER 70S-6	1.2	DC+	218	27,6	228,00	X	
4	ER 70S-6	1.2	DC+	225	27,8	268,24	X	
5	ER 70S-6	1.2	DC+	226	28,6	414,55	X	
6	ER 70S-6	1.2	DC+	226	28,6	422,22	X	
7	ER 70S-6	1.2	DC+	184	25,9	100,00	X	
8	ER 70S-6	1.2	DC+	202	28,2	247,33	X	
9	ER 70S-6	1.2	DC+	204	28	361,90	X	
10	ER 70S-6	1.2	DC+	277	36,8	350,77	X	
11	ER 70S-6	1.2	DC+	187	26,3	141,61	X	



FIM-EPN

**LABORATORIO DE  
SOLDADURA DE PRODUCCIÓN Y MANTENIMIENTO****Registro de calificación del procedimiento (PQR)**Nombre Compañía: E.P.N  
Según norma: ASME IXInspector: Salazar Escobar Adriana Victoria  
Cajamarca Guambi Juan GabrielWPS No: TESIS002  
Fecha:

Nombre del Soldador: Abel Llambo

Proceso de soldadura: MANUAL  
SMAW:SEMIAUTOMATICO  
FCAW: GMAW: XAUTOMATICO  
SAW:Tipo y grado del metal base: Especificación: A516 G.70 Diámetro: N/A Espesor: 25,4 [mm]  
P No.: 1 Grupo No.: 2Juntas Utilizadas: Tipo de junta: K Abertura de raíz: 3 [mm] Ángulo de ranura: 45°  
Respaldo: N/A

Posición de soldadura: 1G Dirección de soldadura: Izquierda a derecha Tiempo de soldadura: 00:10:17

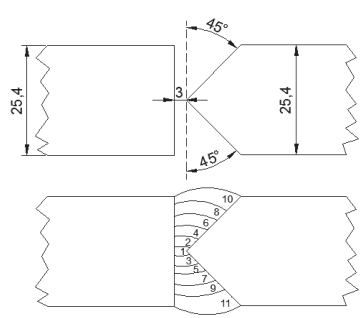
Metal de aporte: Denominación AWS: ER 70S-6 SFA No.: A5.18 Diámetro: 1,2 mm  
Denominación Comercial: ER 70S-6 Marca: AGA

Gas de protección: Activo Tipo: CO2 Caudal: 25 lt/min

Precalentamiento: 160 °C Temperatura entre pases: 145 °C

Tipo de máquina de soldador: MIG / MAG Lincoln Electric

**PARAMETROS DE SOLDADURA**

Pases No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Detalle de la Junta 
Proceso	GMAW SEMIAUTOMATICO											
Tipo de electrodo (AWS):	ER 70S-6											
Especificación (SFA) No.	A5.18											
Diámetro (mm):	1,2											
Velocidad de soldadura (mm/min):	175,38	400,00	228,00	414,55	422,22	100,00	247,33	361,90	350,77	350,77	141,61	
Voltaje:	24,5	35,6	27,6	27,8	28,6	28,6	25,9	28,2	28	36,8	26,3	
Amperaje:	160	241	218	225	226	226	184	202	204	277	187	
Dirección:	De izquierda a derecha											
Tipo de corriente y polaridad:	DC +											
Código de soldador:	ABELTESIS001											

**EXAMENES****ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS**

INSPECCIÓN VISUAL CALIFICADO: CLASIFICADO

**ENSAYOS DESTRUCTIVOS****RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN**

Muestra No.	Identificación de Laboratorio	Aprobación	OBSERVACIÓN
P2T1	LAEV	SI	Falla en el material base
P2T2	LAEV	SI	Falla en el material base

**RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DOBLADO**

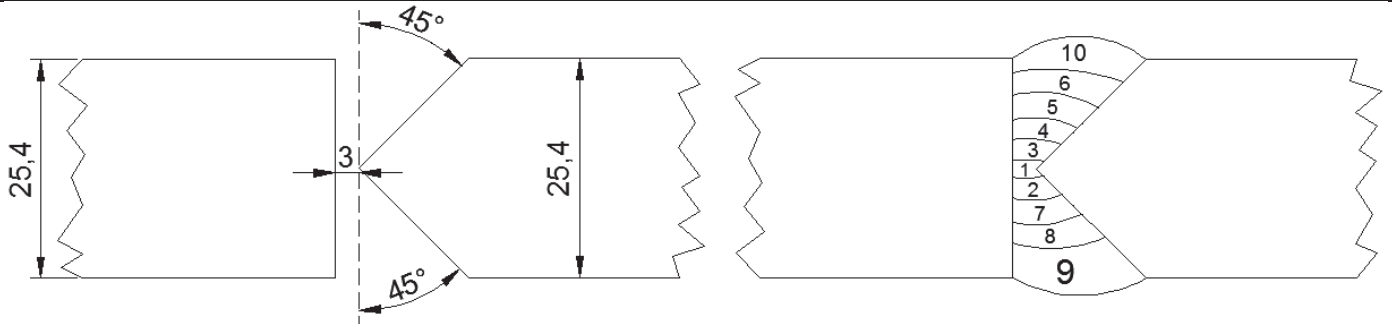
Muestra No.	Identificación de Laboratorio	Aprobación	OBSERVACIÓN
P1DL1	LABSOLDADURA	SI	No presenta novedades
P1DL2	LABSOLDADURA	SI	Presenta una pequeña discontinuidad que no sobrepasa la medida permitida en la norma ASME Sección IX
P1DL3	LABSOLDADURA	SI	Presenta una discontinuidad considerable, no sobrepasa la medida permitida en la norma ASME Sección IX
P1DL4	LABSOLDADURA	SI	No presenta novedades



# FIM - EPN

## Especificación de procedimiento de soldadura (WPS)

Nombre Compañía:	E.P.N.	No. Identificación:	TESIS003	
PQR No.:	TEST003	Fecha:		
Según Norma:	ASME IX	Realizado por:	Salazar Escobar Adriana Victoria Cajamarca Guambi Juan Gabriel	
<b>Artículo I. Junta Utilizada</b>		<b>Artículo V. Técnica de Soldadura</b>		
Tipo de Junta:	Junta en K	Proceso de Soldadura:	GMAW	
Abertura raíz:	3 [mm]	Tipo de Soldadura:	Manual                      Semiautomática    X    Automática	
Talón:	N/A	Soldadura a:	Un lado                      Dos lados    X	
Ángulo de ranura:	45°	Cordón de respaldo:	Sí                      No    X	
Placa de respaldo:	N/A	Limpieza:	Pase raíz:                      Disco y grata	
Preparar bisel:	Si	Pase siguientes:	Disco y grata	
Método:	Limado			
<b>Artículo III. Metal Base</b>		<b>Artículo VI. Posición de Soldadura</b>		
Especificación:	A 516 Grado 70	Posición de Soldadura:	1G	
Espesor:	25,4 [mm]	Progresión:	De derecha a izquierda	
Diámetro:	N/A	Técnica:	Arrastre:                      Empuje:    X	
P. N°:	1	Un Pase:	Varios pases:    X	
Grupo N°:	2	<b>Pre calentamiento:</b>	167 °C	
<b>Artículo III. Metal Aporte</b>		<b>Tiempo entre pases:</b>	1:00 min	
Diámetro:	1.2 [mm]	<b>Artículo VII. Notas</b>		
Denominación AWS:	ER 70 S-6	Asegurar alineación de las juntas		
Casa Comercial:	Linde S.A.	Asegurar limpieza de las piezas		
Denominación comercial:	ER 70 S-6			
A. N°:	1			
F. N°:	6			
<b>Artículo IV. Gas Protección</b>				
Tipo:	CO2			
Caudal:	25 lt/min			



No de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De Avance (mm/min)	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro	Tipo y polaridad	Intensidad (Amperios)			Oscilado	Recto
1	ER 70S-6	1.2	DC+	230	29,9	380,00	X	
2	ER 70S-6	1.2	DC+	269	35,2	422,22	X	
3	ER 70S-6	1.2	DC+	282	36,3	325,71	X	
4	ER 70S-6	1.2	DC+	301	36,3	506,67	X	
5	ER 70S-6	1.2	DC+	296	36,8	542,86	X	
6	ER 70S-6	1.2	DC+	274	36,5	380,00	X	
7	ER 70S-6	1.2	DC+	302	37,7	380,00	X	
8	ER 70S-6	1.2	DC+	325	37,7	456,00	X	
9	ER 70S-6	1.2	DC+	278	34,5	265,12	X	
10	ER 70S-6	1.2	DC+	275	34,4	253,33	X	



FIM-EPN

**LABORATORIO DE SOLDADURA****Registro de calificación del procedimiento (PQR)**Nombre Compañía: E.P.N  
Según norma: ASME IXInspector: Salazar Escobar Adriana Victoria  
Cajamarca Guambi Juan GabrielWPS No: TESIS003  
Fecha:

Nombre del Soldador: Abel Llambo

Proceso de soldadura:

MANUAL  
SMAW:SEMIAUTOMATICO  
FCAW: GMAW: XAUTOMATICO  
SAW:

Tipo y grado del metal base:

Especificación: A516 G.70

Diámetro: N/A

Espesor: 25,4 [mm]

P No.: 1

Grupo No.: 2

Juntas Utilizadas:

Tipo de junta: K

Abertura de raíz: 3 [mm]

Ángulo de ranura: 45°

Respaldo: N/A

Posición de soldadura: 1G

Dirección de soldadura: Izquierda a derecha

Tiempo de soldadura: 00:10:17

Metal de aporte:

Denominación AWS: ER 70S-6

SFA No.: A5.18

Diámetro: 1,2 [mm]

Denominación Comercial: ER 70S-6

Marca: AGA

**Gas de protección:** Activo

Tipo: CO2

Caudal: 25 lt/min

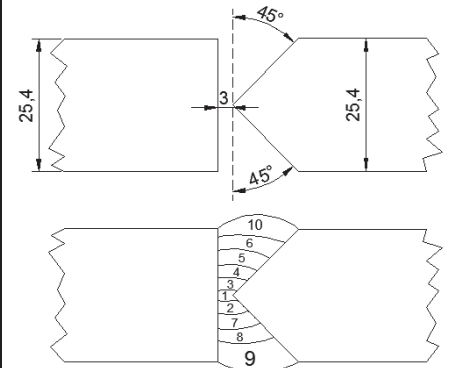
**Precalentamiento:** 160 °C

Temperatura entre pases: 145 °C

**Tipo de máquina de soldador:** MIG / MAG Lincoln Electric**PARAMETROS DE SOLDADURA**

Pases No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Proceso	GMAW SEMIAUTOMATICO									
Tipo de electrodo (AWS):	ER 70S-6									
Especificación (SFA) No.	A5.18									
Diámetro (mm):	1,2									
Velocidad de soldadura (mm/min):	380	422,22	325,71	506,67	542,86	380	380	456	265,12	253,33
Voltaje:	29,9	35,2	36,3	36,3	36,8	36,5	37,7	37,7	34,5	34,4
Amperaje:	230	269	282	301	296	274	302	325	278	275
Dirección:	De izquierda a derecha									
Tipo de corriente y polaridad:	DC +									
Código de soldador:	ABELTESIS001									

Detalle de la Junta

**EXAMENES****ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS**

INSPECCIÓN VISUAL:

CALIFICADO: SI

DESCALIFICADO:

**ENSAYOS DESTRUCTIVOS****RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN**

Muestra No.	Identificación de Laboratorio	Aprobación	OBSERVACIÓN
P3T1	LAEV	SI	Falla en el material base
P3T2	LAEV	SI	Falla en el material base

**RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DOBLADO**

Muestra No.	Identificación de Laboratorio	Aprobación	OBSERVACIÓN
P3DL1	LABSOLDADURA	SI	No presenta novedades
P3DL2	LABSOLDADURA	SI	No presenta novedades
P3DL3	LABSOLDADURA	SI	No presenta novedades
P3DL4	LABSOLDADURA	SI	No presenta novedades

### ANEXO 3

## GUÍA DE REMISIÓN ACERO DE LOS ANDES DE LAS PROBETAS DE ESTUDIO



**INDUSTRIA DE ACERO DE LOS ANDES S.A.**

MATRIZ  
PLANTA INDUSTRIAL:  
San Juan de Turubamba - Calle J s/n y Panamericana Sur  
Telfs.: 2690 652 - 2690 955 - 2690 141 - Fax: (593-2) 2690 954 QUITO - ECUADOR

N° 001-001- **000011936**

**GUIA DE REMISIO**

No. AUTORIZACION SRI 1113956157

R.U.C. 1790149838001  
CONTRIBUYENTE ESPECIAL  
Resolución 5368 del 2/Jun/96

FECHA INICIO TRASLADO : / /  
DIA MES AÑO  
FECHA TERMINA TRASLADO : / 18-09-14 /  
DIA MES AÑO  
18-09-14

Cliente :  
Atención : **ESCUELA POLITECNICA NACIONAL**  
Dirección : **JUAN GABRIEL CAJAMARCA**  
Teléfono : **Av. 6 de diciembre**  
R.U.C. / C.I. : **0**

**MOTIVO DEL TRASLADO:**

- VENTA
- COMPRA
- TRANSFORMACION
- CONSIGNACION
- TRASLADO ENTRE ESTABLECIMIENTOS
- TRASLADO POR EMISOR ITINERANTE DE COMPROBANTES DE VENTA
- DEVOLUCION
- IMPORTACION
- EXPORTACION
- PRESTAMO

Comando : **S/C**  
Proyecto : **DONACIÓN DE PROBETAS DE ENSAYO**  
Comprobante de Venta :  
Fecha de Emisión : **18-09-14**

Punto de Partida : **PLANTA INDUSTRIAL IAA** Fecha de Emisión: **18-09-14**  
Hora de Salida : **10:35**

**DESTINATARIO**  
Nombre o Razón Social : **ESCUELA POLITECNICA NACIONAL**  
Punto de Llegada : **Av. 6 de diciembre**

**IDENTIFICACION DE LA PERSONA ENCARGADA DEL TRANSPORTE**  
Nombre o Razón Social : **Transporte IAA- SR. JUAN GABRIEL CAJAMARCA**  
Dirección de Destino : **Av. 6 de diciembre** R.U.C. / C.I. :  
Vehículo : **FORD** Placas : **ASeguro**  SI  NO

ITEM	CODIGO	DESCRIPCION DEL MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	PESO KG/UNIT.	PESO KG/TOT.	OBSERVACIONES
1	S/C	PL 24 X 150 X 380 mm DONACION PROBETAS DE ENSAYO XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX <i>ASIG 670</i>		Und	8		

FIRMA: *[Signature]*  
NOMBRE: **Diego Tasso**  
FECHA: **18/09/2014**  
ABASTECIMIENTOS      ASEGURAMIENTO DE CALIDAD      DESPACHOS      TRANSPORTISTA

## ANEXO 4

# INFORME TÉCNICO DEL RESULTADO DE LAS PROBETAS DE TRACCIÓN



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



LABORATORIO DE ANÁLISIS  
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

## INFORME TÉCNICO

LAEV – JUL.02.15

Quito, 3 de julio de 2015

**TRABAJO SOLICITADO POR:** ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
Ing. Carlos Díaz M.Sc.

Los resultados contenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en probetas extraídas de juntas soldadas pertenecientes a Srta. Adriana Victoria Salazar Escobar y Sr. Juan Gabriel Cajamarca Guambi, para el desarrollo del proyecto de titulación “Estudio y Caracterización de la ZAC en Acero A 516 Grado 70 con Junta Tipo K y de espesor de 1 pulgada, con Diferente Entrada de Calor (Voltaje y Corriente)”. Las probetas fueron entregadas en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional.

### RESULTADOS

- MUESTRAS:** Seis (6) probetas extraídas de juntas soldadas para ensayo de tracción.
- ENSAYO DE TRACCIÓN**

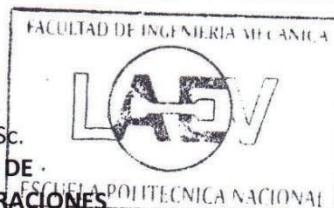
En la tabla 1 se muestran los resultados de los ensayos de tracción realizados en las probetas.

Tabla 1. Resistencia a la tracción de las probetas ensayadas.

Id.	Ancho promedio	Espesor promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		Obs.*	Calificación
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa		
P1 T1	17,51	25,64	54.960	244.474	79,0	545	FMB	Aprueba
P1 T2	18,4	25,65	56.168	249.848	76,8	529	FMB	Aprueba
P2 T1	19,39	25,63	59.130	263.023	76,8	529	FMB	Aprueba
P2 T2	18,6	25,64	57.104	254.011	77,3	533	FMB	Aprueba
P3 T1	18,99	25,62	57.937	257.717	76,8	530	FMB	Aprueba
P2 T2	18,52	25,43	56.987	253.491	78,1	538	FMB	Aprueba

\*FMB= Falla en el material base.

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



## ANEXO 5

### INFORMACIÓN ELECTRODOS A UTILIZAR EN EL PROYECTO

#### ER 70 S - 3

### ALAMBRE MIG PARA ACERO DE BAJO CARBONO

#### ER 70 S - 3

<b>Norma:</b>	AWS	ER 70 S - 3
---------------	-----	-------------

#### Análisis del Metal Depositado:

C	0.09%	Si	0.43%	Mn	0.9%
---	-------	----	-------	----	------

#### Descripción:

Alambre continuo cobrizado de acero micro-aleado

#### Proceso:

MIG/MAG (G.M.A.W.)	GAS DE PROTECCIÓN	
	CO <sub>2</sub>	AGA MIX 20

RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	ELONGACIÓN
52 kg./mm <sup>2</sup> (74.000 psi)	34%

#### Aplicación:

Para soldar acero dulce en toda posición, mediante proceso MIG (AGA MIX 20) o MAG (CO<sub>2</sub>): Alta velocidad de soldadura de acero en posición de corto circuito con arco estable y poco chisporroteo.

#### DATOS PARA SOLDAR:

PROCESO MAG (GMAW)	Ø		AMPERAJE	VOLT. GAS	FLUJO lt/min	VELOCIDAD ALIMEN.ALAM. cmt/min.
	mm.	Pulg.				
CORTO CIRCUITO	0.8	0.030	90-110	15-21	8-15	500- 860
	0.9	0.035	90-110	16-22		400- 750
	1.0	0.040	100-120	17-22		310- 630
	1.2	0.045	100-130	17-22		250- 560
SPRAY	0.8	0.030	140-280	24-28	10-20	990-1700
	0.9	0.035	165-300	24-28		910-1320
	1.0	0.040	180 - 410	24-30		700-1200
	1.2	0.045	200 - 450	24-30		530- 990

Estos son datos para equipos convencionales. Para otro tipo de equipos consultar a Escuelas de Soldadura de AGA. Corto circuito se utiliza normalmente para materiales de espesor menor a 4.0 mm. y para soldadura de raíz y en posiciones difíciles. Para soldaduras en posición vertical y sobrecabeza, reducir el amperaje un 10 a 15%.

**NOTA:** Las mejores condiciones para cada aplicación deben determinarse mediante pruebas al momento de soldar.

**IMPORTANTE:** Protéjase de la humedad.

**PESO POR ROLLO:** 20 kg/44 lbs.

## ER 70 S - 6

### ALAMBRE MIG PARA ACERO DE BAJO CARBONO

#### ER 70 S - 6

<b>Norma:</b>	AWS	ER 70 S - 6
---------------	-----	-------------

#### Análisis del Metal Depositado:

C	0.1%	Si	0.90%	Mn	1.50%
---	------	----	-------	----	-------

#### Descripción:

Alambre continuo cobrizado de acero micro-aleado en presentación capa a capa.

#### Proceso:

MIG/MAG (G.M.A.W.)	GAS DE PROTECCIÓN	
	CO <sub>2</sub>	AGA MIX 20

RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	ELONGACIÓN
58 - 63 kg./mm <sup>2</sup> (80.000 psi)	Lo = 5d 27.3%

#### Aplicación:

Para soldar acero dulce en toda posición, mediante proceso MIG/MAG usando anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>) o mezcla AGAMIX 20. Utilización en estructuras en general, maquinarias, bastidores de autos, puentes, muelles, torres, etc.

#### DATOS PARA SOLDAR:

PROCESO MAG (GMAW)	Ø		AMPERAJE	VOLT.	FLUJO GAS lt/min	VELOCIDAD ALIMEN. ALAM cmt/min.
	mm.	Pulg.				
CORTO CIRCUITO	0.8	0.030	90-110	15-21	8-15	500-860
	0.9	0.035	90-110	16-22		400-760
	1.0	0.040	100-120	17-22		310-630
	1.2	0.045	100-130	17-22		250-560
SPRAY	0.8	0.030	140-280	24-28	10-20	990-1700
	0.9	0.035	165-300	24-28		910-1320
	1.0	0.040	80-410	24-30		700-1200
	1.2	0.045	200-450	24-30		530- 990

Estos son datos para equipos convencionales. Para otro tipo de equipos consultar a Escuelas de Soldadura de AGA.

Corto circuito se utiliza normal por materiales de espesor menor a 4.0 mm. y para soldadura de raíz y en posiciones difíciles. Para soldaduras en posición vertical y sobrecabeza, reducir el amperaje un 10 a 15%

**NOTA:** Las mejores condiciones para cada aplicación deben determinarse mediante pruebas al momento de soldar.

**IMPORTANTE:** Protéjase de la humedad.

**PESO POR ROLLO:** 20 kg/44 lbs.