

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **ANÁLISIS DE LA SOLDADURA INDIRECTA POR HORNO (FB) EN ACEROS AL CARBONO**

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

**JUAN CARLOS GUAMANGALLO MENDOZA**

**juan\_ca9@hotmail.com**

**EDISON GONZALO VILLARROEL RICAURTE**

**edigonza19@hotmail.com**

**DIRECTOR: ING. DIEGO MARCELO ESPINOSA CHAUVIN**

**diego.espinosa@epn.edu.ec**

**Quito, Octubre 2012**

## DECLARACIÓN

Nosotros, Juan Carlos Guamangallo Mendoza y Edison Gonzalo Villarroel Ricaurte, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

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

---

JUAN GUAMANGALLO MENDOZA

---

EDISON VILLARROEL RICAURTE

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Juan Carlos Guamangallo Mendoza y Edison Gonzalo Villarroel Ricaurte, bajo mi supervisión.

---

**ING. DIEGO ESPINOSA**  
**DIRECTOR DE PROYECTO**

---

**ING. PATRICIO ESTUPIÑAN**  
**COLABORADOR**

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco primero a la noble y gloriosa facultad de Ingeniería Mecánica por todos los conocimientos adquiridos tanto intelectuales como éticos, para mi desarrollo personal y profesional como también para la realización de este proyecto, las experiencias vividas en sus aulas ocuparán un espacio importante en mi vida.

A mis padres y abuelos por su ejemplo de trabajo y dedicación.

*Juan Carlos.*

Primeramente quiero agradecer a Dios por haberme brindado su apoyo y guía en cada momento de mi vida y con ello poder cumplir cada uno de mis objetivos y hacer realidad mis sueños.

También agradezco a mi familia por todo el apoyo que me han dado en cualquier aspecto, tendiéndome una mano desinteresada y afectiva en cada etapa de mi vida. De igual forma agradezco el conocimiento impartido por cada uno de mis profesores, en especial al Ing. Diego Espinosa por su acertada dirección durante el desarrollo de este proyecto y al Ing. Patricio Estupiñan quién siempre nos brindó su apoyo y guía de la manera más cordial y respetuosa.

Por último agradezco a mis amigos con quienes se compartió momentos gratos e inolvidables, con los cuales se supo salir adelante en los momentos difíciles.

*Edison.*

## DEDICATORIA

A toda mi familia pero en especial a mis hermanos:

A mi hermano Orlando, su protección y cariño han sido mi motivación en alcanzar mis objetivos.

A mi hermano Alejandro por ser la persona que cambio mi vida.

*Juan Carlos.*

Dedico este proyecto principalmente a Dios y a mi Familia pues siempre estuvieron presentes para darme su apoyo incondicional y no permitirme caer y renunciar a cumplir todo lo que para mí es importante y de esta manera poder llevar una vida digna y sobre todo capacitado para solucionar los problemas que se me presenten en el futuro.

*Edison.*

## CONTENIDO

<b>CONTENIDO.....</b>	<b>vi</b>
<b>CONTENIDO DE TABLAS .....</b>	<b>xvi</b>
<b>CONTENIDO DE FIGURAS.....</b>	<b>xviii</b>
<b>CONTENIDO DE ANEXOS.....</b>	<b>xxii</b>
<b>CONTENIDO DE FOTOGRAFÍAS.....</b>	<b>xxiii</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>xxv</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>xxvii</b>
<b>CAPÍTULO 1 ESTUDIO DE LOS ACEROS AL CARBONO .....</b>	<b>1</b>
1.1 ASPECTOS GENERALES DE LOS ACEROS AL CARBONO .....	1
1.1.1 TÉCNICAS Y MÉTODOS DE OBTENCIÓN DEL ACERO.....	2
1.1.1.1 PRODUCCIÓN DEL ARRABIO .....	2
1.1.1.2 ALTO HORNO .....	3
1.1.1.3 REFINACIÓN DEL ARRABIO.....	4
1.1.1.3.1 PROCESO DE HORNO ABIERTO O CRISOL .....	4
1.1.1.3.2 PROCESO DE HORNO DE OXÍGENO BÁSICO.....	5
1.1.1.3.3 PROCESO DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO .....	6
1.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS AL CARBONO .....	7
1.2.1 RESISTENCIA AL DESGASTE .....	7
1.2.2 MAQUINABILIDAD .....	7
1.2.3 DUREZA.....	7
1.2.4 TENACIDAD .....	7
1.2.5 ELASTICIDAD .....	7
1.2.6 DUCTILIDAD .....	7
1.2.7 FRAGILIDAD .....	8
1.2.8 RESILENCIA.....	8
1.3 TIPOS DE ACEROS AL CARBONO.....	8
1.3.1 ACEROS DE BAJO CARBONO .....	8

1.3.1.1	APLICACIONES .....	8
1.3.2	ACEROS DE MEDIO CARBONO .....	8
1.3.2.1	APLICACIONES .....	9
1.3.3	ACEROS DE ALTO CARBONO .....	9
1.3.3.1	APLICACIONES .....	9
1.4	SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS.....	9
1.4.1	DEFINICIÓN DE SOLDABILIDAD .....	9
1.4.2	TIPOS DE SOLDABILIDAD .....	10
1.4.2.1	SOLDABILIDAD OPERATIVA.....	10
1.4.2.2	SOLDABILIDAD METALÚRGICA.....	10
1.4.2.3	SOLDABILIDAD CONSTRUCTIVA .....	10
1.4.3	FACTORES QUE AFECTAN O INFLUYEN EN LA SOLDABILIDAD.....	10
1.4.4	REGIONES PRESENTES EN LA SOLDADURA.....	11
1.4.4.1	LÍNEA DE FUSIÓN.....	11
1.4.4.2	ZONA AFECTADA POR EL CALOR .....	11
1.4.5	CONCEPTO DE CARBONO EQUIVALENTE.....	12
1.4.6	SOLDABILIDAD DE ACEROS DE BAJO CARBONO .....	13
1.4.7	SOLDABILIDAD DE ACEROS DE MEDIO Y ALTO CARBONO .....	13
1.5	DIAGRAMA HIERRO – CARBONO.....	14
1.5.1	DEFINICIÓN DE ESTRUCTURAS .....	18
1.6	TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS ACEROS AL CARBONO.....	20
1.6.1	TEORÍA DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS.....	20
1.6.2	TRATAMIENTOS TERMICOS MÁS USADOS .....	22
1.6.2.1	RECOCIDO .....	22
1.6.2.1.1	RECOCIDO DE REGENERACIÓN.....	22
1.6.2.1.2	RECOCIDOS SUBCRÍTICOS .....	22
1.6.2.1.3	RECOCIDO DE ABLANDAMIENTO .....	22
1.6.2.1.4	RECOCIDO CONTRA ACRIDUD.....	23
1.6.2.1.5	RECOCIDO SUBCRÍTICO GLOBULAR .....	23
1.6.2.2	RECOCIDOS DE AUSTENIZACIÓN INCOMPLETA.....	23
1.6.2.3	DOBLE RECOCIDO .....	23
1.6.2.4	NORMALIZADO .....	23
1.6.2.5	TEMPLE .....	24

1.6.2.6	REVENIDO.....	24
1.6.2.7	TRATAMIENTOS ISOTÉRMICOS DE LOS ACEROS .....	24
1.6.2.8	AUSTEMPERING .....	24
1.6.2.9	MARTEMPERING .....	25
1.7	DIAGRAMA TTT .....	25
1.7.1	TIPOS DE DIAGRAMA TTT.....	26
1.7.1.1	CURVAS TTT ISOTÉRMICAS.....	26
1.7.1.2	CURVAS TTT DE ENFRIAMIENTO CONTINUO .....	27
<b>CAPÍTULO 2 SOLDADURA INDIRECTA DE METALES.....</b>		<b>30</b>
2.1	PRINCIPIOS DE LA SOLDADURA INDIRECTA.....	30
2.1.1	DEFINICIÓN DE SOLDADURA INDIRECTA.....	30
2.1.2	FUNDAMENTOS DE LA SOLDADURA INDIRECTA .....	30
2.1.2.1	MOJABILIDAD.....	30
2.1.2.2	CAPILARIDAD.....	31
2.1.2.3	COHESIÓN.....	33
2.1.2.4	DIFUSIÓN MOLECULAR .....	33
2.1.3	CLASIFICACIÓN DE LA SOLDADURA INDIRECTA.....	33
2.1.3.1	SOLDADURA FUERTE .....	33
2.1.3.2	SOLDADURA BLANDA .....	33
2.2	ELEMENTOS Y FACTORES DE LA PRODUCCIÓN POR SOLDADURA INDIRECTA.....	34
2.3	CLASIFICACIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA INDIRECTA SEGÚN LA FUENTE DE CALENTAMIENTO.....	37
2.3.1	SOLDADURA INDIRECTA EN HORNOS.....	37
2.3.2	SOLDADURA INDIRECTA POR INMERSIÓN .....	38
2.3.3	SOLDADURA INDIRECTA POR FOCOS LUMINOSOS E INFRARROJO.....	39
2.3.4	SOLDADURA INDIRECTA POR RAYO ELECTRÓNICO.....	41
2.3.5	SOLDADURA INDIRECTA CON LÁSER.....	41
2.3.6	SOLDADURA INDIRECTA CON SOPLETE .....	42
2.3.7	SOLDADURA INDIRECTA AL ARCO ELÉCTRICO .....	43

2.3.8	SOLDADURA INDIRECTA POR RESISTENCIA.....	44
2.3.9	SOLDADURA INDIRECTA ELECTROLÍTICA .....	46
2.3.10	SOLDADURA INDIRECTA POR INDUCCIÓN .....	46
2.4	ASPECTOS TECNOLÓGICOS DEL PROCESO DE SOLDADURA INDIRECTA.....	48
2.4.1	OPERACIONES TECNOLÓGICAS EN LA SOLDADURA INDIRECTA.....	48
2.4.2	DISEÑO DEL PROCESO TECNOLÓGICO DE SOLDADURA INDIRECTA.....	50
2.5	VENTAJAS DE LA SOLDADURA INDIRECTA.....	51
2.6	DESVENTAJAS DE LA SOLDADURA INDIRECTA .....	52
<b>CAPÍTULO 3 SOLDADURA FUERTE .....</b>		<b>53</b>
3.1	DEFINICIÓN .....	53
3.2	REQUERIMIENTOS PARA SOLDADURA FUERTE .....	53
3.3	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO .....	53
3.4	CLASES DE JUNTAS PARA SOLDADURA FUERTE.....	55
3.4.1	SEPARACIÓN DE LA UNIÓN.....	55
3.5	METALURGIA DE LA SOLDADURA FUERTE .....	57
3.6	PROCESOS DE SOLDADURA FUERTE.....	58
3.7	AUTOMATIZACIÓN DE LA SOLDADURA FUERTE .....	59
3.8	PREPARACIÓN DE LAS PARTES PARA SU UNIÓN POR SOLDADURA FUERTE.....	59
3.8.1	LIMPIEZA EN LA SOLDADURA FUERTE.....	59
3.8.2	AUTOACOMODO EN SOLDADURA FUERTE.....	60
3.8.2.1	COLOCACIÓN POR GRAVEDAD.....	61
3.8.2.2	AJUSTE CON INTERFERENCIA .....	61
3.8.2.3	MOLETEADO .....	62
3.8.2.4	ESTACADO .....	62
3.8.2.5	EXPANSIÓN.....	63
3.8.2.6	ENGARGOLADO.....	63
3.8.2.7	RECALCADO .....	63

3.8.2.8	ACODILLADO.....	64
3.8.2.9	UNIÓN POR ROSCA.....	65
3.8.2.10	REMACHADO .....	65
3.8.2.11	PLEGADO .....	66
3.8.2.12	MARTILLADO .....	66
3.8.2.13	SOLDADO POR PUNTOS .....	66
3.9	EFFECTOS DE LA SOLDADURA FUERTE .....	67
3.9.1	PRECIPITACIÓN DE CARBUROS .....	67
3.9.2	ÓXIDOS RESIDUALES .....	68
3.9.3	FRAGILIZACIÓN OCASIONADA POR EL HIDRÓGENO.....	68
3.9.4	FRAGILIZACIÓN OCASIONADA POR EL AZUFRE .....	68
3.9.5	FRAGILIZACIÓN OCASIONADA POR EL FÓSFORO .....	69
3.9.6	PRESIÓN DEL VAPOR .....	69
3.9.7	AGRIETAMIENTO POR ESFUERZO .....	69
3.10	VENTAJAS DE LA SOLDADURA FUERTE.....	70
3.11	DESVENTAJAS DE LA SOLDADURA FUERTE .....	71
3.12	APLICACIONES.....	71

## **CAPÍTULO 4 SOLDADURA FUERTE POR HORNO (FB)..... 73**

4.1	SOLDADURA FUERTE EN HORNO .....	73
4.1.1	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO .....	74
4.2	PROCESOS DE SOLDADURA FUERTE EN HORNO .....	75
4.2.1	POR LA FORMA DE PRODUCCIÓN .....	75
4.2.1.1	POR HORNO CONTINUO .....	75
4.2.1.2	POR HORNO DE LOTES .....	76
4.2.2	POR LA PROTECCIÓN DE LA SOLDADURA .....	76
4.2.2.1	POR HORNO EN VACÍO .....	76
4.2.2.2	POR HORNO AL AIRE .....	77
4.2.2.3	POR HORNO BAJO ATMÓSFERA CONTROLADA .....	77
4.3	TIPO DE HORNOS.....	78
4.3.1	HORNOS DE LOTES.....	79
4.3.2	HORNOS CONTINUOS.....	80

4.3.2.1	HORNOS CONTINUOS CON TRANSPORTADOR DE BANDA DE TELA METÁLICA.....	81
4.3.2.2	HORNOS CONTINUOS CON SISTEMA DE TRANSPORTE MEDIANTE RODILLOS REFRACTARIOS.....	81
4.3.3	HORNOS DE RETORTA .....	82
4.3.4	HORNO AL VACÍO .....	83
4.3.4.1	RETORTA CALIENTE, U HORNO DE RETORTA DE BOMBEADO ÚNICO.....	83
4.3.4.2	RETORTA CALIENTE DE BOMBEO DOBLE O DE DOBLE PARED.....	83
4.3.4.3	HORNO AL VACÍO DE PARED FRÍA .....	84
4.4	VENTAJAS DE LA SOLDADURA FUERTE POR HORNO.....	85
4.5	LIMITACIONES DE LA SOLDADURA FUERTE POR HORNO.....	86
4.6	APLICACIONES.....	86

## **CAPÍTULO 5 METALES DE APORTE Y FUNDENTES PARA SOLDADURA FUERTE.....88**

5.1	METALES DE APORTE PARA SOLDADURA FUERTE .....	88
5.2	CARACTERÍSTICAS .....	89
5.2.1	LICUACIÓN .....	90
5.2.2	FUSIÓN Y FLUIDEZ .....	90
5.2.3	MOJADO Y ADHESIÓN.....	91
5.2.4	FORMAS COMERCIALES DE LOS METALES DE APORTACIÓN.....	92
5.3	SELECCIÓN DEL METAL DE APORTE.....	93
5.4	COLOCACIÓN DEL METAL DE APORTE .....	98
5.5	METALES DE APORTE SEGÚN LA NORMA AWS A 5.8.....	100
5.5.1	METALES DE APORTE DE PLATA .....	100
5.5.2	METALES DE APORTE DE ORO .....	100
5.5.3	METALES DE APORTE DE ALUMINIO-SILICIO .....	101
5.5.4	METALES DE APORTE DE COBRE-FÓSFORO.....	101
5.5.5	METALES DE APORTE DE COBRE Y COBRE-ZINC .....	101

5.5.6	METALES DE APOORTE DE NÍQUEL .....	102
5.5.7	METALES DE APOORTE DE COBALTO.....	102
5.5.8	METALES DE APOORTE DE MAGNESIO .....	102
5.5.9	METALES DE APOORTE PARA METALES REFRACTARIOS .....	103
5.6	SELECCIÓN DE LOS METALES BASE.....	105
5.6.1	ACEROS DE HERRAMIENTAS DE ALTO CARBONO Y DE ALTA VELOCIDAD.....	105
5.6.2	TITANIO Y ZIRCONIO.....	106
5.6.3	ALUMINIO Y ALEACIONES DE ALUMINIO .....	106
5.6.4	ACEROS DE BAJO CARBONO Y DE BAJA ALEACIÓN .....	108
5.6.5	METALES REFRACTARIOS .....	109
5.6.5.1	MOLIBDENO .....	109
5.6.5.2	TUNGSTENO .....	109
5.6.5.3	TANTALIO Y COLOMBIO .....	110
5.6.6	MAGNESIO Y ALEACIONES DE MAGNESIO .....	110
5.6.7	COBRE Y ALEACIONES DE COBRE .....	111
5.6.8	BERILIO.....	111
5.6.9	HIERRO COLADO.....	112
5.6.10	ACEROS INOXIDABLES.....	112
5.6.10.1	HIERRO Y ACERO AL CROMO .....	113
5.6.10.2	ACEROS INOXIDABLES ENDURECIBLES POR PRECIPITACIÓN.....	114
5.6.11	CERÁMICAS.....	114
5.6.12	METALES PRECIOSOS.....	114
5.6.13	ALEACIONES DE NÍQUEL Y DE ALTO NÍQUEL.....	115
5.6.14	CARBUROS Y CERMETS.....	115
5.6.15	ALEACIONES RESISTENTES AL CALOR.....	116
5.7	FUNDENTES PARA SOLDADURA FUERTE.....	118
5.7.1	FACTORES QUE AFECTAN AL FUNCIONAMIENTO DEL FUNDENTE.....	118
5.7.1.1	MATERIAL BASE – TEMPERATURA.....	118
5.7.1.2	TIEMPO.....	119
5.7.1.3	VOLUMEN DE FLUJO.....	119
5.7.2	APLICACIÓN DEL FUNDENTE.....	120

5.8	COMPOSICIÓN DE FUNDENTES .....	120
5.8.1	FUNDENTES SEGÚN LA NORMA AWS A5.31:2003 .....	121
5.8.2	SOLDADURA CON UN FUNDENTE LÍQUIDO .....	125
<b>CAPÍTULO 6 PRUEBA EXPERIMENTAL.....</b>		<b>127</b>
6.1	PREPARACIÓN DE JUNTAS Y DIMENSIONAMIENTO .....	127
6.1.1	SELECCIÓN DEL METAL BASE.....	127
6.1.1.1	ACERO DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO .....	127
6.1.1.2	ACERO DE MEDIO CONTENIDO DE CARBONO.....	128
6.1.1.2.1	CÁLCULO DE LA TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO (SEFERIAN).....	128
6.1.1.3	ACERO DE ALTO CONTENIDO DE CARBONO .....	129
6.1.1.3.1	CÁLCULO DE LA TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO (SEFERIAN).....	130
6.1.2	ANÁLISIS POR ESPECTROMETRÍA DE CHISPA.....	130
6.1.3	JUNTA DE SOLDADURA Y DIMENSIONAMIENTO .....	131
6.1.3.1	ACCESORIOS.....	132
6.2	SELECCIÓN DE MATERIAL DE APORTE Y FUNDENTE PARA LOS DIFERENTES TIPOS DE ACERO.....	133
6.2.1	SELECCIÓN DEL MATERIAL DE APORTE.....	133
6.2.1.1	MATERIAL DE APORTE BCUP-3 .....	134
6.2.1.2	MATERIAL DE APORTE RBCUZN-C .....	135
6.2.2	SELECCIÓN DEL FUNDENTE.....	135
6.2.2.1	FUNDENTE ARGENTA FLUX 200 ROSA.....	136
6.2.2.2	FUNDENTE GÉMINI FLUX .....	137
6.3	EQUIPO UTILIZADO .....	138
6.3.1	HORNO DE CALENTAMIENTO .....	138
6.3.2	HORNO DE POSTCALENTAMIENTO.....	140
6.4	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL DE SOLDADURA FUERTE POR HORNO.....	140
6.4.1	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL ÓPTIMO DE SOLDADURA FUERTE POR HORNO.....	142

6.4.2	SOLDADURA EN PROBETA DE ACERO DE BAJO CARBONO..	147
6.4.3	SOLDADURA EN PROBETA DE ACERO DE MEDIO CARBONO.....	149
6.4.4	SOLDADURA EN PROBETA DE ACERO DE ALTO CARBONO..	150
6.5	ESTABLECER LA ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDAR EN FUERTE (BPS).....	151
6.6	ENSAYOS DESTRUCTIVOS.....	158
6.6.1	ENSAYO DE TRACCIÓN .....	158
6.6.1.1	NORMA PARA ENSAYO DE TRACCIÓN .....	159
6.6.2	ENSAYO DE PELADO.....	160
6.6.2.1	NORMA PARA ENSAYO DE PELADO .....	161
6.6.3	INSPECCIÓN METALOGRÁFICA.....	161
6.7	ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS .....	164
6.7.1	INSPECCIÓN VISUAL.....	164

## **CAPÍTULO 7 ANÁLISIS DE RESULTADOS..... 165**

7.1	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS .....	165
7.1.1	INTRODUCCIÓN .....	165
7.1.2	ANÁLISIS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN .....	166
7.1.3	ANÁLISIS DEL ENSAYO DE PELAR .....	171
7.1.4	ANÁLISIS DEL ENSAYO METALOGRÁFICO .....	173
7.1.4.1	SOLDADURA FUERTE METAL BASE ACERO A36.....	174
7.1.4.1.1	ANÁLISIS DE LA SOLDADURA CON METAL DE APORTE RBCuZn-C.....	174
7.1.4.1.2	ANÁLISIS DE LA SOLDADURA CON METAL DE APORTE BCuP-3.....	175
7.1.4.2	SOLDADURA FUERTE METAL BASE ACERO SAE 1045.....	176
7.1.4.2.1	ANÁLISIS DE LA SOLDADURA CON METAL DE APORTE RBCuZn-C.....	176
7.1.4.2.2	ANÁLISIS DE LA SOLDADURA CON METAL DE APORTE BCuP-3.....	178

7.1.4.3	SOLDADURA FUERTE METAL BASE ACERO BÖHLER K100.....	179
7.1.4.3.1	ANÁLISIS DE LA SOLDADURA CON METAL DE APORTE RBCuZn-C.....	179
7.1.4.3.2	ANÁLISIS DE LA SOLDADURA CON METAL DE APORTE BCuP-3.....	180
7.1.5	MACROGRAFÍAS DE PROBETAS .....	181
7.2	REGISTRO DE PROCEDIMIENTO DE CALIFICACIÓN (PQR) .....	183
<b>CAPÍTULO 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>		<b>186</b>
8.1	CONCLUSIONES .....	186
8.2	RECOMENDACIONES .....	188
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>		<b>189</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>191</b>

## CONTENIDO DE TABLAS

### CAPÍTULO 1

Tabla 1.1. Composición del arrabio en el alto horno. ....	3
---	---

### CAPÍTULO 5

Tabla 5.1. Combinaciones metal base-metal de aporte. ....	96
Tabla 5.2. Metales de aporte de soldadura fuerte para metales refractarios. ....	104
Tabla 5.3. Composición nominal e intervalo de fusión de las aleaciones de aluminio soldables en fuerte comunes.....	108
Tabla 5.4. Aleaciones de magnesio soldables en fuerte y metales de aporte.....	111
Tabla 5.5. Metales por soldar y recomendaciones para metales de relleno, fundentes de soldar y aplicaciones.....	117
Tabla 5.6. Clasificación de fundentes de soldadura fuerte con materiales de aporte de soldadura fuerte.....	122

### CAPÍTULO 6

Tabla 6.1. Composición del acero A36.....	127
Tabla 6.2. Propiedades del acero A36. ....	127
Tabla 6.3. Composición del acero SAE 1045.....	128
Tabla 6.4. Propiedades del acero SAE 1045.....	128
Tabla 6.5. Composición del acero BÖHLER K100. ....	129
Tabla 6.6. Resultados de análisis por Espectrometría de Chispa. ....	131
Tabla 6.7. Separación recomendada por el metal de aporte.....	132
Tabla 6.8. Composición química del BCuP-3.....	134
Tabla 6.9. Propiedades del BCuP-3. ....	134
Tabla 6.10. Composición química del RBCuZn-C.....	135
Tabla 6.11. Propiedades del RBCuZn-C. ....	135
Tabla 6.12. Propiedades del Argenta Flux 200. ....	137
Tabla 6.13. Especificaciones del horno de calentamiento.....	139
Tabla 6.14. Dimensiones del horno de calentamiento.....	139
Tabla 6.15. Características del horno de postcalentamiento.....	140

Tabla 6.16. Variables de las probetas de prueba.....	141
Tabla 6.17. Parámetros de la programación del horno. ....	146
Tabla 6.18. Parámetros de las probetas soldadas de acero de bajo carbono.....	148
Tabla 6.19. Parámetros de las probetas soldadas de acero de medio carbono.....	149
Tabla 6.20. Parámetros de las probetas soldadas de acero de alto carbono.	150

## CAPÍTULO 7

Tabla 7.1. Resultados del ensayo a tracción.....	166
Tabla 7.2. Esfuerzos de tracción de las probetas ensayadas. ....	167
Tabla 7.3. Resultados del ensayo de pelar. ....	171
Tabla 7.4. Áreas de las probetas ensayadas. ....	171

## CONTENIDO DE FIGURAS

### CAPÍTULO 1

Figura 1.1. Efecto del contenido del carbono en la resistencia de los aceros. ...	1
Figura 1.2. Esquema del alto horno. ....	4
Figura 1.3. Proceso del horno de oxígeno básico. ....	5
Figura 1.4. Horno eléctrico de inducción. ....	6
Figura 1.5. Horno eléctrico de arco directo. ....	6
Figura 1.6. Representación de las regiones que se generan en una soldadura. ....	12
Figura 1.7. Diagrama Meta-estable Fe-C, Diagrama Estable Fe-C. ....	15
Figura 1.8. Diagrama Hierro-Carbono. ....	17
Figura 1.9. Microestructura de la ferrita. ....	18
Figura 1.10. Microestructura de la austenita. ....	19
Figura 1.11. Perlita: Compuesto formado por ferrita y cementita. ....	19
Figura 1.12. Microestructura de la martensita. ....	20
Figura 1.13. Esquema del proceso para cada tipo de tratamiento térmico. ....	24
Figura 1.14. Curvas TTT isotérmicas de un acero eutectoide (0.8% C). ....	27
Figura 1.15. Diagrama de transformación durante el enfriamiento continuo y estructuras resultantes (Grange y Klefer). ....	29

### CAPÍTULO 2

Figura 2.1. Esquema del concepto de mojabilidad. ....	30
Figura 2.2. Ángulos de mojado de metales de aporte para soldadura fuerte. ...	31
Figura 2.3. Efecto de capilaridad. La superficie del líquido es cóncava (menisco). ....	32
Figura 2.4. Depresión capilar. La superficie del líquido es convexa. ....	32
Figura 2.5. $\alpha$ = ángulo de contacto. $\alpha < 90^\circ$ Mojado; $\alpha > 90^\circ$ Mojado. ....	32
Figura 2.6. Elementos del sistema de producción por soldadura indirecta. ....	34
Figura 2.7. Calentamiento por horno para soldadura indirecta de producción. ....	37
Figura 2.8. Ilustración de la soldadura indirecta por inmersión en baño químico. ....	39
Figura 2.9. Esquemas ópticos del concentrador de radiación. ....	40

Figura 2.10. Equipo para soldadura indirecta al infrarrojo.....	41
Figura 2.11. Unión en tubos de acero inoxidable hecha mediante soldadura indirecta por inducción en una atmósfera controlada.....	47
Figura 2.12. Bobinas y placas típicas para soldadura indirecta por inducción.	48

### CAPÍTULO 3

Figura 3.1. Clases de juntas para soldadura fuerte.....	55
Figura 3.2. Relación entre la separación de la unión y la resistencia al cizallamiento para dos métodos de aplicación de fundente.....	57
Figura 3.3. Colocación por gravedad. ....	61
Figura 3.4. Ajuste con interferencia.....	61
Figura 3.5. Moleteado. ....	62
Figura 3.6. Estacado. ....	62
Figura 3.7. Expansión. ....	63
Figura 3.8. Engargolado.....	63
Figura 3.9. Recalcado. ....	64
Figura 3.10. Acodillado.....	64
Figura 3.11. Unión por rosca.....	65
Figura 3.12. Remachado.....	65
Figura 3.13. Plegado.....	66
Figura 3.14. Martillado.....	66
Figura 3.15. Soldado por puntos.....	67

### CAPÍTULO 4

Figura 4.1. Ilustración de una operación de soldadura fuerte en horno. ....	73
Figura 4.2. Ilustración del procedimiento para soldadura fuerte por horno bajo atmósfera controlada.....	78
Figura 4.3. Clasificación de los hornos de soldadura fuerte.....	79
Figura 4.4. Horno tipo foso.....	80
Figura 4.5. Horno de campana.....	80
Figura 4.6. Horno de soldadura con cinta transportadora CuproBraz®.....	81
Figura 4.7. Horno de retorta 560 - 700° C.....	82
Figura 4.8. Hornos de cuba con retorta de pared fría.....	85

## CAPÍTULO 5

Figura 5.1. Comportamiento del metal de aporte en la soldadura fuerte.....	89
Figura 5.2. Diagrama constitucional plata-cobre. ....	91
Figura 5.3. Anillos.....	93
Figura 5.4. Arandelas y chapitas. ....	93
Figura 5.5. Técnicas para aplicar metal de aporte en la soldadura fuerte:.....	97
Figura 5.6. Métodos para precolocar alambre de aporte de soldadura fuerte. .	98
Figura 5.7. Colocación previa de calzas de metal de aporte para soldadura fuerte.....	99
Figura 5.8. Uniones soldadas en fuerte con surcos para colocar previamente metal de aporte; después del ciclo de soldadura fuerte los surcos quedan vacíos.....	99
Figura 5.9. Soldadura fuerte con fundente líquido.....	126

## CAPÍTULO 6

Figura 6.1. Ilustración de las pinzas y montaje de las placas.....	132
Figura 6.2. Horno VULCAN. ....	138
Figura 6.3. Horno de postcalentamiento del Laboratorio de Tratamientos Térmicos.....	140
Figura 6.4. Ilustración de las pinzas y montaje de las placas.....	143
Figura 6.5. Aplicación del metal de aporte. ....	144
Figura 6.6. Aplicación del fundente. ....	145
Figura 6.7. Máquina universal de ensayos.....	159
Figura 6.8. Dimensiones del espécimen de tracción de junta traslapada.....	160
Figura 6.9. Dimensiones del espécimen pelado de junta traslapada. ....	161
Figura 6.10. Desbaste de las muestras.....	162
Figura 6.11. Pulido de las muestras. ....	163
Figura 6.12. Microscopio metalográfico.....	163

## CAPÍTULO 7

Figura 7.1. Junta soldada para calificación de procedimiento.....	165
Figura 7.2. Cargas cortantes aplicados a la probeta.....	166
Figura 7.3. Diagrama esfuerzo vs probeta. ....	168
Figura 7.4. Probetas ensayadas a tracción.....	169

Figura 7.5. Mojado irregular del metal de aporte en la probeta A36-P.....	170
Figura 7.6. Mojado del metal de aporte. De izquierda a derecha A36-B, SAE-B.....	170
Figura 7.7. Diagrama área de mojado vs probeta.....	172
Figura 7.8. Probetas del ensayo de pelar.....	173
Figura 7.9. Metalografía 100x, metal base acero A36 con material de aporte RBCuZn-C.....	174
Figura 7.10. Metalografía 500x, metal base acero A36 con material de aporte RBCuZn-C.....	174
Figura 7.11. Metalografía 100x, metal base acero A36 con material de aporte BCuP-3.....	175
Figura 7.12. Metalografía 500x, metal base acero A36 con material de aporte BCuP-3.....	175
Figura 7.13. Metalografía 100x, metal base acero SAE 1045 con material de aporte RBCuZn-C.....	176
Figura 7.14. Metalografía 500x, metal base acero SAE 1045 con material de aporte RBCuZn-C.....	177
Figura 7.15. Metalografía 100x, metal base acero SAE 1045 con material de aporte BCuP-3.....	178
Figura 7.16. Metalografía 500x, metal base acero SAE 1045 con material de aporte BCuP-3.....	178
Figura 7.17. Metalografía 100x, metal base acero Böhler K100 con material de aporte RBCuZn-C.....	179
Figura 7.18. Metalografía 500x, metal base acero Böhler K100 con material de aporte RBCuZn-C.....	179
Figura 7.19. Metalografía 100x, metal base acero Böhler K100 con material de aporte BCuP-3.....	180
Figura 7.20. Metalografía 500x, metal base acero Böhler K100 con material de aporte BCuP-3.....	181
Figura 7.21. Macrografía de las probetas soldadas.....	182
Figura 7.22. Registro del Procedimiento de Calificación (PQR) – Material de Aporte RBCuZn-C.....	184
Figura 7.23. Registro del Procedimiento de Calificación (PQR) – Material de Aporte BCuP-3.....	185

## CONTENIDO DE ANEXOS

ANEXO 1: Resultado de análisis por espectrometría de chispa.....	192
ANEXO 2: Propiedades acero BÖHLER K 100.....	195
ANEXO 3: Propiedades acero BÖHLER V945.....	199
ANEXO 4: Catálogo de ACEROS BÖHLER.....	202
ANEXO 5: Fotografías de microestructuras de la soldadura en acero ASTM A-36 con metal de aporte RBCuZn-C.....	205
ANEXO 6: Fotografías de microestructuras de la soldadura en acero ASTM A-36 con metal de aporte BCuP-3.....	208
ANEXO 7: Fotografías de microestructuras de la soldadura en acero SAE 1045 con metal de aporte RBCuZn-C.....	211
ANEXO 8: Fotografías de microestructuras de la soldadura en acero SAE 1045 con metal de aporte BCuP-3.....	214
ANEXO 9: Fotografías de microestructuras de la soldadura en acero BÖHLER K100 con metal de aporte RBCuZn-C.....	217
ANEXO 10: Fotografías de microestructuras de la soldadura en acero BÖHLER K100 con metal de aporte BCuP-3.....	220
ANEXO 11: Fotografías de los hornos y probeta soldada.....	223

## CONTENIDO DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Unión soldada, amplificación 100x.....	206
Fotografía 2. Difusión en la placa base 1, amplificación 500x.....	206
Fotografía 3. Difusión en la placa base 2, amplificación 500x.....	207
Fotografía 4. Microestructura de las placas base, de izquierda a derecha, placa base 1, placa base 2, amplificación 100x.....	207
Fotografía 5. Microestructura de las placas base, de izquierda a derecha, placa base 1, placa base 2, amplificación 500x.....	207
Fotografía 6. Unión soldada, amplificación 100x.....	209
Fotografía 7. Intercara placa base 1, amplificación 500x. ....	209
Fotografía 8. Intercara placa base 1, amplificación 500x. ....	210
Fotografía 9. Microestructura de las placas base, de izquierda a derecha, placa base 1, placa base 2, amplificación 100x.....	210
Fotografía 10. Microestructura de las placas base, de izquierda a derecha, placa base 1, placa base 2, amplificación 500x.....	210
Fotografía 11. Unión soldada, amplificación 100x.....	212
Fotografía 12. Intercara placa base 1, amplificación 500x. ....	212
Fotografía 13. Intercara placa base 2, amplificación 500x. ....	213
Fotografía 14. Microestructura de las placas base, de izquierda a derecha, placa base 1, placa base 2, amplificación 100x.....	213
Fotografía 15. Microestructura de las placas base, de izquierda a derecha, placa base 1, placa base 2, amplificación 500x.....	213
Fotografía 16. Unión soldada, amplificación 100x.....	215
Fotografía 17. Intercara placa base 1, amplificación 500x. ....	215
Fotografía 18. Intercara placa base 2, amplificación 500x. ....	216
Fotografía 19. Microestructura de las placas base, de izquierda a derecha, placa base 1, placa base 2, amplificación 100x.....	216
Fotografía 20. Microestructura de las placas base, de izquierda a derecha, placa base 1, placa base 2, amplificación 500x.....	216
Fotografía 21. Unión soldada, amplificación 100x.....	218
Fotografía 22. Intercara placa base 1, amplificación 500x. ....	218
Fotografía 23. Intercara placa base 2, amplificación 500x. ....	219

Fotografía 24. Microestructura de las placas base, de izquierda a derecha, placa base 1, placa base 2, amplificación 100x.....	219
Fotografía 25. Microestructura de las placas base, de izquierda a derecha, placa base 1, placa base 2, amplificación 500x.....	219
Fotografía 26. Unión soldada, amplificación 100x.....	221
Fotografía 27. Intercara placa base 1, amplificación 500x. ....	221
Fotografía 28. Intercara placa base 2, amplificación 500x. ....	222
Fotografía 29. Microestructura de las placas base, de izquierda a derecha, placa base 1, placa base 2, amplificación 100x.....	222
Fotografía 30. Microestructura de las placas base, de izquierda a derecha, placa base 1, placa base 2, amplificación 500x.....	222
Fotografía 31. Panel de control del horno de calentamiento. ....	224
Fotografía 32. Colocación de los tabiques refractarios en la cámara del horno.....	224
Fotografía 33. Horno de tratamiento postsoldadura. ....	225
Fotografía 34. Probeta soldada. ....	225

## RESUMEN

El presente proyecto es una investigación que permite analizar la soldadura fuerte de aceros al carbono mediante el proceso por horno, así como establecer un procedimiento para realizar este tipo de soldadura considerando factores como la selección del metal de aporte y fundente apropiados para el metal base que se va a soldar.

En el primer capítulo se realiza un estudio de los aceros al carbono, comenzando por la obtención, especificación de las propiedades mecánicas y clasificación de los mismos. También se analiza los tipos de soldabilidad, descripción del diagrama hierro carbono y descripción breve de los tratamientos térmicos.

El segundo capítulo corresponde a una descripción de la soldadura indirecta de metales, así como el estudio de propiedades como mojabilidad, capilaridad, cohesión y difusión. Se especifica la clasificación de soldadura indirecta, tipos, ventajas y desventajas de esta soldadura.

En el tercer capítulo se especifica la soldadura fuerte, en donde se detalla requerimientos, principios, clases, procesos, preparación de las piezas a unir mediante este proceso, efectos, ventajas y desventajas de este tipo de soldadura.

En el cuarto capítulo se detalla la soldadura fuerte por horno, procesos, tipos de hornos, ventajas, limitaciones y aplicaciones de este tipo de soldadura.

El quinto capítulo corresponde a un estudio de las características y tipos de metales de aporte según la norma AWS A5.8, análisis de los metales base y descripción de los fundentes para soldadura fuerte.

En el sexto capítulo se realizan las pruebas experimentales para lo cual se hace una preparación de juntas y dimensionamiento de las placas, selección del metal base, metal de aporte y fundente. También se especifica el procedimiento experimental para la soldadura fuerte por horno, se establece la especificación del procedimiento de soldar en fuerte (BPS) y se detalla los

ensayos a realizarse (tracción, pelar y metalográfico) para determinar la resistencia y difusión de las juntas soldadas.

En el capítulo siete se analiza los resultados de los diferentes ensayos realizados para realizar una comparación entre las juntas soldadas de diferentes metales base y de aporte, con lo cual se podrá determinar cuál es la junta soldada que presenta la mejor resistencia. Por último se realiza un registro de procedimiento de calificación (PQR).

En el capítulo octavo se detallan las conclusiones y recomendaciones obtenidas del análisis de la soldadura fuerte por horno.

## INTRODUCCIÓN

El propósito de este proyecto es conocer la forma apropiada de realizar una soldadura fuerte de aceros de diferente contenido de carbono (bajo, medio y alto) mediante el proceso por horno. Para ello primero se realiza un estudio de los metales base que se desea soldar, pues en el caso de los aceros al carbono el porcentaje de este compuesto influye en gran medida en su grado de soldabilidad, considerando que a mayor porcentaje de carbono el material se vuelve menos soldable.

Otro factor a tener en cuenta es la selección apropiada del metal de aporte y fundente, la norma AWS A5.8 especifica una serie de metales de aporte para soldadura fuerte y en base a sus características se selecciona el metal de aporte correcto para realizar la soldadura, considerando factores como: el metal base que se va a soldar, proceso de soldadura fuerte que se va a emplear, tipo de junta y dimensión de la holgura para que exista la acción capilar.

El fundente se lo selecciona en base al metal de aporte que se va a utilizar para llevar a cabo la soldadura fuerte, la selección incorrecta del fundente puede ocasionar una soldadura de baja calidad y poco resistente, debido a que el fundente es el encargado de evitar la formación de óxidos durante el proceso de soldadura garantizando de esta manera que el flujo capilar ocurra en toda el área a soldar.

Se debe tener presente que el proceso de soldadura por horno es un proceso por difusión por tal motivo no ocurre la fusión del metal base, el único material que pasa a su estado líquido es el metal de aporte el cual tiene un punto de fusión mayor a 450 °C y menor al punto de fusión del metal base, éste metal de aporte al introducirse en la holgura de la junta y fluir por acción capilar a través de ella con la ayuda del fundente, ocasionará una difusión del metal de aporte hacia el metal base, los espacios interatómicos dejados en el metal base debido a la separación de los átomos por el calentamiento serán llenados por los átomos del metal de aporte ocurriendo una difusión, la cual es más notoria en aceros de bajo contenido de carbono.

# CAPÍTULO 1

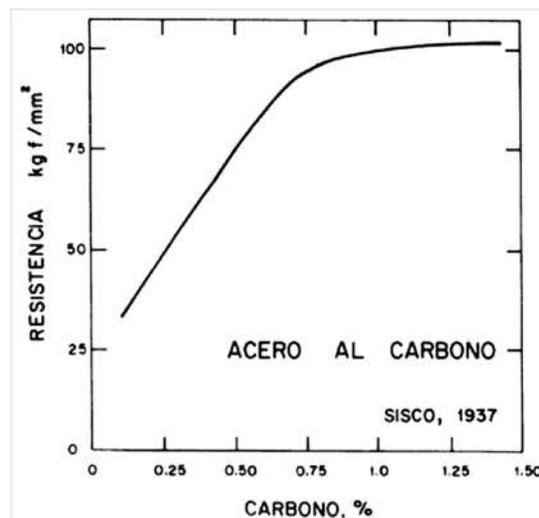
## ESTUDIO DE LOS ACEROS AL CARBONO

### 1.1 ASPECTOS GENERALES DE LOS ACEROS AL CARBONO<sup>1</sup>

El acero es el material de más amplia aplicación en ingeniería es por eso que su estudio es de fundamental importancia tanto para mejorar sus propiedades como para encontrar nuevas aplicaciones.

El acero al carbono, definido como la aleación entre el hierro y el carbono principalmente, cuya composición puede estar entre 0.025% y 2.11% en peso, a temperatura ambiente de contenido de carbono, pudiendo contener otros elementos con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas o químicas, como por ejemplo de fósforo, máximo 0.04%, azufre, máximo 0.05%, manganeso de 0.60 a 0.90%.

El carbono tiene una gran influencia en el comportamiento mecánico de los aceros. La resistencia de un acero simple con 0.5% de carbono es más de dos veces superior a la de otro con 0.1%. Además, como puede apreciarse en la figura 1.1, si el contenido de carbono llega al 1%, la resistencia casi se triplica con respecto al nivel de referencia del 0.1%.



**Figura 1.1.** Efecto del contenido del carbono en la resistencia de los aceros.

Fuente: [http://materias.fi.uba.ar/6715/Material\\_archivos/Material%20complementario%2067.17/](http://materias.fi.uba.ar/6715/Material_archivos/Material%20complementario%2067.17/)

### 1.1.1 TÉCNICAS Y MÉTODOS DE OBTENCIÓN DEL ACERO

El acero al ser un producto industrial, no se lo encuentra de manera natural, por lo que se necesita de determinados procesos para su obtención determinando así sus características y propiedades finales.

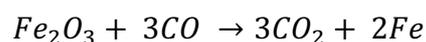
#### 1.1.1.1 Producción del arrabio

La producción de arrabio es el primer proceso en la obtención del acero, es el producto de la reducción del hierro mineral en el alto horno, en este proceso los materiales empleados son el mineral de hierro, coque y caliza.

Las materias primas son cargadas en el alto horno por la parte superior, el aire que ha sido precalentado previamente hasta los 1030°C aproximadamente, es forzado dentro de la base del alto horno para quemar el coque.

El coque se quema como combustible para calentar el horno, el oxígeno del aire a alta temperatura reacciona con el coque produciendo la combustión formando monóxido de carbono, liberando energía calórica, que se combina con los óxidos de hierro del mineral que por reducción química se obtiene hierro metálico.

Describiendo la reacción química, la siguiente ecuación:



La caliza se emplea como una fuente adicional de monóxido de carbono y como sustancia fundente, este a su vez forma silicato de calcio con la sílice presente en el mineral, que sin la caliza formaría silicato de hierro, lo que impediría la formación del hierro metálico, el silicato de calcio por las altas temperaturas se funde y por ser menos denso flota sobre el hierro fundido, el silicato de calcio junto con otros óxidos no metálicos forman una escoria que protege al hierro de reaccionar con el oxígeno del aire que entra, teniendo como producto final el arrabio con las siguientes características:

**Tabla 1.1.** Composición del arrabio en el alto horno.

Elemento	Porcentaje en peso
Hierro	92%
Carbono	3 – 4 %
Silicio	0.5 – 3 %
Manganeso	0.25 – 2.5 %
Fósforo	0.04 – 2 %
Azufre	0.025%
Vanadio	0.35%
Titanio	0.06%

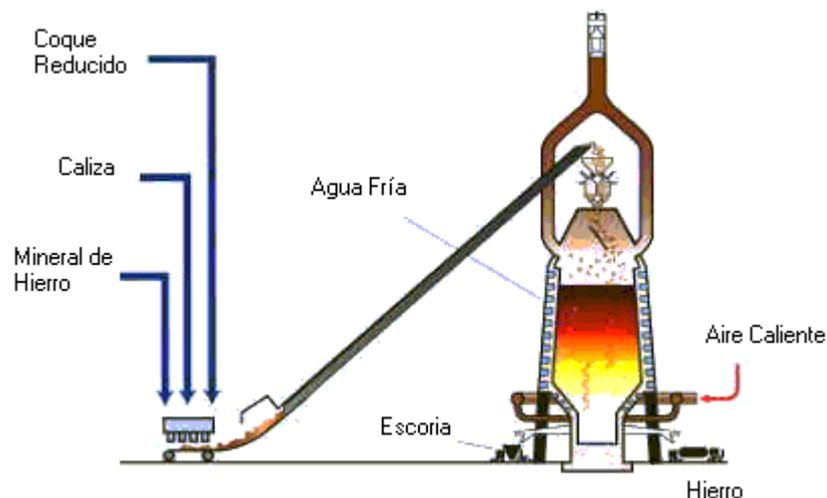
Fuente: <http://www.buenastareas.com/ensayos/Aceros-Simples-ALCarbono/193041.html>

### 1.1.1.2 Alto horno

Este es virtualmente una planta química que reduce continuamente el hierro del mineral. Está formado por una cápsula cilíndrica de acero forrada con un material no metálico y resistente al calor, como ladrillos refractarios y placas refrigerantes. El diámetro de la cápsula disminuye hacia arriba y hacia abajo, y es máximo en un punto situado aproximadamente a una cuarta parte de su altura total. La parte inferior del horno está dotada de varias aberturas tubulares llamadas toberas, por donde se fuerza el paso del aire. Cerca del fondo se encuentra un orificio por el que fluye el arrabio cuando se sangra (o vacía) el alto horno. Encima de ese orificio, pero debajo de las toberas, hay otro agujero para retirar la escoria. La parte superior del horno, cuya altura es de unos 30 m, contiene respiraderos para los gases de escape, y un par de tolvas redondas, cerradas por válvulas en forma de campana, por las que se introduce la carga en el horno. Los materiales se llevan hasta las tolvas en pequeñas vagonetas o cucharas que se suben por un elevador inclinado situado en el exterior del horno.

Los altos hornos funcionan de forma continua. La materia prima que se va a introducir en el horno se divide en un determinado número de pequeñas cargas que se introducen a intervalos de entre 10 y 15 minutos. La escoria que flota sobre el metal fundido se retira una vez cada dos horas, y el arrabio se sangra cinco veces al día. El aire insuflado en el alto horno se precalienta a una

temperatura aproximada de 1030°C. El calentamiento se realiza en las llamadas estufas, cilindros con estructuras de ladrillo refractario.



**Figura 1.2.** Esquema del alto horno.

Fuente: <http://patmadal.alumnos.upv.es/Materiales/Ver%20Escoria%20Aceria.htm>

### 1.1.1.3 Refinación del arrabio

El arrabio, producto de la reducción del hierro mineral, contiene demasiado carbono como impurezas para ser utilizado, por lo que debe ser refinado, porque esencialmente, el acero es hierro altamente refinado que contiene menos de un 2% de carbono. Para esto se recurre a procesos básicos de oxidación, por ello el oxígeno se empleará para remover el exceso de carbono del arrabio, con altas temperaturas el carbono disuelto en el hierro reacciona con el oxígeno para producir monóxido de carbono en forma de gas con lo que se reduce o controla el porcentaje de carbono. Entre los procesos de refinación se destacan los más importantes que son: horno abierto, horno de oxígeno básico, horno de arco eléctrico.

#### 1.1.1.3.1 Proceso de horno abierto o crisol

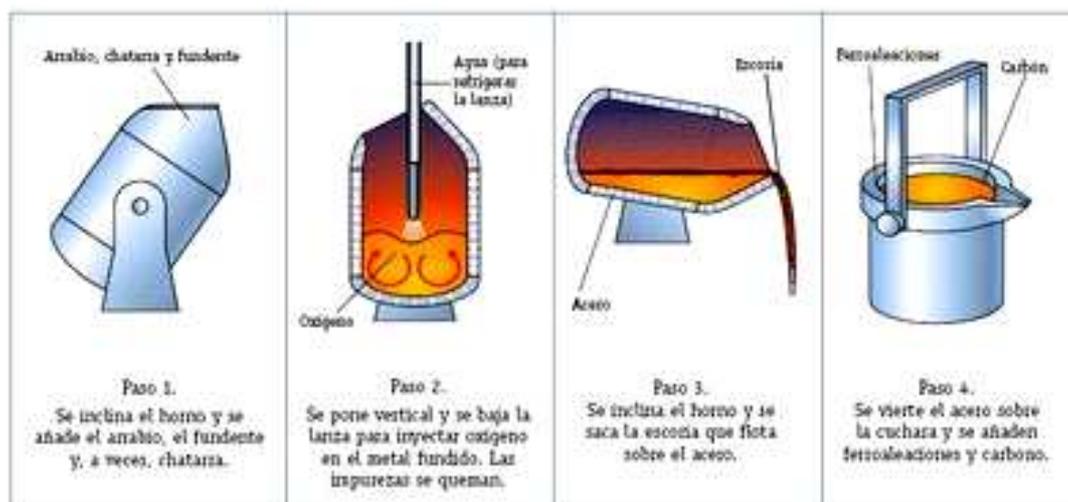
Este tipo de horno es similar a un horno enorme, y se le denomina de crisol porque contiene en el fondo una especie de piscina larga y poco profunda. El horno se carga en un 30% a un 40% con arrabio y piedra caliza, empleando aire precalentado, combustible líquido y gas para la combustión. Al mismo tiempo, se quema el exceso de carbono y otras impurezas. Este proceso puede

acelerarse introduciendo tubos refrigerados por agua, los que suministran un flujo de oxígeno sobre la carga.

El proceso completo demora de cinco a ocho horas, mientras que el Horno de Oxígeno Básico produce la misma cantidad de acero en 45 minutos aproximadamente. Debido a esto, este horno ha sido virtualmente reemplazado por el de Oxígeno Básico.

#### 1.1.1.3.2 Proceso de horno de oxígeno básico

El horno se inclina desde su posición vertical y se carga con el arrabio, después de ser devuelto a su posición vertical, se hace descender hacia la carga oxígeno refrigerado por agua y se fuerza sobre ella un flujo de oxígeno puro a alta velocidad. Este actúa como fuente de calor y para la oxidación de las impurezas. Tan pronto como el chorro de oxígeno comienza, se agrega la cal y otros materiales fundentes. La reacción química resultante desarrolla una temperatura aproximada de 1650° C. El oxígeno se combina con el exceso de carbono acabando como gas y se combina también con las impurezas para quemarlas rápidamente. Su residuo es absorbido por la capa flotante de escoria. Cuando la composición es correcta, el horno se inclina para verter el acero fundido en una olla de colada.



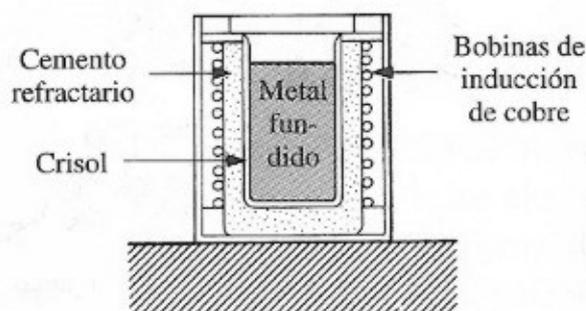
**Figura 1.3.** Proceso del horno de oxígeno básico.

Fuente: <http://fer2.wikispaces.com/ARRABIO+EN+ACERO+CONVERTIDOR>

### 1.1.1.3.3 Proceso de horno de arco eléctrico

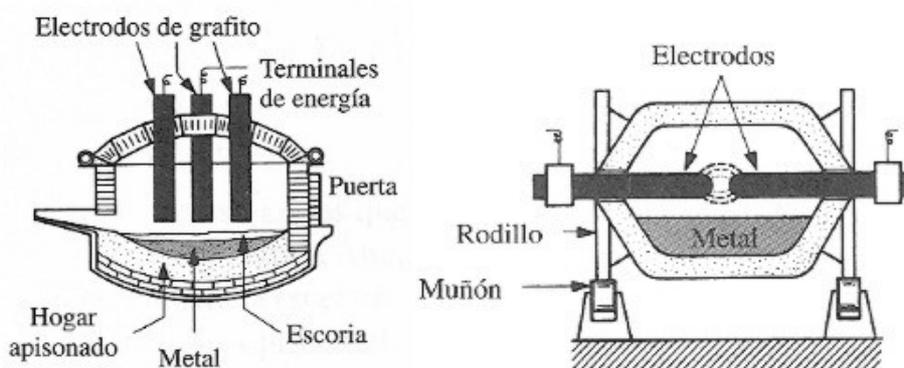
Es el más versátil de todos los hornos para fabricar acero, debido a que no se emplea combustible alguno, no se introduce ningún tipo de impurezas y el resultado es un acero más limpio. Al horno se lo carga con el arrabio, al aplicarse la corriente eléctrica, la formación del arco entre los electrodos gigantes produce un calor intenso. Cuando la carga se ha derretido completamente, se agregan dentro del horno cantidades medidas de los elementos de aleación requeridos.

La masa fundida resultante se calienta, permitiendo que se quemen las impurezas y que los elementos de aleación se mezclen completamente. Para acelerar la remoción del carbono, el oxígeno gaseoso se introduce generalmente en forma directa dentro de acero fundido por medio de tubos. El oxígeno quema el exceso de carbono y algunas de las impurezas, mientras otras se desprenden como escoria por la acción de varios fundentes.



**Figura 1.4.** Horno eléctrico de inducción.

Fuente: <http://www.sapiensman.com/ESDictionary/docs/d12.htm>



**Figura 1.5.** Horno eléctrico de arco directo.

Fuente: <http://www.sapiensman.com/ESDictionary/docs/d12.htm>

## **1.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS AL CARBONO**

### **1.2.1 RESISTENCIA AL DESGASTE**

En el acero es la resistencia a la erosión cuando está en contacto por fricción con otro material. También se puede definir como la capacidad de un metal para oponerse a su deterioro bajo la acción de cargas externas.

### **1.2.2 MAQUINABILIDAD**

En el acero es la facilidad que posee para permitir cualquier proceso de mecanizado por arranque de viruta.

### **1.2.3 DUREZA**

Es la capacidad de resistir a la deformación plástica localizada, como puede ser la resistencia a ser rayados por otro material más duro, o a que un penetrador o indentador genere una huella superficial cuando se aplica de forma controlada una carga.

### **1.2.4 TENACIDAD**

Es la propiedad de un material que le permite soportar esfuerzo considerable, aplicado lenta o súbitamente, en forma continua o intermitente y deformarse antes de fallar, en otras palabras es la capacidad que tiene un material de absorber energía sin producir fisuras (resistencia al impacto).

### **1.2.5 ELASTICIDAD**

Es la propiedad mecánica que representa la capacidad de un material a recuperar su posición inicial cuando las fuerzas externas aplicadas han dejado de actuar.

### **1.2.6 DUCTILIDAD**

Es la propiedad que tiene un material de deformarse plásticamente antes de su ruptura, lo que demuestra su capacidad para absorber energía antes de llegar a la rotura. Sin embargo el término ductilidad se usa frecuentemente de forma incorrecta, debido a que el hecho de que un metal se doble con facilidad no

significa necesariamente que sea dúctil, a menos que tal doblez represente una deformación permanente.

### **1.2.7 FRAGILIDAD**

Es la propiedad contraria a la ductilidad. Los materiales frágiles son elementos que fallan sin deformación permanente apreciable, además estos elementos son de baja resistencia al choque o al impacto.

### **1.2.8 RESILENCIA**

Es la capacidad que tiene un material de absorber energía elástica, mientras está sometido a una fuerza de deformación, devolviendo esta energía cuando se deja de aplicar y regresando al estado inicial.

## **1.3 TIPOS DE ACEROS AL CARBONO**

### **1.3.1 ACEROS DE BAJO CARBONO**

Los aceros de bajo carbono tienen menos del 0.25% de carbono en su aleación. Su microestructura consiste en ferrita y perlita, por tanto son relativamente blandos y poco resistentes pero con extraordinaria ductilidad y tenacidad. Son de fácil mecanizado, soldables, baratos y no adquieren dureza sensible con un temple.

#### **1.3.1.1 Aplicaciones**

Los aceros de bajo carbono se los emplea para fabricar vigas, carrocerías de automóviles, láminas para tuberías, estructuras de edificios y puentes, las columnas metálicas de las líneas eléctricas, los cascos de los buques, etc. En la mayoría de los casos se utiliza el acero tal como viene de las acerías, sin darle ningún tratamiento térmico especial.

### **1.3.2 ACEROS DE MEDIO CARBONO**

Los aceros de medio carbono contienen entre el 0.25 y 0.60% de carbono. Su microestructura generalmente es martensita por tal motivo estos aceros son empleados cuando se quiere mayor resistencia, pues siguen manteniendo un buen comportamiento dúctil aunque su soldadura ya requiere cuidados especiales, debido a su contenido de carbono no son soldables por medios

comunes sin comprometer su resistencia, ya que el aumento de temperatura en la zona de la soldadura y su posterior enfriamiento fragiliza la zona próxima a la soldadura. Estos aceros pueden ser tratados térmicamente para mejorar las propiedades mecánicas.

#### **1.3.2.1 Aplicaciones**

Los aceros de medio carbono son más resistentes que los aceros bajos en carbono pero menos dúctiles y maleables, por tanto se suelen utilizar para fabricar cinceles, martillos, cigüeñales, pernos, ejes, engranes, etc.

### **1.3.3 ACEROS DE ALTO CARBONO**

Los aceros de alto carbono, contienen entre 0.6% y 1.4% de carbono, son más duros y resistentes que los otros aceros al carbono, pero su fragilidad ya es notoria y son difíciles de soldar. Casi siempre se utilizan con tratamientos de templeado y revenido que los hacen muy resistentes al desgaste.

#### **1.3.3.1 Aplicaciones**

Los aceros de alto carbono se emplean en la fabricación de herramientas de matricería, herrería, carpintería, como por ejemplo cuchillos, navajas, brocas para cemento, picos, palas, martillos, cinceles, corta tubos, troqueles, herramientas de torno, etc.

## **1.4 SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS<sup>2</sup>**

### **1.4.1 DEFINICIÓN DE SOLDABILIDAD**

La soldabilidad es la capacidad que tienen los materiales de la misma o diferente naturaleza para ser unidos de forma permanente mediante procesos de soldadura, sin presentar transformaciones estructurales perjudiciales, tensiones o deformaciones que puedan ocasionar defectos en el material base y en la soldadura. La definición de soldabilidad, para su mejor entendimiento, se fundamenta en tres aspectos principales:

- Operativa.
- Metalúrgica.
- Constructiva.

## **1.4.2 TIPOS DE SOLDABILIDAD**

### **1.4.2.1 Soldabilidad operativa**

Responde a la operación de soldadura, en lo que respecta a condiciones tecnológicas y de ejecución de las uniones soldadas por cualquier proceso de soldadura.

### **1.4.2.2 Soldabilidad metalúrgica**

Es la capacidad de los materiales de no presentar transformaciones estructurales en la unión soldada o variaciones en las propiedades físico – químicas, como si se presenta en los aceros aleados donde existe posibilidad de formar estructuras de martensita.

### **1.4.2.3 Soldabilidad constructiva**

Concierno a las propiedades físicas del material base, tales como dilatación y contracción que provocan deformaciones y tensiones, las cuales pueden generar agrietamientos en la unión soldada, como ocurre en el caso del hierro fundido que por su poca plasticidad no tiene capacidad de absorber deformaciones y hay que recurrir a recursos tecnológicos de pre y post calentamiento para evitar esta soldabilidad condicionada.

## **1.4.3 FACTORES QUE AFECTAN O INFLUYEN EN LA SOLDABILIDAD**

El concepto de soldabilidad se enfoca hacia la obtención de una soldadura que pueda cumplir los requisitos técnicos para lo cual ella está diseñada y sobre este concepto influyen una serie de factores que deben ser tomados en cuenta cuando se realiza la unión soldada como son:

- Tipo de material base.
- Influencia de los elementos aleantes.
- Tipo de junta y procesos de soldadura.
- Velocidad de enfriamiento.
- Temperatura de precalentamiento.
- Calor entregado.

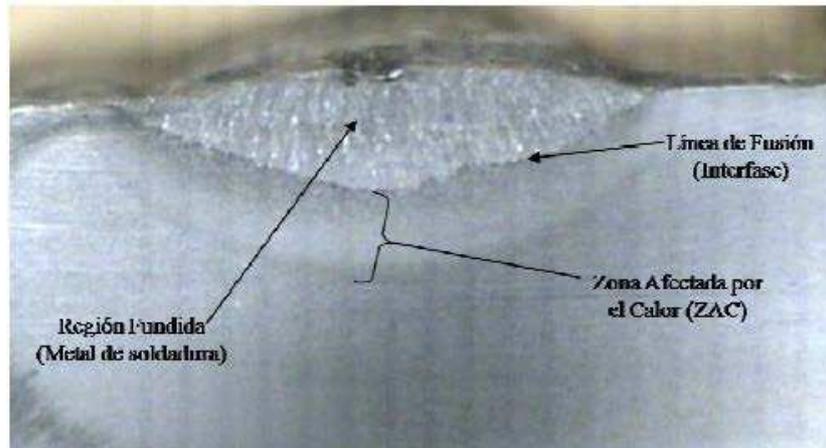
## **1.4.4 REGIONES PRESENTES EN LA SOLDADURA**

### **1.4.4.1 Línea de fusión**

Es la interfaz entre la región de material fundido y la región en estado sólido, normalmente es la zona más propicia a inicio de fisuras, ya que existen áreas con fusión parcial.

### **1.4.4.2 Zona afectada por el calor**

Es la región del metal base que sufre ciclos de calentamiento y enfriamiento debido al aporte térmico de la soldadura. Uno de los factores que influyen en la zona afectada por el calor es la difusividad térmica del material base, pues si la difusividad es alta, la velocidad de enfriamiento del material es alta por lo tanto la ZAC es relativamente pequeña. Inversamente, una difusividad baja conduce a un enfriamiento más lento por lo tanto el ZAC es más grande. Esta zona puede presentar propiedades algo diferentes a las del material base, dado que en esta zona ocurre una transformación, por lo que es muy importante tener en cuenta esto durante la selección del proceso de soldadura para tratar de minimizar la ZAC y que la afectación inevitable sea la menor posible. Los problemas asociados con las características de la ZAC son más difíciles de manejar que los asociados con el metal de aporte, si este último presenta problemas simplemente se lo reemplaza, mientras que los problemas asociados con la ZAC algunas veces pueden ser resueltos modificando el metal base lo cual resulta más costoso.



**Figura 1.6.** Representación de las regiones que se generan en una soldadura.

**Fuente:**

[http://soldadura.org.ar/index.php?option=com\\_content&view=article&id=187:soldabilidad-de-los-aceros&catid=20:investigaci-desarrollo&Itemid=70](http://soldadura.org.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=187:soldabilidad-de-los-aceros&catid=20:investigaci-desarrollo&Itemid=70)

#### 1.4.5 CONCEPTO DE CARBONO EQUIVALENTE

Los diferentes elementos aleantes en los aceros tienen determinada influencia térmica sobre la templeabilidad de los mismos, siendo el carbono el elemento más representativo de lo dicho anteriormente, por lo tanto existe una relación directa entre la composición química del acero y las transformaciones estructurales. Para cuantificar la influencia de los elementos aleantes de los aceros se han desarrollado expresiones en base al elemento más representativo que es el carbono, a estas fórmulas se les conoce como fórmulas de carbono equivalente, estas se han desarrollado experimentalmente para tener una idea del comportamiento de los aceros en lo referente a su soldabilidad, pero esta predicción no es exacta ya que la soldabilidad depende de varios factores y no exclusivamente del porcentaje de carbono.

##### **Fórmula IIW**

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

##### **Fórmula de Ito y Bessyo**

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

### **Fórmula de Seferian**

$$CE = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7Mo}{90}$$

Cuanto mayor sea el porcentaje de carbono equivalente menor será la soldabilidad del acero. Con valores de porcentaje de carbono equivalente, según la fórmula del Instituto Internacional de Soldadura IIW menores que 0.30 se tendría una muy buena soldabilidad del acero para diferentes y variadas condiciones de soldadura.

#### **1.4.6 SOLDABILIDAD DE ACEROS DE BAJO CARBONO**

Los aceros de bajo carbono pueden soldarse con cualquiera de los procesos conocidos, la elección del proceso depende de factores como la clase de unión, posición de soldadura y costo. Todos los aceros de bajo carbono son soldables con arco eléctrico, pero si el contenido de carbono es demasiado bajo puede desarrollar porosidad interna. Aunque la porosidad (excepto que la soldadura presente demasiados poros) no ofrece un serio problema desde el punto de vista de la soldadura; pero son indeseables desde el punto de vista de la apariencia. Para reducir al mínimo este problema debe seguirse uno o más de los procedimientos que se indican a continuación:

- Cambiar el procedimiento de soldadura.
- Reducir la cantidad de calor que se está aplicando.
- Asegurarse de eliminar completamente toda la escoria y el fundente de cada cordón antes de depositar el siguiente.

#### **1.4.7 SOLDABILIDAD DE ACEROS DE MEDIO Y ALTO CARBONO**

A medida que aumenta el porcentaje de carbono disminuye la soldabilidad del acero. En razón a su mayor contenido de carbono, puede presentarse una tendencia a la formación de fisuras en el metal base, así como poros en la soldadura e incluso asperezas en la superficie de la misma. El precalentamiento de la pieza reduce estos problemas al mínimo, al soldar estos aceros la temperatura de precalentamiento se mantiene durante todo el proceso de soldadura y, al terminar, el enfriamiento debe ser de forma lenta y uniforme.

## 1.5 DIAGRAMA HIERRO – CARBONO<sup>3</sup>

El Diagrama de Equilibrio Hierro-Carbono es la representación gráfica del sistema de aleación de estos dos componentes respecto a sus cambios de fase determinados por la temperatura, composición y presión, pero al suponer el valor de la presión constante, el diagrama representará los cambios estructurales por la variación de la temperatura y la composición, bajo condiciones de equilibrio, es decir, en las que no habrá cambio con el tiempo. Sin embargo se ha comprobado la descomposición del carburo de hierro en un tiempo muy largo a una temperatura ambiente, por lo que suponer que está en equilibrio es válido para la mayoría de casos de estudio.

Para que una solución de hierro - carbono reciba el nombre de aleación, la concentración de carbono no puede ser mayor del 6.67%, de lo contrario sus propiedades metálicas se alteran y se transforma en un compuesto químico. El diagrama hierro - carbono presenta constituyentes como el hierro, acero y fundiciones.

El hierro tiene un contenido en carbono entre el 0.008% y el 0.025% y sus aplicaciones son muy limitadas casi exclusivamente a núcleos de inductancias.

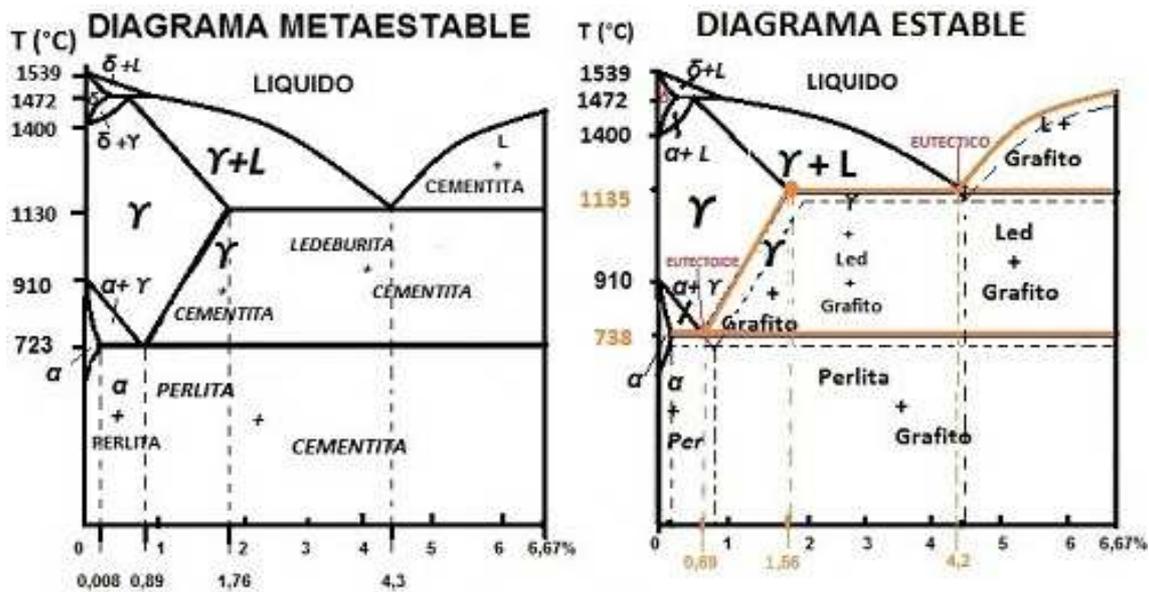
Los aceros tienen un contenido de carbono entre el 0.025% y el 1.76% a temperatura ambiente. Estos tienen una amplia aplicación en la industria debido a su buena resistencia mecánica, su elevada dureza y su ductilidad.

Las fundiciones tienen un contenido de carbono entre el 1.76% y el 6.67%. Estas debido a su elevada dureza son empleadas en la fabricación de herramientas de corte.

Debido a las posibilidades que el carbono esté libre (grafito) o combinado (carburo de hierro) permite la existencia de dos diagramas distintos:

- Diagrama estable (Fe-grafito)
- Diagrama meta-estable (Fe-carburo de hierro).

Hasta alrededor del 2% de carbono las aleaciones siguen el diagrama meta-estable y se utiliza industrialmente para la producción de aceros. Por encima del 2% de carbono, las aleaciones pueden seguir el diagrama estable o meta-estable y se utilizan industrialmente para la producción de fundiciones.



**Figura 1.7.** Diagrama Meta-estable Fe-C, Diagrama Estable Fe-C.

**Fuente:** <http://blog.utp.edu.co/metalografia/2011/05/18/5-5-diagrama-hierro-carbono-puntos-criticos-y-ejemplos-de-regla-de-la-palanca/>

El diagrama meta-estable muestra tres líneas horizontales que indican reacciones isotérmicas. En términos generales, la figura 1.8 se ha marcado con letras griegas para representar las soluciones sólidas. La solución sólida  $\gamma$  se llama austenita. En la esquina superior izquierda de la figura 1.8 se encuentra la región  $\delta$  llamada así debido a la solución sólida  $\delta$ . La solubilidad máxima del carbono en Fe  $\delta$  es de 0.08% (punto H) mientras que en el Fe  $\gamma$  es mucho mayor. Conforme se agrega carbono al hierro, la temperatura del cambio alotrópico aumenta de 1400 a 1492°C al 0.08% C. Considérese el significado de la línea NHAB. Al enfriar, la porción NH representa el principio del cambio de estructura cristalina de Fe  $\delta$  a Fe  $\gamma$  para aleaciones que contienen menos del 0.08% de C. La porción HA representa el principio del cambio de estructura cristalina por medio de una reacción peritética para aleaciones entre 0.08 y 0.18% de C. Para aleaciones que contienen menos del 0.18% de C al enfriar, el fin del cambio de estructura cristalina está dado por la línea NA. La porción AB representa el principio y el fin del cambio de estructura cristalina por medio de la reacción peritética. En otras palabras, para aleaciones entre 0.18 y 0.4% de C, el cambio alotrópico empieza y termina a temperatura constante.

El diagrama muestra un punto eutéctico C, que está a 4.3% de C y a 1130°C. Como la línea horizontal ECF representa la reacción eutéctica, siempre que una aleación cruce esta línea, la reacción deberá ocurrir. Cualquier líquido que esté presente cuando esta línea se alcanza debe solidificar en la muy fina mezcla íntima de las dos fases que están en cualquier extremo de la línea horizontal: austenita y carburo de hierro (llamada cementita). Esta mezcla eutéctica: se llama ledeburita.

Hay una pequeña área de solución sólida a la izquierda de la línea GP. Se sabe que 910°C representa el cambio en estructura cristalina de hierro puro  $\gamma$  a  $\alpha$ . Esa área es una solución sólida de una pequeña cantidad de carbono disuelto en Fe  $\alpha$  y se llama ferrita. El diagrama muestra una tercera línea horizontal PSK, que representa una reacción eutectoide. El punto eutectoide, S, está a 0.8% de C y a 723°C. Cualquier austenita presente debe transformarse en la muy fina mezcla eutectoide de ferrita y cementita, llamada perlita. Por debajo de la línea de temperatura eutectoide, cada aleación consistirá de una mezcla de ferrita y cementita.

Los aceros que contienen menos del 0.8% de C se llaman aceros hipoeutectoides, en tanto que los que contienen de 0.8 a 1.76% de C se llaman aceros hipereutectoides. Las fundiciones que contienen menos del 4.3% de C se conocen como fundiciones blancas hipoeutécticas, en tanto que las que contienen más del 4.3% de C se llaman fundiciones blancas hipereutécticas.

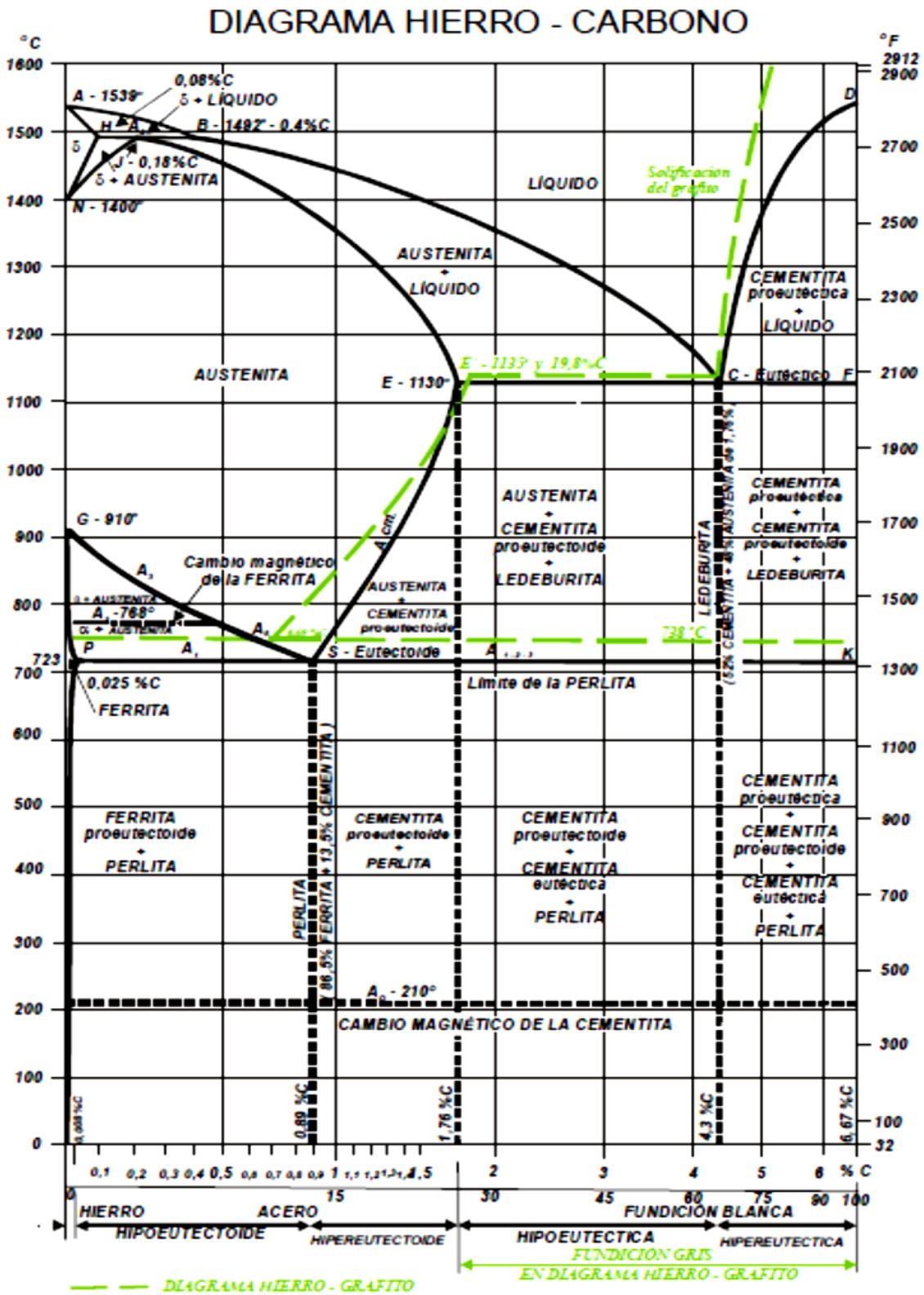
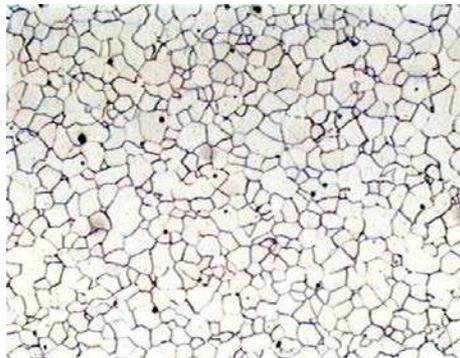


Figura 1.8. Diagrama Hierro-Carbono.

Fuente: <http://blog.utp.edu.co/metalografia/2011/05/18/5-5-diagrama-hierro-carbono-puntos-criticos-y-ejemplos-de-regla-de-la-palanca/>

### 1.5.1 DEFINICIÓN DE ESTRUCTURAS

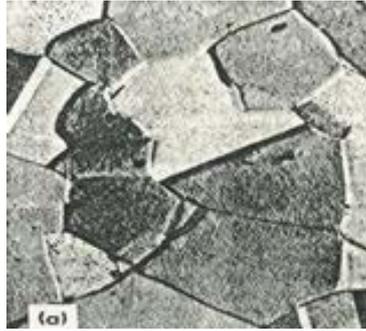
**Ferrita:** Es una solución sólida de carbono en hierro alfa ( $Fe\alpha$ ). La solubilidad máxima de carbono en la ferrita es aproximadamente de 0.008% de C a temperatura ambiente y 0.03% de C a 723°C. La ferrita es una solución sólida intersticial, los átomos de carbono se disponen en los intersticios de la red de Fe. Su red cristalina es cubica de cuerpo centrado. Dependiendo de la temperatura a la que se encuentre, la ferrita es dúctil y magnética, pero pasa a ser no magnética a temperaturas superiores a 768 °C. Su dureza es HB 80 - 100 y es la estructura más suave que aparece en el diagrama.



**Figura 1.9.** Microestructura de la ferrita.

Fuente: <http://www.esi2.us.es/IMM2/Pract-html/ferrita.html>

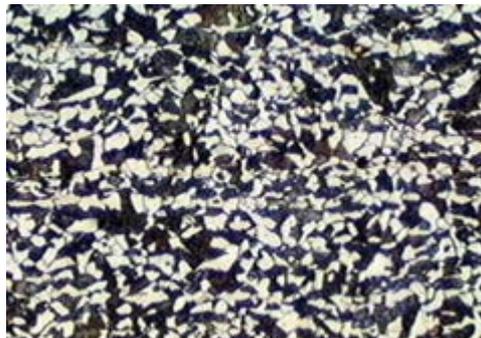
**Austenita:** Es el constituyente más denso de los aceros y es una solución sólida de carbono en hierro gama ( $Fe\gamma$ ). La solubilidad máxima de carbono en la austenita es 1.76% de C a 1130°C y 0.8% de C a 723°C. Su red cristalina es cubica de cuerpo centrado. La austenita es una solución sólida intersticial no magnética. Esta fase se encuentra solo a altas temperaturas y la temperatura de 723°C es el límite inferior de la existencia estable de la austenita en las aleaciones hierro-carbono. Su dureza es HB 180 - 200.



**Figura 1.10.** Microestructura de la austenita.

**Fuente:** [http://materias.fi.uba.ar/6715/Material\\_archivos/Material%20complementario%2067.17/Aceros.pdf](http://materias.fi.uba.ar/6715/Material_archivos/Material%20complementario%2067.17/Aceros.pdf)

**Perlita:** Es la mezcla eutéctica que contiene 0.80 % de C y se forma a 723°C, consta de capas alternadas de ferrita y cementita, siendo el espesor de las láminas de ferrita 0,3 μm superior a las de cementita. Las propiedades mecánicas de la perlita son intermedias entre las de la ferrita y cementita y aunque es más dura y resistente que la ferrita, es más blanda y maleable que la cementita.



**Figura 1.11.** Perlita: Compuesto formado por ferrita y cementita.

**Fuente:** <http://metalurgiaunmsm.wordpress.com/2011/10/23/tratamiento-termico/>

**Cementita:** Es un compuesto químico de hierro en carbono de fórmula  $Fe_3C$ , es el constituyente más duro y frágil que aparece en el diagrama, a bajas temperaturas es ferromagnético y pierde esta propiedad a 212°C. Su estructura cristalina es ortorrómbica y su dureza aproximada es HB 650 – 800.

**Martensita:** Es el constituyente de los aceros templados, está conformado por una solución sólida sobresaturada de carbono en  $Fe \alpha$ . Se obtiene por enfriamiento rápido de la austenita de los aceros, tras haber sido calentada para conseguir una constitución austenítica. Se presenta en forma de agujas y cristaliza en el sistema tetragonal. La proporción de carbono no es constante y

varía hasta un contenido máximo de 0.98%. Si aumentamos la proporción de carbono, también aumenta la resistencia mecánica, la dureza y la fragilidad del acero.



**Figura 1.12.** Microestructura de la martensita.

**Fuente:** <http://metalurgiaunmsm.wordpress.com/2011/10/23/tratamiento-termico/>

**Ledeburita:** Es una mezcla eutéctica de austenita y cementita, contiene 4.3% de C y se forma a 1130°C. Bajo los 723°C la austenita se transformará en perlita y entonces la estructura de la ledeburita será: perlita más cementita. Su dureza es HB 600 – 700 y es muy frágil.

## 1.6 TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS ACEROS AL CARBONO<sup>4</sup>

### 1.6.1 TEORÍA DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS

El objeto de los tratamientos térmicos es mejorar las propiedades y las características de los aceros y esto se logra al calentar y mantener las piezas de acero a temperaturas adecuadas durante un determinado tiempo, para luego enfriarlas en condiciones convenientes, con esto se modifica la estructura microscópica de los aceros. Los factores principales en los tratamientos térmicos son el tiempo y la temperatura, por tal motivo estos factores se fijan antes del proceso de acuerdo a las características que se desean obtener.

En todo tratamiento térmico se distinguen tres fases:

- Calentamiento hasta la temperatura adecuada.
- Permanencia a esa temperatura hasta obtener uniformidad térmica.
- Enfriamiento a la velocidad adecuada.

De acuerdo con las variantes de estas fases se obtienen los distintos tratamientos.

**Calentamiento hasta la temperatura adecuada:** Al empezar algún tratamiento térmico se debe iniciar a la temperatura ambiente la cual tampoco se deben introducir piezas de más de 200 mm de espesor o diámetro en hornos cuya temperatura sea superior a los 300°C. La elevación de temperatura debe ser uniforme en toda la pieza y se logra aumentando la temperatura lo más lentamente posible. La temperatura como mínimo debe de ser un minuto por un milímetro de espesor o diámetro de la pieza. Debe realizarse lentamente con la menor diferencia de temperatura entre el interior y la periferia para evitar grietas y roturas a causa de las tensiones internas por la desigual dilatación entre la periferia y el centro, y por las contracciones al atravesar las zonas críticas. La duración del calentamiento depende también del tipo de tratamiento aplicado; en los normalizados la duración es más cortas, en los recocidos es más larga, porque no solo hay que conseguir la formación del estado austenítico, sino también la difusión y homogeneización de las estructuras.

**Permanencia a la temperatura máxima:** Debe ser tanto más larga cuanto más rápido haya sido el calentamiento para lograr el equilibrio entre la temperatura del centro y la periferia y con ello la homogeneización de la estructura.

Cada temperatura máxima es indicada en las especificaciones del tratamiento térmico a aplicar, ligeramente más elevada que la crítica superior. Si la elevación de la temperatura excede el límite cercano al punto de fusión el acero queda con una estructura frágil debido a la fusión de las impurezas que rodea los granos. Las temperaturas para el acero al carbono son de 1260 a 1350 °C según sea el contenido de carbono. Alcanzar la máxima temperatura influye en el crecimiento del grano, con un mayor tiempo de permanencia, los granos de austenita se desarrollan y aumentan de tamaño. Se da permanencia de uno a dos minutos por cada milímetro de espesor de la pieza, para conseguir la austenización completa del acero.

**Enfriamiento a la velocidad adecuada:** Es la etapa más importante y que caracteriza a cada tratamiento. Para lograr la estructura deseada hay que partir de la estructura austenítica, para lograr la transformación. Si el enfriamiento se hace a distintas velocidades, el comienzo y el final de transformación es distinto, y las estructuras resultantes serán distintas aún para el mismo acero. En los aceros de bajo carbono, incluso con tiempos muy cortos de enfriamiento, la transformación tiene lugar sin problemas, por el contrario, los aceros de medio o alto carbono, el tiempo de enfriamiento debe ser tal que se permita una completa transformación de las estructuras.

## **1.6.2 TRATAMIENTOS TERMICOS MÁS USADOS**

### **1.6.2.1 Recocido**

El objeto principal de este tratamiento térmico es ablandar el acero, también se puede regenerar su estructura o eliminar tensiones internas. Este método consiste en calentamientos a temperaturas adecuadas, seguidos por lo general de enfriamientos lentos.

#### *1.6.2.1.1 Recocido de regeneración*

En este caso el calentamiento se hace a una temperatura ligeramente más alta que la crítica superior y luego el material se enfría muy lentamente con esto se logra ablandar el acero y regenerar su estructura.

#### *1.6.2.1.2 Recocidos subcríticos*

En este proceso el calentamiento se hace por debajo de la temperatura crítica inferior, en este caso no es importante la velocidad de enfriamiento, incluso se lo puede enfriar al aire sin que se endurezca, con este tipo de recocido se logra eliminar las tensiones del material y se incrementa la ductilidad del mismo. Existen tres clases de recocidos subcríticos: de ablandamiento, contra acritud y globular.

#### *1.6.2.1.3 Recocido de ablandamiento*

El objeto principal es ablandar el acero por un procedimiento rápido y económico. Con este proceso se reduce la dureza a los materiales lo suficiente para mecanizarlos, el proceso consiste en calentar el acero hasta una

temperatura, que siendo inferior a la crítica, sea lo más elevada posible para luego enfriar al aire.

#### *1.6.2.1.4 Recocido contra acritud*

Este proceso se efectúa a temperaturas entre 550° y 650°C, y tiene por objeto principal aumentar la ductilidad de los aceros con un contenido de carbono menor al 0.4% y estirados en frío. Al calentar el acero a esa temperatura se destruye la cristalización alargada de ferrita, dando lugar a la aparición de cristales más dúctiles que permiten mecanizar el material con mayor facilidad.

#### *1.6.2.1.5 Recocido subcrítico globular*

Este proceso consiste en calentar el acero a temperaturas inferiores pero muy próximas a la crítica inferior para luego dejarlo enfriar muy lentamente en el horno, con esto se consigue una estructura globular de baja dureza.

### **1.6.2.2 Recocidos de austenización incompleta**

Estos tratamientos se los aplica a los aceros con más del 0.5% de carbono con el fin de reducir su dureza y mejorar su maquinabilidad. Este proceso consiste en calentamientos prolongados a temperaturas intermedias entre la crítica superior y la inferior, seguidos de un enfriamiento lento.

### **1.6.2.3 Doble recocido**

Para obtener muy bajas durezas se suele dar a los aceros primero un recocido de regeneración y luego otro subcrítico.

### **1.6.2.4 Normalizado**

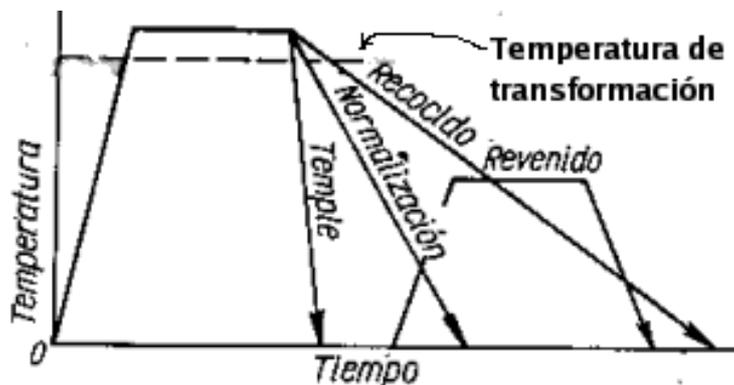
Este tratamiento consiste en un calentamiento a temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior, seguido de un enfriamiento al aire. Con este proceso se logra eliminar las tensiones internas y se uniformiza el tamaño de grano del acero. Cabe mencionar que este proceso es utilizado para destruir los efectos de un tratamiento anterior defectuoso.

### 1.6.2.5 Temple

Este tratamiento permite endurecer y aumentar la resistencia de los aceros. El proceso consiste en calentar el acero a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior, seguido de un enfriamiento rápido en agua o en aceite.

### 1.6.2.6 Revenido

Es un tratamiento que se da a las piezas de acero previamente templadas. El proceso consiste en calentar el acero a una temperatura inferior a la crítica, logrando con esto una disminución de la dureza y resistencia de los aceros templados. Además se mejora la tenacidad y se eliminan las tensiones creadas en el temple.



**Figura 1.13.** Esquema del proceso para cada tipo de tratamiento térmico.

Fuente: <http://www.sabelotodo.org/metalurgia/tratatermacero.html>

### 1.6.2.7 Tratamientos isotérmicos de los aceros

En estos tratamientos el enfriamiento de las piezas no se hace de forma regular y progresiva, sino que se interrumpe o modifica a diversas temperaturas durante ciertos intervalos, en los que permanece el material a temperatura constante durante un tiempo.

### 1.6.2.8 Austempering

Este tratamiento consiste en calentar el acero a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior y luego enfriarlo rápidamente en plomo o sales fundidas, a temperaturas comprendidas entre 200°C y 600°C, permaneciendo el acero en el baño a esta temperatura durante el tiempo

suficiente para que se verifique la transformación completa de la austenita en otros constituyentes a temperatura constante.

#### **1.6.2.9 Martempering**

Es un temple escalonado en el que el material caliente, a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior, se enfría en un baño de sales, también caliente, a temperaturas comprendidas entre 200°C y 400°C, permaneciendo las piezas dentro durante un tiempo que debe controlarse cuidadosamente y que debe ser suficiente para que iguale la temperatura en toda la masa, antes de que en ninguna parte de ella se inicie la transformación de la austenita y luego se enfría al aire.

### **1.7 DIAGRAMA TTT<sup>5</sup>**

Los diagramas Tiempo, Temperatura, Transformación, son diagramas que representan las fases y estructuras en los aceros cuando solidifican a una velocidad considerable, con el aumento de la velocidad ocurre la formación de estructuras y fases que no se pueden identificar en el diagrama de equilibrio, logrando así analizar la interacción entre la temperatura, tiempo y transformación a través de la velocidad de enfriamiento, para un determinado acero de composición conocida.

Son muy útiles en la aplicación de los tratamientos térmicos para el acero ya que con los diagramas TTT se puede controlar de forma efectiva la transformación de su estructura para una determinada aplicación.

Estos diagramas o curvas representan en función de la temperatura, el tiempo necesario para que se inicie y complete la transformación isotérmica de la austenita en otras estructuras.

### 1.7.1 TIPOS DE DIAGRAMA TTT

Existen dos tipos de diagramas TTT, se determinan de acuerdo a las condiciones en la que se llevarán a cabo los procesos de tratamientos térmicos, y estos son:

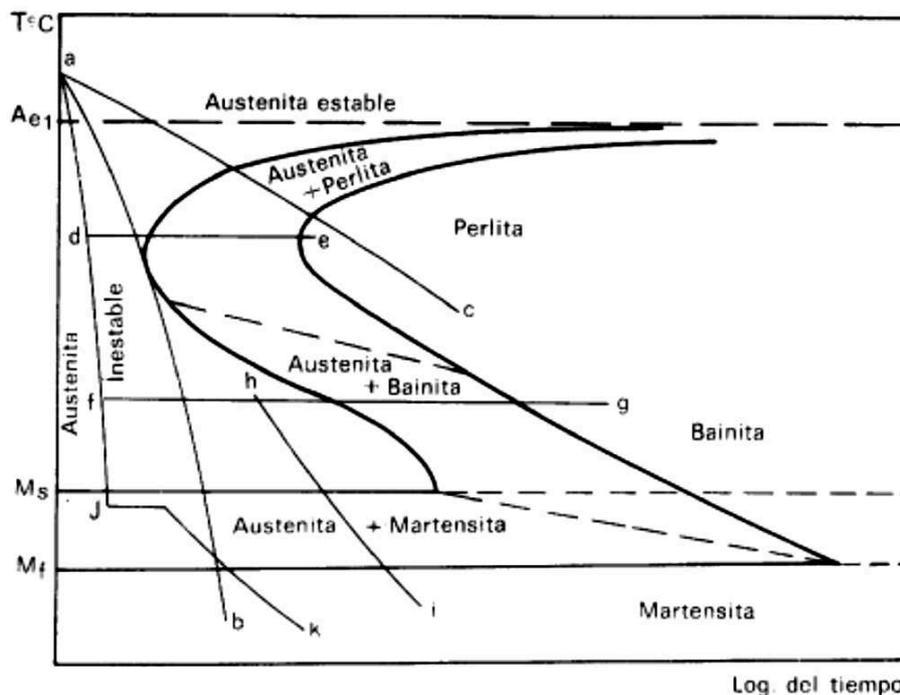
- Isotérmicos, para los procesos que se efectúen a temperatura constante.
- Continuos, para aquellos procesos en los cuales la temperatura varía permanentemente.

#### 1.7.1.1 Curvas TTT isotérmicas

Son diagramas que muestran la transformación de la austenita para un determinado acero, que ocurre a una temperatura constante dada por el baño de enfriamiento seleccionado para el tipo de tratamiento térmico, luego de ser calentado hasta la temperatura de austenización y enfriado en forma brusca. Este enfriamiento brusco debe permitir mantener una estructura totalmente austenítica, hasta que el acero alcance la temperatura del baño de enfriamiento. Según la temperatura del baño se obtiene un tipo de estructura para el acero seleccionado.

Estas curvas se aplican para interpretar los procedimientos a temperatura constante, tales como: obtención de perlita, tratamientos bainíticos y temple en baños calientes, y solo es aplicable cuando el tamaño de la pieza es pequeño.

En la figura 1.14 se muestra una curva de este tipo de un acero eutectoide (0.8% C). El ciclo a-d-e corresponde a una transformación que conduce a una estructura perlítica y el a-f-g a una estructura bainítica. Ms corresponde la temperatura a la cual comienza la formación de martensita y Mf la temperatura de transformación total. Una característica de la transformación martensítica, que la diferencia de la bainítica, consiste en que la martensita no progresa isotérmicamente, haciéndolo solo por disminución de la temperatura.



**Figura 1.14.** Curvas TTT isotérmicas de un acero eutectoide (0.8% C).

Fuente: <http://es.scribd.com/doc/79377258/Soldadura>

### 1.7.1.2 Curvas TTT de enfriamiento continuo

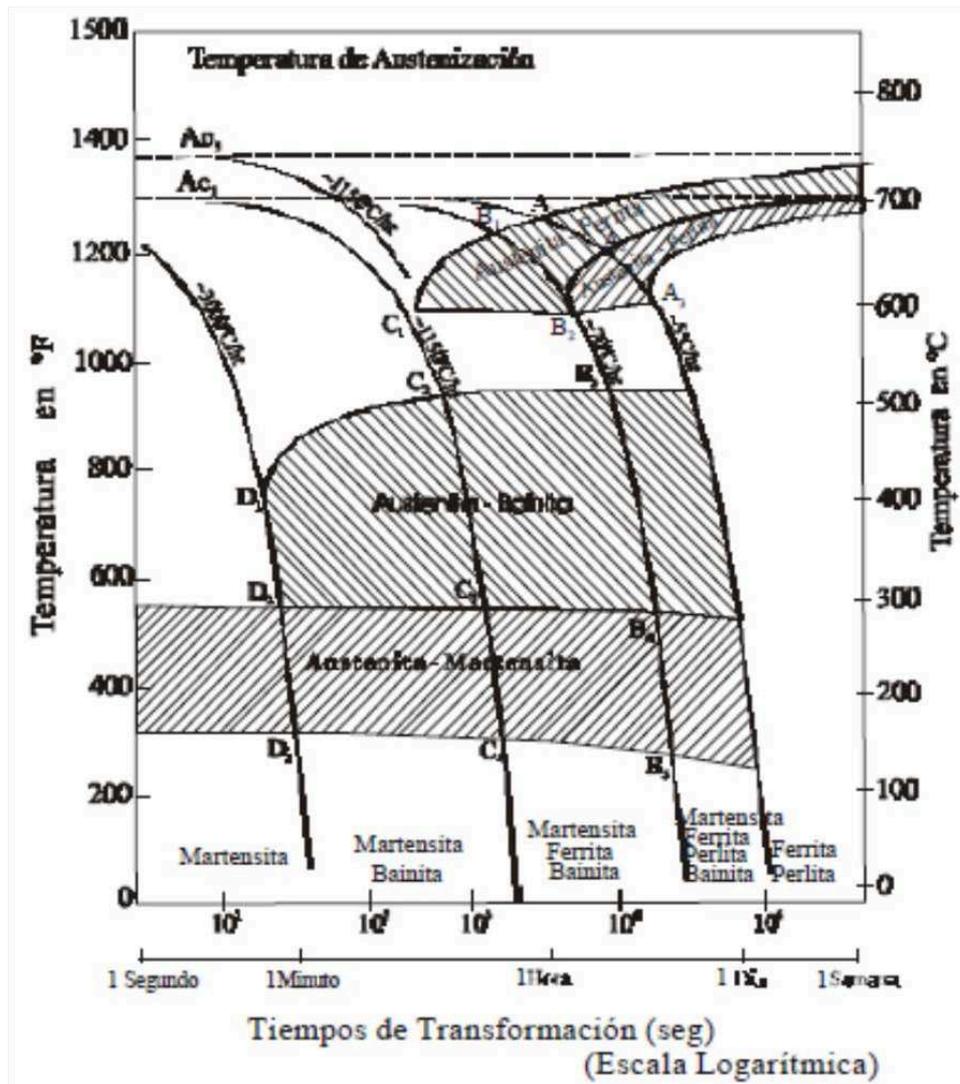
Sobre estos diagramas se determina la velocidad crítica de enfriamiento que es necesaria para que se forme martensita. Estas curvas se incluyen sobre la curva de transformación TTT correspondiente, curvas para diferentes velocidades de enfriamiento que proporcionan una idea más exacta del curso de la transformación; en cada una de ellas, se considera que la transformación empieza en el punto en que corta a la curva de transformación TTT donde inicia la reacción y termina cuando corta a la de fin de reacción. Además se considera, que en el enfriamiento continuo, la austenita se transforma igual que antes, pero la transformación no es homogénea; esto es que el enfriamiento continuo está formado por la integración de sucesivos enfriamientos y permanencias diferenciales escalonadas a las sucesivas temperaturas que se van alcanzando y como consecuencia, los productos de descomposición finales aparecen mezclados. Sin embargo, las transformaciones que se producen pueden estudiarse muy bien, en una primera aproximación, considerando que la austenita se halla a las temperaturas intermedias durante una fracción de tiempo, tanto menor, cuanto mayor sea la velocidad de enfriamiento y que ocurre en ellas una transformación isotérmica parcial y sucesiva.

El diagrama de enfriamiento continuo, es diferente al de transformación isotérmica, en que los cambios estructurales se verifican en tiempos ligeramente mayores y que no se observa la región bainítica.

En los diagramas isotérmicos, la información no es de aplicación práctica para los tratamientos térmicos usuales tales como: temple, normalizado y recocido de los aceros, porque se trata de procesos de enfriamiento continuo.

En la figura 1.15 está ilustrada la forma en que conduce al enfriamiento continuo y cuáles son las estructuras resultantes:

- Si se toma primero la velocidad de enfriamiento menor  $\sim 5^{\circ}\text{C}/\text{hora}$ , el acero es enfriado a través de las regiones en que hay transformación a ferrita A1 A2 y perlita A2 A3, estos constituyentes serán los componentes de la estructura final.
- Una velocidad mayor  $\sim 70^{\circ}\text{C}/\text{hora}$ , atraviesa las zonas de transformación en ferrita B1 B2, perlita B2 B3, bainita B3 B4 y martensita B4 B5, la estructura final presentará estos constituyentes.
- Durante el enfriamiento a velocidad más elevada  $\sim 1.150^{\circ}\text{C}/\text{hora}$ , el campo de la perlita no es atravesado; obtendremos pues, al final, sólo ferrita, bainita y martensita.
- Para velocidades de enfriamiento superiores a  $1.150^{\circ}\text{C}/\text{hora}$  y hasta  $3000^{\circ}\text{C}/\text{hora}$ , la estructura, de acuerdo con el diagrama, aparecerá libre de ferrita y consiste en casi todo bainita y pequeña proporción de martensita.
- Finalmente, como puede verse en la última curva de enfriamiento, velocidades por encima de  $3000^{\circ}\text{C}/\text{hora}$  son necesarias para obtener la estructura única de martensita que corresponde al temple total o estructura de partida de temple y revenido. Esta velocidad de enfriamiento corresponde, por tanto, a la velocidad crítica superior, o velocidad crítica de temple.



**Figura 1.15.** Diagrama de transformación durante el enfriamiento continuo y estructuras resultantes (Grange y Klefer).

Fuente: [http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/calderon\\_cj/Cap3.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/calderon_cj/Cap3.pdf)

## CAPÍTULO 2

### SOLDADURA INDIRECTA DE METALES

#### 2.1 PRINCIPIOS DE LA SOLDADURA INDIRECTA<sup>6</sup>

##### 2.1.1 DEFINICIÓN DE SOLDADURA INDIRECTA

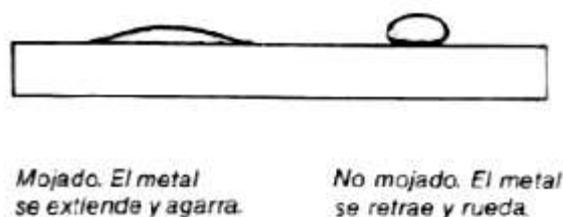
Soldadura indirecta es la unión térmica de dos materiales sólidos mediante el calentamiento local de las juntas a unir y la posterior adición del metal de aporte cuyo punto de fusión es inferior a las de las piezas que se han de soldar, este metal de aporte fluye a través de una holgura por acción capilar hasta rellenar la misma y su posterior solidificación.

##### 2.1.2 FUNDAMENTOS DE LA SOLDADURA INDIRECTA

###### 2.1.2.1 Mojabilidad

Para que sea posible la formación de la aleación de enlace es necesario que el metal de aportación moje perfectamente el metal base.

Se dice que un líquido "moja" una superficie cuando se extiende por ella; en caso contrario, se retrae sobre sí mismo y forma una gota que no se adhiere, no agarra, como se ilustra en la figura 2.1.

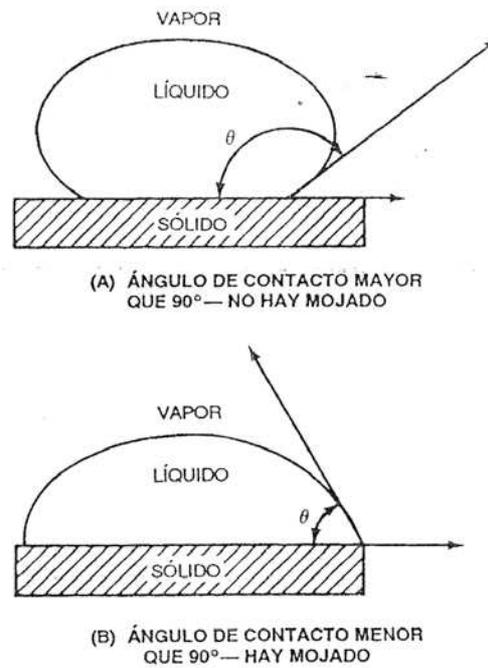


**Figura 2.1.** Esquema del concepto de mojabilidad.

**Fuente:**

<http://grupos.emagister.com/ficheros/vcruzada?fdwn=1&idGrupo=1440&idFichero=776284>

La figura 2.2 es una representación idealizada del concepto de mojado. Un ángulo de contacto menor que  $90^\circ$  medido entre el sólido y el líquido por lo regular identifica una característica de mojado positiva. Los ángulos de contacto mayores que  $90^\circ$  indican que no hay mojado.

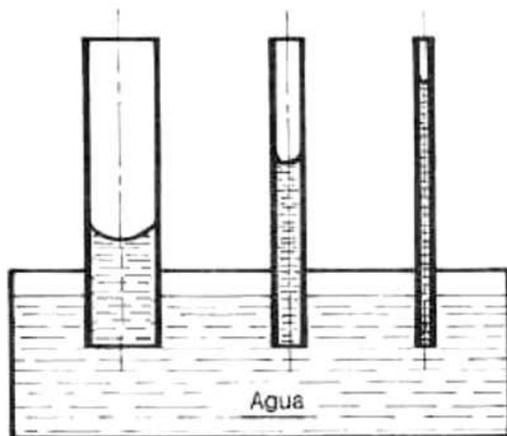


**Figura 2.2.** Ángulos de mojado de metales de aporte para soldadura fuerte.

Fuente: AMERICAN WELDING SOCIETY; Manual de Soldadura; Octava Edición; Tomo II; Editorial Prentize-Hall Hispanoamérica; México; 1996; Pág. 408.

### 2.1.2.2 Capilaridad

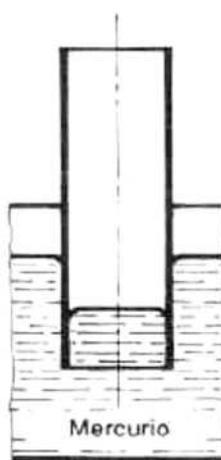
Es el nombre que recibe el fenómeno de la ascensión espontánea de un líquido por un tubo estrecho. La altura a que asciende un determinado líquido es tanto mayor cuanto más fino es el tubo (figura 2.3). En el caso de algunos líquidos, como el mercurio, se observa una depresión capilar (figura 2.4). En virtud de este fenómeno, una aportación líquida y que moje, introducida entre dos superficies, ascenderá más cuanto menor sea la separación entre ambas superficies.



**Figura 2.3.** Efecto de capilaridad. La superficie del líquido es cóncava (menisco).

Fuente:

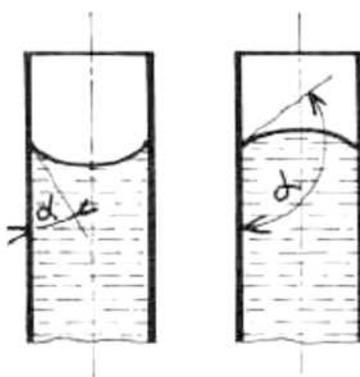
<http://grupos.emagister.com/ficheros/vcruzada?fdwn=1&idGrupo=1440&idFichero=776284>



**Figura 2.4.** Depresión capilar. La superficie del líquido es convexa.

Fuente:

<http://grupos.emagister.com/ficheros/vcruzada?fdwn=1&idGrupo=1440&idFichero=776284>



**Figura 2.5.**  $\alpha$  = ángulo de contacto.  $\alpha < 90^\circ$  Mojado;  $\alpha > 90^\circ$  No Mojado.

Fuente:

<http://grupos.emagister.com/ficheros/vcruzada?fdwn=1&idGrupo=1440&idFichero=776284>

### **2.1.2.3 Cohesión**

El fenómeno de la capilaridad es consecuencia de la tensión superficial (cohesión) que se manifiesta en la superficie de separación entre un líquido y un sólido, dos líquidos no miscibles, un sólido y un gas, un gas y un líquido. En un líquido en reposo, las fuerzas de cohesión molecular, producen una atracción mutua entre las moléculas, hasta que se alcanza el equilibrio.

### **2.1.2.4 Difusión molecular<sup>7</sup>**

Es un proceso espontáneo de transporte de moléculas del sistema cristalino de un material al otro. Al calentarse, las moléculas del material base se distancian y el metal de aporte en estado líquido penetra entre ellas. Al enfriarse, las moléculas se atraen y contraen el metal de aporte, produciendo la adhesión entre el metal base y el metal de aporte.

## **2.1.3 CLASIFICACIÓN DE LA SOLDADURA INDIRECTA**

### **2.1.3.1 Soldadura fuerte**

La soldadura fuerte une materiales calentándolos en presencia de un metal de aporte que tiene un cambio a fase líquida por encima de 450°C pero por debajo del cambio a fase sólida de los metales base. El metal de aporte se distribuye entre las superficies de la unión, que embonan íntimamente, por acción capilar. El calentamiento puede proveerse de muy diversas maneras. Este proceso de soldadura se estudiará de forma más profunda en un capítulo posterior

### **2.1.3.2 Soldadura blanda**

Se define como un proceso de unión en el cual se funde un metal de aporte con un punto de fusión que no excede los 450°C, y se distribuye mediante acción capilar entre las superficies empalmantes de los metales que se van a unir. En este proceso no ocurre la fusión de los metales base, pero el metal de aporte se humedece y combina con el metal base para formar una unión metalúrgica. Las superficies que se van a soldar deben limpiarse con anticipación para que estén libres de óxidos, grasas, etc. Debe aplicarse un fundente apropiado a las superficies empalmantes y calentarlas. Se añade a la unión un metal de aporte, denominado soldadura (soldante), y se distribuye

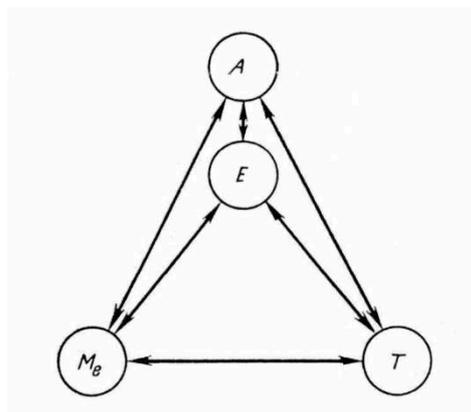
entre las partes que se ajustan estrechamente. Como proceso industrial, la soldadura blanda se asocia más estrechamente con el ensamble electrónico. También se usa para uniones mecánicas, pero no para uniones sujetas a tensiones o temperaturas elevadas.

## 2.2 ELEMENTOS Y FACTORES DE LA PRODUCCIÓN POR SOLDADURA INDIRECTA<sup>8</sup>

El diseño de la estructura tecnológica de la pieza y el diseño de los procesos tecnológicos son los problemas de mayor relevancia en la producción por soldadura indirecta, debido a que estos se deben encaminar a una alta calidad de las piezas soldadas y una eficacia en la producción.

El estudio de los elementos principales del sistema de soldadura indirecta aceptado para la producción, es una condición en la cual se fundamenta para asegurar la alta calidad de la pieza soldada. Estos elementos son seleccionados de acuerdo a las características de la pieza (A).

Para determinar la calidad de las piezas soldadas se ponen en consideración ciertos elementos del sistema productivo y estos son: la estructura de la pieza (E), el material del pieza (Me) y el proceso tecnológico (T) para soldadura indirecta de la pieza. Los diferentes factores permiten la caracterización de estos elementos (figura 2.6).



**Figura 2.6.** Elementos del sistema de producción por soldadura indirecta.

**Fuente:** LASHKÓ N y LASHKÓ A; Soldadura Indirecta de Metales; Editorial MIR; Moscú; 1979;

Pág. 24.

La estructura de la pieza es el elemento más importante en la producción por soldadura indirecta, este se caracteriza por dos grupos de factores; 1) los que

se refieren a la estructura: la clase de la pieza, el tipo de unión, la magnitud de holgura, la magnitud de solapa; 2) los de escala: el espesor de la pared de la pieza, la diferencia en espesores de las paredes de las piezas a soldar, las dimensiones máximas y la masa de las piezas.

El grado de heterogeneidad en el campo de temperatura es influenciado por los factores de escala, mientras que la influencia en el proceso tecnológico para la soldadura indirecta es condicionada por los factores de estructura, que ejercen el tipo de unión y la clase de la pieza soldada.

El material de la estructura (Me) es el segundo elemento del sistema de producción y los factores fisicoquímicos caracterizan a este elemento, este tipo de factores son muy importantes para la producción de soldadura indirecta, los regímenes admisibles del calentamiento de la pieza durante la soldadura indirecta, sus propiedades físicas, entre ellas el coeficiente de dilatación térmica y el régimen del tratamiento térmico.

El proceso tecnológico (T) es el tercer elemento del sistema de producción cuyo proceso incluye tres grupos de factores: técnicos, económicos y tecnológicos. Los factores técnicos caracterizan el equipamiento del proceso tecnológico para soldadura indirecta: equipo, medios de mecanización y automatización. Como factores económicos del proceso se incluyen: el costo de los materiales tecnológicos, las normas de tiempo y el salario. Como factores tecnológicos en la producción de soldadura indirecta se incluyen los materiales tecnológicos, en otras palabras las aleaciones de soldar, fundentes, medios gaseosos activos, pastas inhibidoras y otros.

El rendimiento económico, la alta calidad y fiabilidad de la pieza soldada pueden asegurarse solo a condición de la unidad y compatibilidad de los tres elementos característicos en el sistema de producción, así como de sus factores integrantes en las tres etapas de realización de la pieza soldada, durante su diseño, fabricación y explotación.

La compatibilidad de los tres elementos en el proceso preparatorio de la producción se realiza por una buena relación entre los parámetros técnico-económicos en el diseño de la estructura.

El conjunto de propiedades para la estructura de la pieza, que se manifiestan en la posibilidad de reducir los gastos de trabajo, fabricación, tiempo al preparar técnicamente la producción, materiales, explotación y reparación, basándose en una comparación con los correspondientes índices para estructuras de piezas soldadas similares, son los parámetros técnico-económicos.

Las posibilidades de la soldadura indirecta son ampliadas gracias al perfeccionamiento de materiales y tecnología. Por esto los parámetros técnico-económicos de una estructura es, en cierta medida, un concepto relativo, pues lo que antes no era tecnológico, comienza a ser tecnológico con el perfeccionamiento de los materiales y la tecnología. Las posibilidades técnicas de las fábricas condicionan los parámetros técnico-económicos de una estructura y en este sentido también son relativos, pues lo que para una empresa es tecnológico, puede no serlo para otra, debido a que tiene posibilidades técnicas menores.

Existe una serie de principios generales que deben tenerse en cuenta en todas las etapas de diseño y fabricación de las piezas soldadas, independientemente del carácter relativo sobre el concepto de la correspondencia a los parámetros técnico-económicos de una estructura. Al examinar la compatibilidad entre el material y la estructura, entre el material y el proceso tecnológico, o entre los tres factores en conjunto, es como se deducen estos principios.

La estabilidad de la composición y propiedades de los materiales estructurales y tecnológicos, que interaccionan en el proceso de soldadura indirecta, es una de las condiciones imprescindibles para asegurar la alta calidad y fiabilidad de las piezas soldadas.

Para los materiales usados en soldadura indirecta (aleaciones de soldar, fundentes y medios gaseosos) no son suficientes los datos sobre su composición, temperaturas de fusión y, para las aleaciones de soldar además los datos acerca de sus propiedades mecánicas; también hacen falta datos referentes a las propiedades especiales de los materiales, que determinan su compatibilidad con los metales a soldar.

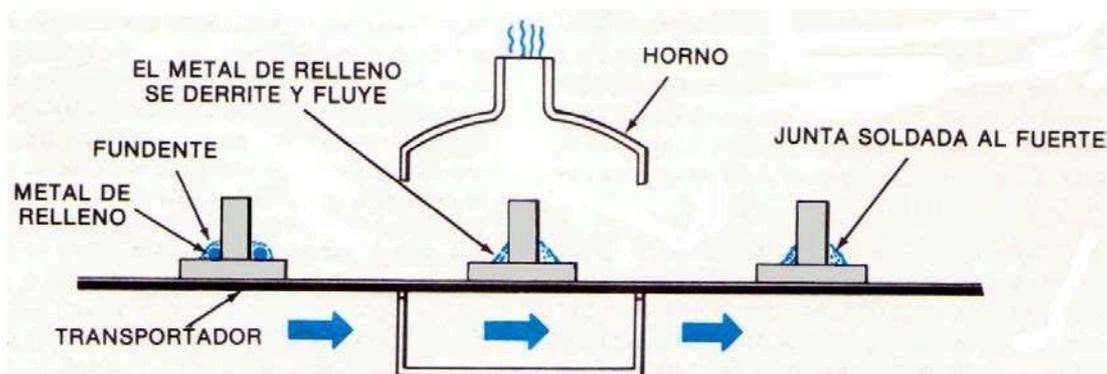
En lo que se refiere a las aleaciones de soldar, se necesitan datos sobre su compatibilidad con el material a soldar, en particular, las propiedades de las uniones soldadas por medio de estas, las temperaturas de soldadura indirecta, etc.

## 2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA INDIRECTA SEGÚN LA FUENTE DE CALENTAMIENTO<sup>8</sup>

### 2.3.1 SOLDADURA INDIRECTA EN HORNOS

El calentamiento en hornos para realizar la soldadura indirecta de metales es un procedimiento antiguo, pero solo cuando en la industria comenzaron a utilizarse hornos eléctricos, este procedimiento obtuvo una propagación especialmente amplia.

Las operaciones de producción alta usan hornos de transporte, en los cuales se colocan las partes de una banda transportadora y son conducidas a las diferentes secciones de calentamiento y enfriamiento. La banda transportadora entonces se mueve al horno a una velocidad regulada (figura 2.7). El metal de aporte, que es en forma de alambre, lamina, polvo o pasta, está colocado en la posición correcta cerca de la junta y el calor del horno derrite el metal de aporte. El tiempo de permanencia para la soldadura indirecta se calcula desde el momento que los materiales logran la temperatura de soldadura.



**Figura 2.7.** Calentamiento por horno para soldadura indirecta de producción.

Fuente: DEERE John; Soldadura; Primera Edición; Editorial Moline; Illinois; 1980; Pág. 50.

### **2.3.2 SOLDADURA INDIRECTA POR INMERSIÓN**

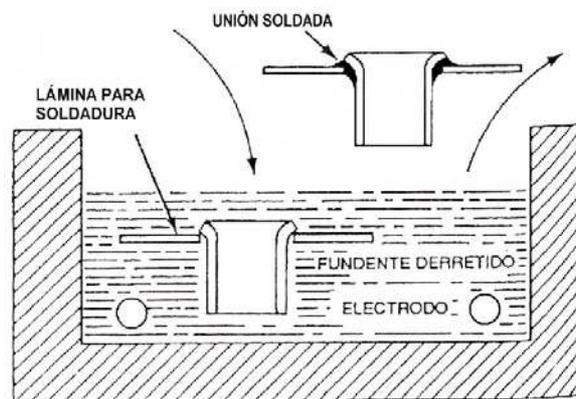
Dos métodos de soldadura indirecta por inmersión son la soldadura por inmersión en baño de metal fundido y la soldadura por inmersión en baño químico (fundente) fundido.

#### **Método de baño de metal fundido**

Este método por lo regular está limitado a la soldadura indirecta de ensamblajes pequeños, como las conexiones de alambres o tiras metálicas. Un crisol, generalmente de grafito, se calienta externamente hasta la temperatura requerida para mantener el metal de aporte de soldadura en estado fluido. Una capa de fundente cubre el metal de aporte fundido. El tamaño del baño fundido (crisol) y el método de calentamiento deben ser tales que la inmersión de las piezas en el baño no baje la temperatura de este último por debajo de una temperatura adecuada de soldadura. Las piezas deberán estar limpias y protegidas con fundente antes de introducirse en el baño. Los extremos de los alambres o las piezas deberán mantenerse firmemente juntos desde que se saquen del baño hasta que el metal de aporte se haya solidificado por completo.

#### **Método de baño químico (fundente) fundido**

Este método de soldadura indirecta requiere un recipiente metálico o de cerámica para el fundente y un mecanismo para calentar el fundente hasta una temperatura conveniente de soldadura. El calor puede aplicarse externamente con un soplete o internamente con un elemento de calefacción por resistencia eléctrica. Un tercer método implica el calentamiento por resistencia eléctrica del fundente mismo; en este caso, el fundente debe derretirse primero mediante calentamiento externo (figura 2.8).



**Figura 2.8.** Ilustración de la soldadura indirecta por inmersión en baño químico.

**Fuente:** AMERICAN WELDING SOCIETY; Manual de Soldadura; Octava Edición; Tomo II; Editorial Prentize-Hall Hispanoamérica; México; 1996; Pág. 389.

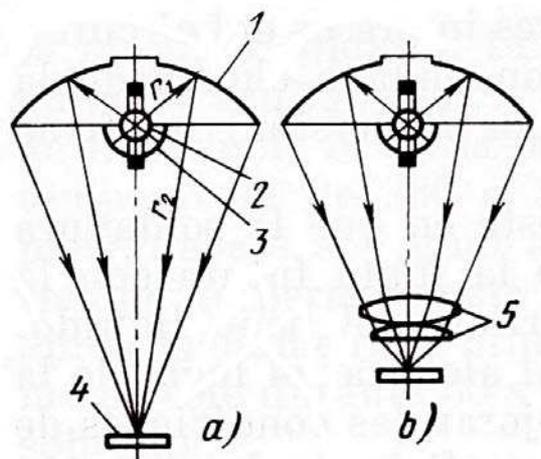
Las piezas deberán limpiarse, ensamblarse y de preferencia sujetarse con guías antes de sumergirlas en el baño. El metal de aporte de soldadura indirecta se coloca previamente en forma de anillos, rondanas, barras, pasta o como revestimiento sobre el metal base. Puede requerirse precalentamiento para asegurar que las piezas estén secas y evitar la congelación de fundente en las piezas, lo que podría causar una fusión selectiva del fundente y el metal de aporte de soldadura. Las temperaturas de precalentamiento por lo regular son cercanas al punto de fusión del fundente. Una cierta cantidad de fundente queda adherida al ensamble soldado. El fundente derretido debe escurrir de las piezas mientras éstas están calientes. El fundente que permanezca en las piezas frías deberá eliminarse con agua o agentes químicos.

### 2.3.3 SOLDADURA INDIRECTA POR FOCOS LUMINOSOS E INFRARROJO

El calentamiento por medio de rayos luminosos enfocados posee cualidades de suma importancia para la soldadura indirecta, la energía se suministra sin contacto con el metal a soldar, por eso la fuente de calor y la pieza a calentar pueden situarse a una distancia considerable, se pueden calentar metales independientemente de sus propiedades eléctricas y magnéticas. Al emplear este tipo de calentamiento el control del proceso para soldar se puede realizar a simple vista.

La soldadura indirecta al infrarrojo puede considerarse como una variación de la soldadura indirecta en horno en la que el calor se suministra por radiación luminosa de onda larga.

Como fuente de energía radiante se usan potentes lámparas de arco de xenón y también lámparas menos potentes de cuarzo. El calentamiento se produce por la radiación invisible de lámparas de cuarzo de alta intensidad capaces de proporcionar hasta 5000 watts de energía radiante. El aporte de calor varía en proporción inversa con el cuadrado de la distancia de la fuente, pero no es usual que las lámparas se moldeen de modo que sigan el contorno de las piezas que se van a calentar. Se usan reflectores concentradores para enfocar la radiación sobre las piezas.



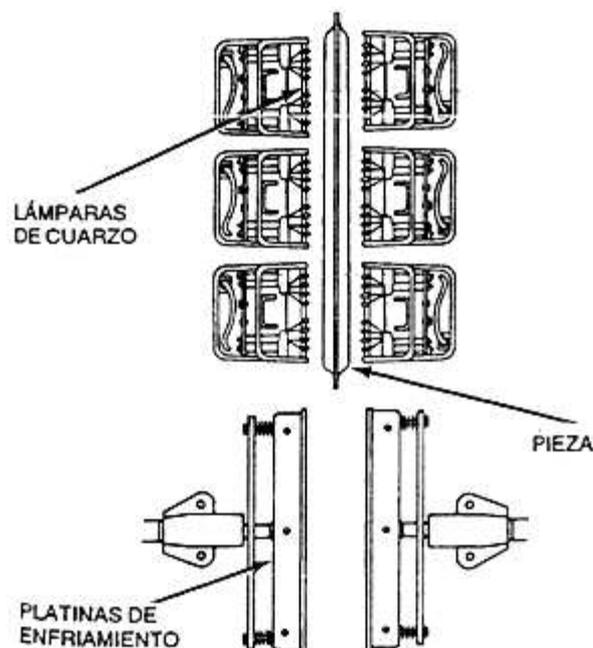
**Figura 2.9.** Esquemas ópticos del concentrador de radiación.

a) Monoelipsoidal; b) Monoelipsoidal con condensador de una lente.

1. reflector; 2. lámpara de xenón; 3. contrareflector; 4. objeto a calentar;  
5. condensador.

**Fuente:** LASHKÓ N y LASHKÓ A; Soldadura Indirecta de Metales; Editorial MIR; Moscú; 1979;  
Pág. 248.

Si es preciso soldar al vacío o con protección de gas inerte, el ensamble y las lámparas se colocan en una cámara de cristal o retorta que pueda evacuarse o llenarse con gas inerte. En seguida se calienta la unidad hasta una temperatura controlada, indicada por termopares. La figura 2.10 muestra una disposición para soldadura indirecta al infrarrojo. La pieza se lleva a las platinas de enfriamiento una vez soldada.



**Figura 2.10.** Equipo para soldadura indirecta al infrarrojo.

**Fuente:** AMERICAN WELDING SOCIETY; Manual de Soldadura; Octava Edición; Tomo II; Editorial Prentize-Hall Hispanoamérica; México; 1996; Pág. 390.

### 2.3.4 SOLDADURA INDIRECTA POR RAYO ELECTRÓNICO

La energía cinética de electrones es la base para el proceso de calentamiento por rayo electrónico. Lentes enfocadores magnéticos y electrostáticos comprimen el flujo de electrones que se desplazan con gran velocidad del cátodo al ánodo en un campo eléctrico fuerte. El calentamiento de la superficie es producido por la energía cinética del choque de los electrones contra la superficie de la pieza (ánodo), el cual se transforma en energía térmica.

Cámaras especiales de vacío son los lugares donde se produce el calentamiento por rayo electrónico para soldar. El haz electrónico se forma por la emisión de electrones a partir del cátodo calentado.

Instalaciones complicadas debido al empleo de vacío, dispositivos de mando de alta precisión, costo elevado y bajo rendimiento del proceso para soldar, son las desventajas de este procedimiento.

### 2.3.5 SOLDADURA INDIRECTA CON LÁSER

La radiación electromagnética de alta intensidad es un flujo luminoso, este se enfoca fácilmente en un punto cuyo diámetro es de 1 a 10 micras, esto permite

en un corto tiempo concentrar la energía en un área pequeña. Es posible alterar en forma mínima el estado del metal básico adyacente a la costura soldada utilizando la irradiación de láser.

Un fácil enfoque mediante esquemas ópticos simples es la ventaja que presenta la radiación de láser. Sin embargo la inestabilidad de las características energéticas de salida del láser es el defecto de mayor relevancia que presenta este procedimiento de calentamiento.

### **2.3.6 SOLDADURA INDIRECTA CON SOPLETE**

En este proceso el calentamiento es por medio de uno o más sopletes de gas. Dependiendo de la temperatura y de la cantidad de calor requerida, el gas combustible (acetileno, propano, gas, etc.) se puede quemar con aire, oxígeno y aire comprimido.

Los sopletes de aire-gas natural son los que producen la temperatura de flama más baja y también el mínimo calor. El acetileno a presión se usa en el soplete de aire-acetileno con aire a presión atmosférica. Se tiene gran aplicación usar sopletes de aire-gas natural como de aire-acetileno para soldar piezas pequeñas y secciones delgadas.

Los sopletes que usan oxígeno y gas natural u otros gases de cilindro (propano, butano) tienen temperaturas de flama más altas. Si se aplican con una flama neutral o levemente reductora, es posible obtener excelentes resultados en muchas aplicaciones de soldadura indirecta.

Los sopletes de oxihidrógenos se usan mucho para la soldadura indirecta de aluminio y aleaciones no ferrosas. Lo bajo de la temperatura reduce la posibilidad de sobrecalentar el ensamble durante la soldadura indirecta. Un exceso de hidrógeno ayuda a limpiar y proteger la unión.

Para la soldadura indirecta manual con soplete, éste puede equiparse con una sola punta, que puede ser de una o varias flamas. La soldadura indirecta manual con soplete resulta especialmente útil para unir ensambles con secciones de masa desigual.

Es posible configurar operaciones mecanizadas, si la tasa de producción lo justifica, empleando uno o más sopletes equipados con puntas de una o varias

flamas. La máquina puede diseñarse de modo que mueva el trabajo o bien los sopletes, o ambas cosas. Si se emplean flamas de gas y aire premezclados, se utiliza un mechero del tipo refractario.

El calentamiento con soplete para soldadura indirecta sólo puede usarse con metales de aporte acompañados de fundente o con autofundente. Esta lista incluye aluminio-silicio, plata, cobre-fósforo, cobre-cinc y níquel. Con excepción de los metales de aporte de cobre-fósforo, todos requieren fundente. En ciertas aplicaciones incluso los metales de aporte de cobre-fósforo autofundentes requieren fundente adicional.

El metal de aporte puede colocarse previamente en la unión y cubrirse con fundentes antes del calentamiento, o alimentarse en el punto de aplicación de la flama. Primero se aplica calor a la unión y se derrite el fundente, seguido por el metal de aporte que entonces fluye al interior de la unión. Es preciso evitar el sobrecalentamiento del metal base y del metal de aporte, ya que este último podría difundirse con rapidez y salir de la unión bajo la acción de la gravedad. El gas natural es adecuado para la soldadura indirecta con soplete porque la temperatura relativamente baja de su flama reduce el peligro de sobrecalentamiento.

El metal de aporte para soldadura fuerte puede colocarse previamente en la unión en forma de anillos, rondanas, tiras, cilindros o polvos, o puede alimentarse a mano, generalmente en forma de alambre o varilla. En todos los casos, la limpieza y el uso del fundente correcto son esenciales.

### **2.3.7 SOLDADURA INDIRECTA AL ARCO ELÉCTRICO**

Para soldar piezas pequeñas se emplea el calentamiento mediante un arco eléctrico, el arco puede producirse entre una hoja metálica de aleación soldante, colocada en la holgura entre las piezas a unir, y un electrodo de carbón o grafito. El calentamiento del metal cerca de la holgura y la fusión de la aleación soldante ocurren por la acción del calor del arco. Reduciendo el voltaje con la ayuda de un transformador se puede utilizar la energía eléctrica de la red industrial como fuente de energía.

Al soldar mediante este procedimiento, un terminal de la fuente de corriente continua se conecta al soporte que está en contacto con la pieza a soldar y el

otro terminal se conecta al electrodo. Cuando se produce el arco la hoja metálica de la aleación soldante se funde y se llena la holgura.

Se debe tener presente al emplear este procedimiento de calentamiento que las aleaciones de soldar no deben tener componentes con tensión alta de vapor, tales como el zinc y el cadmio, que bajo la acción térmica del arco se queman y se evaporan.

### **2.3.8 SOLDADURA INDIRECTA POR RESISTENCIA**

El calor necesario para la soldadura indirecta por resistencia se obtiene del flujo de una corriente eléctrica a través de los electrodos y de la unión que se va a soldar. Las piezas que forman la unión se convierten en parte del circuito eléctrico. El metal de aporte de soldadura indirecta, en alguna forma que resulte conveniente, se coloca previamente en la unión o se alimenta durante la soldadura. La aplicación de fundentes se hace con la debida consideración de la conductividad de los fundentes. (La mayor parte de los fundentes son aislantes cuando están secos.) Se utiliza fundente siempre que no se introduzca específicamente una atmósfera que realice la misma función. Las partes por soldar se sostienen entre dos electrodos y se aplican una presión y una corriente adecuada. La presión deberá mantenerse hasta que la unión se haya solidificado. En algunos casos, ambos electrodos pueden estar en el mismo lado de la unión, con un respaldo apropiado que mantenga la presión necesaria.

El metal de aporte de soldadura fuerte se aplica previamente en forma de alambre, calzas, rondanas, anillo, polvo o pasta. En unos cuantos casos es posible la alimentación durante la soldadura. Los fundentes húmedos por lo regular se aplican en forma de una mezcla muy aguada justo antes de colocar el ensamble en la fijación para soldadura indirecta. No se usan fundentes secos porque son aislantes y no permiten el paso de suficiente corriente.

Las piezas por soldar deben estar limpias. Ellas, junto con el metal de aporte y el fundente, se ensamblan y colocan en la fijación, y se aplican presión. Conforme fluye la corriente, los electrodos se calientan, a menudo hasta la incandescencia, y el fundente y el metal de aporte se derriten y fluyen. La corriente deberá ajustarse a un nivel tal que se logre un calentamiento rápido y

uniforme de las piezas. Si hay sobrecalentamiento se corre el riesgo de oxidar o fundir el trabajo, y los electrodos se deteriorarán. Si la corriente es muy baja, se prolongará el tiempo de soldadura. La mejor combinación de calentamiento rápido con una vida útil razonable larga de los electrodos se determina experimentando con diferentes composiciones de electrodos, geometrías y voltajes.

El enfriamiento rápido desde una temperatura elevada (extinción) de las piezas facilitará la eliminación del fundente. El ensamble soldado primero deberá enfriarse lo suficiente para que la soldadura pueda mantener unidas las piezas.

La soldadura indirecta por resistencia tiene aplicación sobre todo en uniones que tienen una configuración relativamente simple. Es difícil lograr una distribución uniforme de la corriente, y por tanto un calentamiento uniforme, si el área que se va a soldar es grande o discontinua, o desproporcionada en una dimensión. El equipo consiste en tenazas o abrazaderas con los electrodos sujetos en el extremo de cada brazo. De preferencia, las tenazas deberán estar enfriadas por agua, a fin de evitar el sobrecalentamiento. Los brazos son conductores portadores de corriente que se conectan mediante cables a un transformador.

Los electrodos para soldadura indirecta por resistencia se fabrican con conductores eléctricos de alta resistencia, como los bloques de grafito o de carbón, las varillas de tungsteno o molibdeno, o incluso acero en algunos casos. El calor para soldadura indirecta se genera principalmente en los electrodos y fluye hacia el trabajo por conducción. En general no resulta satisfactorio usar la resistencia de las piezas de trabajo como única fuente de calor.

La presión aplicada con una máquina para soldadura de puntos, prensas, pinzas u otro mecanismo debe ser suficiente para mantener un buen contacto eléctrico y unir firmemente las piezas durante la fusión del metal de aporte. La presión debe mantenerse durante el tiempo en el que fluye la corriente y después de que ésta se interrumpe, hasta que la unión se solidifica. La duración del flujo de corriente variará entre cerca de un segundo para trabajos pequeños y delicados hasta varios minutos para trabajos más grandes. Por lo regular, el operador controla este tiempo, quien determina si ya se completó la

soldadura indirecta con base en la temperatura y el flujo del metal de aporte fundido.

### **2.3.9 SOLDADURA INDIRECTA ELECTROLÍTICA**

El fenómeno de que el cátodo sumergido en el electrolito se calienta al pasar por este último una corriente eléctrica es el fundamento en el cual se basa la soldadura en electrolitos. Una resistencia eléctrica alta ocasionada por los gases y vapores que se forman alrededor del cátodo es la causa principal para el calentamiento intenso del cátodo cuando circula corriente eléctrica a través del electrolito.

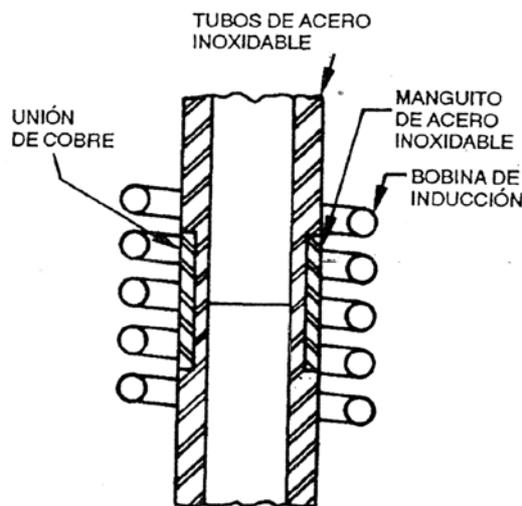
La composición y temperatura de los electrolitos, así como el tiempo para el calentamiento condicionan el régimen de calentamiento en electrolitos. Soluciones acuosas de sales y ácidos son utilizadas como electrolitos.

Unir metales de diferente estructura es la ventaja que presenta la soldadura en electrolito frente a los demás procedimientos de soldadura. La gran velocidad de calentamiento, al automatizar el proceso permite lograr alta eficacia, asegurando buena calidad en las uniones soldadas.

Con este procedimiento solo se puede soldar piezas pequeñas y de forma simple y esta es su principal desventaja.

### **2.3.10 SOLDADURA INDIRECTA POR INDUCCIÓN**

El calentamiento en este proceso se obtiene de una corriente eléctrica inducida en las piezas que se van a unir. En este proceso, las piezas se colocan dentro o cerca de una bobina enfriada por agua que transporta corriente alterna. Las piezas por calentar no forman parte del circuito eléctrico, sino que actúan como secundario en cortocircuito de un transformador del cual la bobina de trabajo, que está conectada a la fuente de potencia, es el primario. Tanto en las piezas magnéticas como en las no magnéticas, el calentamiento se debe a la resistencia de las piezas a las corrientes que la acción de transformador induce en ellas (figura 2.11).

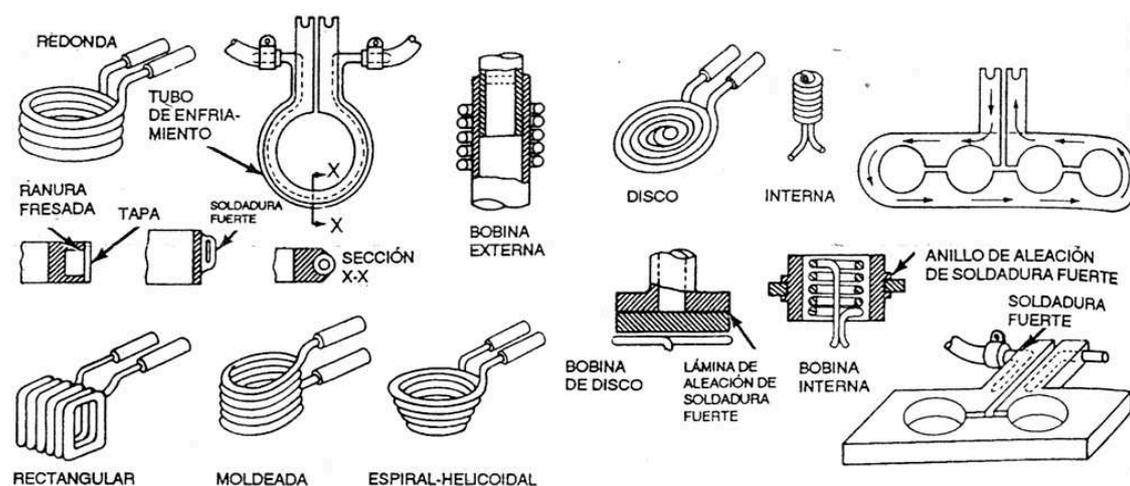


**Figura 2.11.** Unión en tubos de acero inoxidable hecha mediante soldadura indirecta por inducción en una atmósfera controlada. Obsérvese la colocación de la unión en la bobina de inducción.

**Fuente:** AMERICAN WELDING SOCIETY; Manual de Soldadura; Octava Edición; Tomo II; Editorial Prentize-Hall Hispanoamérica; México; 1996; Pág. 386.

El metal de aporte de soldadura indirecta se coloca previamente en la unión. Se requiere un diseño cuidadoso de la unión y de la configuración de la bobina para asegurar que las superficies de todos los miembros de la unión alcancen la temperatura de soldadura al mismo tiempo. Se utiliza fundente excepto cuando se introduce una atmósfera especial que desempeña la misma función.

Las frecuencias para soldadura indirecta por inducción generalmente varían entre 10 y 450 kHz. Las frecuencias más bajas se obtienen con generadores de estado sólido, y las más altas, con osciladores de tubos de vacío. Los generadores de inducción se fabrican con capacidades desde un kilowatt hasta varios cientos de kilowatts de salida. Los diversos diseños de bobinas de inducción se ilustran en la figura 2.12. Un generador puede usarse para energizar varias estaciones de trabajo individuales en secuencia, empleando un interruptor de transferencia, o bien los ensambles retenidos con fijaciones se pueden indizar o procesar secuencialmente por una bobina tipo transportador y así calentarse hasta la temperatura apropiada de soldadura.



**Figura 2.12.** Bobinas y placas típicas para soldadura indirecta por inducción.

Fuente: AMERICAN WELDING SOCIETY; Manual de Soldadura; Octava Edición; Tomo II; Editorial Prentize-Hall Hispanoamérica; México; 1996; Pág. 387.

La soldadura indirecta por inducción se emplea cuando se requiere un calentamiento muy rápido. El tiempo de procesamiento por lo regular es del orden de segundos cuando se manejan grandes cantidades de piezas en forma automática. Este tipo de soldadura fuerte se ha utilizado ampliamente para fabricar productos industriales y de consumo; ensambles estructurales; productos eléctricos y electrónicos; herramientas de minería, máquinas herramientas, herramientas manuales, equipo militar, armamentos, y ensambles aeroespaciales.

Los ensambles se pueden unir mediante soldadura indirecta por inducción en una atmosfera controlada colocando los componentes y la bobina en una cámara no metálica, o colocando la cámara y el trabajo dentro de la bobina.

## 2.4 ASPECTOS TECNOLÓGICOS DEL PROCESO DE SOLDADURA INDIRECTA<sup>8</sup>

### 2.4.1 OPERACIONES TECNOLÓGICAS EN LA SOLDADURA INDIRECTA

Una serie de transiciones ordenadas y consecutivas permiten lograr una operación tecnológica del proceso para fabricar algún elemento. Es necesaria la operación preparatoria de la capa superficial para que entren en acción mutua el metal a soldar y la aleación soldante líquida para el proceso de

soldadura, esta operación consiste en eliminar previamente del metal a soldar y la aleación soldante grasas, aceites, suciedad y películas gruesas no metálicas, como las de óxido.

Mecánica y químicamente se pueden quitar las películas no metálicas, mediante el decapado de las piezas en soluciones especiales, antes de realizar la soldadura. Decapado, lavado, neutralización de los residuos del decapado y secado son los pasos para quitar químicamente las películas no metálicas. Las composiciones que tiene el metal a soldar condicionan el régimen y la composición de las soluciones para el decapado.

Sobre la fluidez de la aleación soldante lo que puede ejercer una influencia notoria es la rugosidad de la capa superficial. Por eso, cuando esta aleación entra en la holgura, se debe asegurar el grado requerido de rugosidad en los sectores de la superficie, que se someten a la soldadura. La rugosidad de la superficie ejerce una menor influencia si la aleación de soldar se coloca en la propia holgura. El ciclo temperatura-tiempo del proceso determina la propia operación de soldadura, por el régimen temperatura-tiempo y la magnitud, cuando la presión para soldar es aplicada.

Antes de realizar la soldadura indirecta, o durante el proceso de calentamiento para ésta, tienen que eliminarse las tensiones internas de tracción que surgen debido al tratamiento térmico o a la deformación plástica, para prevenir que el metal aportado líquido provoque en el metal a soldar fragilidad y además se debe estabilizar la estructura del metal base.

La eliminación de los residuos de fundentes, limpieza de la unión para quitar los solapamientos de la aleación soldante, maquinado de la pieza por corte o su tratamiento térmico, son las operaciones tecnológicas de mayor importancia después de soldar.

El control de calidad en las uniones soldadas es determinado por las condiciones del elemento que a su vez se caracteriza por sus propiedades de servicio: mecánicas, hermeticidad, resistencia eléctrica, resistencia a la corrosión, resistencia contra choques térmicos, etc. El mejor método para controlar la calidad en las uniones soldadas de una pieza es el ensayo de éstas

últimas bajo condiciones de carga, o aquellas condiciones que las simulen, en el transcurso de un plazo dado para su funcionamiento.

El objetivo de los ensayos no destructivos para controlar la calidad de la pieza soldada es detectar los defectos en las uniones soldadas y valorar su grado de peligrosidad bajo condiciones de carga para la pieza soldada.

#### **2.4.2 DISEÑO DEL PROCESO TECNOLÓGICO DE SOLDADURA INDIRECTA**

El diseño de la estructura tecnológica de la pieza, así como el diseño del proceso tecnológico de soldadura para las piezas, son las tareas más importantes en el sistema actual que sirve para preparar el proceso productivo, encaminadas a asegurar alta calidad, fiabilidad de las piezas soldadas, así como la eficacia en la producción de soldadura

Se distinguen parámetros técnico-económicos de las piezas que pueden ser de producción y de explotación. Estos parámetros para la producción suponen una fabricación de la pieza donde pueda usarse un proceso tecnológico altamente productivo que se caracteriza por el costo mínimo, al cumplirse el volumen prefijado de producción, asegurando las características de servicio de la pieza soldada. Los parámetros técnico-económicos para la explotación suponen, además, la reducción de gastos durante el servicio tecnológico y la reparación de la pieza soldada.

En muchos casos, la solución constructiva eficaz no encuentra su solución tecnológica evidente, lo que exige abordar en forma conjunta los problemas referentes al diseño, a la preparación para fabricar la pieza soldada o para su reparación. Sin embargo, los parámetros técnico económicos no limitan las soluciones constructivas, sino que ante todo contribuyen a perfeccionar la tecnología y exigen una coordinación precisa en el sistema de dirección en los servicios de diseño y tecnología.

El diseño de las piezas fabricadas mediante soldadura indirecta pasa hoy día por tres etapas: en la primera etapa de diseño se determina la posibilidad de obtener, en principio, diferentes soluciones constructivas y se analiza la racionalidad tecnológica. En esta etapa se elige el procedimiento de soldadura según la formación de la costura soldada y la eliminación de la película de

óxidos; materiales tecnológicos compatibles con metales de la estructura; regímenes aproximados de soldadura indirecta que aseguren los valores dados en las propiedades de servicio de las uniones soldadas.

La segunda etapa del diseño es la creación del proyecto técnico donde se elaboran diferentes variantes constructivas de las piezas principales, de las unidades de montaje y de la pieza soldada y se elige aquella que satisface, de modo más completo, los requisitos de suma importancia que se plantean ante las características de explotación de esta pieza. Los requisitos más importantes también pueden ser el rendimiento económico de la producción de la pieza soldada, su peso mínimo, etc.

Para cumplir la tercera etapa en el diseño de una estructura soldada, es necesario que sea diseñado un proceso tecnológico óptimo de soldadura a partir del cual sea posible realizar un estudio profundo de la estructura para la pieza soldada con el fin de asegurar buenos parámetros técnico-económicos.

El diseño del proceso tecnológico para la soldadura indirecta, permite garantizar una alta calidad de las piezas soldadas y así elevar la eficacia de producción.

## **2.5 VENTAJAS DE LA SOLDADURA INDIRECTA**

Al comparar la soldadura indirecta con otros procesos de soldadura se encuentran algunas ventajas como son:

- Se pueden unir áreas de empalmes grandes de forma sencilla.
- Se pueden unir piezas de espesores diferentes.
- No es necesario fundir los metales base como se realiza en otros procesos de soldadura.
- Debido a que no se requiere temperaturas elevadas de soldadura las piezas a soldarse no sufren cambios en su estructura, con lo cual las propiedades del metal base son menos afectadas.
- Es posible la unión de metales y no metales.
- Se reduce la distorsión y los esfuerzos residuales.

## **2.6 DESVENTAJAS DE LA SOLDADURA INDIRECTA**

Si bien la soldadura indirecta tiene ventajas al compararla con otros procesos de soldadura, también presenta desventajas como son:

- Puede presentarse erosión del metal base, dependiendo del espesor de las piezas a unir y de las combinaciones de materiales.
- Se puede tener una ductilidad demasiado baja en la unión resultante debido a la formación de fases quebradizas.
- Al emplear este proceso de soldadura las juntas soldadas no pueden ser fácilmente verificadas con ensayos no destructivos

## **CAPÍTULO 3**

### **SOLDADURA FUERTE<sup>9</sup>**

#### **3.1 DEFINICIÓN**

La soldadura fuerte también conocida en la terminología inglesa como brazing, es un proceso de unión metalúrgica térmica en el que el metal de aporte, se calienta hasta su fusión que mediante acción capilar fluye entre la holgura que existe entre los materiales a soldar, la acción capilar entonces empuja el metal fundido de soldadura entre las superficies de la junta uniéndolas por atracción atómica y mediante difusión, al enfriarse, el metal solidificado de soldadura fuerte forma una ligadura sólida en la junta. El material de aporte tiene un punto de fusión por encima de los 450°C, pero siempre por debajo del punto de fusión de los componentes que va a unir. En este proceso de soldadura se puede unir materiales disímiles y componentes con masas y tamaños diferentes.

#### **3.2 REQUERIMIENTOS PARA SOLDADURA FUERTE**

Para la correcta aplicación de cualquier operación de soldadura fuerte se debe tomar en cuenta la correcta disposición de las juntas y la limpieza de óxidos y cualquier contaminante de las superficies. La limpieza además de realizarla antes del proceso de soldadura se puede lograr aplicando una capa de un fundente especial a las superficies, estas al ser calentadas, son capaces de disolver toda materia extraña.

#### **3.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO**

En la aplicación de soldadura fuerte más simple, las superficies que se van a unir una vez limpias de contaminantes y óxidos, se recubren con fundentes. Después se calienta el área de la unión hasta que el fundente se derrite y limpia los metales base, entonces quedan protegidos contra una oxidación adicional por la capa de fundente líquido. Luego, el metal de aporte se funde en algún punto de superficie del área de unión. La atracción capilar entre el metal

base y el metal de aporte es mucho mayor que aquella entre el metal base y el fundente; por tanto, el metal de aporte desplaza al fundente. Al enfriarse la unión hasta la temperatura ambiente, quedará llena de metal de aporte sólido, y el fundente solidificado se encontrará en la periferia de la unión.

La unión metalúrgica en este proceso se establece por la difusión, es decir, interpenetración granular entre el metal base y el metal de aporte. Esta difusión crea una aleación llamada "aleación de enlace" de poco espesor (del orden de una micra).

El flujo capilar es el principio físico fundamental que garantiza la unión por soldadura fuerte en todos los casos en que el metal de aporte fundido moja ambas superficies de unión, la capilaridad es un resultado de la tensión superficial entre el o los metales base y el metal de aporte, protegido por un fundente o una atmósfera, y establecido por el ángulo de contacto entre el metal base y el metal de aporte. En el flujo del metal de aporte de soldadura fuerte influyen aspectos dinámicos sobre la fluidez, la viscosidad, la presión de vapor, la gravedad y sobre todo los efectos de reacciones metalúrgicas entre el metal de aporte y el metal base.

El diseño de la unión debe tener entonces el espacio suficiente para que permita una acción capilar eficiente y la resultante coalescencia. La unión de soldadura fuerte típica tiene un área relativamente grande y una separación muy angosta. La separación debe ser suficientemente grande para no limitar el flujo del metal de aporte fundido en toda la interfase, y por lo contrario, si la separación en la unión es demasiado grande la acción capilar se reducirá y habrá áreas entre las partes donde no haya metal de aporte.

Las uniones que se van a soldar en fuerte por lo regular se preparan con separaciones de 0.025 a 0.25 mm (0.001 a 0.01 plg); por ello, la fluidez del metal de aporte es un factor importante. Una fluidez elevada es una característica deseable en los metales de aporte para soldadura fuerte, ya que la acción capilar podría ser insuficiente para atraer un metal de aporte viscoso.

### 3.4 CLASES DE JUNTAS PARA SOLDADURA FUERTE

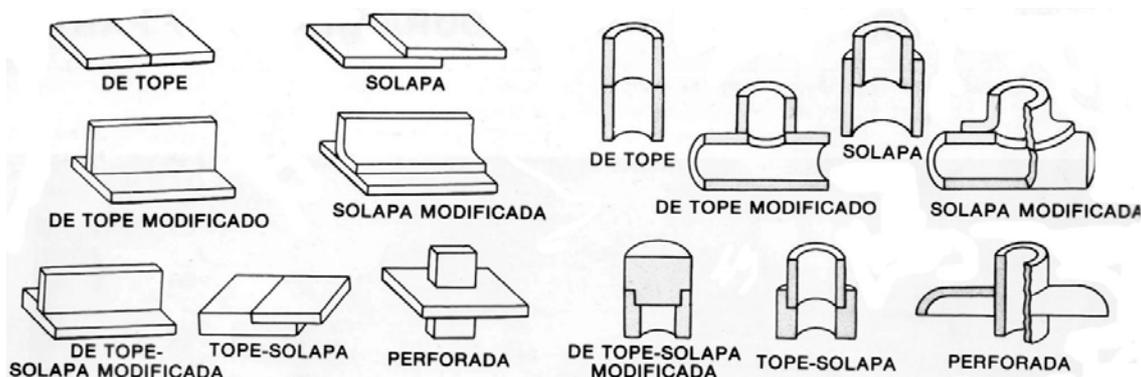
Las dos juntas básicas para soldadura fuerte son la junta solapada y la junta de tope (figura 3.1). Las juntas-T y juntas esquinadas se consideran juntas de tope.

La junta solapada ofrece la resistencia máxima. Las uniones superpuestas se usan con mayor frecuencia en la soldadura fuerte, porque proporcionan un área de interfase relativamente grande entre las partes. La solapa deberá ser por lo menos tres veces el grosor de la sección más delgada.

Debido a que el área de sección transversal de una junta de tope está limitada a aquella de la sección más delgada, es imposible lograr la resistencia máxima de unión.

Donde no se puede utilizar una junta solapada, se puede reducir la debilidad de la junta de tope utilizando una junta biselada siendo esta más difícil de preparar y muchas veces se requiere de cuidado especial para mantener alineadas a las piezas.

La resistencia de una junta de tope también puede mejorarse aumentando el área de sección transversal, como se ilustra en la figura.



**Figura 3.1.** Clases de juntas para soldadura fuerte.

**Fuente:** DEERE John; Soldadura; Primera Edición; Editorial Moline; Illinois; 1980; Pág. 48.

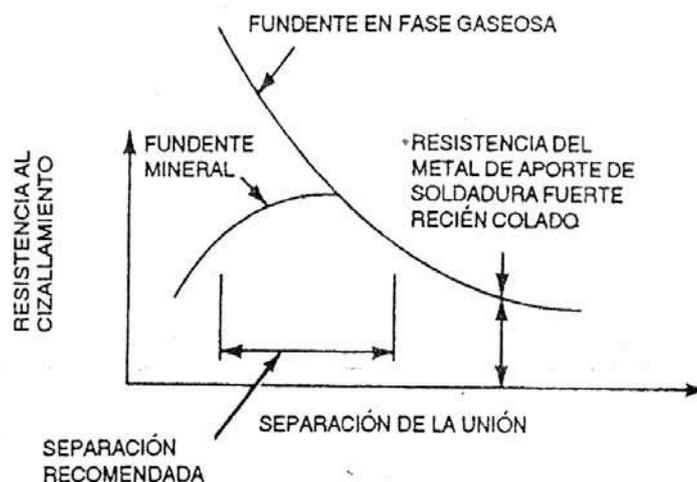
#### 3.4.1 SEPARACIÓN DE LA UNIÓN

Como se explicó anteriormente, en la soldadura fuerte es importante la separación entre las superficies que se van a soldar, ya que esto además de influir en el principio de funcionamiento del proceso, influye de manera importante sobre el desempeño mecánico de una unión soldada, aplicado a

todos los tipos de carga (estáticas, de fatiga, y de impacto) y a todos los diseños de uniones. Entre los efectos de la separación de la unión sobre el desempeño mecánico están:

- El efecto puramente mecánico de la restricción del flujo plástico del metal de aporte por un metal base de mayor resistencia mecánica.
- La posibilidad de que la escoria quede atrapada.
- La posibilidad de que haya orificios.
- La relación entre la separación de la unión y la fuerza capilar que gobierna la distribución del metal de aporte.
- La cantidad de metal de aporte que debe difundirse en el metal base cuando se suelda en fuerte por difusión.

Si la unión soldada en fuerte está libre de defectos (inclusiones de fundentes, orificios, áreas no soldadas, porosidad), su resistencia en corte dependerá del espesor de la unión, como se ilustra en la figura 3.2. Esta figura ilustra cómo la resistencia de la unión al cizallamiento cambia con la separación, el valor de separación recomendada en el cual la resistencia de la unión se maximiza, depende de los metales base y de aporte, la configuración de la unión y las condiciones del proceso. Estos valores representan la separación de la unión a la temperatura en la que se lleva a cabo la soldadura fuerte, los cuales pueden, ser diferentes de la separación a la temperatura ambiente, dependiendo de la expansión térmica de los metales base.



**Figura 3.2.** Relación entre la separación de la unión y la resistencia al cizallamiento para dos métodos de aplicación de fundente.

**Fuente:** AMERICAN WELDING SOCIETY; Manual de Soldadura; Octava Edición; Tomo II; Editorial Prentize-Hall Hispanoamérica; México; 1996; Pág. 402.

### 3.5 METALURGIA DE LA SOLDADURA FUERTE<sup>6</sup>

En la unión metalúrgica por soldadura fuerte, la temperatura está por debajo del valor de la temperatura más alta en la que el o los metales que se unen están completamente sólidos. Los cambios metalúrgicos de la soldadura fuerte están limitados a reacciones de estado sólido en el metal base, reacciones de solidificación entre el metal de aporte y reacciones dentro del metal de aporte sólido. El flujo capilar del metal de soldadura fuerte depende de las reacciones físicas y metalúrgicas que tengan con el material base, el fundente o atmósfera y los óxidos superficiales del metal base.

En algunos procesos de soldadura fuerte, el mojado y el flujo se promueven con la adición de fundente. En la soldadura fuerte al vacío, el flujo y el mojado dependen por completo de las interacciones superficiales entre el metal líquido y el metal base. La mayor parte de los óxidos se desplazan o eliminan con fundente. Los óxidos de cromo, aluminio, titanio y manganeso requieren tratamiento especial.

En la temperatura máxima durante el ciclo de soldadura fuerte, cuando hay metal de aporte líquido en la unión, puede haber erosión del metal base. La rapidez de disolución del metal base por el metal de aporte depende de los límites de solubilidad mutuos, de la cantidad de metal de aporte disponible en

la unión, de la temperatura de soldadura fuerte y de la potencial formación de aleaciones eutécticas de más baja temperatura.

En algunas ocasiones se puede formar una capa intermedia de compuesto intermetálico entre el metal de aporte y el metal base durante la operación de unión. Se emplean diagramas de fase para predecir la formación de compuestos intermetálicos.

Una vez que el metal de aporte se ha solidificado para formar la unión, los efectos subsecuentes pueden estar bajo el control de fenómenos de difusión.

Puede haber penetración de metal de aporte líquido en las fronteras de grano del metal base. Los metales base sometidos a esfuerzos son especialmente susceptibles a la penetración de metal líquido.

Los elementos de aleación se difunden con mayor rapidez en las fronteras de los granos que en la red cristalina. Si se forma una aleación eutéctica, al tener bajo punto de fusión es posible que llene cualquier grieta de frontera de grano tan pronto como esta aparezca; si es así, el daño puede ser mínimo, esto se conoce como intrusión.

Las características dinámicas del proceso de soldadura fuerte reciben cada vez mayor reconocimiento, y se está estudiando extensivamente la difusión y los cambios metalúrgicos subsecuentes que pueden tener lugar durante el servicio. A temperaturas elevadas, puede ser que llegue a ocurrir cambios en estado sólido como resultado directo de la difusión, la oxidación o la corrosión. Todo lo anterior significa que las propiedades metalúrgicas y mecánicas de estas uniones pueden cambiar durante el servicio y deberán ser evaluadas como parte del proceso de calificación de la unión.

### **3.6 PROCESOS DE SOLDAURA FUERTE<sup>6</sup>**

Los procesos de soldadura fuerte se clasifican según las fuentes o métodos de calentamiento que se basan en los mismos principios de los procesos descritos anteriormente por soldadura indirecta, variando en estos procesos la temperatura de aplicación, según el procedimiento de soldadura fuerte, además del tipo de fundente y su colocación en la junta. Los métodos actuales de mayor importancia industrial son los siguientes:

- Soldadura fuerte con soplete.
- Soldadura fuerte en horno.
- Soldadura fuerte por inducción.
- Soldadura fuerte por resistencia.
- Soldadura fuerte por inmersión.
- Soldadura fuerte al infrarrojo.

### **3.7 AUTOMATIZACIÓN DE LA SOLDADURA FUERTE<sup>6</sup>**

Las variables importantes que intervienen en la soldadura fuerte son susceptibles de automatización como son: la temperatura, el tiempo de permanencia en la temperatura, el metal de aporte y la atmósfera, la cantidad de metal de aporte, la tasa y el modo de calentamiento. La automatización puede incluir además inspección y limpieza (eliminación de fundente) en línea, soldadura fuerte simultánea de múltiples uniones de un ensamble y operaciones de soldadura fuerte continuas. Con esto, el grado de automatización de los proceso de soldadura fuerte es alto

En general, cuanto mayor sea el grado de automatización de un proceso, más rigurosa deberá ser su justificación económica. Por lo regular, el mayor costo de la automatización se compensa con el aumento de la productividad. En el caso de la soldadura fuerte, bien puede haber la justificación adicional del ahorro de energía por el calentamiento más eficiente de las uniones.

### **3.8 PREPARACIÓN DE LAS PARTES PARA SU UNIÓN POR SOLDADURA FUERTE<sup>10</sup>**

Para que los resultados con soldadura fuerte sean óptimos, es importante tanto la limpieza como el ensamble de los componentes antes de su unión; esto con el fin de facilitar lo que más sea posible el flujo del metal de aporte durante el proceso de unión.

#### **3.8.1 LIMPIEZA EN LA SOLDADURA FUERTE**

Para lograr la completa cohesión y penetración del material, es necesaria la eliminación de óxido, mugre, grasa, humedad y aceite, de la soldadura por toda

la junta. El fundente es el encargado de la protección contra la oxidación durante el calentamiento, impide en forma efectiva que los elementos oxidantes del aire lleguen a las superficies de la junta, pero en los procesos que utilizan atmósferas protectoras, como el argón o el helio, se requiere poca o ninguna protección adicional de toda la junta.

Los procesos de limpieza utilizados comúnmente incluyen los ácidos, los disolventes, el desengrasado a vapor, el cepillado mecánico, el esmerilado, la limpieza con chorro de arena, y otros. De este método, sólo el cepillado mecánico, los disolventes, y el esmerilado, se emplean en forma individual o combinados para la soldadura fuerte en producción y la de reparación.

La eliminación mecánica de los óxidos y manchas, previa a la soldadura fuerte, se realiza a lima, con esmeril, por golpeo, o por ataque a chorro con municiones. No se recomienda la limpieza con chorro de arena, ni con cepillo de alambre. Con la limpieza a chorro de arena, las partículas de arena que son retenidas por la superficie interfieren con el flujo del material de la soldadura. El cepillado con alambre embarra a veces el metal sobre el óxido, en vez de eliminar este último. El ataque con ácido se utiliza cuando no se tienen superficies maquinadas y limpias.

La grasa y el aceite se eliminan mejor por desengrasado, lo que es importante, porque aún durante el calentamiento rápido de la zona de la junta, no se queman generalmente por completo; dejan un residuo carbonáceo que puede dificultar seriamente el flujo de la aleación de soldadura.

### **3.8.2 AUTOACOMODO EN SOLDADURA FUERTE**

Las partes que han de soldarse en producción por soldadura fuerte se ensamblan generalmente por autoacomodo. El autoacomodo es un método de ensamble en el cual las partes componentes tienen características que aseguran que al ser ensambladas permanecerán en la relación de posición correcta durante todo el ciclo de soldadura, sin ayuda de dispositivos auxiliares. Este método de ensamble se prefiere a cualquier otro, porque elimina el costo inicial y el de reposición de los dispositivos auxiliares, así como el costo que representa su calentamiento durante el proceso de soldadura. Es generalmente el mejor método para sostener los componentes en posición. Se analizan a

continuación los diversos métodos por los que puede lograrse el autoacomodo sin dispositivos.

### 3.8.2.1 Colocación por gravedad

Por este método se unen dos componentes uno sobre el otro, que por acción de la gravedad se establece la posición entre los dos componentes, en la mayoría de casos no necesita de guías o elementos adicionales de sujeción por lo que este método es de mayor aplicación, el metal de aporte se aplica enrollando en torno a un componente cerca de la junta o colocando entre los componentes, como se muestra en la figura 3.3.

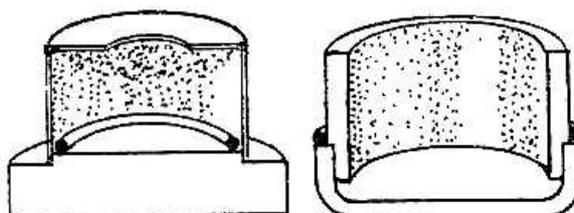


**Figura 3.3.** Colocación por gravedad.

**Fuente:** HORWITZ, Heary; Soldadura: Aplicaciones y Práctica; Editorial Alfaomega; México D.F.; 1997; Pág. 246.

### 3.8.2.2 Ajuste con interferencia

En este método la unión entre dos componentes se realiza con un ajuste por interferencia (figura 3.4) previo a la aplicación de la soldadura, con esto se logra que no exista deslizamiento entre los componentes durante el proceso. En la mayoría de los casos el grado de interferencia no excede de alrededor de 0.001 pulgada por cada pulgada de diámetro, hasta para diámetros de alrededor de 3 pulgadas. El metal de aporte se coloca alrededor de la superficie de interferencia interior o exterior como se detalla en la figura 3.4.

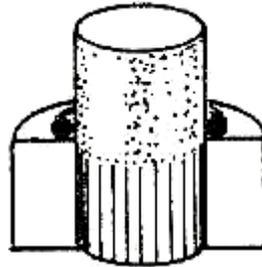


**Figura 3.4.** Ajuste con interferencia.

**Fuente:** HORWITZ, Heary; Soldadura: Aplicaciones y Práctica; Editorial Alfaomega; México D.F.; 1997; Pág. 246.

### 3.8.2.3 Moleteado

En este método se realiza la operación de moleteado al extremo del miembro macho que conjuga con el miembro hembra, como se ilustra en la figura 3.5, con esto se logra corregir las posibles fallas de construcción en los componentes, obteniendo uniformidad entre las juntas unidas por soldadura fuerte.

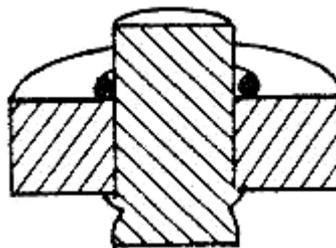


**Figura 3.5.** Moleteado.

**Fuente:** HORWITZ, Heary; Soldadura: Aplicaciones y Práctica; Editorial Alfaomega; México D.F; 1997; Pág. 246.

### 3.8.2.4 Estacado

Este método asegura la posición de dos componentes para el proceso de soldadura fuerte, haciendo resaltar rebabas sobre el componente circular, haciendo picaduras con un punzón. Se aplica en la orientación de ensambles tales como levas, palancas y engranajes sobre flechas o sobre un tubo común. A veces, se le aplica como sustituto de la soldadura por puntos, del moleteado o del ajuste con interferencia.

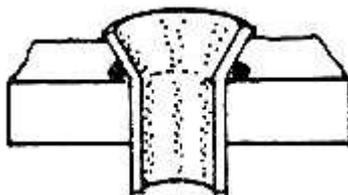


**Figura 3.6.** Estacado.

**Fuente:** HORWITZ, Heary; Soldadura: Aplicaciones y Práctica; Editorial Alfaomega; México D.F; 1997; Pág. 246.

### 3.8.2.5 Expansión

En este método para la sujeción de los componentes, se realiza la expansión de un componente sobre el otro, siendo su mayor aplicación en ensambles de tubos a las láminas con tubos. En este caso el componente tubular se coloca a presión en una lámina de cabezal y se expande en un agujero para asegurar firmemente el ensamble, como se ilustra en la figura 3.7. La operación de expansión se puede realizar antes o después del proceso de soldadura.

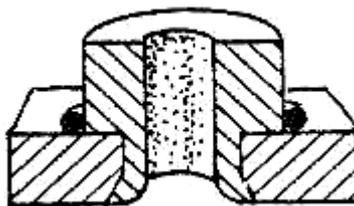


**Figura 3.7.** Expansión.

**Fuente:** HORWITZ, Heary; Soldadura: Aplicaciones y Práctica; Editorial Alfaomega; México D.F; 1997; Pág. 246.

### 3.8.2.6 Engargolado

Este método se aplica cuando el diámetro de un agujero de un ensamble no puede modificar el ensamble, en el caso de un cubo y una palanca, el ensamble se asegura (como se ilustra en la figura 3.8) por engargolado en una máquina remachadora. Este método de ensamble se usa en las partes de diversos tipos de máquinas de oficina.



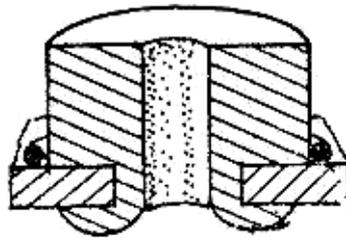
**Figura 3.8.** Engargolado.

**Fuente:** HORWITZ, Heary; Soldadura: Aplicaciones y Práctica; Editorial Alfaomega; México D.F; 1997; Pág. 246.

### 3.8.2.7 Recalcado

En este método la operación de recalcado fuerza el contacto entre la espiga y el agujero entre dos componentes, como se ilustra en la figura 3.9, por lo que se aplica cuando no es necesario mantener mucha exactitud en el diámetro del

agujero en el cubo. Es un método efectivo y de bajo costo. Además de otras aplicaciones, se ha usado el recalcado para ensamblar un cuerpo de válvula en la cámara del flotador de los refrigeradores. La unión resultante después de la soldadura fuerte hecha en horno con cobre tiene buena resistencia mecánica, es hermética, a prueba de fugas, y capaz de soportar presiones elevadas.

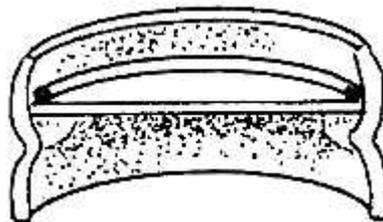


**Figura 3.9.** Recalcado.

**Fuente:** HORWITZ, Heary; Soldadura: Aplicaciones y Práctica; Editorial Alfaomega; México D.F; 1997; Pág. 246.

### 3.8.2.8 Acodillado

Este método se emplea en el ensamble de un disco al interior de un cilindro hueco, mediante el acodillado del extremo del cilindro, como se ilustra en la figura 3.10, además en esta figura se muestra el ensamble de un disco, un cilindro y un anillo de metal de aporte. En el proceso de soldadura fuerte por horno, este tipo de ensamble se lo coloca en posición vertical, de manera que el metal de aporte fluya hacia abajo a través de las juntas; en el caso que el componente tubular sea largo, el ensamble debe estar en posición horizontal, para que quepa en el horno; en este caso puede colocarse un anillo con sobretamaño de alambre duro como metal de aporte cercano a la junta.

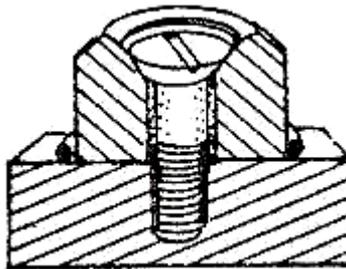


**Figura 3.10.** Acodillado.

**Fuente:** HORWITZ, Heary; Soldadura: Aplicaciones y Práctica; Editorial Alfaomega; México D.F; 1997; Pág. 246.

### 3.8.2.9 Unión por rosca

En este método el ensamble se realiza por medio de un tornillo, como se ilustra en la figura 3.11. Este método se usa para ensamblar componentes de portapunzones de repuesto para los juegos de dados que se emplean en las prensas punzonadoras. Como se requiere hacer operaciones de taladrado y roscado previo al proceso de soldadura fuerte, este método de ensamble está limitado por lo general a la producción en cantidades pequeñas.

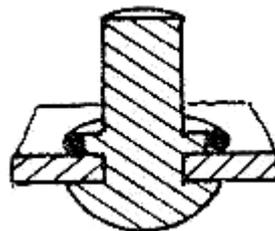


**Figura 3.11.** Unión por rosca.

**Fuente:** HORWITZ, Heary; Soldadura: Aplicaciones y Práctica; Editorial Alfaomega; México D.F.; 1997; Pág. 246.

### 3.8.2.10 Remachado

Este método de ensamble emplea un remache como parte de la sujeción de los componentes, como se ilustra en la figura 3.12. Se aplica mucho para ensamblar las aspas para los discos exteriores de los rodets de ventiladores, antes de hacer soldadura fuerte en horno. La combinación del remachado y la soldadura fuerte prolonga marcadamente la vida de servicio del ensamble.



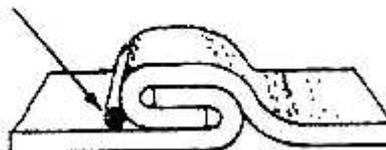
**Figura 3.12.** Remachado.

**Fuente:** HORWITZ, Heary; Soldadura: Aplicaciones y Práctica; Editorial Alfaomega; México D.F.; 1997; Pág. 246.

### 3.8.2.11 Plegado

En este método, para el ensamble de los componentes, se traban mediante plegado, en este método se puede usar varios métodos y diseños de plegado como el que se ilustra en la figura 3.13. Estos métodos se aplican mucho en la manufactura de tubos o de conjuntos tubulares unidos por soldadura fuerte.

Alambre de metal de aporte



**Figura 3.13.** Plegado.

**Fuente:** HORWITZ, Heary; Soldadura: Aplicaciones y Práctica; Editorial Alfaomega; México D.F; 1997; Pág. 246.

### 3.8.2.12 Martillado

El ensamble de dos cascos huecos por el método de martillado aparece ilustrado en la figura 3.14. Los componentes estampados se juntan a presión, y el casco exterior se repliega con un martillo de aire a lo largo de su periferia. Para aplicar el metal de aporte a un ensamble de este tipo puede rociarse cobre fundido sobre las entrecaras de la junta con un aplicador de rociado oxiacetilénico antes de ensamblar.

Rociado con cobre



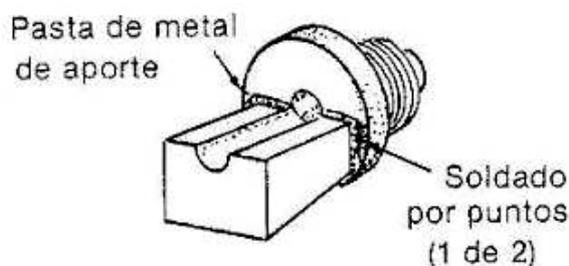
**Figura 3.14.** Martillado.

**Fuente:** HORWITZ, Heary; Soldadura: Aplicaciones y Práctica; Editorial Alfaomega; México D.F; 1997; Pág. 246.

### 3.8.2.13 Soldado por puntos

Para el ensamble de componentes, este método utiliza soldadura por puntos en uno o varios puntos (figura 3.15), determinados cuidadosamente, en la unión

de los componentes, para después mediante la acción de la atmósfera protectora en la soldadura fuerte en horno, cualquier óxido que se forme durante la soldadura por puntos sea reducido. Por economía, debe mantenerse al mínimo el número de puntos de soldadura por ensamble.



**Figura 3.15.** Soldado por puntos.

**Fuente:** HORWITZ, Heary; Soldadura: Aplicaciones y Práctica; Editorial Alfaomega; México D.F; 1997; Pág. 246.

### 3.9 EFECTOS DE LA SOLDADURA FUERTE<sup>10</sup>

En la soldadura fuerte, si bien no existe fusión del metal base, se pueden presentar cambios en su estructura o defectos, debido a su calentamiento o a la difusión por parte del material de aporte, para lo que se presentan las características de estos fenómenos, así como los tratamientos que han encontrado útiles para mantenerlos al mínimo.

#### 3.9.1 PRECIPITACIÓN DE CARBUROS

Este fenómeno se basa en la combinación que puede presentar el carbono dentro de la estructura, de preferencia con el cromo, formando carburo de cromo, el cual aparece ordinariamente en los contornos de los cristales, y ocurre cuando las aleaciones que contienen cromo son afectadas por temperaturas que varían desde aproximadamente 800 a 1500°F (450 a 820°C). Su efecto está en la disminución de la resistencia a la corrosión de la zona afectada por el calor, y puede reducirse al mínimo este efecto aplicando un calentamiento posterior a la operación de soldadura, a una temperatura comprendida entre 1850 y 2050°F (1000 a 1100°C), durante 2 horas, y con un enfriamiento al aire.

### **3.9.2 ÓXIDOS RESIDUALES**

Son los óxidos que quedan sobre la superficie del metal base después de su limpieza, se pueden reducirse, en el caso de aluminio, titanio, silicio, magnesio, manganeso y berilio, mediante fundentes especiales, para los óxidos de cromo, se pueden eliminar con fundentes que contengan fluoruros.

### **3.9.3 FRAGILIZACIÓN OCASIONADA POR EL HIDRÓGENO**

Este fenómeno se presenta cuando en los metales a soldar, no han eliminado por completo los óxidos, durante la operación de vaciado y solidificación, en atmósferas que contengan hidrógeno, debido a que las moléculas de vapor de agua (que se forman al combinarse el oxígeno atrapado con el hidrógeno difuso) son demasiado grandes para salir hasta la superficie. En presencia de este fenómeno disminuye la resistencia a la tensión debido a que el vapor de agua atrapado crea una presión de magnitud apreciable en el interior de la estructura del metal, y la rompe. Para disminuir su efecto en los metales no ferrosos, se debe evitar el uso de atmósferas con hidrógeno durante la aplicación de la soldadura fuerte, y para el caso de los metales ferrosos se calienta toda la masa del metal a 300°F, manteniéndola a esa temperatura hasta que se haya difundido todo el hidrógeno. El tiempo de horneado o de mantenimiento de la temperatura puede ser desde unas cuantas horas hasta unos cuantos días.

### **3.9.4 FRAGILIZACIÓN OCASIONADA POR EL AZUFRE**

Ocurre cuando se sueldan o se calientan aleaciones de níquel y las de níquel-cobre utilizando atmósferas de tipo azufroso, formando sulfuro de níquel en los contornos de los cristales del metal base, ocasionando fracturación del metal, debido a que este compuesto es frágil y con bajo punto de fusión. En el metal fragilizado por azufre no se puede disminuir su efecto o recuperarlo, por lo que generalmente se convierte en desperdicio.

### **3.9.5 FRAGILIZACIÓN OCASIONADA POR EL FÓSFORO**

Ocurre por la combinación que tiene el fósforo con otros metales para formar fosfuros, y puede reducirse al mínimo evitando el uso de metales de aporte con cobre y fósforo y el de aleaciones formadas a base de hierro o de níquel.

### **3.9.6 PRESIÓN DEL VAPOR**

Por la vaporización de algunos elementos del metal de aporte cuando se calientan a temperaturas elevadas en el vacío, se genera una presión, por lo que se debe tener mucho cuidado al seleccionar los metales de aporte para unir por soldadura fuerte aquellas partes que tengan que trabajar a altas temperaturas en el vacío.

### **3.9.7 AGRIETAMIENTO POR ESFUERZO**

Este fenómeno se presenta con frecuencia al aplicar soldadura fuerte a materiales que adquieren temple por envejecimiento, y que requieren de altas temperaturas para el recocido. Se producen grietas casi instantáneamente durante la aplicación de soldadura fuerte, y son generalmente visibles porque el metal de aporte tiende a fluir en las grietas. El agrietamiento por esfuerzo puede evitarse de la siguiente forma:

- Evitando la aplicación de esfuerzos externos, que se puede producir por la sujeción de las piezas, por los soportes en las piezas o por las plantillas.
- Calentamientos más lentos, en caso de partes pesadas se pueden calentar tan rápidamente que originan esfuerzos por gradientes térmicos de pendiente fuerte.
- Revisando el diseño de la junta o rediseñando las partes.
- Recociendo las partes trabajadas en frío antes de aplicar la soldadura fuerte.
- Utilizando material de temple por recocido, más que de temple duro.

### **3.10 VENTAJAS DE LA SOLDADURA FUERTE**

- Es el proceso ideal para uniones de metales de poca soldabilidad.
- Menor costo comparado con otros procesos de soldadura, con poca cantidad de aleación se consigue la unión de dos piezas.
- Alta resistencia de la junta soldada con relación al material de aporte, la resistencia de la unión no tiene nada que ver con las características del material de aporte.
- Ductilidad de las uniones por soldadura fuerte, capaces de soportar considerables choques y vibraciones.
- Este proceso es capaz de unir metales cuyas secciones transversales difieren notablemente.
- Las uniones tienen una excelente distribución de esfuerzos, siendo la junta T ideal para resistir esfuerzos de fatiga.
- Esta técnica es ampliamente utilizada en instalaciones de tuberías de líquidos y gases debido al impedimento que ofrece a la presencia de fugas.
- Ideal en procesos donde no está permitida la fusión, tuberías, o en la unión de piezas de pequeño espesor y tamaño, donde los procesos de soldadura por fusión podrían destruir el material base.
- En aplicaciones eléctricas, debido a los componentes de los metales de aporte, ofrece una buena conductividad eléctrica.
- Los procesos de soldadura fuerte pueden ser total o parcialmente automatizados.
- Buen acabado, si se realiza adecuadamente, no requiere de rectificado o de acabados mecánicos después de que la unión se ha completado, las uniones soldadas presentan una buena apariencia con bordes lisos y limpios.
- Facilita las uniones complejas o inaccesibles, es el proceso ideal por el efecto capilar que ocurre entre las uniones.

- Se reducen los problemas en la zona afectada por el calor en el metal base cerca de la unión.
- Altas velocidades de los ciclos de producción, ciertos métodos para soldadura fuerte pueden realizarse en forma rápida y consistente.
- Algunos métodos permiten la soldadura simultánea de varias uniones.
- Permite la soldadura de los materiales base con recubrimientos.

### **3.11 DESVENTAJAS DE LA SOLDADURA FUERTE**

- La preparación de las piezas puede resultar más costosa que en un proceso por fusión.
- La soldadura fuerte proporciona para algunos casos menos resistencia mecánica y continuidad en la unión que un proceso de fusión, aunque una soldadura correctamente diseñada y ejecutada puede ser tan resistente como los materiales base.
- Las uniones óptimas están generalmente solapadas por lo que incrementa el peso del conjunto.
- Siempre va ser necesario una limpieza posterior al soldeo para eliminar los residuos del fundente, en los procesos que no se aplique atmósfera protectora.

### **3.12 APLICACIONES**

La soldadura fuerte es un proceso de producción de amplio uso en diversas industrias:

- Automotriz, en la unión de tubos y conductos.
- Equipo eléctrico, por ejemplo, para unir alambres y cables.
- Herramientas de corte por ejemplo, para unir insertos de carburo reforzado a partes finales.
- Industria de procesamiento químico.
- Calefacción, aire acondicionado, se unen conductos y tubos metálicos mediante soldadura fuerte.

- Industria de refrigeración.
- Operaciones de mantenimiento.
- Joyería.

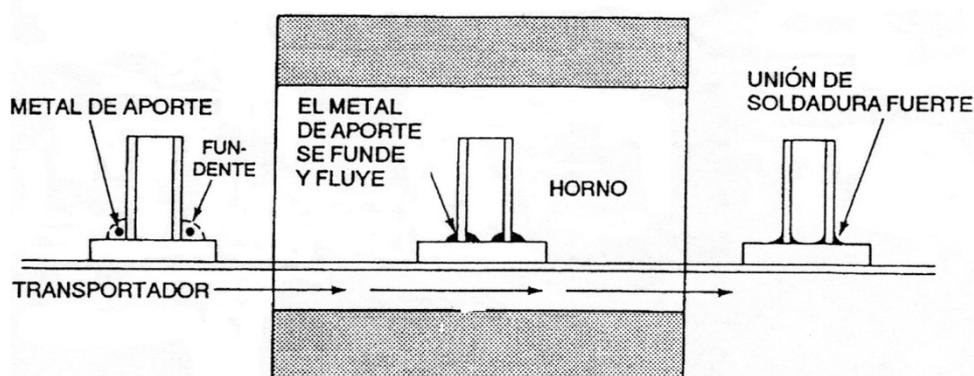
## CAPÍTULO 4

### SOLDADURA FUERTE POR HORNO (FB)

#### 4.1 SOLDADURA FUERTE EN HORNO<sup>6</sup>

La soldadura fuerte por horno es un proceso de unión de partes metálicas que se comercializó por primera vez alrededor de 1930, que obtiene, el calor para fundir el material de aporte, dentro de un horno, con la protección de un fundente y/o de una atmósfera controlada.

Las partes a soldar se deben ensamblar con el metal de aporte y el fundente, colocado dentro de la unión o junto a ella. El ensamble se calienta dentro del horno hasta que las piezas alcanzan la temperatura de soldadura fuerte, permanezcan un tiempo determinado y se efectúe la unión, para que luego el conjunto se enfríe lentamente bajo una atmósfera controlada, para que las partes soldadas no se oxiden cuando se exponen al aire a temperatura ambiente, la descripción del proceso se ilustra en la figura 4.1.



**Figura 4.1.** Ilustración de una operación de soldadura fuerte en horno.

**Fuente:** AMERICAN WELDING SOCIETY; Manual de Soldadura; Octava Edición; Tomo II; Editorial Prenotase-Hall Hispanoamérica; México; 1996; Pág. 384.

El control de la temperatura y la atmósfera es importante en la soldadura fuerte en horno, la temperatura del horno debe ser considerablemente más alta que la temperatura de fusión de la aleación del metal de aporte de soldadura fuerte utilizado. Si las piezas constan de muchas partes, la velocidad de calentamiento debe ajustarse de modo que todas las partes alcancen la

temperatura de soldadura fuerte aproximadamente al mismo tiempo. En caso de la atmósfera, puede ser neutral o reductora, en ocasiones se usan hornos de vacío. Dependiendo de la atmósfera y los metales que se van a soldar, puede eliminarse la necesidad de un fundente.

La soldadura fuerte por horno es más conveniente para procesos de producción medios y altos de piezas pequeñas y/o de forma irregular en donde la zona de unión es difícil de acceder por cualquier otro proceso de soldadura. En producciones altas, por lo general en lotes, se cargan las partes componentes y el metal para soldadura fuerte en el horno, éstas se calientan a temperaturas para soldadura y después se enfrían y retiran.

#### **4.1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO**

Al calentarse el ensamble de las piezas junto con el metal de aporte en el horno y el fundente, el metal de aporte se funde con lo cual este se puede extenderse por las superficies de las piezas, sin embargo, por el efecto capilar que existe en la unión de las piezas a soldar, el fundente es atraído hacia el interior, con lo que el espacio en la junta entre las piezas se llena totalmente. La fuerza molecular que introduce el fundente en la junta impide que éste vuelva a salir. Las fuerzas capilares son mayores cuanto menor es el espacio en la junta entre las piezas, es por eso que es importante el acabado en ellas. Si los lugares de ajuste de las piezas ofrecen aberturas con ranuras diferentes, en aquellos lugares donde la distancia entre piezas es relativamente grande, se puede interrumpir el flujo del fundente.

Con respecto al horno, en el proceso de unión, suceden reacciones químicas entre el gas protector y las piezas a soldar, en los que se eliminan todos los óxidos e impurezas que se puede generar en las superficies de las piezas, por lo tanto disminuye el riesgo de que el metal de aporte fundido, en su fluidez, sea obstaculizado. Este tipo de soldadura ofrece una gran resistencia, se distingue por la especial hermeticidad de los puntos soldados y además al calentarse la pieza por igual en toda su superficie, no sufre deformación alguna.

El tiempo de soldadura está determinado por el espesor de las piezas a soldar y de la masa de los accesorios que se necesiten para posicionarlas. Se debe

tener en cuenta el tiempo de soldadura para evitar una interacción excesiva entre el metal de aporte y el metal base, pero el mínimo necesario para que el metal de aporte fluya al interior de la unión, además, el tiempo de soldadura en este proceso es largo en comparación con el resto de procesos de soldadura fuerte, por lo cual se debe tener cuidado para que el calor no afecte al material base.

Normalmente bastan uno o dos minutos a la temperatura de soldadura fuerte para formar la unión. Un tiempo más prolongado a la temperatura de soldadura fuerte puede resultar benéfico en los casos en que es preciso elevar el punto de refusión del metal de aporte, o en los que la difusión mejora la ductilidad y la resistencia mecánica de la unión. Es frecuente usar tiempos a la temperatura de soldadura fuerte de 30 a 60 minutos cuando se desea elevar el punto de refusión de la unión soldada.

## **4.2 PROCESOS DE SOLDADURA FUERTE EN HORNO<sup>11</sup>**

La clasificación de los procesos de soldadura fuerte en horno se basan en dos aspectos que son: de acuerdo a la forma de producción que se puede aplicar en este proceso de forma continua y por lotes o forma discontinua, y por la protección que se da a la soldadura durante el calentamiento que puede ser al aire, con atmósfera controlada o al vacío.

### **4.2.1 POR LA FORMA DE PRODUCCIÓN**

#### **4.2.1.1 Por horno continuo**

Las piezas a soldar se transportan a lo largo de un túnel dentro del horno donde tiene lugar el calentamiento, la unión de las piezas y el enfriamiento.

#### **Ventajas:**

- Alta tasa de producción.
- Normalmente no se usa fundente, por lo que no requiere limpieza posterior.
- Las piezas no necesitan estar tan limpias como para el soldeo en vacío.

**Limitaciones:**

- El equipo es caro pero no tanto como los hornos de vacío.

**4.2.1.2 Por horno de lotes**

Las piezas a soldar se colocan en el interior del horno.

**Ventajas:**

- Normalmente no se usa fundente, por lo que no requiere limpieza posterior.
- Las piezas no necesitan estar tan limpias como para proceso en vacío.
- Se pueden soldar piezas de mayor tamaño que en el proceso continuo.

**Limitaciones:**

- Las fases de calentamiento, soldadura y enfriamiento son largas.
- No es recomendable para altas temperaturas.
- Es energéticamente ineficiente.

**4.2.2 POR LA PROTECCIÓN DE LA SOLDADURA****4.2.2.1 Por horno en vacío**

En este proceso la función del vacío es mantener la limpieza de las piezas, al impedir las reacciones con el oxígeno presente en el aire, evitar reacciones con metales bases reactivos, además de permitir el flujo del material de aporte en ausencia de fundente. Si el vacío se mantiene con bombeo continuo, eliminará los constituyentes volátiles que se liberen durante la soldadura.

**Ventajas:**

- Se pueden soldar aleaciones que contienen metales reactivos, como el Aluminio y el Titanio.
- Proporciona un control preciso de la fase de calentamiento.

**Limitaciones:**

- El equipo utilizado es muy costoso.
- Las piezas a soldar requieren una buena limpieza.

- No se pueden soldar materiales volátiles.
- Comúnmente se aplica solo a piezas pequeñas.

#### **4.2.2.2 Por horno al aire**

En este caso es necesaria la aplicación de un fundente a las piezas a soldar para prevenir la oxidación del metal base, previo a la colocación del ensamble dentro del horno.

##### **Ventajas:**

- El equipo es sencillo y relativamente barato.
- Se pueden soldar piezas de gran tamaño.

##### **Limitaciones:**

- Excepto en aquellas zonas donde se aplica fundente, las piezas están expuestas a la oxidación.
- La larga duración de las fases puede dar lugar a un deterioro del fundente.

#### **4.2.2.3 Por horno bajo atmósfera controlada**

En este caso la protección en la soldadura se consigue con la acción de atmósferas a base de gases o mezcla de gases reductores (N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>MeOH, óxido de carbono, gas carbónico, hidrógeno, nitrógeno, metano) que impidan la formación de óxidos, evitando la contaminación por los gases que pudieran generarse por desgasificación de las piezas metálicas o disociación de los óxidos. Si la atmósfera controlada es inflamable o tóxica, se requerirá una ventilación adecuada del área de trabajo y protección contra explosiones.

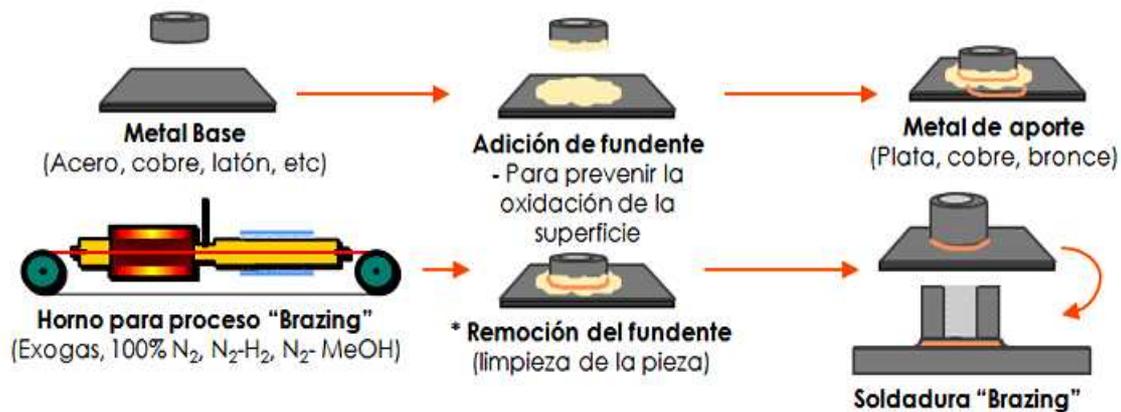
##### **Ventajas:**

- Es una soldadura limpia brillante no requiere trabajos posteriores como pueden ser lijar, limar, pulir, etc.
- Ahorro en materiales al no necesitar aplicación de fundente en la mayoría de los casos.

- Por la limpieza que ofrece, las piezas pueden someterse de inmediato al pintado, zincado o cualquier otro tipo de recubrimiento superficial o tratamiento térmico (templado, cementado, nitrurado, etc).

#### Limitaciones:

- Control exacto de los parámetros de la atmósfera de protección.
- El equipo utilizado es costoso.
- Cuidado en la aplicación y almacenamiento de los gases de protección.
- Mayor control en las temperaturas y tiempos de trabajo.
- Dificultades con aleaciones que se puedan volatilizar



**Figura 4.2.** Ilustración del procedimiento para soldadura fuerte por horno bajo atmósfera controlada.

Fuente: <http://www.cryoinfra.com/aplicaciones/item/79-brazing-n2-%E2%80%A2-h2>

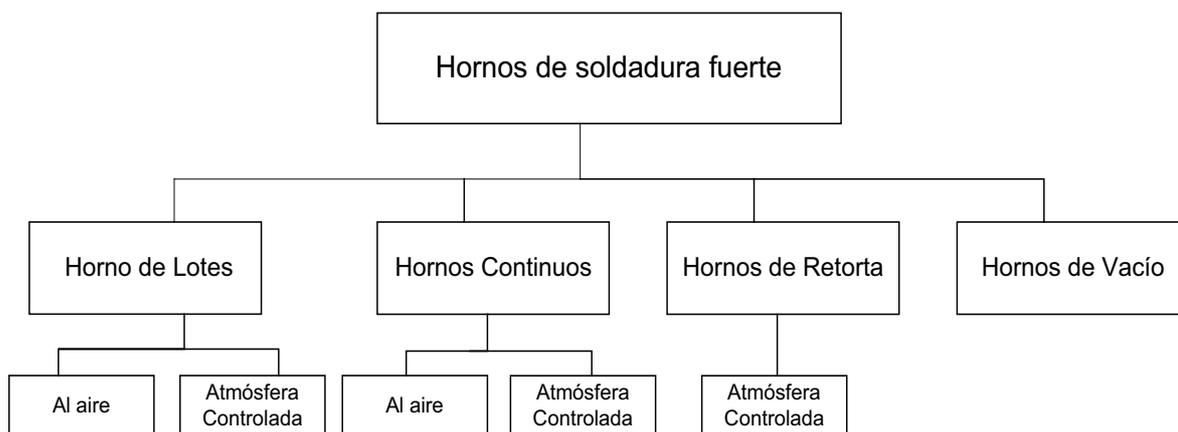
### 4.3 TIPO DE HORNOS<sup>11</sup>

El equipo de un horno típico consta de cámaras de calentamiento y de enfriamiento, una fuente de energía, controles de temperatura y presión, en algunos equipos, un dispositivo auxiliar, el generador de atmósfera para el suministro de atmósfera protectora para el horno o un dispositivo de vacío.

El control de temperatura en los hornos es del tipo de potenciómetro conectado a termopares y válvulas de control de gas o contactores. La mayor parte de los hornos se calienta por resistencia eléctrica empleando elementos de calefacción de carburo de silicio, níquel-cromo o un metal refractario (Mo, Ta, W). En el caso que el calentamiento sea por flama de gas o petróleo, las flamas no deben incidir directamente sobre las piezas.

Los hornos que se emplean para soldadura fuerte se clasifican:

- Hornos de lotes, ya sea con aire o atmósfera controlada
- Hornos continuos, ya sea con aire o atmósfera controlada
- Hornos de retorta con atmósfera controlada
- Hornos de vacío.



**Figura 4.3.** Clasificación de los hornos de soldadura fuerte.

**Fuente:** Propia.

#### 4.3.1 HORNOS DE LOTES

Estos hornos son para la producción de piezas soldadas por lotes o en forma discontinua, en los cuales calientan cada carga de trabajo individualmente. La capacidad de los hornos están distribuidos por ciclos, los cuales pueden ser bastantes rápidos, llegando a durar 15 o 20 minutos, dependiendo del tipo de horno, masa de las piezas a unir, y si están precalentadas o no antes de introducirlas en el horno. Son hornos que ofrecen un proceso sencillo, económico y flexible de varios cientos de piezas al día. Los hornos de lotes pueden ser del tipo de carga por arriba (tipo de foso), de carga lateral o de carga por abajo. En el caso de piezas de tamaño considerable o con muchas partes, el horno desciende sobre el lote o la carga, denominado horno de campana. Los hornos por lotes que usan flamas de gas o petróleo para calentar y que no tienen retortas requieren la aplicación de fundentes a las piezas por soldar. La mayor parte de los hornos por lotes de calefacción eléctrica utilizan equipos auxiliares de atmósfera controlada, ya que los

elementos de calentamiento por lo regular pueden funcionar sin dificultades en la atmósfera controlada.



**Figura 4.4.** Horno tipo foso.

**Fuente:** <http://www.directindustry.es/prod/remix/hornos-de-retorta-36349-396267.html>



**Figura 4.5.** Horno de campana.

**Fuente:** <http://www.directindustry.es/prod/solo-swiss-group/hornos-de-campana-27674-354167.html>

#### 4.3.2 HORNOS CONTINUOS

En este tipo de hornos se produce un flujo continuo de piezas soldadas. Las piezas se colocan en bandas, bandejas, cestas especiales con un sistema de arrastre o por acción de rodillos, que atraviesan el horno por sus distintas secciones. La fuente de calor puede consistir en flamas de gas, fuel-oil, petróleo, o elementos de calefacción eléctricos. Los hornos continuos suelen tener tres áreas bien diferenciadas:

- Área de precalentamiento, en donde las piezas se calientan lentamente hasta una temperatura inferior a la de soldadura.
- Área de soldeo.
- Área de enfriamiento.

En el caso de la aplicación de atmósfera protectora en el área de soldeo, esta también fluye sobre las partes y alrededor de ellas en el área de precalentamiento, bajo presión positiva. El flujo de gas de la atmósfera elimina el aire atrapado e inicia la reducción de los óxidos superficiales y cuando pasan al área de enfriamiento, las piezas arrastran una estela de gas protector.

#### **4.3.2.1 Hornos continuos con transportador de banda de tela metálica**

En estos hornos continuos los ciclos de calentamiento, enfriamiento y tiempo de permanencia a temperatura de soldeo son automáticos, y como todo proceso continuo tienen alta capacidad y precisión.



**Figura 4.6.** Horno de soldadura con cinta transportadora CuproBraze®

**Fuente:** <http://www.directindustry.es/prod/seco-warwick-sa/hornos-de-soldadura-blanda-con-cinta-transportadora-16223-59271.html>

#### **4.3.2.2 Hornos continuos con sistema de transporte mediante rodillos refractarios**

Su aplicación se basa para cargas que tienen dimensiones y pesos considerables, así como también en altas producciones. La producción típica está entre 160 y 910 kg por hora.

### 4.3.3 HORNOS DE RETORTA

Al igual que en los hornos continuos la carga de piezas a soldar viene dada por lotes, pero a diferencia de estos, las piezas se colocan en una bandeja de transporte que se introduce en el horno, pasando por la retorta cilíndrica cerrada, que contienen diferentes cámaras:

- El vestíbulo, donde se receptan las piezas a soldar.
- Cámara de calentamiento.
- Cámara de soldeo.
- Cámara de enfriamiento.

Una vez que la bandeja esta dentro del vestíbulo, se cierra la puerta de entrada y se purga la cámara para que no se contamine la atmósfera controlada de la cámara de calentamiento. Finalizada esta purga, la bandeja pasa a la cámara de calentamiento. Cuando las piezas han alcanzado la temperatura suficiente se pasan a la cámara de soldeo, donde se produce la unión de las piezas. Al final de la etapa de unión, las piezas soldadas pasan a la cámara de enfriamiento. Cuando la bandeja llega a una temperatura de enfriamiento aceptable, se retira del horno y se vuelve a comenzar el proceso con otra carga de piezas.

En ocasiones se emplea una atmósfera protectora dentro de los hornos de alta temperatura para reducir las incrustaciones externas en las retortas.



**Figura 4.7.** Horno de retorta 560 - 700 ° C.

**Fuente:** <http://www.directindustry.es/prod/remix/hornos-de-retorta-36349-396267.html>

#### **4.3.4 HORNO AL VACÍO**

A diferencia de otros tipos de hornos de soldadura fuerte, este tiene un equipo adicional de generación de vacío durante la fase de soldeo en el horno, que puede ser o no continuo.

Los hornos para soldadura fuerte al vacío son de tres tipos, los cuales pueden tener configuraciones de carga lateral, de carga por abajo y de carga por arriba. Las áreas de trabajo por lo regular son de forma rectangular en los hornos de carga lateral y de forma circular para los de carga por abajo o por arriba.

##### **4.3.4.1 Retorta caliente, u horno de retorta de bombeado único**

El horno consiste en una retorta aislada, por lo regular de un metal de espesor considerable, por el vacío que se produce en su interior. Una vez ingresadas las piezas, se sella la retorta, se genera el vacío y se calienta externamente por el horno que puede ser por flama de gas o por energía eléctrica.

Estos hornos están limitados por el tamaño de la retorta y la máxima temperatura de trabajo, que están determinados por la capacidad que tiene la retorta para resistir la fuerza de colapso de la presión atmosférica a la temperatura de soldadura fuerte y el tiempo de producción, ya que en cada ciclo de carga es necesario calentar y enfriar la retorta.

La temperatura máxima para los hornos de soldadura fuerte de este tipo es del orden de 1150°C (2100°F). A menudo se introduce argón, nitrógeno u otro gas a la retorta a fin de acelerar el enfriamiento después de soldar.

El bombeo continuo de vacío es necesario para casi todos los trabajos de soldadura fuerte para eliminar los gases despedidos por la carga de trabajo.

##### **4.3.4.2 Retorta caliente de bombeo doble o de doble pared**

Consisten en una retorta, situada dentro de una cámara de vacío, que contiene las piezas que se van a unir. Dentro de la cámara se mantiene un vacío típico de 130 a 13Pa; dentro de la retorta se obtiene un vacío más fino, del orden de 1.3Pa. Normalmente se requiere que la bomba de vacío de la retorta funcione continuamente a lo largo de todo el ciclo de trabajo para retirar los gases que continuamente entran con la carga de trabajo. Estos hornos presentan la

ventaja de que los elementos calefactores y refractarios no están sujetos a un alto vacío.

A diferencia del horno de bombeo único, este tiene una retorta interna que contiene las piezas a soldar dentro de una cámara de vacío, por lo que se tiene dos tipos de vacío, uno dentro de la cámara con una presión de 133 a 13.3Pa y dentro de la retorta interna un vacío de presión más baja, del orden de 1.3Pa. Además dentro de la pared exterior se encuentran el aislamiento térmico o material refractario y los elementos calefactores por lo que presentan la ventaja de que estos no son afectados por el alto vacío. Los elementos calefactores suelen ser de una aleación níquel-cromo, de grafito, de acero inoxidable o de carburo de silicio, el material refractario por lo regular está hecho por tabiques de sílice o alúmina, o de materiales colables o fibrosos.

Normalmente se necesita que la bomba de vacío de la retorta interna funcione de forma continua a lo largo de todo el ciclo de trabajo para retirar los gases que continuamente son despedidos por la carga de trabajo.

#### **4.3.4.3 Horno al vacío de pared fría**

Pueden llegar a obtener temperaturas de 2205°C y vacío del orden de 0.00013Pa. Consiste en una sola cámara de vacío, en cuyo interior están situados el aislamiento o material refractario y los elementos calefactores que por regular utiliza agua como medio de enfriamiento; los cuales determinan por sus propiedades la temperatura máxima de trabajo ya que se someten directamente a la máxima temperatura y al alto vacío.

En el caso de los elementos calefactores, los materiales de los que están compuestos suelen ser de muy alto punto de fusión con presión de vapor baja, como el molibdeno, tungsteno, grafito o tantalio. Los escudos de calor por lo regular se fabrican con múltiples capas de molibdeno, tantalio, níquel o acero inoxidable. En el caso del aislamiento térmico, en estos hornos se encuentran en forma de tabiques de alúmina de alta pureza, grafito o fibras de alúmina forradas de acero inoxidable. Con esto los hornos de pared fría pueden alcanzar valores de temperatura de 2200°C y presiones de 0.000133Pa.

Para la generación de vacío, los equipos utilizados son las bombas de vacío de tipo mecánico con sello de aceite para presiones de 1.3 a 1300Pa. Para la

unión de metales con contenido de cromo, silicio u otros elementos que forman óxidos resistentes, se necesita presiones mayores con valores entre 1.3 a 0.13Pa, que se obtiene de preferencia con una bomba Roots seca de alta velocidad o de tipo turbomecánico. Las bombas de vacío de este tipo no pueden trabajar con escape directo a la atmósfera y requieren una bomba de prevacío. Para la soldadura fuerte de materiales base que contienen proporciones apreciables de aluminio, titanio o zirconio, los cuales forman óxidos muy estables, se necesita vacío de 0.13Pa o menos. Los hornos al vacío para tales trabajos por los regular requieren una bomba de difusión capaz de alcanzar presiones de 1.3 a 0.0001Pa. La bomba de difusión debe estar respaldada por una bomba de vacío mecánica o por una bomba tipo Roots respaldada a su vez por una bomba mecánica.



**Figura 4.8.** Hornos de cuba con retorta de pared fría.

a) Retorta cilíndrica con calefacción de wolframio, b) Módulo calefactor de grafito

Fuente: [http://www.nabertherm.com/produkte/details/es/labor\\_retortenoefen#produkte\\_details](http://www.nabertherm.com/produkte/details/es/labor_retortenoefen#produkte_details)

#### 4.4 VENTAJAS DE LA SOLDADURA FUERTE POR HORNO

- Bajo costo por unidad soldada, especialmente en hornos continuos como en lotes.
- Reemplaza a otros procesos por soldadura fuerte en altas y medianas producciones, en especial el proceso continuo.

- Ofrece una distribución uniforme de la temperatura en toda la unión soldada.
- Se puede soldar varias uniones en una misma pieza en una sola operación.
- Se puede eliminar la limpieza final de la pieza por el acabado que tiene luego del proceso de soldadura.
- Alto grado de automatización del proceso.

#### **4.5 LIMITACIONES DE LA SOLDADURA FUERTE POR HORNO**

- Elevado costo del equipo.
- Elevado precio por unidad para pequeñas cantidades.
- Mayor elaboración en el diseño de las juntas.
- Por lo general se necesita de accesorios o plantillas para la correcta sujeción de las piezas.
- Gran consumo de energía.
- Mayor cuidado en el calentamiento porque puede afectar a las propiedades de las piezas a soldar.
- Mayor control en el mantenimiento de los equipos por las condiciones de servicio y la forma continua de operación.

#### **4.6 APLICACIONES**

En función del tipo de horno que se utilice, las aplicaciones son las siguientes:

##### **Atmósfera protectora**

- Proceso continuo: su mayor aplicación está piezas de acero dulce con cobre, en herramientas.
- Proceso discontinuo: En la industria electrónica y eléctrica.

##### **Soldadura fuerte en vacío**

- En aleaciones resistentes a la corrosión y a la temperatura.
- Industria aeroespacial y nuclear, cuando se unen metales reactivos.

- Para aceros inoxidables, superaleaciones, aleaciones de aluminio, aleaciones de titanio y metales que contienen elementos refractarios o reactivos.
- Los metales base que contienen cromo y silicio.
- Metales que contienen proporciones apreciables de aluminio, titanio, zirconio u otros elementos con óxidos particularmente estables.

**Al aire**

- Normalmente se emplea para producciones pequeñas en soldadura fuerte de baja temperatura.

## **CAPÍTULO 5**

### **METALES DE APORTE Y FUNDENTES PARA SOLDADURA FUERTE**

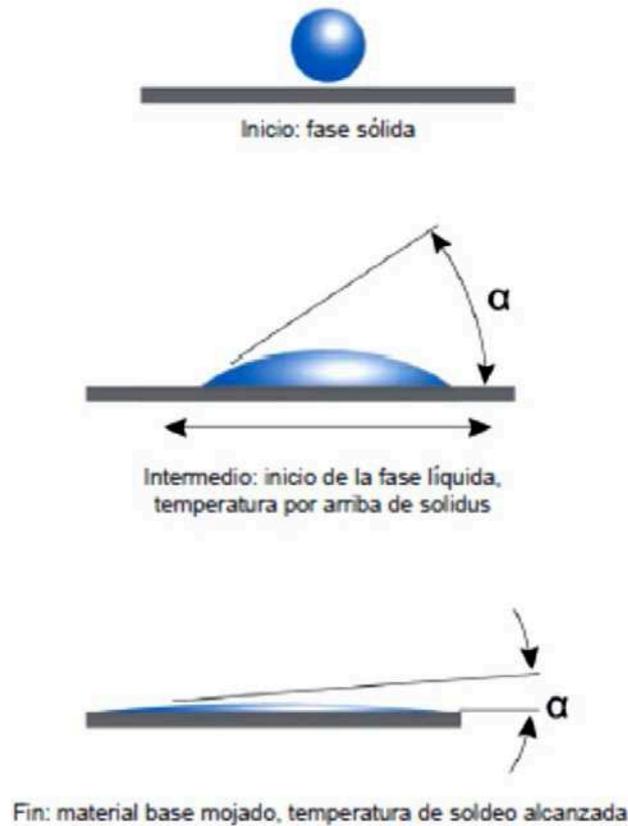
#### **5.1 METALES DE APORTE PARA SOLDADURA FUERTE<sup>6</sup>**

Son metales puros o aleaciones que penetran entre las superficies a unir y conforman el elemento de unión de las dos partes. Se deben conservar en los envases originales, en un lugar protegido de la humedad, el polvo y averías en general, puesto que cualquier residuo o contaminación puede afectar la calidad final de la unión. No se recomienda el almacenamiento en horno.

Temperatura sólidos es la máxima temperatura a la cual el metal de aporte está totalmente sólido. La temperatura líquidos es la temperatura mínima a la cual el metal de aporte está totalmente líquido. Cuando la holgura es regular y adecuado para la soldadura fuerte, se debe usar un material de aporte eutéctico o con un corto rango de fusión, a fin de que la holgura se llene de forma rápida y total en cuanto se alcance la temperatura líquidos. Tal velocidad de operación permite alcanzar altos índices de productividad y baja probabilidad de defectos en la unión.

Cuando la holgura es ancha (más de 0,15 mm) o irregular, es decir, menos adecuado para la soldadura fuerte, se debe usar un metal de aporte con un rango de fusión más amplio y trabajar a temperatura intermedia, con la aleación todavía pastosa, a fin de facilitar el control de la fluidez y, en consecuencia, el llenado de la holgura. En este caso, el calentamiento es lento y la probabilidad de defectos es más alta.

Cuando el rango de fusión del metal de aporte es relativamente amplio (más de 80°C), es necesario tener cuidado para evitar que los constituyentes se separen como consecuencia del calentamiento, por la volatilización de elementos como el zinc y el cadmio.



**Figura 5.1.** Comportamiento del metal de aporte en la soldadura fuerte.

**Fuente:** [http://www.harris-brastak.com.br/catalogo/catalogo\\_espanhol\\_web.pdf](http://www.harris-brastak.com.br/catalogo/catalogo_espanhol_web.pdf)

## 5.2 CARACTERÍSTICAS<sup>6</sup>

Los metales de aporte para soldadura fuerte deben tener las siguientes propiedades:

- Composición con la suficiente homogeneidad y estabilidad para que la separación de los constituyentes (licuación) durante la soldadura fuerte sea mínima.
- Capacidad para producir o evitar las interacciones del metal de aporte y los metales base.
- Capacidad de formar uniones soldadas con propiedades mecánicas y físicas apropiadas para una determinada aplicación.
- Compatibilidad entre el punto de fusión y los metales que se van a unir, y fluidez suficiente a la temperatura de soldadura fuerte para lograr una buena penetración y distribución por acción capilar en la unión preparada.

- Formar una unión fuerte e íntegra debido a la capacidad para mojar las superficies de los metales base.

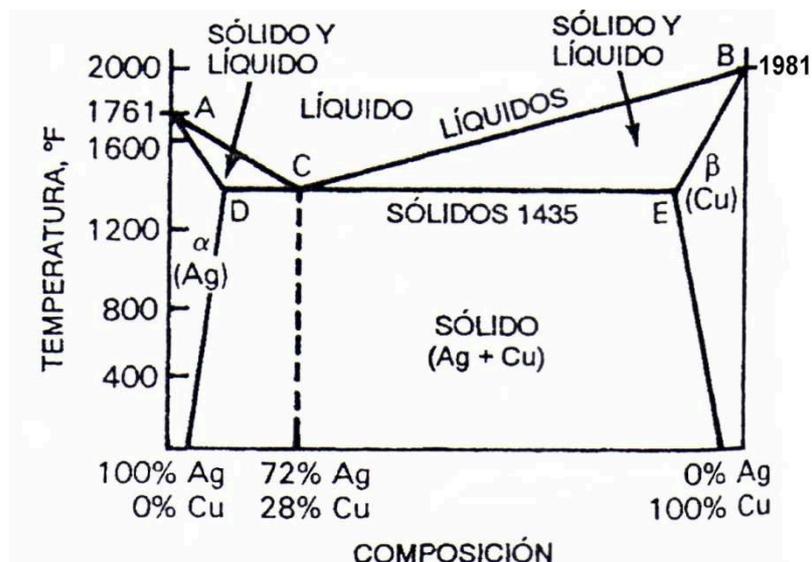
### 5.2.1 LICUACIÓN

La composición del metal fundido cambiará gradualmente conforme se incrementa la temperatura desde el sólido hasta el líquido, debido a que las fases de aleación sólida y líquida de un metal de aporte para soldadura fuerte generalmente no son iguales. Si se permite que la porción que se funde primero fluya hacia fuera, es posible que el sólido restante no se funda y permanezca como un residuo. No existe una tendencia a separarse en los metales de aporte con intervalos de fusión estrechos, con la finalidad de que fluya libremente al interior de uniones con separaciones extremadamente angostas. Deben calentarse rápidamente los metales de aporte con intervalos de fusión amplios o colocarse en la unión después de que el metal base haya alcanzado la temperatura de soldadura fuerte, para que la separación que se llama licuación sea mínima. Ocurre una formación de filetes grandes en las extremidades de las uniones cuando se utiliza metales de aporte propensos a la licuación, debido a que estos fluyen lentamente y solo penetran en uniones bastante separadas.

### 5.2.2 FUSIÓN Y FLUIDEZ

Generalmente los metales puros son muy fluidos y se funden a una temperatura constante. Las composiciones binarias (dos metales) tienen diferentes características, dependiendo de las proporciones de los dos metales. El diagrama de equilibrio del sistema binario plata-cobre se ilustra en la figura 5.2. La línea de cambio a fase sólida (sólido), ADCEB, indica la temperatura de comienzo de la fusión de las aleaciones, en tanto que la línea de cambio a fase líquida (líquido), ACB, indica las temperaturas a las que las aleaciones se vuelven completamente líquidas. En el punto C las dos líneas se unen (72% plata – 28% cobre), lo que indica que esa aleación se funde esa temperatura específica (la temperatura eutéctica). Esta aleación tiene la composición eutéctica; es tan fluida como un metal puro, en tanto que las demás combinaciones de aleación son pastosas entre sus temperaturas de sólido y de líquido. Costará más trabajo que la aleación fluya al interior de una unión

capilar, cuanto mayor sea la separación entre estas dos temperaturas. La solución sólida de cobre en plata es la región  $\alpha$ , y la solución sólida de plata en cobre es la región  $\beta$ . Una mezcla íntima de soluciones  $\alpha$  y  $\beta$  es el constituyente de la zona sólida central. Los átomos de plata y de cobre están distribuidos en forma totalmente homogénea en una solución líquida, por encima de la línea de líquidus.



**Figura 5.2.** Diagrama constitucional plata-cobre.

**Fuente:** AMERICAN WELDING SOCIETY; Manual de Soldadura; Octava Edición; Tomo II; Editorial Prentize-Hall Hispanoamérica; México; 1996; Pág. 391.

### 5.2.3 MOJADO Y ADHESIÓN

Un metal de aporte de soldadura fuerte debe alearse con la superficie del metal base sin (1) difundirse de manera indeseable al interior del metal base, (2) diluir el metal base, (3) erosionar el metal base y (4) no formar compuestos quebradizos, de esta manera el proceso se vuelve efectivo.

La temperatura y duración del ciclo de soldadura fuerte, la solubilidad mutua entre el metal de aporte y el metal base, y la cantidad de metal de aporte presente influyen sobre los efectos 1,2 y 3 anteriormente mencionados.

Las propiedades del metal base se ven afectadas cuando los metales de aporte se difunden excesivamente. Se debe seleccionar un metal de aporte apropiado si se desea controlar la difusión y seguir el correcto ciclo de soldadura fuerte.

El flujo capilar se mejora si el metal de aporte moja el metal base. La solubilidad mutua puede modificar la composición del metal de aporte por aleación si son largos los capilares entre las piezas metálicas. Por lo general, esto aumentará la temperatura de líquidus y hará que solidifique antes de llenar por completo la unión.

Cuando el metal base y el metal de aporte de soldadura fuerte son mutuamente solubles ocurre la erosión del metal base. Se presentan ocasiones en que tal aleación fuerte es mutuamente soluble, así como existen ocasiones en que tal aleación produce compuestos intermetálicos quebradizos que reducen la ductilidad de la unión.

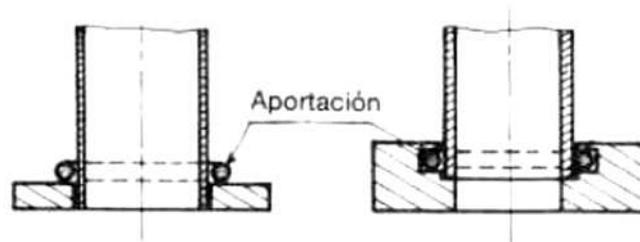
Con el fin de otorgar características deseables, como resistencia a la corrosión en medios específicos, temperaturas de soldadura fuerte favorables o ahorro de materiales, se ajusta la composición de los metales de aporte para soldadura fuerte. Por ejemplo los metales de aporte que contienen zinc o cadmio, o ambos, que bajan las temperaturas de líquidus y sólidus, se utilizan para sobreponerse a la capacidad de aleación (humectabilidad) limitada de las aleaciones plata-cobre que se usan para soldar en fuerte hierro y acero.

Cuando son indeseables los constituyentes con presión de vapor alta se añade estaño en lugar de cinc o cadmio. De igual forma, se utiliza silicio para reducir las temperaturas de líquidus y sólidus de los metales de aporte para soldadura fuerte de aluminio y con base níquel.

#### **5.2.4 FORMAS COMERCIALES DE LOS METALES DE APORTACIÓN**

Son muy variadas, según el modo de empleo:

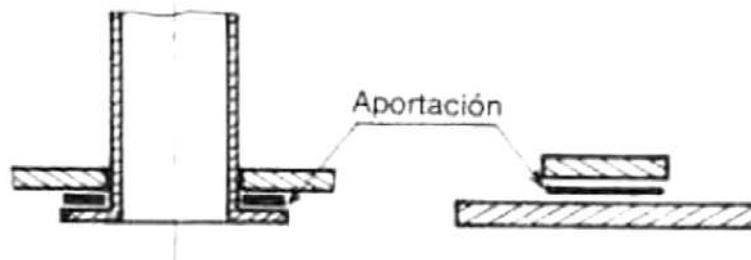
- Lingotes y barras, únicamente en aleaciones a base de plomo y estaño reservadas para la soldadura blanda.
- Varillas y alambres, de diversas secciones y espesor, pastas, polvos, láminas, y también piezas preformadas, es decir, con una forma especial (plaquitas, anillos, arandelas, tubos, etc.) adaptada a una aplicación específica (figuras 5.3 y 5.4).



**Figura 5.3. Anillos.**

Fuente:

<http://grupos.emagister.com/ficheros/vcruzada?fdwn=1&idGrupo=1440&idFichero=776284>



**Figura 5.4. Arandelas y chapitas.**

Fuente:

<http://grupos.emagister.com/ficheros/vcruzada?fdwn=1&idGrupo=1440&idFichero=776284>

NOTA: Las hojas se recortan y conforman para adaptarlas a las piezas.

Todas estas formas se fabrican en diversos metales y aleaciones, según el uso a que se destinen, tanto para la soldadura blanda como para la fuerte.

### 5.3 SELECCIÓN DEL METAL DE APORTE<sup>6</sup>

La mayoría de los materiales de aporte son aleaciones que funden a través de un rango de temperaturas, a excepción de las eutécticas que lo hacen a una temperatura específica.

La aleación por tanto, adquiere inicialmente un estado pastoso cuando se encuentra entre el sólido y el líquido, debido a que una porción permanece sólida hasta que la temperatura alcanza el líquido. Teóricamente mantener la pieza en el líquido originaría la fusión del metal de aporte, sin embargo las variables de producción pueden no garantizar la completa fusión del material en la unión, por lo que se suele aumentar esta temperatura entre 10° y 40°C para obtener siempre la completa fusión del material de aporte.

Para seleccionar un metal de aporte para soldadura fuerte se deben considerar cuatro factores:

- 1) Compatibilidad con el metal base y el diseño de la unión.
- 2) Requisitos de servicio del ensamble soldado

Los requisitos de operación, como temperatura de servicio (alta o criogénica), ciclaje térmico, vida útil, esfuerzos de carga, condiciones corrosivas, estabilidad ante radiaciones y operación en vacío deben ser satisfechos por la composición seleccionada.

- 3) Temperatura de soldadura fuerte requerida.

Con la finalidad de economizar energía calórica, minimizar los efectos térmicos sobre el metal base (recocido, crecimiento de granos, deformación), minimizar la interacción metal base-metal de aporte, es preferible utilizar temperaturas de soldadura fuerte bajas. Cuando se desea utilizar un metal de aporte con punto de fusión más alto se usan temperaturas de soldadura fuerte más altas, sin embargo resulta más económico combinar con la soldadura fuerte el recocido, la liberación de tensiones o el tratamiento térmico del metal base, realizar un procesamiento subsecuente a temperatura elevada, promover las interacciones metal base metal de aporte a fin de elevar la temperatura de refusión de la unión ó promover la eliminación de ciertos óxidos refractarios al vacío o con una atmósfera especial.

- 4) Método de calentamiento.

Cualquier método de calentamiento puede ser empleado para metales de aporte con intervalos de fusión pequeños menores de 28°C (50° F) entre sólidos y líquidos, y el metal de aporte de soldadura fuerte se puede colocar previamente en el área de la unión en forma de calzas, pasta o polvo.

Una vez que se ha calentado el metal base se puede alimentar este tipo de aleaciones en forma manual o automática a la unión. Los metales de aporte que tienden a la licuación solo deben usarse con métodos de calentamiento que lleven la unión a la temperatura de soldadura fuerte con mucha rapidez, o bien introducirse después de que el metal base haya alcanzado dicha temperatura.

Con la finalidad de simplificar la selección del metal de aporte, ANSI/ AWS A5.8, Especificación para metales de aporte de soldadura fuerte, divide los

metales de aporte en siete categorías y en varias clasificaciones dentro de cada categoría. La especificación abarca los productos que son metales de aportes comunes, disponibles comercialmente. Las combinaciones metal base-metal de aporte que se sugieren se muestran en la tabla 5.1.

**Tabla 5.1. Combinaciones metal base-metal de aporte.**

	Al y sus aleaciones	Mg y sus aleaciones	Cu y sus aleaciones	Aceros al carbono y de baja aleación	Hierro colado	Aceros inoxidable	Ni y sus aleaciones	Ti y sus aleaciones	Be, Zr y aleaciones (metales reactivos)	W, Mo, Ta, Cb y aleaciones (metales refractarios)	Aceros de herramientas
Al y sus aleaciones	BAISI										
Mg y sus aleaciones	X	BMg									
Cu y sus aleaciones	X	X	BAG, BAu, BCuP, RBCuZn	BNI							
Aceros al carbono y de baja aleación	BAISI	X	BAG, BAu, RBCuZn, BNI	BAG, BAu, BCu RBCuZn, BNI							
Hierro colado	X	X	BAG, BAu, RBCuZn, BNI	BAG, RBCuZn, BNI	BAG, RBCuZn, BNI						
Aceros inoxidable	BAISI	X	BAG, BAu	BAG, BAu, BCu, BNI	BAG, BAu, BCu, BNI						
Ni y sus aleaciones	X	X	BAG, BAu, RBCuZn, BNI	BAG, BAu, BCu RBCuZn, BNI	BAG, BCu RBCuZn	BAG, BAu, BCu, BNI	BAG, BAu, BCu, BNI				
Ti y sus aleaciones	BAISI	X	BAG	BAG	BAG	BAG	BAG	Y			
Be, Zr y aleaciones (metales reactivos)	X BAISI (Be)	X	BAG	BAG, BNI*	BAG, BNI*	BAG, BNI*	BAG, BNI*	Y	Y		
W, Mo, Ta, Cb y aleaciones (metales refractarios)	X	X	BAG, BNI	BAG, BCu, BNI*	BAG, BCu, BNI*	BAG, BCu, BNI*	BAG, BCu, BNI*	Y	Y	Y	
Aceros de herramientas	X	X	BAG, BAu, RBCuZn, BNI	BAG, BAu, BCu RBCuZn, BNI	BAG, BAu, RBCuZn, BNI	BAG, BAu, BCu, BNI	BAG, BAu, BCu RBCuZn, BNI	X	X	X	BAG, BAu, BCu RBCuZn, BNI

Nota: Consulte la especificación AWS A5.8 si desea información sobre composiciones específicas dentro de cada clasificación.

X - No se recomienda, aunque se puede usar con técnicas especiales para ciertas combinaciones de materiales disímiles.

Y - No es posible hacer generalizaciones sobre estas combinaciones. Consulte el manual de soldadura fuerte para averiguar cuáles metales de aporte se puede usar

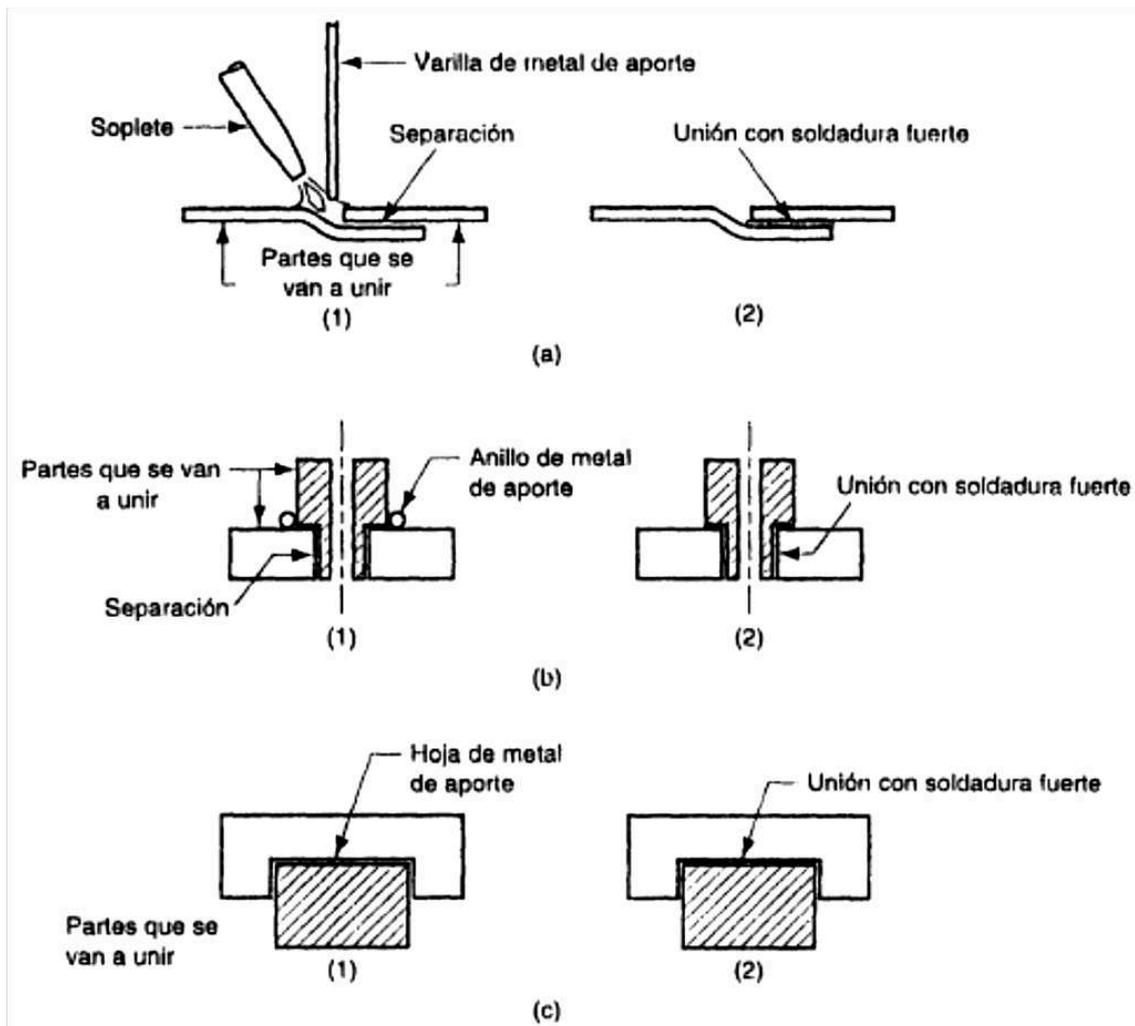
\* - Existen metales de aporte de soldadura fuerte especiales y se usan con éxito con combinaciones de metales específicos.

Metales de aporte:

BAISI	Aluminio	BCuP	Cobre fósforo
BAG	Base de plata	RBCuZn	Cobre zinc
BAU	Base de oro	BMg	Base de magnesio
BCu	Cobre	BNI	Base de níquel

**Fuente:** AMERICAN WELDING SOCIETY; Manual de Soldadura; Octava Edición; Tomo II; Editorial Prentize-Hall Hispanoamérica; México; 1996; Pág. 393.

Los metales de aporte se aplican a la operación de soldadura fuerte en diversas formas, entre las que incluyen alambres, varillas, láminas y tiras, polvos, pastas, partes preformadas hechas de metal latonado diseñado para adaptarse a una configuración de unión particular y al revestimiento en una de las superficies a las que se va a aplicar soldadura fuerte. Varias de estas técnicas se ilustran en la figura 5.5.



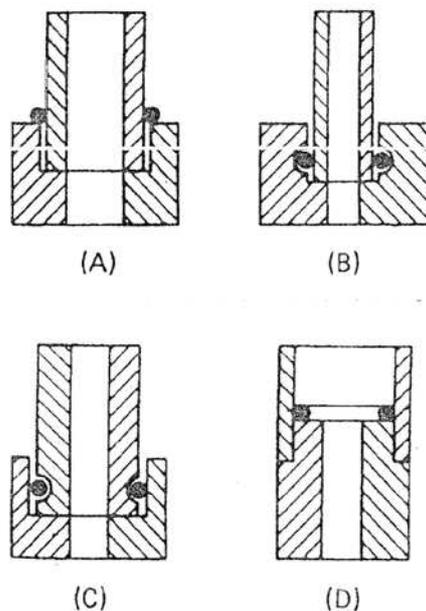
**Figura 5.5.** Técnicas para aplicar metal de aporte en la soldadura fuerte: (a) soplete y varilla de aporte, (b) anillo de metal de aporte a la entrada de la separación y (c) hoja de metal de aporte entre superficies de partes planas. Secuencia:(1) antes y (2) después.

Fuente: <http://materias.fcyt.umss.edu.bo/tecno-II/PDF/cap-44.pdf>

## 5.4 COLOCACIÓN DEL METAL DE APORTE<sup>6</sup>

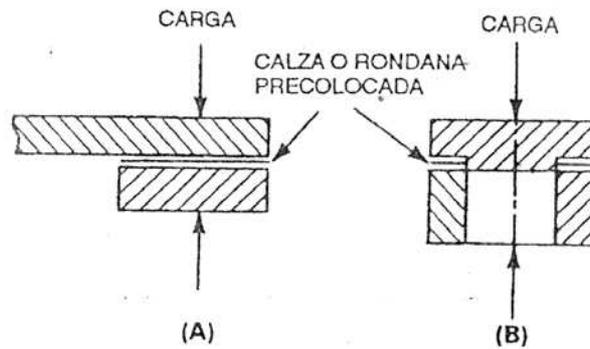
Al diseñar una unión para soldadura fuerte, es preciso establecer el proceso que se usará y la forma en que el metal de aporte se colocará en la unión. En la mayor parte de las uniones soldadas en fuerte a mano, el metal de aporte simplemente se alimenta a la superficie visible de la unión durante la soldadura. En el caso de soldadura fuerte en horno o de alta producción, el metal de aporte se coloca previamente en la unión, posiblemente con equipo automático.

Las figuras 5.6 y 5.7 ilustran los métodos para colocar previamente metal de aporte en forma de alambre o lámina. Si se hace un surco en el metal base para aceptar el metal de aporte precolocado, se deberá hacer en la sección más gruesa. Al calcular la resistencia mecánica de la unión propuesta, se deberá restar el área del surco del área de la unión, ya que el metal de aporte saldrá del surco para fluir hacia las zonas de la unión, como se indica en la figura 5.8.

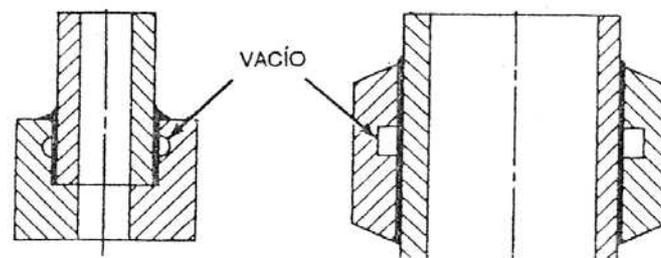


**Figura 5.6.** Métodos para precolocar alambre de aporte de soldadura fuerte.

**Fuente:** AMERICAN WELDING SOCIETY; Manual de Soldadura; Octava Edición; Tomo II; Editorial Prentize-Hall Hispanoamérica; México; 1996; Pág. 410.



**Figura 5.7.** Colocación previa de calzas de metal de aporte para soldadura fuerte.  
**Fuente:** AMERICAN WELDING SOCIETY; Manual de Soldadura; Octava Edición; Tomo II;  
 Editorial Prentize-Hall Hispanoamérica; México; 1996; Pág. 410.



**Figura 5.8.** Uniones soldadas en fuerte con surcos para colocar previamente metal de aporte; después del ciclo de soldadura fuerte los surcos quedan vacíos.  
**Fuente:** AMERICAN WELDING SOCIETY; Manual de Soldadura; Octava Edición; Tomo II;  
 Editorial Prentize-Hall Hispanoamérica; México; 1996; Pág. 410.

El metal de aporte en polvos se puede aplicar en cualquiera de los puntos indicados en la figura 5.6. El polvo se puede aplicar seco en el área de la unión y luego empaparse con aglomerante, o bien puede mezclarse previamente con el aglomerante y aplicarse a la unión. La densidad del polvo por lo regular es del 50 al 70% de la del metal sólido, por lo que el volumen del surco debe ser mayor si se usa polvo.

Si se emplean calzas colocadas previamente, las secciones por soldar en fuerte deberán tener libertad de movimiento cuando las calzas se derritan. Posiblemente se necesite algún tipo de carga para juntarlas y expulsar de la unión el exceso de metal de aporte y fundente.

## **5.5 METALES DE APORTE SEGÚN LA NORMA AWS A 5.8<sup>12</sup>**

### **5.5.1 METALES DE APORTE DE PLATA**

Estos metales de aporte de soldadura fuerte son empleados para unir metales ferrosos y no ferrosos, excepto aluminio y magnesio. Estos metales de aporte tienen buenas propiedades de soldadura y son adecuados para colocarse previamente en la unión ya calentada. Generalmente son utilizadas las juntas a traslape, sin embargo las juntas a tope se pueden utilizar si los requerimientos son menos estrictos.

Para una adecuada acción capilar se recomienda una holgura de las juntas de 0.001 a 0.005 pulgadas (0.025 a 0.13 mm). Se requiere fundente en la mayoría de los metales.

No se requiere fundente cuando el horno de soldadura tiene una atmósfera protectora. Si los metales de aporte contienen zinc o cadmio se utilizan en un horno de atmósfera protectora, tomando en consideración que el zinc o cadmio se vaporiza, cambiando la composición química.

Por lo tanto, los metales de relleno cadmio y zinc se recomienda para soldadura en horno en una atmósfera protectora. Los metales de relleno que contengan cadmio y / o zinc no deben ser utilizados en un horno de vacío. Los metales de relleno conforme a BAg-1, BAg-1a, BAg-2, BAg-2a, BAg-3, BAg-27 y BAg-33 contienen cadmio.

### **5.5.2 METALES DE APORTE DE ORO**

Estos metales de aporte se utilizan para soldar en fuerte metales con base de hierro, de níquel y de cobalto cuando se requiere una mejor ductilidad y una mayor resistencia a la oxidación y a la corrosión. Por lo general se usan con secciones delgadas debido a su baja tasa de interacción con el metal base.

Estos metales de relleno generalmente se utilizan con hornos de inducción u hornos con una atmósfera protectora, en estos casos no se requiere fundente.

### **5.5.3 METALES DE APORTE DE ALUMINIO-SILICIO**

Esta clasificación de metales de aporte es utilizada para unir los siguientes grados de aluminio y aleaciones de aluminio: 1060, 1350, 1100, 3003, 3004, 5005, 5050, 6053, 6061, 6951, 7005 y aleaciones coladas 710.0 y 711.0.

Después de soldar con fundente, las partes soldadas deben ser limpiadas a fondo. La inmersión en agua hirviendo por lo general elimina el residuo de fundente. Si esto no es adecuado, las partes son generalmente sumergidas en un concentrado comercial de ácido nítrico u otra solución apropiada de ácido y luego se enjuaga a fondo.

### **5.5.4 METALES DE APORTE DE COBRE-FÓSFORO**

Este tipo de metales de aporte se utiliza principalmente para unir cobre y aleaciones de cobre, aunque tienen un uso limitado en la plata, tungsteno y molibdeno. Estos metales de aporte no deben ser utilizados en aleaciones de ferrosas o con base de níquel o en aleaciones de cobre-níquel que tengan más del 10% de níquel. Estos metales de aporte son adecuados para todos los procesos de soldadura fuerte, y tiene propiedades autofundentes cuando se usan para unir cobre, sin embargo es recomendable utilizar un fundente para todos los otros metales incluyendo las aleaciones de cobre. Tiene una buena resistencia a la corrosión excepto cuando la junta está en contacto con atmósferas sulfurosas. Cabe mencionar que los rangos de temperatura fuerte comienzan debajo del líquido.

### **5.5.5 METALES DE APORTE DE COBRE Y COBRE-ZINC**

Esta clasificación de metales de aporte para soldadura fuerte se utiliza para unir diversos metales ferrosos y no ferrosos. Estos también pueden ser utilizados con diversos procesos de soldadura fuerte. Sin embargo, con el metal de aporte de RBCuZn, se debe evitar el sobrecalentamiento. Se pueden formar porosidades en la unión por un conjunto de vapores de zinc atrapados.

Los metales de aporte de cobre-zinc sirven para unir aceros, cobre, aleaciones de cobre, níquel, aleaciones con base de níquel y acero inoxidable en los casos en que no se requiere resistencia a la corrosión. Se emplean con los procesos

de soldadura fuerte con soplete, en horno y por inducción. Se usa fundente, por lo regular de bórax con ácido bórico.

#### **5.5.6 METALES DE APORTE DE NÍQUEL**

Los metales de aporte de níquel en soldadura fuerte presentan buenas propiedades de resistencia a la corrosión y al calor. Este metal de aporte tiene excelentes propiedades de servicio a altas temperaturas. Los metales de aporte de níquel tienen la característica de presión de vapor muy baja que se requiere en los sistemas al vacío y en aplicaciones de tubos al vacío a temperaturas elevadas.

La reducción de la holgura en las uniones y el empleo de ciclos térmicos adecuados son a menudo empleados para minimizar la presencia de compuestos intermetálicos, incrementando así la ductilidad de la unión y aumentando la temperatura de refusión. Con la difusión completa, la temperatura de difusión puede aumentar por encima de 2500°F (1370°C).

El cromo es el elemento limitante en metales para ser utilizados en aplicaciones en vacío. Cabe señalar que cuando el fósforo es combinado con otros elementos, estos compuestos tienen bajas presiones de vapor y pueden ser fácilmente utilizados en una atmósfera de vacío para soldadura fuerte de  $1 \times 10^{-3}$  torr (013Pa) a 1950°F (1066°C), sin la eliminación del fósforo.

Una mayor resistencia y ductilidad en este grupo de metales de aporte es obtenible mediante soldadura fuerte por difusión.

#### **5.5.7 METALES DE APORTE DE COBALTO**

Esta clasificación de metales de aporte se utiliza generalmente por su compatibilidad con los materiales de base de cobalto y además por sus propiedades a altas temperaturas.

#### **5.5.8 METALES DE APORTE DE MAGNESIO**

Estos metales de aporte se utilizan para unir las aleaciones de magnesio AZ10A, K1A y M1A empleando procesos de soldadura fuerte con soplete, por inmersión o en horno. Para evitar la fusión del metal base el calentamiento se

debe controlar con precisión. La separación óptima de las uniones para la mayor parte de las aplicaciones está entre 0.10 y 0.25 mm (0.004 y 0.010 pulg).

Si el fundente se elimina por completo después de la soldadura fuerte se aumenta la resistencia a la corrosión. Generalmente los ensambles soldados en fuerte son apropiados para servicio continuo hasta 120°C (250°F o servicio intermitente hasta 150°C (300°F), tomando en cuenta las limitaciones habituales del entorno real de operación.

#### **5.5.9 METALES DE APORTE PARA METALES REFRACTARIOS**

Este tipo de metales de aporte es muy útil para ensambles de metales refractarios, especialmente para aquellos en los que intervienen secciones delgadas. Sin embargo, para aplicaciones de alta temperatura y alta corrosión son pocos los metales de aporte que se han diseñado.

En la tabla 5.2 se muestra los diferentes metales de aporte y metales puros que se usan para soldar en fuerte metales refractarios.

Los metales de aporte de bajo punto de fusión, como plata-cobre-cinc, cobre-fósforo y cobre sirven para unir tungsteno en aplicaciones de contactos eléctricos, pero a temperaturas elevadas no es aconsejable utilizar estos metales de aporte. Para ello es conveniente usar metales de alto punto de fusión, como tantalio y colombio.

Existen varios metales de aporte para soldadura fuerte que unen molibdeno, pero se debe considerar el efecto de la temperatura de soldadura fuerte sobre la recristalización del metal base. El tiempo de soldadura debe ser muy corto si se suelda en fuerte por encima de la temperatura de recristalización. Es factible usar metales de aporte con base de cobre y plata cuando no se requiera servicio a alta temperatura.

**Tabla 5.2.** Metales de aporte de soldadura fuerte para metales refractarios.

Metal de aporte	Temperatura de líquidus		Metal de aporte	Temperatura de sólidos	
	°F	°C		°F	°C
Cb	4380	2416	Mn-Ni-Co	1870	1021
Ta	5425	2997			
Ag	1760	960	Co-Cr-Si-Ni	3450	1899
Cu	1980	1082	Co-Cr-W-Ni	2600	1427
Ni	2650	1454	Mo-Ru	3450	1899
Ti	3300	1816	Mo-B	3450	1899
Pd-Mo	2860	1571	Cu-Mn	1600	871
Pt-Mo	3225	1774	Cb-Ni	2175	1190
Pt-30W	4170	2299			
Pt-50Rh	3720	2049	Pd-Ag-Mo	2400	1306
			Pd-Al	2150	1177
Ag-Cu-Zn-Cd-Mo	1145-1295	619-701	Pd-Ni	2200	1205
Ag-Cu-Zn-Mo	1324-1450	718-788	Pd-Cu	2200	1205
Ag-Cu-Mo	1435	780	Pd-Ag	2400	1306
Ag-Mn	1780	971	Pd-Fe	2400	1306
			Au-Cu	1625	885
Ni-Cr-B	1950	1066	Au-Ni	1740	949
Ni-Cr-Fe-Si-C	1950	1066	Au-Ni-Cr	1900	1038
Ni-Cr-Mo-Mn-Si	2100	1149	Ta-Ti-Zr	3800	2094
Ni-Ti	2350	1288			
Ni-Cr-Mo-Fe-W	2380	1305	Ti-V-Cr-Al	3000	1649
Ni-Cu	2460	1349	Ti-Cr	2700	1481
Ni-Cr-Fe	2600	1427	Ti-Si	2600	1427
Ni-Cr-Si	2050	1121	Ti-Zr-Be(b)	1830	999
			Zr-Cb-Be(b)	1920	1049
			Ti-V-Be(b)	2280	1249
			Ta-V-Cb(b)	3300-3500	1816-1927
			Ta-V-Ti(b)	3200-3350	1760-1843

a. No todos los metales de aporte que se muestran están disponibles comercialmente.

b. Depende de la composición específica.

**Fuente:** AMERICAN WELDING SOCIETY; Manual de Soldadura; Octava Edición; Tomo II; Editorial Prentize-Hall Hispanoamérica; México; 1996; Pág. 395.

Las aleaciones cobre-oro que contienen oro en proporciones entre el 46 y el 90% forman compuestos endurecidos por envejecimiento que son

quebradizos. No es factible utilizar metales de aporte con base de plata porque pueden hacer quebradizos el metal base.

## **5.6 SELECCIÓN DE LOS METALES BASE<sup>6</sup>**

En las propiedades mecánicas del metal de un ensamble soldado se debe considerar el efecto de la soldadura fuerte, así como la resistencia final de la unión soldada. Los metales base que se hayan fortalecido mediante trabajado en frío sufrirán un recocido si las temperaturas y tiempos del proceso de soldadura fuerte están en el intervalo de recocido del metal base que se está procesando. Los metales resistentes al calor “trabajados en caliente –frío” que se sueldan en fuerte solo presentan las propiedades físicas del metal recocido. El metal base trabajado en frío casi siempre es recocido por el ciclo de soldadura fuerte, a menos que la temperatura de soldadura fuerte sea muy baja y el metal permanezca muy poco tiempo en esta temperatura. Después de la operación de soldadura fuerte no es aconsejable trabajar en frío el metal base.

Si se requiere una resistencia mecánica superior a la que corresponde a las propiedades del metal base recocido en un ensamble soldado, se debe seleccionar un material susceptible de tratamiento térmico, el metal base puede ser un tipo extinguido en aceite, un tipo extinguido en aire que se pueda soldar en fuerte y endurecer en la misma operación o en operaciones independientes, o un tipo endurecible por precipitación que pueda soldarse en fuerte y tratarse en solución en un ciclo combinado. Es posible soldar en fuerte piezas ya endurecidas, para esto se utiliza un metal de aporte de baja temperatura.

### **5.6.1 ACEROS DE HERRAMIENTAS DE ALTO CARBONO Y DE ALTA VELOCIDAD**

Los aceros de herramientas de alto carbono por lo regular contienen entre 0.60 y 1.40% de carbono. Antes de la operación de endurecimiento se debe realizar la soldadura fuerte de los aceros de alto carbono. Es conveniente utilizar metales de aporte con temperatura de soldadura fuerte mayores que 820° C (1500° F), debido a que las temperaturas de endurecimiento para los aceros al carbono varían entre 760 y 820° C (1400 y 1500° F). El metal de aporte deberá

tener un sólido igual o mayor que la temperatura de austenización, si la soldadura fuerte y el endurecimiento se realizan en la misma operación.

En el caso de aceros de herramienta de alta velocidad y aceros de herramienta de aleación de alto carbono y alto cromo que tienen temperaturas de templado del orden de 540 a 650° C (1000 a 1200° F) es posible combinar el templado y la soldadura fuerte. Se emplean metales de aporte con tratamientos térmicos de soldadura fuerte en ese intervalo. La pieza se saca del horno de templado, se suelda en fuerte empleando métodos de calentamiento localizado, y para completar el ciclo de templado se regresa al horno.

### **5.6.2 TITANIO Y ZIRCONIO**

El titanio y el zirconio se combinan fácilmente con el oxígeno, y reaccionan para formar compuestos intermetálicos quebradizos con muchos metales y con hidrógeno y nitrógeno.

Al utilizar metales de aporte de plata y con base de plata para soldar en fuerte titanio, se formaban compuestos intermetálicos quebradizos y había corrosión por las fisuras. El papel de aluminio tipo 3003 puede unir estructuras delgadas y ligeras, como los tableros de emparedado de panel complejos.

Las aleaciones Ti-Zr-Ni-Be, Ti-Zr-Ni-Cu y Ti-Ni-Cu son otros metales de aporte para soldadura fuerte con alta capacidad de servicio y resistencia a la corrosión. Controlando con precisión la temperatura dentro del intervalo de 900 a 955° C (1650 a 1750° F) se obtiene los mejores resultados con estufas de alto vacío.

### **5.6.3 ALUMINIO Y ALEACIONES DE ALUMINIO**

Las series ASTM 1XXX y 3XXX, y las aleaciones de bajo magnesio de la serie ASTM 5XXX son las aleaciones de aluminio forjadas no tratables por calor que mejor se pueden soldar en fuerte. Los metales de aporte disponibles se funden por debajo de las temperaturas de sólido de todas las aleaciones forjadas comerciales que no son susceptibles de tratamiento térmico. La serie ASTM 6XXX son las aleaciones forjadas susceptibles de tratamiento térmico que con más frecuencia se sueldan en fuerte. Debido al bajo punto de fusión, las series de aleaciones de aluminio ASTM 2XXX y 7XXX con la excepción de las

aleaciones 7072 y 7005 no pueden soldarse en fuerte. Generalmente no se sueldan en fuerte las piezas de aluminio coladas en troquel debido a que su alto contenido de gases puede generar ampollas.

Los metales base de aluminio comunes que pueden soldarse en fuerte se indican en la tabla 5.3. Los procesos de soplete, inmersión u horno son propicios para la soldadura fuerte de aluminio.

**Tabla 5.3.** Composición nominal e intervalo de fusión de las aleaciones de aluminio soldables en fuerte comunes.

Designación comercial	Aleación ASTM	Calificación de soldabilidad en fuerte	Composición nominal							Intervalo de fusión aproximado		
			Cu	Si	Mn	Mg	Zn	Cr	°F	°C		
			EC	EC	A	Al 99.45% mín						
1100	1100	A	Al 99% mín							1190-1215	643-657	
3003	3003	A			1,2					1190-1210	643-654	
3004	3004	B			1,2	1				1165-1205	629-651	
3005	3005	A	0,3	0,6	1,2	0,4	0,25	0,1		1180-1215	638-657	
5005	5005	B				0,8				1170-1210	632-654	
5050	5050	B				1,2				1090-1200	588-649	
5052	5052	C				2,5				1100-1200	593-649	
6151	6151	C		1		0,6		0,25		1190-1200	643-649	
6951	6951	A	0,25	0,35		0,65				1140-1210	615-654	
6053	6053	A		0,7		1,3				1105-1205	596-651	
6061	6061	A	0,25	0,6		1		0,25		1100-1205	593-651	
6063	6063	A		0,4		0,7				1140-1205	615-651	
7005	7005	B	0,1	0,35	0,4	1,4	4,5	0,13		1125-1195	607-648	
7072	7072	A						1		1125-1195	607-648	
Colado 43	Colado 443.0	A		5						1065-1170	629-632	
Colado 356	Colado 356.0	C		7		0,3				1035-1135	557-613	
Colado 406	Colado 406	A		Al 99% mín							1190-1215	643-657
Colado A612	Colado A712.0	B				0,7	6,5			1105-1195	596-648	
Colado C612	Colado C712.0	A				0,35	6,5			1120-1190	604-643	

a. Porcentaje de elementos de aleación: el resto es aluminio e impurezas normales.

b. Calificaciones de soldabilidad en fuerte:

A = Aleaciones que se sueldan en fuerte fácilmente con todos los métodos y procedimientos comerciales.

B = Aleaciones que pueden soldarse en fuerte con todas las técnicas si se tiene un poco de cuidado.

C = Aleaciones que requieren cuidado especial para soldarse en fuerte.

**Fuente:** AMERICAN WELDING SOCIETY; Manual de Soldadura; Octava Edición; Tomo II; Editorial Prentize-Hall Hispanoamérica; México; 1996; Pág. 397.

#### 5.6.4 ACEROS DE BAJO CARBONO Y DE BAJA ALEACIÓN

No existe dificultad en la soldadura fuerte de aceros de bajo carbono y de baja aleación. Con frecuencia se suelda con metal de aporte de cobre en una

atmósfera controlada a temperaturas por encima de 1080° C (1980° F), o con metales de aporte con base de plata a más bajas.

En los aceros de aleación, el metal de aporte debe tener un sólido bastante por encima de cualquier temperatura de tratamiento térmico a fin de evitar daños a uniones que recibirán tratamientos térmicos después de la soldadura fuerte. En algunos casos, los aceros endurecibles al aire se pueden soldar en fuerte y luego endurecerse extinguiéndolos desde la temperatura de soldadura fuerte.

Si no se desea alterar las propiedades metalúrgicas del metal base se puede usar un metal de aporte con una temperatura de soldadura fuerte menor que la temperatura crítica del acero.

### **5.6.5 METALES REFRACTARIOS**

Aún se encuentra en las etapas de desarrollo la soldadura fuerte de molibdeno, tungsteno, tantalio y colombio.

#### **5.6.5.1 Molibdeno**

Metales de aporte con base de paladio y metales con base de molibdeno (Mo-0.5Ti) que tengan temperatura de recristalización alta sirven para soldar en fuerte el molibdeno. El chapeado con cromo, como capa de barrera, evita la formación de compuestos intermetálicos. Para servicio resistente a la oxidación en aplicaciones de recubrimiento son adecuados la mayor parte de los metales de aporte de soldadura fuerte a alta temperatura.

#### **5.6.5.2 Tungsteno**

Empleando metales de aporte con base de níquel el tungsteno puede soldarse en fuerte consigo mismo y con otros metales y no metales, tomando en cuenta que la interacción entre el tungsteno y el níquel recristaliza el metal base. Antes de soldarlo en fuerte se recomienda liberar las tensiones del tungsteno mediante un tratamiento térmico y para limitar la interacción con el metal de aporte el ciclo de soldadura fuerte deberá ser corto.

### **5.6.5.3 Tantalio y Colombio**

Para soldarse en fuerte satisfactoriamente el tantalio y el colombio requieren técnicas especiales. De la atmósfera de soldadura fuerte se deben eliminar todos los gases reactivos, estos incluyen monóxido de carbono, hidrógeno, oxígeno y amoniaco. El tantalio y el colombio a menudo se chapean con cobre o níquel, como protección contra la oxidación a altas temperaturas. Debe existir una compatibilidad entre el chapeado y el metal de aporte de soldadura fuerte.

### **5.6.6 MAGNESIO Y ALEACIONES DE MAGNESIO**

Se emplean técnicas similares a las que se usan con aluminio para soldar en fuerte aleaciones de magnesio. La soldadura fuerte por inmersión es el proceso más utilizado, pero también se puede soldar en horno y con soplete. En la tabla 5.4 se ilustra las aleaciones de magnesio que se consideran soldables en fuerte. La soldadura fuerte en horno y con soplete se limita a la aleación M1A, mientras que la soldadura fuerte por inmersión se puede aplicar a las aleaciones AZ10A, AZ31B, AZ61A, K1A, M1A, ZE10A, ZK21A y ZK60A.

Para los procesos de soldadura fuerte con soplete, por inmersión o en horno es aconsejable el metal de aporte BMg-1. La aleación BMg-2 suele ser la preferida para la mayor parte de las aplicaciones de soldadura fuerte porque su intervalo de fusión es más bajo. El metal de aporte que tiene una composición de punto de fusión más bajo es el GA432, este metal de aporte tiene una base de zinc y solo es adecuado para el proceso de soldadura fuerte por inmersión.

**Tabla 5.4.** Aleaciones de magnesio soldables en fuerte y metales de aporte.

Clasificación de AWS A5.8	Designación de la aleación ASTM	Formas disp.	Sólidos		Líquidos		Intervalo de soldadura fuerte		Metal de aporte apropiado	
			°F	°C	°F	°C	°F	°C	BMg-1	BMg-2a
<b>Metal Base</b>										
-	AZ10A	E	1170	632	1190	643	1080-1140	582-616	X	X
-	AZ31B	E. S	1050	566	1160	627	1080-1141	582-593		X
-	K1A	C	1200	649	1202	650	1080-1142	582-616	X	X
-	M1A	E. S	1198	648	1202	650	1080-1143	582-616	X	X
-	ZE10A	S	1100	593	1195	646	1080-1144	582-593		X
-	ZK21A	E	1159	626	1187	642	1080-1145	582-616	X	X
<b>Metal de aporte</b>										
BMg-1	AZ92A	W. R ST. P	830	443	1110	599	1120-1140	604-616	-	-
E = Formas extruidas y secciones estructurales					R = Varilla					
S = Láminas y placas					ST = Tira					
C = Piezas coladas					P = Polvo					
W = Alambre										

**Fuente:** AMERICAN WELDING SOCIETY; Manual de Soldadura; Octava Edición; Tomo II; Editorial Prentize-Hall Hispanoamérica; México; 1996; Pág. 398.

### 5.6.7 COBRE Y ALEACIONES DE COBRE

Los metales base de aleaciones de cobre incluyen las aleaciones cobre-cinc (latón), cobre-silicio (bronce al silicio), cobre- aluminio (bronce de aluminio), cobre-estaño (bronce fosforado), cobre-níquel y varias más.

### 5.6.8 BERILIO

Para unir metalúrgicamente el berilio la soldadura fuerte es el método ideal. Los sistemas de metal de aporte para soldadura fuerte, con sus intervalos de temperatura son:

- Cinc: 427 - 454° C (800 – 850° F)
- Aluminio – silicio: 566 – 677° C (1050 – 1250° F)
- Plata – cobre: 694 – 904° C (1200- 1660° F)
- Plata: 882 – 954° C (1620 – 1750° F)

Pese a que el zinc funde por debajo de 450° C (840° F) y no cumple con la temperatura definida para soldadura fuerte se le acepta como el metal de aporte de más bajo punto de fusión para soldar en fuerte berilio. Para ensambles de berilio forjados de alta resistencia mecánica se emplean metales de aporte de aluminio – silicio debido a que la temperatura de soldadura fuerte está bastante por debajo de la temperatura de re cristalización del metal base. Si se utiliza fundente es recomendable el metal de aporte tipo BAISi-4.

Existe una menor interacción metalúrgica entre el metal base y los metales de aporte en comparación con los metales de aporte con base de plata, siendo esta una ventaja importante en la unión de secciones delgadas o papeles de berilio.

Para estructuras que se van a exponer a temperaturas elevadas resulta factible emplear metales de aporte para soldadura fuerte de plata y con base de plata. Con estos sistemas de aleaciones es sencilla la soldadura fuerte en atmósfera protectora pudiendo efectuarse al vacío o bajo atmósferas controladas.

#### **5.6.9 HIERRO COLADO**

Generalmente se requieren consideraciones especiales para la soldadura fuerte de los hierros colados. Los tipos de hierro colado son, entre otros, el blanco, el gris, el maleable y el dúctil, pero casi nunca se suelda en fuerte el hierro colado blanco.

Para facilitar el mojado con el metal de aporte se usan metales de aporte de plata de bajo punto de fusión. Deben soldarse en fuerte por debajo de los 760° C los hierros colados dúctiles y maleables.

Cuando el hierro colado de alto carbono se suelda en fuerte con cobre, la temperatura debe ser baja para evitar la fusión de áreas localizadas del hierro colado, sobre todo en secciones delgadas.

#### **5.6.10 ACEROS INOXIDABLES**

Debido a su elevado contenido de carbono todas las aleaciones de acero inoxidable son difíciles de soldar en fuerte. Bajo hidrógeno purificado (seco) o en el vacío es la forma más apropiada de soldar en fuerte estas aleaciones. Es preciso mantener puntos de rocío por debajo de -51° C (-60° F) porque el

mojado se dificulta después de la formación del óxido de cromo. Para reducir la cantidad de óxidos de cromo presentes es necesario utilizar un fundente en la soldadura fuerte con soplete.

Para soldar en fuerte aceros inoxidable se emplea metales de aporte de aleación de plata, de cobre y de cobre-zinc. Cuando se busca resistencia a la corrosión generalmente se utiliza aleaciones de plata que contienen zinc.

Los metales de aporte que contiene fósforo no deben usarse en piezas sometidas a esfuerzos grandes porque es posible que se formen fosforosos de níquel y hierro quebradizos en la zona de la unión.

Los mejores metales de aporte para aceros inoxidable que contienen titanio o aluminio, o ambos, porque el boro tiene una acción fundente moderada que ayuda a mojar estos metales base, son los metales de aporte de níquel que contiene fósforo. Se puede conseguir uniones con propiedades físicas mejoradas al utilizar soldadura fuerte por difusión.

#### **5.6.10.1 HIERRO Y ACERO AL CROMO**

Los aceros inoxidable martensíticos (403, 410, 414, 416, 420 y 431) se endurecen al aire cuando se enfrían desde la temperatura de soldadura fuerte, la cual excede su intervalo de temperatura de austenización. Por tal motivo, se debe recocerlo durante el proceso o después de la soldadura fuerte. Con ciertos metales de aporte de soldadura fuerte estos aceros son propensos al agrietamiento por esfuerzo.

Mediante tratamiento térmico no se pueden endurecer los aceros inoxidable ferríticos (405, 4096 y 430) y no se puede refinar su estructura de grano. Cuando se sueldan en fuerte a temperaturas por encima de 980° C (1800° F) las propiedades de estas aleaciones se degradan debido a que hay un crecimiento excesivo del grano. Después de un calentamiento prolongado entre 340 y 600° C (650 y 1100° F) pierden ductilidad, pero calentando el ensamble soldado alrededor de 790° C (1450° F) durante un lapso apropiado se puede recuperar esta ductilidad.

### **5.6.10.2 ACEROS INOXIDABLES ENDURECIBLES POR PRECIPITACIÓN**

Estos son aceros inoxidable con adiciones de uno o más de los siguientes elementos: molibdeno, titanio, cobre y aluminio. Mediante tratamientos térmicos de endurecimiento por precipitación se pueden fortalecer las aleaciones con la ayuda de estos elementos adicionales. El ciclo de soldadura fuerte y la temperatura deben coincidir con el ciclo de tratamiento térmico de la aleación cuando se sueldan en fuerte aleaciones de este tipo.

### **5.6.11 CERÁMICAS**

Por soldadura fuerte se pueden unir materiales cerámicos como: alúmina, zirconio, magnesia, forsterita ( $Mg_2SiO_4$ ), berilia y toria. Son difíciles de mojar con los metales de aporte convencionales debido a su naturaleza. Se producen grietas y propagación de grietas con esfuerzos relativamente bajos por causa de las diferencias de expansión térmica y conducción del calor.

Se utilizan metales de aporte de cobre, de plata-cobre y de oro-níquel si la cerámica se premetaliza con el objetivo de facilitar el mojado. El hidruro de titanio o de zirconio se puede descomponer en la fase cerámica – metal para formar un enlace íntimo.

Los alambres de titanio revestidos con plata-cobre o con níquel permiten soldar en fuerte las cerámicas no metalizadas. Las aleaciones de titanio y de zirconio útiles son Ti-V-Cr, Ti-Zr-Be, Ti-V-Zr, Zr-V-Cd, Ti-V-Be.

### **5.6.12 METALES PRECIOSOS**

No se presentan mayores dificultades para soldar en fuerte metales preciosos como: plata, oro, platino y paladio, debido a que se puede eliminar fácilmente con fundentes y atmósferas reductoras la delgada capa de óxido que presentan.

Para contactos eléctricos es factible utilizar soldadura fuerte por resistencia o en horno. Los metales de aporte de plata (BAg) y de metal precioso (BAu) sueldan en fuerte contactos metálicos a retenes.

### **5.6.13 ALEACIONES DE NÍQUEL Y DE ALTO NÍQUEL**

El níquel y las aleaciones de alto níquel pierden ductibilidad por el cobre y los metales de bajo punto de fusión presentes en las aleaciones de soldadura fuerte, como zinc, plomo, bismuto y antimonio. Con la finalidad de eliminar cualesquier sustancias que pudieran contener los elementos mencionados se debe limpiar minuciosamente las superficies de los metales base antes de la soldadura fuerte, también se debe excluir el azufre y sus compuestos de la atmósfera de soldadura fuerte.

En presencia de metales de aporte de soldadura fuerte fundidos el níquel y sus aleaciones son propensos al enfriamiento por esfuerzos. Para eliminar los esfuerzos residuales las piezas deben recocerse antes de la soldadura fuerte o aplicárseles durante el ciclo de soldadura fuerte un tratamiento de liberación de tensiones.

Usar metales de aporte de soldadura fuerte de plata es lo más común. Se prefieren las aleaciones de soldadura fuerte con alto contenido de plata en los entornos corrosivos y se escogen metales de aporte libres de cadmio cuando se desea evitar el agrietamiento por corrosión por esfuerzos.

La más alta resistencia a la corrosión, a la oxidación y a las temperaturas elevadas ofrecen los metales de aporte para soldadura fuerte con base de níquel. Para unir aleaciones de níquel fortalecidas por dispersión que deben funcionar a temperaturas elevadas la soldadura fuerte es el método más factible.

### **5.6.14 CARBUROS Y CERMETS**

Para fabricar herramientas de corte y troqueles se utilizan los carburos de los metales refractarios tungsteno, titanio y tantalio aglomerados con cobalto. Unos materiales de naturaleza muy similar denominados cermets, consisten en partículas cerámicas aglomeradas con diversos metales.

Es más difícil la soldadura fuerte de carburos y cermets en comparación con la soldadura fuerte de metales. Se emplea calentamiento con soplete, por inducción o en horno, a menudo con una técnica de soldadura fuerte en emparedado; se interpone una capa de metal dúctil débil (níquel o cobre puros)

entre el carburo o el cermet y un soporte de metal puro. En lugar de agrietar la cerámica los esfuerzos de enfriamiento hacen que el metal blando se deforme.

Con frecuencia se usan aleaciones de soldadura fuerte con base de plata, de cobre-zinc y de cobre con las herramientas de carburo. Se prefieren las aleaciones de plata que contienen níquel porque proveen un mejor mojado.

Para soldar cermets de carburo de tungsteno, de carburo de titanio y de carburo de colombio aglomerados con níquel y con cobalto es factible utilizar las aleaciones con base de níquel que contienen boro, y una aleación 60% Pd-40% Ni.

#### **5.6.15 ALEACIONES RESISTENTES AL CALOR**

Por lo general estas aleaciones resistentes al calor se sueldan en fuerte en una atmósfera de hidrógeno o en hornos de alta temperatura al vacío utilizando metales de aporte con base de níquel o especiales.

Las aleaciones más fáciles de soldar en fuerte de todas las súper aleaciones son las que tiene una base de cobalto debido a que la mayor parte de ellas no contiene titanio ni aluminio. Debido a que los óxidos de titanio y de aluminio no se reducen a las temperaturas de soldadura fuerte las aleaciones con alto contenido de titanio o de aluminio son difíciles de soldar en fuerte.

La tabla 5.5 indica los metales principales que se unen con los metales de aporte y metales base anteriormente mencionados.

**Tabla 5.5. Metales por soldar y recomendaciones para metales de relleno, fundentes de soldar y aplicaciones.**

Fundente Soldador No. de Tipo AWS	Combinaciones de Metales para las Cuales los Varios Fundentes son Adecuados		Límites de Temperatura Efectiva del Fundente, °C	Materiales Principales del Fundente	Forma física	Método de aplicación
	Metales por Soldar	Metales de Relleno				
1	Aluminio y aleaciones de aluminio	BAISi	371-644	Fluoruros; Cloruros	Polvo	Soplete, por Horno, por Inducción, por Inmersión
2	Aleaciones de Magnesio	BMg	483-650	Fluoruros; Cloruros	Polvo	Por Inducción, por Inmersión
3A	Cobre y aleaciones de cobre (excepto aquellas con aluminio); aleaciones de hierro; hierro fundido; acero de carbono y aleaciones; níquel y aleaciones de níquel; aceros inoxidables; metales preciosos.	BCuP BAG	566-872	Acido bórico, Boratos, Fluoruros, Agentes Humedecedores de Fluoborato	Polvo, Pasta, Líquido	Soplete, por Horno, por Inducción
3B	Cobre y aleaciones de cobre (excepto aquellas con aluminio); aleaciones de hierro; hierro fundido; acero de carbono y aleaciones; níquel y aleaciones de níquel; aceros inoxidables; metales preciosos.	BCu, BCuP, BAG, BAu, R B CuZn, BNI	733-1150	Acido bórico, Boratos, Fluoruros, Agentes Humedecedores de Fluoborato	Polvo, Pasta, Líquido	Soplete, por Horno, por Inducción
4	Aluminio-bronce; Aluminio-latón.	BAG, BCuZn, BCuP	566-872	Boratos, Fluoruros, Cloruros	Polvo, Pasta	Soplete, por Horno, por Inducción
5	Cobre y aleaciones de cobre (excepto aquellas con aluminio); níquel y aleaciones de níquel; aceros inoxidables; aceros de carbono y aleaciones; hierro fundido y aleaciones misceláneas de hierro; metales preciosos (excepto el oro y la plata)	BCu, BCuP, BAG-(8-19), BAu, BCuZn, BNI	760-1205	Bórax, Acido bórico, Boratos	Polvo, Pasta, Líquido	Soplete, por Horno, por Inducción

**Fuente:** DEERE John; Soldadura; Primera Edición; Editorial Moline; Illinois; 1980; Pág. 49.

## **5.7 FUNDENTES PARA SOLDADURA FUERTE<sup>13</sup>**

El fundente en la unión, proporciona la protección que evita la formación de óxidos que impiden el flujo uniforme del metal de aporte, absorbiéndolos durante el calentamiento, los óxidos, se originan en el calentamiento de la superficie del metal, como resultado de la reacción química entre el oxígeno del aire y el metal caliente.

Por lo tanto la aplicación, elección y técnica de aplicación es de mucha importancia en la calidad de la unión, en el caso de la aplicación de un fundente inadecuado, el fundente se satura de óxidos aumentando su viscosidad lo que impide que sea desplazado por completo por el metal de aporte, por lo que se genera discontinuidad en la unión, denominada flux atrapado.

Las funciones características que debe cumplir el fundente para la protección de la unión son las siguientes:

- Punto de fusión más bajo que el del metal de aporte.
- Disolver y eliminar los óxidos de la superficie del metal, además de proteger de nuevas oxidaciones.
- Permanecer activo a la temperatura de soldeo y durante el proceso de soldadura.

Al final del proceso de soldadura hay que remover todo vestigio de residuos del fundente después de soldar para evitar la corrosión.

### **5.7.1 FACTORES QUE AFECTAN AL FUNCIONAMIENTO DEL FUNDENTE**

El correcto funcionamiento del fundente en el proceso de soldadura fuerte depende del material base, temperatura, tiempo del proceso y volumen del fundente aplicado.

#### **5.7.1.1 Material base – Temperatura**

Por las características antes mencionadas que deben tener los fundentes, la temperatura más alta en la que el material de aporte está completamente sólido

determina la mínima temperatura de trabajo del fundente y la temperatura más baja en la que el material de aporte está completamente líquido dictamina la máxima temperatura que debe soportar. Generalmente se selecciona el fundente para que esté activo al menos 50°C por debajo del sólido del material de aporte y que permanezca activo 50°C por encima del líquido del material de aporte, con lo que se garantiza que el fundente sea efectivo durante la operación de soldadura. En el caso de la aplicación por soplete se puede dar sobrecalentamiento, este valor se debe incrementar idealmente hasta los 100°C, lo que daría al fundente la suficiente capacidad para eliminar los óxidos a mayores temperaturas de las esperadas.

#### **5.7.1.2 Tiempo**

Durante el proceso de soldadura fuerte el fundente debe tener el tiempo necesario para eliminar y proteger la superficie del metal base de los óxidos ya que el fundente actúa solamente durante un período limitado. Cuanto más dure el proceso de soldadura existe más posibilidades de que el fundente se sature finalizando su actividad, exhibiendo los residuos el color negro habitual.

No hay un tiempo fijo por el cual el fundente deja de ser efectivo, el tiempo de actividad del fundente dependerá de la temperatura de operación y del tipo de metal base. Si el tiempo es suficientemente largo puede saturarse por debajo de su temperatura de trabajo. En los procesos de soldadura fuerte de larga duración es recomendable la aplicación de fundentes con amplios rangos de trabajo, para procesos de calentamiento rápido, tipo inducción, se puede utilizar fundentes de baja temperatura que trabajen incluso por encima de su rango de temperatura recomendada, que serán solubles en agua y por tanto más fáciles de eliminar.

#### **5.7.1.3 Volumen de flujo**

El volumen de flujo requerido del fundente varía de acuerdo a las características de la aplicación. Por lo general es suficiente cubrir las superficies de unión y los alrededores de las superficies de los componentes con una capa de pasta.

### **5.7.2 APLICACIÓN DEL FUNDENTE**

Los fundentes comerciales comunes vienen en forma de pasta, líquido o polvo, en el caso de fundentes en polvo, se mezcla con agua y unas gotas de detergente, para mejorar el mojado sobre el metal base, hasta formar una pasta relativamente consistente. Los fundentes en forma de pasta no requieren de preparación lo que reduce el tiempo de aplicación.

El mejor modo de aplicar el fundente, es cubriendo con una pasta las piezas individuales antes de ser unidas, además la aplicación en los alrededores de la unión reduce la oxidación de esas áreas.

Es importante aplicarlo después de su preparación ya que se deteriora rápidamente, así como mantener cerrada la tapa del contenedor cuando no se utilice.

Cuando se calienta el final de la varilla y/o se sumerge dentro del fundente y luego se aplica a ambos a la unión (técnica utilizada frecuentemente), se tiene la desventaja de que el fundente no protege la unión durante el ciclo de calentamiento y además la cantidad limitada de fundente aplicada, no evita la oxidación de los metales bases en las proximidades de la unión. A su vez se restringe la penetración capilar del material de aporte fundido.

Usar fundente en exceso rara vez afecta a la calidad de la unión soldada, sin embargo poco fundente genera uniones de baja calidad ya que este queda inactivo rápidamente.

### **5.8 COMPOSICIÓN DE FUNDENTES**

Los fundentes para soldadura fuerte son mezclas de compuestos químicos que pueden incluir sales inorgánicas y ácidos débiles seleccionados por su habilidad para proporcionar limpieza química o protección de las superficies adyacentes y el metal de aporte durante la soldadura fuerte como boratos, bórax fundido, ácido bórico, fluoruros, cloruros, y fluoboratos. Los fundentes basados en el boro no funden a bajas temperaturas con materiales de aporte base plata por lo que deben ser utilizados fundentes basados en fluoruro.

### **5.8.1 FUNDENTES SEGÚN LA NORMA AWS A5.31:2003<sup>14</sup>**

La clasificación de fundentes de soldadura fuerte con materiales de aporte de soldadura fuerte se detalla en la tabla 5.6.

**Tabla 5.6. Clasificación de fundentes de soldadura fuerte con materiales de aporte de soldadura fuerte.**

Clasificación AWS*	Forma	Tipo de metal de aporte	Rango de temperatura de actividad	
			°F	°C
B1-A	Poivo	BAISI	1080-1140	580-615
FB1-B	Poivo	BAISI	1040-1140	560-615
FB1-C	Poivo	BAISI	1000-1140	540-615
FB2-A	Poivo	BMg	900-1150	480-620
FB3-A	Pasta	BAG & BCuP	1050-1600	565-870
FB3-C	Pasta	BAG & BCuP	1050-1700	565-925
FB3-D	Pasta	BAG, BCu, BNi, BAu & RBCuZn	1400-2200	760-1205
FB3-E	Líquido	BAG & BCuP	1050-1600	565-870
FB3-F	Poivo	BAG & BCuP	1200-1600	650-870
FB3-G	Suspensión	BAG & BCuP	1050-1600	565-870
FB3-H	Suspensión	BAG	1050-1700	565-925
FB3-I	Suspensión	BAG, BCu, BNi, BAu & RBCuZn	1400-2200	760-1205
FB3-J	Poivo	BAG, BCu, BNi, BAu & RBCuZn	1400-2200	760-1205
FB3-K	Líquido	BAG & RBCuZn	1400-2200	760-1205
FB4-A	Pasta	BAG & BCuP	1100-1600	595-870

\*El fundente 3B en el Manual de Soldadura Fuerte (Brazing Manual), Tercera Edición, 1976, ha sido discontinuado. El tipo 3B se ha dividido en los tipos FB3-C y FB3-D.

Notas:

- a. La selección de una designación de fundente para un tipo específico de trabajo pudiera basarse en la forma, el tipo de metal de aporte, y la clasificación arriba mencionada, pero la información aquí presentada generalmente no es adecuada para la selección de fundente. Refiérase a la Sección A6 y a la última edición del Manual de Soldadura Fuerte (Brazing Handbook) para mayor asistencia.
- b. Ver 11.2 y 11.3 para la diferencia entre fundente en pasta y fundente en suspensión.

**Fuente:** ANSI/AWS A5.31-92R Specification for Fluxes for Brazing and Braze Welding.

## Clasificación

El sistema para identificar a los fundentes se basa en tres factores: metal base, metal de aporte, y la actividad del rango de temperatura. Las letras FB de cada clasificación se designan por "Flux for Brazing." El tercer carácter es un número que identifica al grupo de aplicación del metal base. El cuarto carácter es una letra que designa un cambio en la forma y composición dentro de la clasificación más amplia del metal base.

**FB1-A** en forma de polvo, aplicado en soldadura fuerte por horno y soplete para aluminio y sus aleaciones susceptibles de trabajarse con soldadura fuerte. Consiste principalmente en fluoruros y cloruros de algunos de los metales alcalinos. Se puede utilizar agua o alcohol como disolvente.

**FB1-B** se presenta en forma de polvo, aplicado en soldadura fuerte por horno para aluminio y sus aleaciones susceptibles de trabajarse con soldadura fuerte. El extremo más bajo de su rango de temperatura de actividad es ligeramente más bajo que el del FB1-A. Consiste principalmente de fluoruros y cloruros de algunos metales alcalinos. Se puede usar alcohol o agua como disolvente.

El **FB1-C** se presenta en forma de polvo, aplicado en soldadura fuerte por inmersión en baño de sal para aluminio y sus aleaciones susceptibles de trabajarse con soldadura fuerte. El extremo más bajo de su rango de temperatura de actividad es mucho más bajo que el del FB1-A y el FB1-B. Consiste principalmente en fluoruros y cloruros de algunos metales alcalinos. Se debe evitar el agua en el fundente o debe ser retirada antes de la inmersión en el baño de sal.

El **FB2-A** se presenta en forma de polvo, aplicado en soldadura fuerte por inmersión en baño de sal de aleaciones de magnesio cuyos indicadores empiezan con AZ. Consiste principalmente en fluoruros y cloruros de algunos de los metales alcalinos. Se debe evitar el agua o debe ser retirada antes de la inmersión en el baño de sal.

El **FB3-A** es un fundente en forma de pasta, para usarse con la mayoría de los procesos de soldadura fuerte en la soldadura de acero, cobre, aleaciones de cobre, níquel, y aleaciones de níquel. No es apropiado para bronce de aluminio u otros metales base que contengan elementos de aleación que formen óxidos

refractarios. Consiste principalmente de ácido bórico, boratos, y compuestos complejos de flúor. Se puede usar agua como disolvente.

El **FB3-C** es similar al FB3-A pero su rango de temperatura de actividad se extiende a una temperatura más alta, y pudiera contener boro elemental. El agua se utiliza como disolvente.

El **FB3-D** se presenta en forma de pasta, aplicado en soldadura fuerte por inducción, horno y soplete para aceros, níquel y sus aleaciones, y carburos usando metales de aporte de alta temperatura. Consiste principalmente en ácido bórico, boratos, y compuestos complejos de flúor. Puede contener boro elemental. Como disolvente se usa agua.

El **FB3-E** es un fundente líquido de baja actividad para soldadura fuerte usado para la soldadura con soplete de joyería o para aumentar las condiciones atmosféricas límites de la soldadura fuerte en horno. Generalmente se aplica por inmersión o con el uso de equipo despachador por rocío o proyección semiautomático o completamente automático.

El **FB3-F** es algo similar al FB3-A, excepto que no se agrega un vehículo al polvo durante la fabricación. El FB3-G se usa con un equipo despachador automático por rocío o proyección. Las áreas generales de aplicación son similares a aquellas del FB3-A. Se puede usar agua como agente disolvente.

El **FB3-G** se presenta en forma de suspensión, se usa con equipo despachador automático por rocío o proyección. Sus áreas generales de aplicación son similares a aquellas del FB3-C. Se puede usar agua como agente disolvente.

El **FB3-H** se presenta en forma de suspensión, se usa con equipo despachador automático por rocío o proyección. Sus áreas generales de aplicación son similares a aquellas del FB3-C. Típicamente contiene boratos complejos y compuestos de fluoruro más boro en polvo. Se puede usar agua como agente disolvente.

El **FB3-I** se presenta en forma de suspensión, se usa con equipo despachador automático de rocío o proyección. Sus áreas de aplicación son similares a aquellas del FB3.D. Típicamente contiene boratos complejos y compuestos de fluoruro más boro en polvo. Se puede usar agua como agente disolvente.

El **FB3-J** se presenta en forma de polvo, tiene áreas de aplicación similares a las del FB3-D. Típicamente contiene boratos complejos y compuestos de fluoruro más boro en polvo. Se puede usar agua como agente disolvente.

El **FB3-K** se presenta en forma líquida, se usa casi exclusivamente en la soldadura fuerte con soplete. El gas combustible se pasa a través de un contenedor de fundente líquido incorporando el fundente al flujo del gas combustible. El fundente se aplica a través de la flama donde se necesita en los metales base como aceros al carbón, aceros bajos en aleaciones, hierro colado, cobre y aleaciones de cobre, níquel y aleaciones de níquel, y metales preciosos. El fundente consiste principalmente en boratos líquidos.

El **FB4-A** se presenta en forma de pasta, aplicado en soldadura fuerte de aleaciones de cobre y otros metales base que contienen hasta 9% de aluminio, bronce de aluminio. Puede además ser adecuado para metales base que contienen hasta 3% de titanio u otros metales que forman óxidos refractarios. Consiste principalmente en boratos, compuestos complejos de flúor, y compuestos complejos de cloro. El agua se puede usar como disolvente.

### **5.8.2 SOLDADURA CON UN FUNDENTE LÍQUIDO<sup>9</sup>**

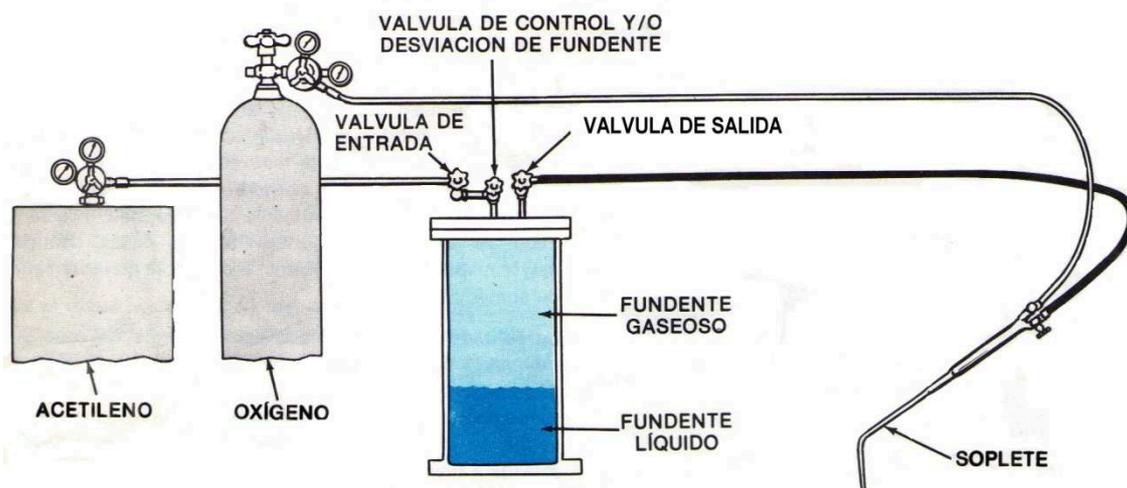
Se puede eliminar la necesidad de aplicar el fundente a las superficies metálicas con la utilización de un fundente líquido. En un tanque separado se encuentra contenido un material fundente en líquido, el tanque está conectado a la línea regular de gas, como se ilustra en la figura 5.9. El flujo del gas al tanque vaporiza el fundente, induciéndolo en el flujo de gas donde éste pasa a través del soplete soldador y a la llama. Cuando la llama hace contacto con el metal, el fundente en la llama limpia la superficie y aplica el fundente para la soldadura fuerte. No se requieren limpiezas previas o posteriores de las piezas.

Se requiere menos calor con los fundentes líquidos que lo que se requiere con el uso de un fundente en polvo o un fundente húmedo. Cabe mencionar que aumenta la resistencia de la pieza soldada y además el metal de soldadura no se oxida.

No se requiere ningún equipo especial a excepción del tanque para el fundente, ya que se utiliza un soplete soldador tipo regular.

En el tanque se encuentra una unidad de control de tres válvulas. La entrada del gas al tanque es regulada por la válvula de admisión, la cantidad de fundente utilizado es controlado por la válvula de fundente, y el gas con el fundente a través del soplete es suministrado por la válvula de salida.

El fundente líquido se puede utilizar para soldadura fuerte de latón, bronce, cobre, aluminio fundido, hierro fundido, níquel y acero.



**Figura 5.9.** Soldadura fuerte con fundente líquido.

**Fuente:** DEERE John; Soldadura; Primera Edición; Editorial Moline; Illinois; 1980; Pág.54.

## CAPÍTULO 6

### PRUEBA EXPERIMENTAL

#### 6.1 PREPARACIÓN DE JUNTAS Y DIMENSIONAMIENTO

##### 6.1.1 SELECCIÓN DEL METAL BASE

Para el análisis de la soldadura fuerte en diferentes tipos de acero al carbono de acuerdo a la clasificación antes descrita, se seleccionan aceros de cada tipo en base a su composición (contenido de carbono), costo y comercialización en el mercado local, por lo tanto, los aceros seleccionados son:

##### 6.1.1.1 Acero de bajo contenido de carbono

###### ACERO A36

- Descripción: Es un acero estructural al carbono, utilizado en construcción de estructuras metálicas. Propiedades: Como la mayoría de los aceros, el A36, tiene una densidad de 7850 kg/m<sup>3</sup> (0.28 lb/in<sup>3</sup>). Formas: El acero A36 se produce en una amplia variedad de formas, que incluyen: planchas, perfiles estructurales, tubos, láminas. Métodos de unión: Las piezas hechas a partir de acero A36 son fácilmente unidas mediante casi todos los procesos de soldadura.

**Tabla 6.1.** Composición del acero A36.

Norma	C%	Mn%	P%	S%	Si%	Cu%
ASTM A-36	0.25 0.29	0.80 1.20	0.04 max	0.05 max	0.4 max	0.20 max

Fuente: [http://www.dipacmanta.com/alineas.php?ca\\_codigo=18171](http://www.dipacmanta.com/alineas.php?ca_codigo=18171)

**Tabla 6.2.** Propiedades del acero A36.

PROPIEDADES MECÁNICAS		
FLUENCIA MPa	ESFUERZO MÁXIMO MPa	ALARGAMIENTO %
250 min	400 min 550 max	20 min

Fuente: [http://www.dipacmanta.com/alineas.php?ca\\_codigo=18171](http://www.dipacmanta.com/alineas.php?ca_codigo=18171)

### 6.1.1.2 Acero de medio contenido de carbono

BÖHLER V 945 SAE 1045

Equivalencia:        AISI    ~1045  
                           DIN     C45  
                           No. Mat. 1.1191

- Descripción: Es un acero de construcción mecánica de alta calidad, de mayor resistencia que el acero de transmisión. Se emplea para la fabricación de partes de maquinaria de pequeña sección sometidos a esfuerzos normales tales como: ejes, pernos, tuercas, pines, pasadores, cuñas, chavetas, portamatrices. Puede ser bonificado para elevar su resistencia a la tracción.

**Tabla 6.3.** Composición del acero SAE 1045.

TIPO DE ALEACIÓN	C%	Si%	Mn%
	0.45	0.25	0.65
Color de identificación	Blanco		
Estado de suministro	Recocido 180 HB		

Fuente: Catálogo BÖHLER.

**Tabla 6.4.** Propiedades del acero SAE 1045.

Estado	Diámetro mm	Límite de fluencia N/mm <sup>2</sup>	Resistencia a la tracción N/mm <sup>2</sup>	Alargamiento (Lo =5d) min %	Contracción min. %
Recocido	16 - 100	340	650 - 750	17	35
	100 - 250	330	580 - 700	18	---

Fuente: Catálogo BÖHLER.

Para determinar la temperatura de precalentamiento se calcula el contenido de carbono equivalente como se muestra a continuación:

#### 6.1.1.2.1 Cálculo de la temperatura de precalentamiento (Seferian)

SAE 1045

$$C_{Eq} = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7Mo}{90}$$

$$C_{Eq} = 0.312 + \frac{0.65 + 0.209}{9} + \frac{0.017}{18} + \frac{7 \times 0.008}{90} = 0.409$$

$$C_{ET} = C_{Eq} \times [1 + (0.005 \times e)]$$

$$C_{ET} = 0.409 \times [1 + (0.005 \times 5)] = 0.419$$

$$T_{pre} = 350 \times \sqrt{(C_{ET} - 0.25)}$$

$$T_{pre} = 350 \times \sqrt{(0.419 - 0.25)}$$

$$T_{pre} = 143.88 [^{\circ}C]$$

$C_{Eq}$  = Carbono equivalente de Seferian.

$C_{ET}$  = Carbono equivalente total.

$T_{pre}$  = Temperatura de precalentamiento.

### 6.1.1.3 Acero de alto contenido de carbono

BÖHLER K100

Equivalencia:

AISI	~D3
DIN	X210Cr12
No. Mat.	1.2080

- Descripción: Es un acero para trabajo en frío, marca estándar de los aceros ledeburíticos de alto porcentaje de carbono y plomo, de alta estabilidad dimensional en el tratamiento térmico y gran resistencia al desgaste. Se utiliza para la fabricación de herramientas para trabajo en frío como punzones y matrices para corte de lámina de hasta 4 mm de espesor, herramientas para trabajo en madera, rodillos de conformado en frío. Herramientas para el prensado de materiales cerámicos y farmacéuticos.

**Tabla 6.5.** Composición del acero BÖHLER K100.

TIPO DE ALEACIÓN	C%	Si%	Mn%	Cr%
		2.00	0.25	0.35
Color de identificación	Blanco-Amarillo			
Estado de suministro	Recocido 248 HB (máx.)			
Acabado	IBO ECOMAX			

Fuente: Catálogo BÖHLER.

Para determinar la temperatura de precalentamiento se calcula el contenido de carbono equivalente en estos tipos de acero como se muestra a continuación:

### 6.1.1.3.1 Cálculo de la temperatura de precalentamiento (Seferian)

BÖHLER K100

$$C_{Eq} = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7Mo}{90}$$

$$C_{Eq} = 1.786 + \frac{0.217 + 10.66}{9} + \frac{0.155}{18} + \frac{7 \times 0.081}{90} = 3$$

$$C_{ET} = C_{Eq} \times [1 + (0.005 \times e)]$$

$$C_{ET} = 3 \times [1 + (0.005 \times 6)] = 3.09$$

$$T_{pre} = 350 \times \sqrt{(C_{ET} - 0.25)}$$

$$T_{pre} = 350 \times \sqrt{(3.09 - 0.25)}$$

$$T_{pre} = 589.8[^\circ C]$$

$C_{Eq}$  = Carbono equivalente de Seferian.

$C_{ET}$  = Carbono equivalente total.

$T_{pre}$  = Temperatura de precalentamiento.

El cálculo de la temperatura de precalentamiento mostrado para los aceros de medio y alto contenido de carbono es para una soldadura por fusión, pero en un proceso por difusión como es la soldadura fuerte por horno solo se lo realiza cuando la norma lo especifica, sin embargo el cálculo realizado da una idea de cual puede ser la temperatura aproximada de tratamiento postsoldadura a realizarse en los aceros de medio y alto carbono.

## 6.1.2 ANÁLISIS POR ESPECTROMETRÍA DE CHISPA

El análisis por espectrometría de chispa o arco es un tipo de espectrometría que se aplica para el análisis de elementos metálicos en muestras sólidas en el que un arco eléctrico o chispa atraviesa la muestra metálica, calentándola a tan alta temperatura que excita los átomos que contiene, emitiendo luz en varias longitudes de onda que pueden ser detectadas mediante métodos espectroscópicos comunes. Las condiciones en que se produce la emisión por arco no son controladas cuantitativamente por lo que el análisis de los elementos es cualitativo.

En base a los requerimientos del estudio de este proceso, se debe comprobar y especificar la composición de cada tipo de acero seleccionado, para lo cual se realiza el análisis por espectrometría de chispa en el Laboratorio de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional empleando el espectrómetro de Chispa BRUKE modelo Q4TASMAN, mostrando los siguientes resultados:

**Tabla 6.6.** Resultados de análisis por Espectrometría de Chispa.

<b>Metales</b>	<b>A 36</b> %	<b>SAE 1045</b> %	<b>K 100</b> %
Carbono (C)	0.085	0.312	1.786
Silicio (Si)	0.010	0.167	0.196
Manganeso (Mn)	0.784	0.650	0.217
Cromo (Cr)	0.008	0.209	10.66
Molibdeno (Mo)	0.006	0.008	0.081
Níquel (Ni)	0.005	0.017	0.155
Fósforo (P)	0.001	0.003	0.016
Azufre (S)	0.003	0.004	0.007
Cobre (Cu)	0.001	0.003	0.058
Aluminio (Al)	0.048	0.040	0.031
Vanadio (V)	0.001	0.001	0.063
Hierro (Fe)	99.03	98.56	90.04

**Fuente:** Departamento de Metalurgia Extractiva, Escuela Politécnica Nacional.

Con estos resultados se comprueba la composición de cada muestra de acero y además estos valores servirán para establecer el procedimiento de soldadura como también el análisis del mismo.

### **6.1.3 JUNTA DE SOLDADURA Y DIMENSIONAMIENTO**

Para el mejor análisis y realización del proceso de soldadura fuerte en horno se realizan juntas a traslape, ya que estas uniones tienen una gran área y espacios muy reducidos entre las superficies.

La separación recomendada de la unión a la temperatura de soldadura fuerte entre las superficies está determinada por el tipo de material de aporte a utilizarse y estos son:

**Tabla 6.7.** Separación recomendada por el metal de aporte.

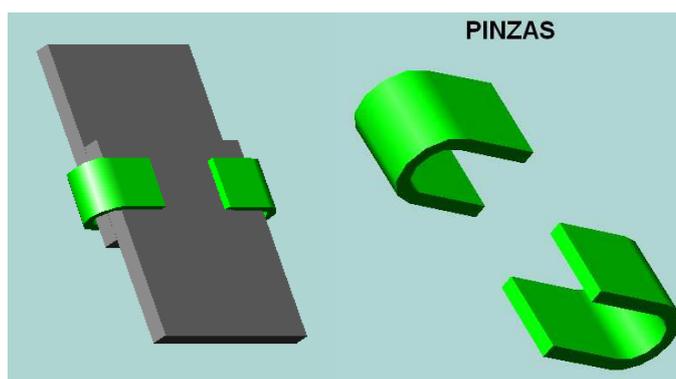
Metal de aporte	Separación recomendada	
	plg	mm
Clasificación AWS A5.8		
Grupo BCuP-3	0.001 - 0.005	0.03 - 0.12
Grupo RBCuZn-C	0.002 - 0.005	0.05 - 0.12

Fuente: Propia.

Esta separación es crítica porque determina el flujo capilar del metal de aporte y con ello la calidad de la unión soldada en fuerte.

### 6.1.3.1 Accesorios

Para la sujeción de las piezas a soldar se requieren de pinzas de acero inoxidable, capaces de sujetar y posicionar las placas para la soldadura en el horno. La característica del acero inoxidable de soportar altas temperaturas, garantizará que la junta se mantenga con la separación adecuada durante todo el proceso de soldadura, estas pinzas se ubican en los extremos de las placas como se ilustra en la figura 6.1.



**Figura 6.1.** Ilustración de las pinzas y montaje de las placas.

Fuente: Propia.

## **6.2 SELECCIÓN DE MATERIAL DE APORTE Y FUNDENTE PARA LOS DIFERENTES TIPOS DE ACERO**

### **6.2.1 SELECCIÓN DEL MATERIAL DE APORTE**

La selección del metal de aporte se lo hace tomando en consideración factores como por ejemplo la holgura de la junta, los metales a soldar, el proceso de soldadura fuerte que se va a aplicar, así como las propiedades mecánicas que se deseen obtener en la junta soldada.

En base al estudio realizado de los diferentes metales de aporte especificados en la norma AWS A5.8 y tomando en consideración las diversas características de cada metal de aporte se hace una selección para realizar el proceso de soldadura fuerte por horno.

En la norma AWS A5.8 provee información acerca de cuál es el metal de aporte correspondiente al material base que se va a soldar, de esta forma tenemos que para soldar aceros al carbono mediante un proceso por horno los materiales de aporte son de la serie BCuP y RBCuZn.

Así se tiene que para holguras demasiado pequeñas en la junta de 0.03 mm a 0.08 mm se utiliza metales de aporte BCuP-2, BCuP-4, BCuP-8, en cambio cuando la holgura es estrecha y no se puede controlar con facilidad se usa el BCuP-3 y BCuP-5 y si es necesario soldar tubos de intercambiadores de calor se utiliza los metales de aporte BCuP-7.

Un análisis similar se realiza para los metales de aporte de la serie RBCuZn, de esta manera si se realiza una soldadura donde no sea tan importante la resistencia a la corrosión se usa el metal de aporte RBCuZn-A, si se desea una soldadura con un incremento en la dureza y resistencia se escoge un metal de aporte con adiciones de hierro y manganeso como el RBCuZn-B, por otro lado si se desea realizar un proceso de soldadura por horno, inducción o soplete con una holgura en la junta de 0.05 mm a 0.13 mm se selecciona el RBCuZn-C y por último si se desea una soldadura fuerte de carburo de tungsteno que no sea por un proceso por horno se aplica un metal de aporte RBCuZn-D.

Los materiales de aporte seleccionados son el BCuP-3 y RBCuZn-C, debido a que el proceso de soldadura fuerte es por horno y no es tan fácil de lograr la

holgura por ser muy pequeña, además la selección de dos metales de aporte distintos es para establecer una comparación entre estos y encontrar las diferencias que ocurren en la soldadura el momento de realizar los ensayos respectivos.

### 6.2.1.1 Material de aporte BCuP-3

- Descripción: Es una aleación de cobre, fósforo y plata, adecuado para la mayoría de juntas de cobre a cobre o latón, donde la holgura no necesariamente puede ser controlada y el ensamble no está sujeto a vibración o movimiento. Este metal de aporte es desarrollado principalmente para su uso en cobre, esta aleación puede ser utilizada en otros materiales no ferrosos con base de cobre. La resistencia a la corrosión es satisfactoria excepto cuando la junta está expuesta a una atmósfera sulfurosa (especialmente a elevadas temperaturas).
- Aplicaciones: este producto se utiliza ampliamente con holguras de junta estrechas, unidades refrigeradas, conductores eléctricos, aparatos de aire acondicionado y tuberías de cobre y latón.
- Norma: AWS A5.8 clasificación BCuP-3.
- Composición química:

**Tabla 6.8.** Composición química del BCuP-3.

Ag %	P %	Otros	Cu %
4.8 – 5.2	5.8 – 6.2	0.15	Restante

Fuente: <http://www.silvaloy.com/docs/Tech%20Sheets/wjt-td-Silvaloy5.pdf>.

- Propiedades mecánicas y físicas:

**Tabla 6.9.** Propiedades del BCuP-3.

Punto de fusión	644 °C
Punto de fluidez	804 °C
Temperatura de soldadura	816 °C
Peso específico	8.12 g/cm <sup>3</sup>

Fuente: <http://www.silvaloy.com/docs/Tech%20Sheets/wjt-td-Silvaloy5.pdf>.

- Diámetros disponibles: 1.6 – 2.4 – 3.2 mm.

### 6.2.1.2 Material de aporte RBCuZn-C

- Descripción: Es un metal de aporte de bronce de bajas emanaciones de humo. Es una aleación de soldadura fuerte mecanizable utilizado en los aceros, aleaciones de cobre, aleaciones de níquel, y acero inoxidable, tiene un alta resistencia a la tracción y buena ductilidad.
- Este metal de aporte se debe utilizar con un fundente para soldadura fuerte.
- Aplicaciones: Se emplea para soldaduras por fusión de latón, por adhesión de aceros, hierro fundido y cobre.
- Norma: AWS A5.8 clasificación RBCuZn-C.
- Composición química:

**Tabla 6.10.** Composición química del RBCuZn-C.

Cu %	Zn %	Sn%
8 - 60	39 - 41	0,5

Fuente: <http://www.unibraze.com/DataSheets/DataLFB.pdf>.

- Propiedades mecánicas y físicas:

**Tabla 6.11.** Propiedades del RBCuZn-C.

Resistencia a la tracción	35 Kg/mm <sup>2</sup>
Temperatura de trabajo	900 °C
Punto de fusión	888 °C
Elongación	25%
Dureza Brinell	96

Fuente: <http://www.unibraze.com/DataSheets/DataLFB.pdf>.

- Dimensiones: Ø = 1/8 plg, L = 80 mm.

### 6.2.2 SELECCIÓN DEL FUNDENTE

La selección del fundente se realiza en base a factores como el tipo de metal de aporte, el proceso de soldadura fuerte y el metal base que se van a soldar.

Del estudio realizado de los fundentes especificados en la norma AWS A5.31 se procede a hacer una selección del fundente apropiado para realizar la soldadura fuerte por horno.

Los fundentes empleados para la soldadura fuerte mediante el proceso por horno son el FB3-A, FB3-C, FB3-D y FB3-J, teniéndose en cuenta que el FB3-C a pesar de ser utilizado para soldadura por horno, presenta un rango de temperatura de actividad más elevado y puede contener compuestos de boro.

Los fundentes FB3-J y el FB3-D son en forma acuosa a diferencia del FB3-A que es en forma de pasta. El fundente FB3-K es utilizado casi exclusivamente en soldadura por soplete, mientras que el fundente FB3-E es utilizado para soldadura fuerte por inmersión.

Los fundentes FB3-G, FB3-H, FB3-I son en forma de compuesto acuoso y se los emplea con equipos de dispersión de rociado automático.

Los fundentes seleccionados son el FB3-A y FB3-J, debido a que el proceso de soldadura fuerte a emplearse es por horno y no se utiliza equipos de rociado.

Se selecciona un fundente por cada metal de aporte y por ello debe existir una relación entre el metal de aporte y el fundente seleccionado, de lo contrario la junta soldada en fuerte no brindará una soldadura de buena calidad.

#### **6.2.2.1 Fundente Argenta Flux 200 Rosa**

- Descripción: Es un fundente el cual permite que las aleaciones de aporte penetren profundamente en las juntas, dando como resultado uniones de alta resistencia. Además disuelve y remueve rápidamente los óxidos con un mínimo burbujeo, eliminando impurezas y porosidades fuera de las uniones soldadas. Es utilizado para la soldadura de latones, bronce, acero, hierro maleable, aceros Inoxidables y aleaciones resistentes al calor.
- Aplicaciones: Se emplea en maquinaria agrícola, intercambiadores de calor, mantenimiento, calderas y reparaciones navales.
- Norma: AWS FB3 - J.

- Propiedades físicas:

**Tabla 6.12.** *Propiedades del Argenta Flux 200.*

Forma	Polvo
Color	Rosado
Grav. Específica	1.5
T° de trabajo	760 - 1090°C.
Cont. Volátil	0.1 %
Punto. de inflamación (Flash Point )	No tiene

**Fuente:** [http://www.argenta.cl/html/productos/quimicos/flux\\_200ROSA.php?p\\_categoria=02](http://www.argenta.cl/html/productos/quimicos/flux_200ROSA.php?p_categoria=02)

- Direcciones de uso: La pieza a soldar se debe limpiar cuidadosamente, además en grandes espesores se debe biselar en V los puntos de unión. El fundente espolvoreado sobre la pieza de trabajo se torna líquido al calentarse, lo cual permite que fluya por toda el área a soldar removiendo óxidos y otras impurezas.
- Precauciones de seguridad: No contiene ácidos y es razonablemente seguro de usar. El uso de protecciones respiratorias son recomendables en áreas de alta contaminación.

#### 6.2.2.2 Fundente Gémini Flux

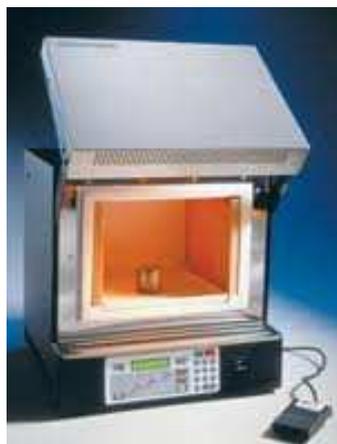
- Descripción: Es un fundente para soldadura fuerte empleado en aleaciones con contenido de plata, este producto limpia y disuelve películas de óxido que dificultan la soldadura. Durante la soldadura este fundente previene la formación de óxidos y la formulación exclusiva de este fundente provee una excelente humectación y acción de limpieza, dando como resultado una junta de mejor calidad.
- Aplicaciones: Se emplea en la mayoría de los procesos de soldadura fuerte especialmente de acero, cobre, aleaciones de cobre, níquel, y aleaciones de níquel. No es apropiado para bronce, aluminio u otros metales base que contengan elementos de aleación que formen óxidos refractarios.
- Norma: AWS FB3 – A.
- Temperatura de trabajo: 665 – 970 °C.

- Componentes: Agua, bifluoruro de potasio, tetra borato de potasio y ácido bórico.
- Instrucciones de uso: Cepillar el área entre las partes que serán unidas. Aplicar calor y usar el punto de fusión del fundente como un indicador de temperatura para determinar cuándo aplicar el metal de aporte. Se puede remover el exceso de fundente con un cepillo y agua caliente.
- Precaución: El fundente puede causar irritación de la piel y problemas respiratorios. Este producto emana humos que pueden causar irritación de los ojos y nariz, además los humos y gases pueden afectar la salud. Este fundente debe ser utilizado en sitios ventilados y no se debe entrar en contacto directo con el fundente, siempre se debe usar guantes y ropa apropiada.

## 6.3 EQUIPO UTILIZADO

### 6.3.1 HORNO DE CALENTAMIENTO

El horno de calentamiento es el equipo en el que se efectuará la operación principal del proceso de soldadura, por las altas temperaturas que se manejan en el proceso, el horno debe garantizar además de un buen control en la temperatura la seguridad necesaria para ingresar las piezas que se soldarán, por lo que el horno perteneciente al Laboratorio de Tratamientos Térmicos que reúne estas características es el que se describe a continuación.



**Figura 6.2.** Horno VULCAN.

**Fuente:** <http://www.dentsplyargentina.com.ar/vulcan%203550.html>

Es un horno tipo mufla como se ilustra en la figura 6.2 con las siguientes características:

- Mayor rapidez en el calentamiento y el enfriamiento.
- Amplio rango operativo de temperatura desde 50°C (120°F) hasta 1100°C (2012°F).
- Plano, puerta elevadora de baja fuerza vertical, con acción de rotación que le da un máximo acceso con mínimo espacio vertical.
- Control programable con programas de 3 etapas.
- Fácil de operar y programar con un interfaz de usuario gráfico.

Especificaciones:

**Tabla 6.13.** Especificaciones del horno de calentamiento.

PARÁMETRO	
Rango de Temperatura:	50°C (122°F)-1100°C (2012°F)/1° Resolución.
Rango de Tiempo de Mantenimiento:	0:00-99:59 (horas:minutos)/1 Min Resolución.
El Rango de Proporción de rampa:	0-40.0°C/minute (72°F)/0.1°C Resolución.
Precisión de la temperatura:	± 5°C (±9°F)
Temperatura de la Mufla:	± 8°C (±15°F)

Fuente: <http://www.silvaloy.com/docs/Tech%20Sheets/wjt-td-Silvaloy5.pdf>.

**Tabla 6.14.** Dimensiones del horno de calentamiento.

Dimensiones			
Externa		Interna	
mm	plg	mm	plg
510	20.0	120	4.6
350	13.8	140	5.7
290	11.5	130	5.2

Fuente: <http://www.silvaloy.com/docs/Tech%20Sheets/wjt-td-Silvaloy5.pdf>.

### 6.3.2 HORNO DE POSTCALENTAMIENTO

Es el horno para el tratamiento de postsoldadura que se realiza a la junta soldada, el cual tiene las siguientes características:

**Tabla 6.15.** Características del horno de postcalentamiento.

Rango de temperatura:	1200 °C máximo.		
El rango de proporción de rampa:	0 - 30.0°C/minuto.		
N° rampas:	Una.		
Tipo de control:	ON/OFF		
Dimensiones:	Alto (cm)	Ancho (cm)	Profundidad (cm)
	33	33	45

Fuente: Propia.



**Figura 6.3.** Horno de postcalentamiento del Laboratorio de Tratamientos Térmicos.

Fuente: Propia.

## 6.4 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL DE SOLDADURA FUERTE POR HORNO

Para encontrar el procedimiento experimental óptimo de soldadura mediante el proceso por horno, se realizaron pruebas variando la cantidad y el tipo de metal de aporte y fundente, la temperatura de soldadura tanto para el metal de aporte como para el fundente. Estas pruebas se realizaron con el objeto de comprobar el rango de temperatura de soldadura fuerte de los metales de aporte BCuP-3 y RBCuZn-C que se especifica en la norma AWS A5.8, así como establecer el tiempo de soldadura conveniente para nuestro proceso.

Para realizar la soldadura fuerte por horno de las probetas previas se realiza el siguiente procedimiento:

1. Limpieza del metal base.
2. Calentamiento del horno hasta la temperatura de trabajo.
3. Montaje y posicionamiento del conjunto a soldar (metal base, metal de aporte, fundente, accesorios).
4. Ingreso del conjunto a soldar en el horno.
5. Permanencia a la temperatura de trabajo.
6. Extracción del conjunto soldado del horno.
7. Enfriamiento al aire.
8. Limpieza final.

Cada uno de los datos obtenidos al cambiar las variables antes mencionadas se describe en la siguiente tabla.

**Tabla 6.16.** Variables de las probetas de prueba.

Variables		Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5
Metal Base		A36	A36	A36	A36	A36
Metal Aporte		RBCuZn-C	RBCuZn-C	RBCuZn-C	BCuP-3	BCuP-3
N° varillas		2	1	2	2	4
Fundente	Tipo	Bórax	FUNDEX 200	FUNDEX 200	Gémini Flux	Gémini Flux
	Cantidad	Alta	Baja	Media	Media	Media
Holgura		0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
$T_0$ (°C)		900	1050	1080	980	980
$T_c$ (°C)		763	930	974	900	810
$T_f$ (°C)		900	1050	1080	980	980
$t_c$		1h 10 min	1h 45 min	2 h	1h 20 min	1h 30 min
$t_{cai}$		6 min	4 min	4 min	4 min	5 min
$t_{sub}$		15 min	16 min	18 min	12 min	20 min
$t_{sold}$		21 min	20 min	22 min	16 min	25 min
$T_o$ : temperatura de calentamiento				$t_o$ : tiempo de calentamiento		
$T_c$ : temperatura de caída				$t_c$ : tiempo de caída		
$T_f$ : temperatura final				$t_{sub}$ : tiempo de subida		
$T_{post}$ : temperatura post calentamiento				$t_{sold}$ : tiempo de soldadura		

Fuente: Propia.

El análisis de las probetas previas a la obtención del procedimiento experimental óptimo es:

- Caída de temperatura en el horno debido a la masa de todo el conjunto a soldar colocado en el interior.
- Disminución de la temperatura por la apertura del horno.
- El gradiente de elevación de temperatura es menor con el conjunto a soldar en el interior del horno.
- El fundente reacciona antes que se produzca la fusión del metal base ocasionando la separación del metal de aporte de la junta a soldar.
- La temperatura de calentamiento del horno no fue la suficiente para fundir el metal de aporte.
- Falta de limpieza de las superficies lo que ocasiona un mojado incompleto.

#### **6.4.1 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL ÓPTIMO DE SOLDADURA FUERTE POR HORNO**

Para realizar la soldadura fuerte por horno se realiza el siguiente procedimiento:

##### **1. Limpieza del metal base**

Es de gran importancia que las superficies a soldar estén limpias y libres de óxidos, grasas, aceites y cualquier tipo de suciedad o impurezas que eviten que el metal de aporte fluya. Se realizan dos métodos de limpieza:

##### **Limpieza mecánica.**

Elimina óxidos e incrustaciones además mejora el flujo capilar y el mojado por parte del metal de aporte de soldadura fuerte. Para este proceso se utiliza amolado, lijado y cepillado con alambre.

##### **Limpieza química.**

El agente de limpieza depende de la naturaleza del contaminante, las superficies y diseño de la unión. El método de desengrasado empleado es de limpieza con disolventes.

Después del desengrasado de las piezas, se eliminan las incrustaciones y óxidos con un desoxidante, aplicado por 15 minutos.

Es importante enjuagar las piezas después de la limpieza química para eliminar cualquier residuo químico con el fin de evitar la formación de películas sobre las superficies de las piezas metálicas.

Para finalizar la limpieza se utiliza alcohol industrial para evitar la oxidación de las superficies.

## 2. Montaje y posicionamiento

Esta operación se realiza ubicando las placas de metal base en traslape a una longitud determinada por el espesor. Para asegurar que se mantenga la holgura suficiente para un flujo capilar adecuado, se coloca unas tiras de alambre de cobre cuyo diámetro es aproximadamente el mismo que la holgura que se desea obtener, estos alambres se los coloca sobre el área de traslape del metal base y mediante unas pinzas de sujeción colocadas en los extremos del traslape se fija el montaje de la junta. Como se muestra en la figura 6.4.



**Figura 6.4.** Ilustración de las pinzas y montaje de las placas.

Fuente: Propia.

## 3. Aplicación del fundente y ubicación del metal de aporte

Una vez fijo las placas del metal base en traslape y con la holgura adecuada se procede a colocar el metal de aporte en la unión de las dos placas considerando que la junta debe estar en una posición inclinada para impedir el

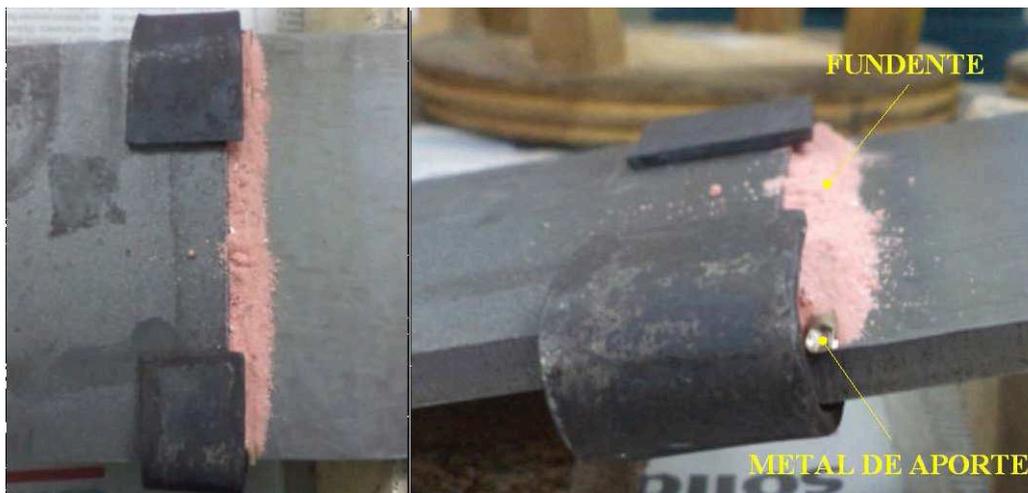
movimiento del metal de aporte por acción de su propio peso antes de realizar la operación de soldadura, como se ilustra en la figura 6.5.

El fundente en forma de polvo o pasta se aplica sobre el metal de aporte y la unión de la junta cubriéndolos por completo para ofrecer la protección adecuada en la operación de soldadura como se indica en la figura 6.6, en cuanto al fundente en forma de polvo se debe prestar atención en que cubra por completo al metal de aporte ya que por su forma tiende a derramarse por la holgura entre los metales base.



**Figura 6.5.** Aplicación del metal de aporte.

Fuente: Propia.



**Figura 6.6.** Aplicación del fundente.

Fuente: Propia.

#### 4. Calentamiento

Después de realizado el montaje de las piezas a soldar, ubicado el metal de aporte y aplicado el fundente, se ingresa el conjunto en el horno para la operación de soldadura y para esto, es necesario que la temperatura en el interior del horno alcance la temperatura de trabajo necesario para fundir el metal de aporte que de acuerdo al equipo utilizado se lo realiza mediante la programación como se describe a continuación.

##### Programación del horno

En el horno, el calentamiento se determina por 3 etapas, estas etapas se establecen por 3 parámetros cada una. Los parámetros se agrupan en grupos:

- Rangos (R1, R2, R3)

Este parámetro indica los grados por minuto en que alcanza la temperatura en cada etapa en °C/min o °F/min.

- Temperaturas (T1, T2, T3)

Establece la temperatura de cada etapa o secuencia en grados °C o °F.

- Tiempos de mantenimiento (H1, H2, H3)

Es el tiempo de permanencia de una etapa a una determinada temperatura y se establecen en horas y minutos.

Los números 1, 2, 3 indican la etapa o la secuencia.

**Tabla 6.17.** *Parámetros de la programación del horno.*

<b>RANGO (°C/min)</b>		
<i>R1</i>	<i>R2</i>	<i>R3</i>
35	35	35
<b>TEMPERATURA (°C)</b>		
<i>T1</i>	<i>T2</i>	<i>T3</i>
800	900	1100
<b>TIEMPO DE MANTENIMIENTO</b>		
<i>H1</i>	<i>H2</i>	<i>H3</i>
1 min	1 min	20 min

Fuente: Propia.

Al llegar el horno a la temperatura de trabajo o calentamiento ( $T_0$ ), se abre la compuerta y se ingresa el conjunto a soldar, teniendo mucha precaución y utilizando el equipo de seguridad apropiado, manteniendo siempre el conjunto en una posición inclinada, una vez en el interior el conjunto se posiciona sobre tabiques refractarios previamente ubicados asegurando su estabilidad, y se cierra la compuerta, todo esta operación se realiza en el menor tiempo posible.

Después la temperatura en el horno desciende a una temperatura de caída ( $T_c$ ) en un tiempo de caída ( $t_c$ ) por la apertura de la compuerta del horno, luego la temperatura se eleva hasta una temperatura final ( $T_f$ ) en un tiempo de subida ( $t_{sub}$ ).

Una vez que llega a la temperatura final, el conjunto soldado es extraído del horno con mucha precaución, que dependiendo del metal base puede tener o no un tratamiento postsoldadura.

El tratamiento postsoldadura se realiza en los metales base de acero de medio y alto contenido de carbono, esto es debido al porcentaje de carbono que contienen por la baja soldabilidad.

El tratamiento postsoldadura se lo realiza a una temperatura aproximada a la hallada en el cálculo de la temperatura de precalentamiento para procesos de soldadura por fusión, no se aplica una temperatura de precalentamiento debido a que esta sólo se realiza en procesos por difusión si lo especifica la norma, además se debe considerar que el fundente al aplicarlo sobre el metal base precalentado puede reaccionar y en lugar de favorecer al ingreso del metal de

aporte en la holgura lo va a expulsar, pues el fundente tendría un aspecto lechoso y no líquido lo cual evitaría el ingreso correcto del metal de aporte en la holgura.

#### 5. Enfriamiento

El enfriamiento realizado depende del tipo de acero soldado, por ejemplo, el conjunto soldado de acero A36 se lo dejó enfriar al aire una vez extraído del horno, ya que este acero presenta una buena soldabilidad debido a su bajo porcentaje de carbono y no necesita de un enfriamiento controlado, mientras que los aceros de medio y alto carbono como son el SAE 1045 y BÖHLER K100 respectivamente, se los introdujo en el horno de postcalentamiento durante un determinado tiempo para que su enfriamiento sea más lento, esto se debe a que el porcentaje de carbono que presentan estos aceros es más elevado, por tal motivo su soldabilidad es menor y requieren de un tratamiento postsoldadura para mejorar su soldabilidad. Este enfriamiento controlado se lo realiza introduciendo en el horno de postcalentamiento la junta soldada inmediatamente después de sacarlo del horno de calentamiento, con la finalidad de evitar un enfriamiento rápido de la junta soldada, y lograr de esta manera que la soldadura no se vea afectada. El horno de postcalentamiento debe estar a la temperatura de postcalentamiento calculada para cada tipo de acero, es decir a 150 y 500°C para los aceros SAE1045 y K100 respectivamente. Una vez transcurrido el tiempo de dos horas aproximadamente se extrae cada junta soldada del horno de postcalentamiento y se lo deja enfriar al aire.

#### 6. Limpieza Final

Una vez enfriado el conjunto soldado, se lo debe limpiar con un cepillo metálico para eliminar residuos de fundente e impurezas que pueda presentar la soldadura.

#### **6.4.2 SOLDADURA EN PROBETA DE ACERO DE BAJO CARBONO**

El proceso de soldadura por horno en acero de bajo carbono sigue el procedimiento detallado anteriormente, con los siguientes parámetros:

**Tabla 6.18.** *Parámetros de las probetas soldadas de acero de bajo carbono.*

Variables		A36 B	A36 P
Metal Base		ASTM A36	ASTM A36
Metal Aporte		RBCuZn-C	BCuP-3
N° varillas		2	4
Fundente	Tipo	Fundex 200	Gémini flux
	Cantidad	Media	Media
Holgura [mm]		0.2	0.2
$T_0$ (°C)		1080	980
$T_c$ (°C)		875	807
$T_f$ (°C)		1080	980
$t_c$		120 min	90 min
$t_{cai}$		5 min	5 min
$t_{sub}$		38 min	24 min
$t_{sold}$		43 min	29 min
Traslape [mm]		50	50
$T_o$ : temperatura de calentamiento		$t_o$ : tiempo de calentamiento	
$T_c$ : temperatura de caída		$t_c$ : tiempo de caída	
$T_f$ : temperatura final		$t_{sub}$ : tiempo de subida	
		$t_{sold}$ : tiempo de soldadura	

Fuente: Propia.

### 6.4.3 SOLDADURA EN PROBETA DE ACERO DE MEDIO CARBONO

El proceso de soldadura por horno en acero de medio carbono sigue el procedimiento detallado anteriormente, con los siguientes parámetros:

**Tabla 6.19.** *Parámetros de las probetas soldadas de acero de medio carbono.*

Variables		SAE B	SAE P
Metal Base		SAE 1045	SAE 1045
Metal Aporte		RBCuZn-C	BCuP-3
N° varillas		2	4
Fundente	Tipo	Fundex 200	Gémini flux
	Cantidad	Media	Media
Holgura [mm]		0.2	0.2
$T_0$ (°C)		1080	980
$T_c$ (°C)		913	834
$T_f$ (°C)		1080	980
$T_{post}$ (°C)		200	200
$t_o$		120 min	90 min
$t_c$		5 min 23 s	3min 25 s
$t_{sub}$		23 min	19 min
$t_{sold}$		28 min 23 s	22 min 25 s
Traslape [mm]		40	40
$T_o$ : temperatura de calentamiento		$t_o$ : tiempo de calentamiento	
$T_c$ : temperatura de caída		$t_c$ : tiempo de caída	
$T_f$ : temperatura final		$t_{sub}$ : tiempo de subida	
$T_{post}$ : temperatura post calentamiento		$t_{sold}$ : tiempo de soldadura	

Fuente: Propia.

#### 6.4.4 SOLDADURA EN PROBETA DE ACERO DE ALTO CARBONO

El proceso de soldadura por horno en acero de alto carbono sigue el procedimiento detallado anteriormente, con los siguientes parámetros:

**Tabla 6.20.** *Parámetros de las probetas soldadas de acero de alto carbono.*

Variables		K100 B	K100 P
Metal Base		AISI D3	AISI D3
Metal Aporte		RBCuZn-C	BCuP-3
N° varillas		2	4
Fundente	Tipo	Fundex 200	Gémini flux
	Cantidad	Media	Media
Holgura [mm]		0.2	0.2
$T_0$ (°C)		1080	980
$T_c$ (°C)		909	847
$T_f$ (°C)		1080	980
$T_{post}$ (°C)		600	600
$t_o$		120min	90min
$t_c$		4min	3min
$t_{sub}$		33min	20min
$t_{sold}$		37 min	23 min
Traslape [mm]		40	40
$T_o$ : temperatura de calentamiento		$t_o$ : tiempo de calentamiento	
$T_c$ : temperatura de caída		$t_c$ : tiempo de caída	
$T_f$ : temperatura final		$t_{sub}$ : tiempo de subida	
$T_{post}$ : temperatura post calentamiento		$t_{sold}$ : tiempo de soldadura	

Fuente: Propia.

## **6.5 ESTABLECER LA ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDAR EN FUERTE (BPS)**

La Especificación del Procedimiento de Soldar en Fuerte (BPS) detalla todas las variables necesarias y suficientes para realizar una junta soldada en fuerte con los requerimientos del código ASME Sección IX. Este documento es calificado para su aceptación mediante pruebas realizadas a la junta soldada de acuerdo a los requerimientos del código.

### **Variables.**

- Metal base.
- Metal de aporte de Soldadura Fuerte.
- Temperatura de Soldadura Fuerte.
- Fundente, gas combustible, o atmósfera de Soldadura Fuerte.
- Posición de flujo.
- Diseño de junta.
- Tratamiento térmico posterior a la Soldadura Fuerte.

## BRAZING PROCEDURE SPECIFICATION.

Preparado por: *Guamangallo - Villarroel*Fecha: *2012 - 10 - 01*Aprobado por: *Ing. Diego Espinosa.*Fecha: *2012 - 10 - 20*BPS: *01*Revisión N°: *01*

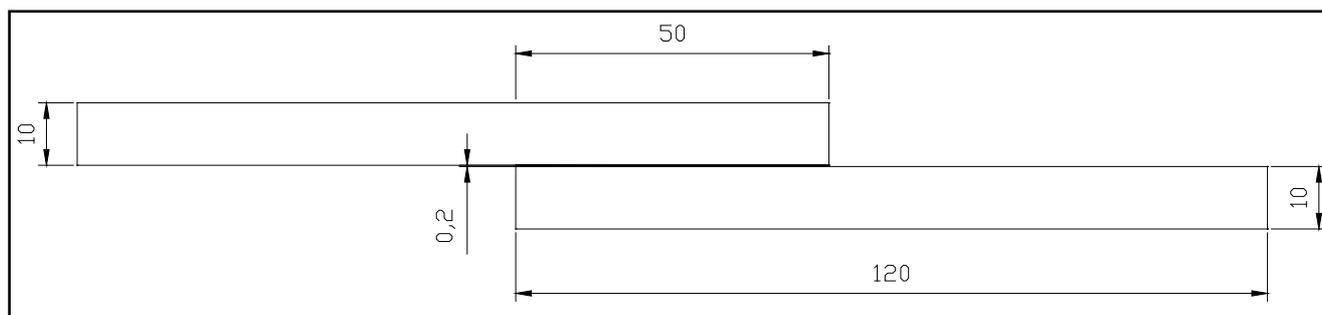
Fecha:

APLICABILIDAD.  
ASME IX....**X**... AWS..... OTRO.....

### PROCESO DE SOLDADURA FUERTE.

Proceso: *Soldadura Fuerte por horno.*Técnica: *Manual.*Rango de temperatura: *875 – 1080 °C*Precalentamiento: *No*Postcalentamiento: *No*

### METAL BASE.

Especificación: *Placas de acero ASTM A36*Especificación: *Accesorio de acero**inoxidable*Dimensiones del Metal base: *120 x 110 x 10 mm*Espesor del Metal Base: *10 mm.*Tipo de junta: *Junta Traslapada.*Descripción de la junta: *Junta traslapada de acero ASTM A36 y accesorio utilizado para probeta.*Longitud de traslape: *50 mm.*Croquis N°: *01*Preparación: *Ninguno.*

### METAL DE APORTE.

Clasificación AWS: *RBCuZn-C.* Clasificación SFA:Forma: *Varilla.*Dimensión: *φ 3.18 x 110 mm.*Aplicación: *Manual.*Posición de flujo: *Descendente.*

### FUNDENTE.

Tipo: *AWS FB3 - J*Atmósfera: *No.*Forma: *Polvo.*Aplicación: *Con Espátula.*

Notas adicionales:

## BRAZING PROCEDURE SPECIFICATION.

Preparado por: *Guamangallo - Villarroel*Fecha: *2012 - 10 - 01*Aprobado por: *Ing. Diego Espinosa.*Fecha: *2012 - 10 - 20*BPS: *02*Revisión N°: *01*

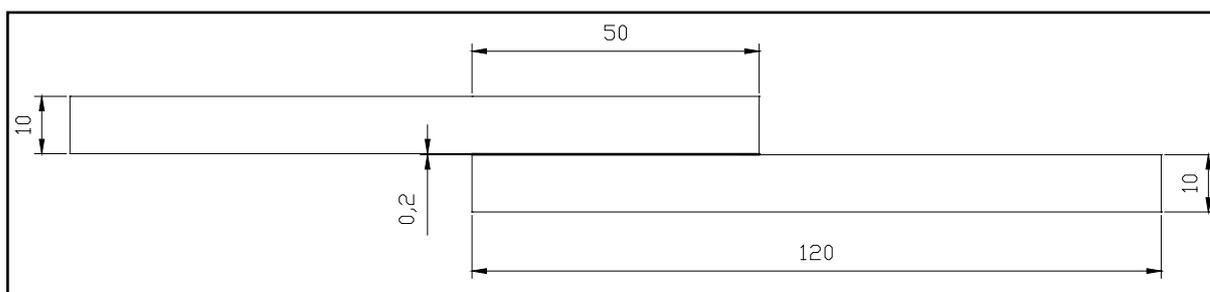
Fecha:

APLICABILIDAD.  
ASME IX....**X**... AWS..... OTRO.....

### PROCESO DE SOLDADURA FUERTE.

Proceso: *Soldadura Fuerte por horno.*Técnica: *Manual.*Rango de temperatura: *807 – 980 °C*Precalentamiento: *No*Postcalentamiento: *No*

### METAL BASE.

Especificación: *Placas de acero ASTM A36*Especificación: *Accesorio de acero**inoxidable*Dimensiones del Metal base: *120 x 110 x 10 mm*Espesor del Metal Base: *10 mm.*Tipo de junta: *Junta Traslapada.*Descripción de la junta: *Junta traslapada de acero ASTM A36 y accesorio utilizado para probeta.*Longitud de traslape: *50 mm.*Croquis N°: *02*Preparación: *Ninguno.*

### METAL DE APORTE.

Clasificación AWS: *BCuP-3.*

Clasificación SFA:

Forma:

*Varilla plana.*

Dimensión:

*3.34 x 1.24 x 110 mm.*

Aplicación:

*Manual.*

Posición de flujo:

*Descendente.*

### FUNDENTE.

Tipo:

*AWS FB3 - A*

Atmósfera:

*No.*

Forma:

*Pasta.*

Aplicación:

*Con Pincel.*

Notas adicionales:

## BRAZING PROCEDURE SPECIFICATION.

Preparado por: *Guamangallo - Villarroel*Fecha: *2012 - 10 - 01*Aprobado por: *Ing. Diego Espinosa.*Fecha: *2012 - 10 - 20*BPS: *03*Revisión N°: *01*

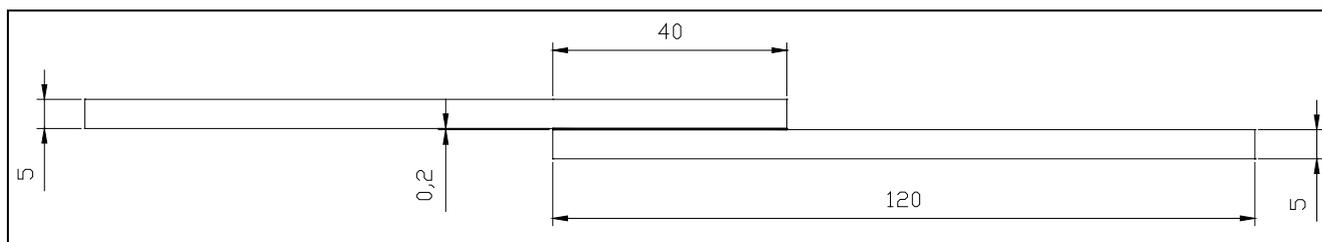
Fecha:

APLICABILIDAD.  
ASME IX....**X**... AWS..... OTRO.....

### PROCESO DE SOLDADURA FUERTE.

Proceso: *Soldadura Fuerte por horno.*Técnica: *Manual.*Rango de temperatura: *913 – 1080 °C*Precalentamiento: *No*Postcalentamiento: *Si*Temperatura: *150 °C*      Tiempo: *2 horas*

### METAL BASE.

Especificación: *Placas de acero SAE 1045*Especificación: *Accesorio de acero**inoxidable*Dimensiones del Metal base: *120 x 110 x 5 mm*Espesor del Metal Base: *5 mm.*Tipo de junta: *Junta Traslapada.*Descripción de la junta: *Junta traslapada de acero SAE 1045 y accesorio utilizado para probeta.*Longitud de traslape: *40 mm.*Croquis N°: *03*Preparación: *Ninguno.*

### METAL DE APORTE.

Clasificación AWS: *RBCuZn - C.* Clasificación SFA:

Forma:

*Varilla.*

Dimensión:

*φ 3.18 x 110 mm.*

Aplicación:

*Manual.*

Posición de flujo:

*Descendente.*

### FUNDENTE.

Tipo:

*AWS FB3 - J*

Atmósfera:

*No.*

Forma:

*Polvo.*

Aplicación:

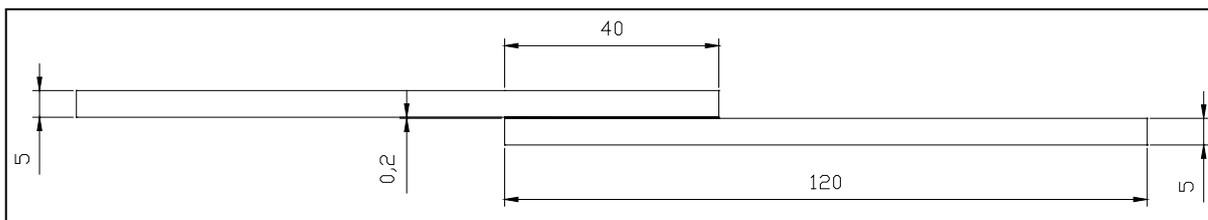
*Con Espátula.*

Notas adicionales:

**BRAZING PROCEDURE SPECIFICATION.**Preparado por: *Guamangallo - Villarroel*Fecha: *2012 - 10 - 01*Aprobado por: *Ing. Diego Espinosa.*Fecha: *2012 - 10 - 20*BPS: *04*Revisión N°: *01*

Fecha:

APLICABILIDAD.		
ASME IX.... <b>X</b> ...	AWS.....	OTRO.....

**PROCESO DE SOLDADURA FUERTE.**Proceso: *Soldadura Fuerte por horno.*Técnica: *Manual.*Rango de temperatura: *834 – 980 °C*Precalentamiento: *No*Postcalentamiento: *Si*Temperatura: *150 °C*      Tiempo: *2 horas***METAL BASE.**Especificación: *Placas de acero SAE 1045*      Especificación: *Accesorio de acero inoxidable*Dimensiones del Metal base: *120 x 110 x 5 mm*Espesor del Metal Base: *5 mm.*Tipo de junta: *Junta Traslapada.*Descripción de la junta: *Junta traslapada de acero SAE 1045 y accesorio utilizado para probeta.*Longitud de traslape: *40 mm.*Croquis N°: *04*      Preparación: *Ninguno.***METAL DE APORTE.**Clasificación AWS: *BCuP-3.*

Clasificación SFA:

Forma: *Varilla plana.*      Dimensión: *3.34 x 1.24 x 110 mm.*Aplicación: *Manual.*      Posición de flujo: *Descendente.***FUNDENTE.**Tipo: *AWS FB3 - A*Atmósfera: *No.*Forma: *Pasta.*Aplicación: *Con Pincel.*

Notas adicionales:

## BRAZING PROCEDURE SPECIFICATION.

Preparado por: *Guamangallo - Villarroel*Fecha: *2012 - 10 - 01*Aprobado por: *Ing. Diego Espinosa.*Fecha: *2012 - 10 - 20*BPS: *05*Revisión N°: *01*

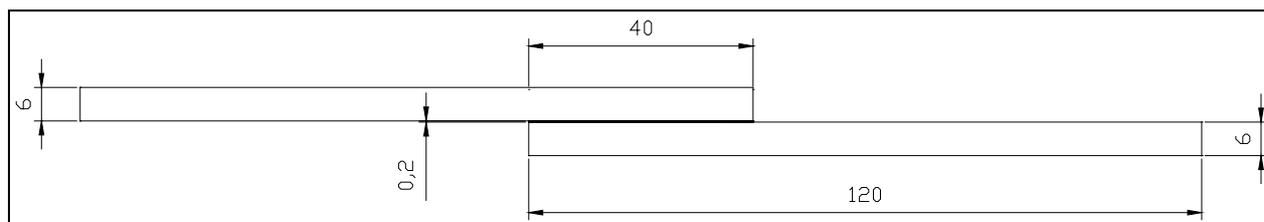
Fecha:

APLICABILIDAD.		
ASME IX....	X...	AWS..... OTRO.....

### PROCESO DE SOLDADURA FUERTE.

Proceso: *Soldadura Fuerte por horno.*Técnica: *Manual.*Rango de temperatura: *909 – 1080 °C*Precalentamiento: *No*Postcalentamiento: *Si*Temperatura: *500 °C*      Tiempo: *2 horas*

### METAL BASE.

Especificación: *Placas de acero AISI D3*  
*inoxidable*Especificación: *Accesorio de acero*Dimensiones del Metal base: *120 x 110 x 6 mm*Espesor del Metal Base: *6 mm.*Tipo de junta: *Junta Traslapada.*Descripción de la junta: *Junta traslapada de acero AISI D3 y accesorio utilizado para probeta.*Longitud de traslape: *40 mm.*Croquis N°: *05*Preparación: *Ninguno.*

### METAL DE APORTE.

Clasificación AWS: *RBCuZn - C.* Clasificación SFA:

Forma:

*Varilla.*

Dimensión:

*ϕ 3.18 x 110 mm.*

Aplicación:

*Manual.*

Posición de flujo:

*Descendente.*

### FUNDENTE.

Tipo:

*AWS FB3 - J*

Atmósfera:

*No.*

Forma:

*Polvo.*

Aplicación:

*Con Espátula.*

Notas adicionales:

## BRAZING PROCEDURE SPECIFICATION.

Preparado por: *Guamangallo - Villarroel*Fecha: *2012 - 10 - 01*Aprobado por: *Ing. Diego Espinosa.*Fecha: *2012 - 10 - 20*BPS: *06*Revisión N°: *01*

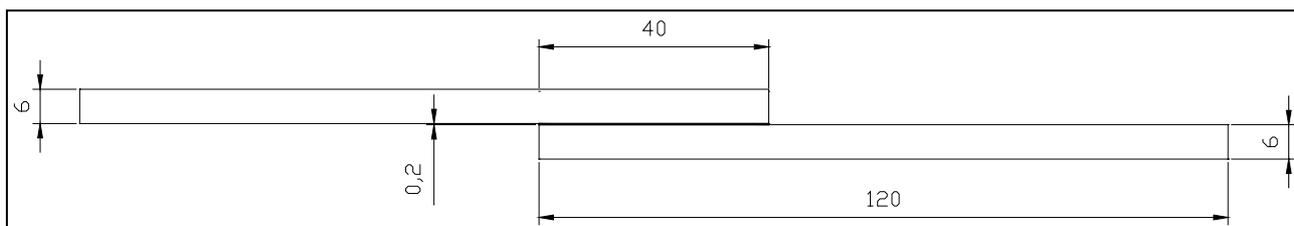
Fecha:

APLICABILIDAD.  
ASME IX....**X**... AWS..... OTRO.....

### PROCESO DE SOLDADURA FUERTE.

Proceso: *Soldadura Fuerte por horno.*Técnica: *Manual.*Rango de temperatura: *847 – 980 °C*Precalentamiento: *No*Postcalentamiento: *Si*Temperatura: *500 °C*      Tiempo: *2 horas*

### METAL BASE.

Especificación: *Placas de acero AISI D3*  
*inoxidable*Especificación: *Accesorio de acero*Dimensiones del Metal base: *120 x 110 x 6 mm*Espesor del Metal Base: *6 mm.*Tipo de junta: *Junta Traslapada.*Descripción de la junta: *Junta traslapada de acero AISI D3 y accesorio utilizado para probeta.*Longitud de traslape: *40 mm.*Croquis N°: *06*Preparación: *Ninguno.*

### METAL DE APORTE.

Clasificación AWS: *BCuP-3.*

Clasificación SFA:

Forma:

*Varilla plana.*

Dimensión:

*3.34 x 1.24 x 110 mm.*

Aplicación:

*Manual.*

Posición de flujo:

*Descendente.*

### FUNDENTE.

Tipo:

*AWS FB3 - A*

Atmósfera:

*No.*

Forma:

*Pasta.*

Aplicación:

*Con Pincel.*

Notas adicionales:

## **6.6 ENSAYOS DESTRUCTIVOS**

Los ensayos destructivos son aquellos en los que mediante la aplicación de esfuerzos externos a probetas normalizadas se producen una alteración irreversible de su geometría dimensional modificando sus condiciones de uso o aptitud de servicio que en el caso de procesos de soldadura muestran las características de una unión soldada para determinar si satisfacen o no los requisitos del servicio al que se aplicarán.

Los ensayos destructivos aplicados corresponden a los requerimientos de la norma ASME Sección IX (Parte QB: Soldadura Fuerte), al tipo de junta utilizada en el proceso y a la cantidad de información que se pueda obtener en comparación a otros ensayos con el fin de efectuar un mejor análisis del proceso.

### **6.6.1 ENSAYO DE TRACCIÓN**

El ensayo de tracción consiste en someter a una probeta normalizada a un esfuerzo axial de tracción que aumenta hasta que se produce la rotura de la probeta. La muestra o probeta preparada específicamente se coloca en las cabezas de la máquina universal de ensayos (ver figura 6.7) con dispositivos de montaje capaces de transmitir la carga desde la máquina hasta la probeta, para después someterla a cargas axiales por medio de un sistema mecánico o hidráulico. La fuerza a la que es sometida la probeta es registrada por un disco calibrado.

Si se conoce el área transversal original de la muestra, puede calcularse el esfuerzo desarrollado a cualquier carga.

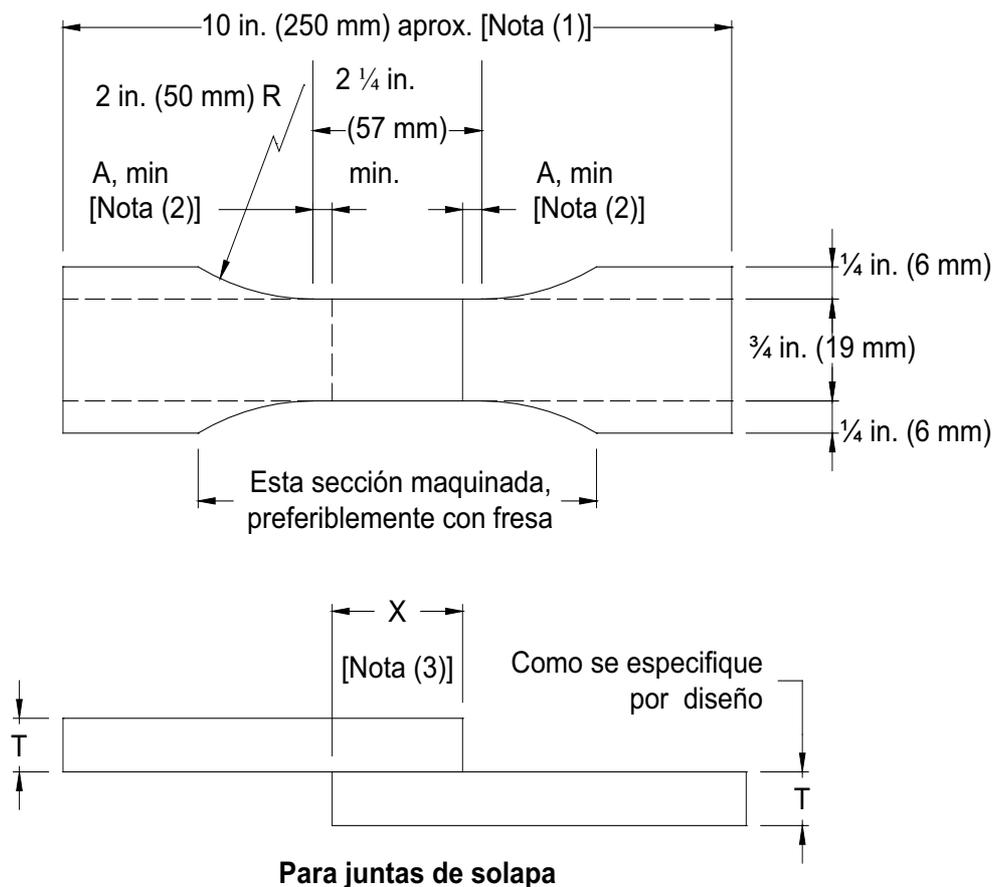


**Figura 6.7.** *Máquina universal de ensayos.*

**Fuente:** Propia

#### **6.6.1.1 Norma para Ensayo de Tracción<sup>15</sup>**

La prueba de tracción descrita en el código ASME Sección IX (QB-462.1(c)) se usa para determinar la resistencia última de juntas a tope para soldadura fuerte para todos los espesores de placa en base a los especímenes de sección reducida para tracción como se indica en la siguiente figura:

**Notas:**

- (1) La longitud puede variar para adaptarse a la máquina de pruebas.
- (2)  $A = \text{mayor de } \frac{1}{4} \text{ in. (6 mm) o } 2T$ .
- (3)  $X = \text{traslape del espécimen de prueba}$ .

**Figura 6.8.** Dimensiones del espécimen de tracción de junta traslapada.

Fuente: ASME Sección IX (QB-462.1(c))

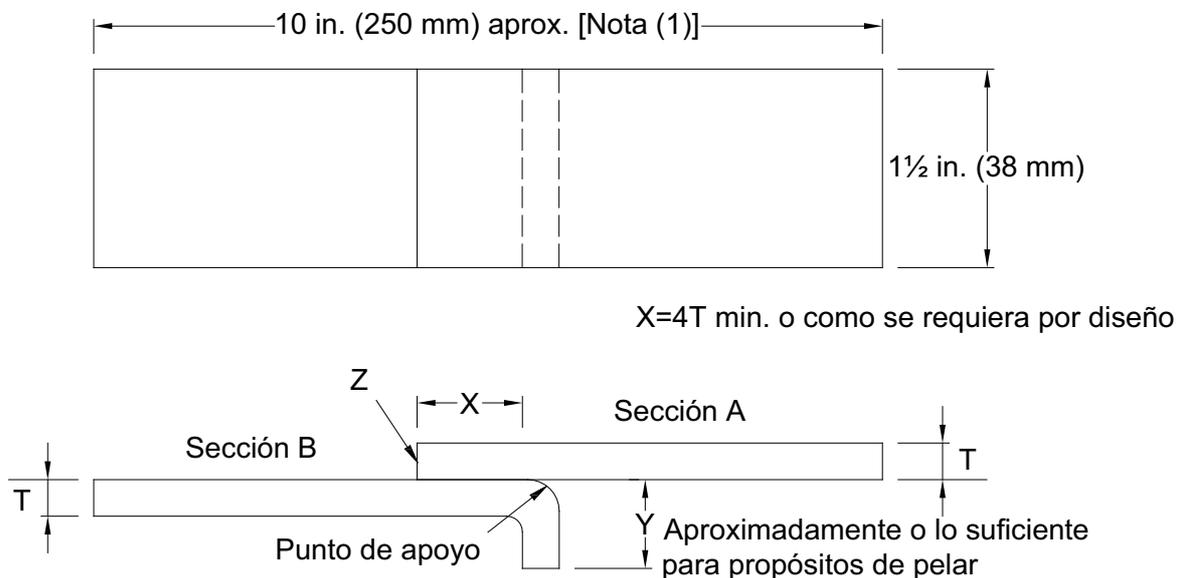
### 6.6.2 ENSAYO DE PELADO

Este ensayo sirve para controlar la resistencia de adhesión y separación de un espécimen soldado en fuerte. Para poder comparar la capacidad de pegado de diferentes materiales entre sí, se emplean placas de acero de forma normalizada.

Esta prueba consiste en separar las placas soldadas mediante la colocación de los extremos de la soldadura en una máquina conveniente que permita separar las secciones sometiéndolas a tracción. Los criterios de aceptación de este ensayo se fijan en los códigos correspondientes.

### 6.6.2.1 Norma para Ensayo de pelado<sup>15</sup>

Las dimensiones de la probeta de pelado se describe en el código ASME Sección IX (QB-462.3)



#### NOTAS GENERALES:

- (a) El reborde Y se puede omitir de la Sección B cuando la "peladura" se puede lograr en una máquina de tensión conveniente.
- (b) el espécimen se soldará en fuerte por el lado marcado con Z.

#### NOTA:

- (1) La longitud puede variar para adaptarse a la máquina de pruebas.

**Figura 6.9.** Dimensiones del espécimen pelado de junta traslapada.

Fuente: ASME Sección IX (QB-462.3).

### 6.6.3 INSPECCIÓN METALOGRAFICA

Esta inspección nos permite detectar defectos como: flujo deficiente de metal de aporte, falta de llenado, falta de penetración, difusión del metal de aporte, porosidades, entre otros, estos defectos pueden ser ocasionados por una inadecuada limpieza, holgura excesiva, mala sujeción de las piezas a soldar.

También mediante esta inspección se puede conocer las características microestructurales o constitutivas de un metal o aleación, relacionándolas con las propiedades físicas, químicas y mecánicas.

La preparación de la muestra para la inspección metalográfica se realiza en el Laboratorio de Metalografía en la siguiente secuencia:

- Selección de la muestra: La muestra seleccionada para el ensayo debe ser representativa de la junta soldada, por lo que se toma la sección central de la junta soldada con una dimensión apropiada para el análisis con el microscopio.
- Extracción de la muestra: Se debe tener cuidado en la extracción de la muestra con el fin de evitar cualquier tipo de alteración.
- Desbaste: Se utilizan distintos tipos de papeles abrasivos teniendo en cuenta que para la eliminación de rayas se debe cambiar la posición rotando  $90^\circ$  aproximadamente al cambiar de papel. Ver figura 6.10.



**Figura 6.10.** Desbaste de las muestras.

Fuente: Propia.

Desbaste grueso: Se utiliza papel abrasivo de grano 240 húmedo sobre una superficie plana y dura.

Desbaste fino: Se utilizan papeles abrasivos de grano 320, 400 y 600 húmedo sobre una superficie plana y dura.

- Pulido: Se utiliza tela tipo paño húmedo cargada con una suspensión de alúmina 1 micra sobre un disco giratorio como se ilustra en la figura 6.11, la muestra se gira sobre el paño en dirección contraria al giro de movimiento del disco para eliminar las “colas de cometa”. Después de terminado el pulido se limpia la superficie de la muestra para luego aplicar alcohol y secarlo en aire caliente todo esto para evitar que se oxide.



**Figura 6.11.** Pulido de las muestras.

Fuente: Propia.

- Ataque químico: Para ver claramente las partes de la microestructura se somete a la superficie pulida a una reacción química en el que se utiliza el reactivo ácido nítrico (Nital) al 2% aplicándolo sobre la superficie pulida luego se enjuaga la superficie inmediatamente después de la reacción y se seca en aire caliente.
- Inspección Metalográfica: Una vez preparada la muestra se puede realizar la inspección al metal base, al metal de aporte, a la intercara, en el microscopio con ampliaciones de 100x y 500x.



**Figura 6.12.** Microscopio metalográfico.

Fuente: Propia.

## **6.7 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS**

Estos ensayos son pruebas practicadas a un material de forma que no altere sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales. El objetivo de estos ensayos es detectar discontinuidades superficiales e internas en materiales, soldaduras, componentes y partes fabricadas. Estos no ofrecen una gran cantidad de información comparados con los ensayos destructivos, sin embargo tiene la ventaja, de que implican un daño imperceptible o nulo en lo ensayado, lo que hace que sean más baratos para el propietario de la pieza a examinar, ya que no implica la destrucción de la misma. Su finalidad es verificar la homogeneidad del material encontrando grietas o micro fisuras en la pieza. Los ensayos son realizados bajo procedimientos escritos, que atienden a los requisitos de las principales normas o códigos de fabricación.

### **6.7.1 INSPECCIÓN VISUAL**

La inspección visual es la técnica más ampliamente utilizada, ya que permite, de manera sencilla y por simple observación, la detección de discontinuidades en la superficie.

Esta inspección se realiza antes, durante y después de soldar. Para la inspección visual en el pre-soldado se debe considerar: la preparación de la junta, dimensiones y acabados, alineación y posicionamiento de las piezas a soldarse y limpieza. La inspección visual durante la ejecución de la soldadura, comprende la verificación del metal de aporte y fundente. Después de realizada la soldadura se debe inspeccionar la presencia de roturas, socavaciones y flujo insuficiente del metal de aporte.

## CAPÍTULO 7

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 7.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

##### 7.1.1 INTRODUCCIÓN

El horno de calentamiento utilizado no tiene aplicaciones para procesos de soldadura, por lo que su manejo se modificó para lograr las uniones soldadas, el espacio en el interior del horno es limitado por lo que las dimensiones de las placas establecidas en el código ASME Sección IX (QB 463(c) y (d)) para la obtención de las muestras para los ensayos fueron modificadas como se ilustra en la figura 7.1, de manera que las muestras para cada ensayo se obtienen de una sola junta soldada variando el metal base y el metal de aporte, de tal forma que se puedan cumplir los objetivos de este estudio que son: analizar la difusión del metal de aporte en el metal base y conocer la resistencia de la soldadura fuerte por horno en los tipos de aceros al carbono seleccionados variando el metal de aporte.



**Figura 7.1.** Junta soldada para calificación de procedimiento.

Fuente: Propia.

Para cumplir los objetivos de este estudio se realizaron los siguientes ensayos:

- Ensayo de tracción para determinar si la resistencia de las uniones soldadas cumple con los criterios de aceptación que especifica el código ASME Sección IX.

- Ensayo de pelado para controlar las características de resistencia de adhesión y separación de las uniones soldadas
- Ensayo metalográfico para observar la difusión del metal de aporte y conocer los posibles cambios estructurales en el metal base.

Haciendo un análisis de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados, se puede tener un criterio más acertado de cual metal base y metal de aporte ofrece una mejor soldadura y de esta manera se habrán cumplido los objetivos propuestos.

### 7.1.2 ANÁLISIS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN

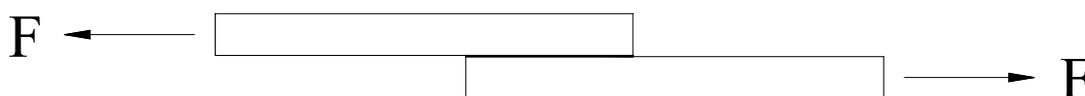
Se prepararon 6 probetas para realizar el ensayo de tracción en la máquina universal de ensayos, los resultados obtenidos de esta prueba fueron los siguientes:

**Tabla 7.1.** Resultados del ensayo a tracción.

Designación	Metal Base		Metal de Aporte	Carga (lb)	Carga (Kg)
	Norma	Denominación comercial			
A36-B	ASTM A36	A36	RBCuZn-C	29200	13273
A36-P	ASTM A36	A36	BCuP-3	3200	1455
SAE-B	SAE 1045	Böhler V945	RBCuZn-C	10100	4591
SAE-P	SAE 1045	Böhler V945	BCuP-3	2900	1318
K100-B	AISI D3	Böhler K100	RBCuZn-C	6600	3000
K100-P	AISI D3	Böhler K100	BCuP-3	200	91

Fuente: Propia.

La falla de la junta soldada en fuerte ocurre por corte de la soldadura o por desgarre del metal de aporte soldado, por lo tanto, el tramo de soldadura soporta solo cargas cortantes como se ilustra en la figura 7.2, sin tomar en cuenta las cargas de flexión por el momento resultante.



**Figura 7.2.** Cargas cortantes aplicados a la probeta.

Fuente: Propia.

Entonces, el esfuerzo de corte es igual a la carga soportada dividida para el área de mojado de la soldadura como se indica en la ecuación.

$$\tau = \frac{F}{A}$$

$\tau$ : esfuerzo cortante (Psi).

F: fuerza (lb).

A: área de mojado (in<sup>2</sup>).

**Tabla 7.2.** Esfuerzos de tracción de las probetas ensayadas.

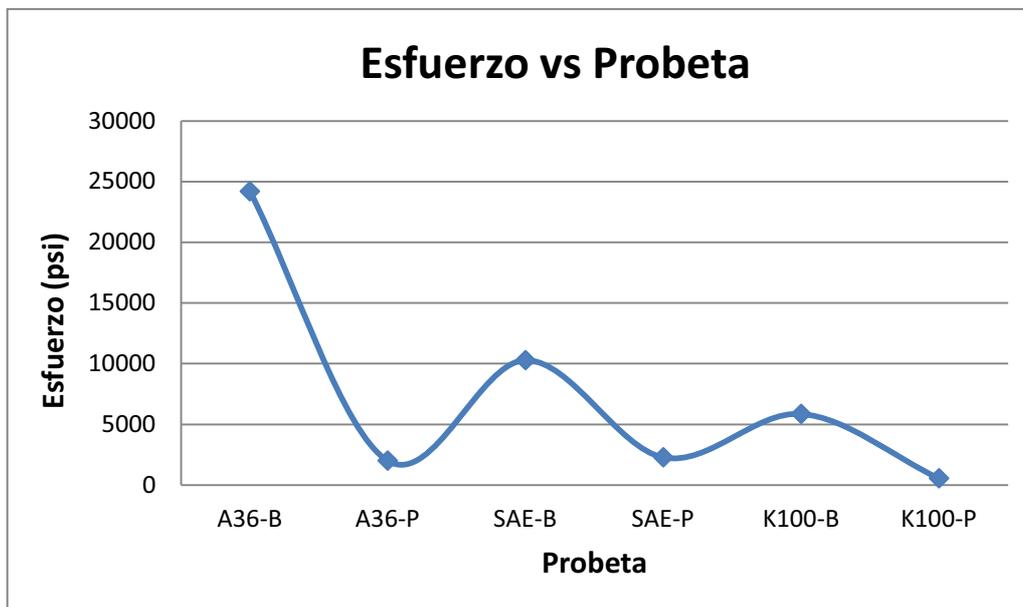
Designación	Metal Base		Carga (lb)	Área (in <sup>2</sup> )	Esfuerzo de tracción (Psi)
	Norma	Denominación comercial			
A36-B	ASTM A36	A36	29200	1.2	24201.5
A36-P	ASTM A36	A36	3200	1.6	2010.1
SAE-B	SAE 1045	Böhler V945	10100	1.0	10288.3
SAE-P	SAE 1045	Böhler V945	2900	1.3	2283.5
K100-B	AISI D3	Böhler K100	6600	1.1	5861.5
K100-P	AISI D3	Böhler K100	200	0.4	554.5

Fuente: Propia.

De la tabla 7.2 se tiene que los mejores resultados en cuanto a resistencia se obtienen en las probetas que fueron soldadas utilizando como metal de aporte el RBCuZn-C, además el tener un área de mojado mayor no garantiza que la soldadura tenga una mayor resistencia a la tracción, esto se lo puede comprobar analizando el área de mojado de los uniones soldadas con los distintos metales de aporte, pues esta área es mayor en las uniones soldadas con BCuP-3 a excepción del acero K100-P, y a pesar de ello su resistencia a la tracción no alcanza los valores de resistencia obtenidos con el RBCuZn-C, y esto es independiente del metal base utilizado, pues en todos los casos la mejor resistencia a tensión se obtiene con este último metal de aporte.

La probeta A36 ofrece los mejores resultados de resistencia a la tracción y esto es independiente del metal de aporte. Además la resistencia a la tracción de la probeta A36-P es menor que la del SAE-P, debido a que en esta última probeta se formó una especie de cordón de soldadura por el metal de aporte que no ingresó en la holgura lo que aumento la resistencia a la tracción.

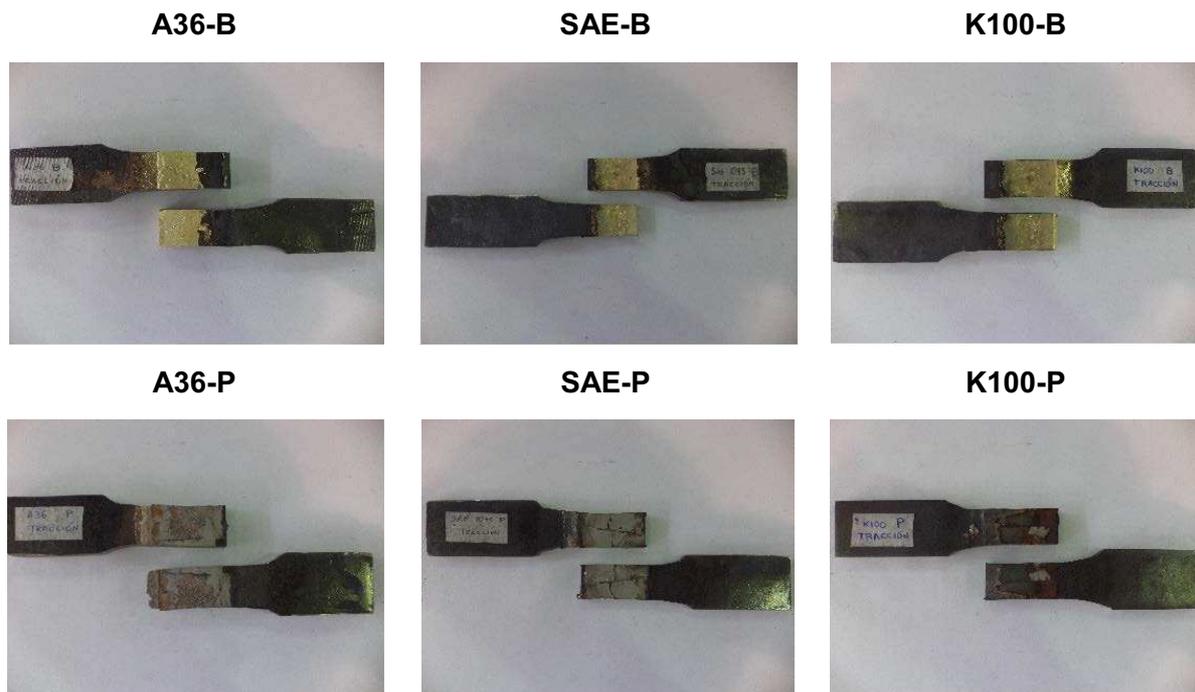
Los valores más bajos de resistencia corresponden a las probetas cuyo metal base fue el acero Böhler K100.



**Figura 7.3.** Diagrama esfuerzo vs probeta.

Fuente: Propia.

En la figura 7.3 se muestra el diagrama esfuerzo de tracción vs probeta, en este puede verse claramente lo mencionado en párrafos anteriores de cuál es el acero que presenta la mayor y menor resistencia, que son el A36 y el K100 respectivamente, además se observa que las caídas más bajas de resistencia corresponden a las probetas soldadas con el metal de aporte que contiene plata (BCuP-3).



**Figura 7.4.** Probetas ensayadas a tracción.

Fuente: Propia.

Realizado el ensayo de tracción se observan en las probetas ensayadas que la falla en la unión soldada es por el desgarre del material de aporte porque se observan zonas opacas en las superficies, típicas de este tipo de falla. Además se observa que mientras más baja es la soldabilidad del acero del metal base, es menor el mojado del metal de aporte.

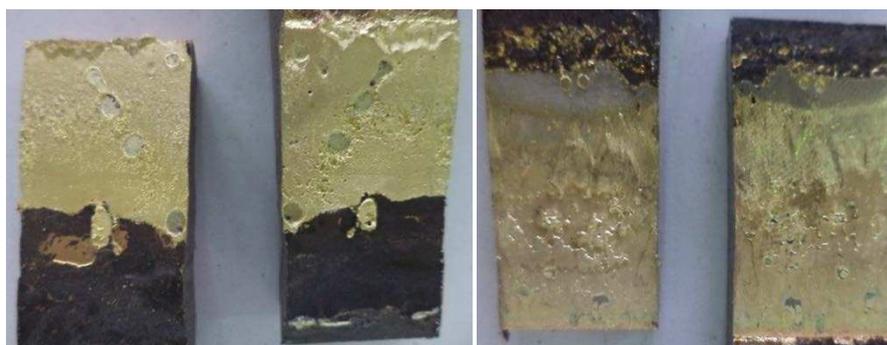
El metal de aporte BCuP-3 moja de forma irregular las superficies traslapadas penetrando toda la longitud de traslape pero con varios espacios en los que el metal de aporte no moja a las superficies como se ilustra en la figura 7.5.



**Figura 7.5.** Mojado irregular del metal de aporte en la probeta A36-P.

**Fuente:** Propia.

El metal de aporte RBCuZn-C moja de forma más uniforme las superficies traslapadas aunque no alcanza a cubrir toda la superficie como se ilustra en la figura 7.6



**Figura 7.6.** Mojado del metal de aporte. De izquierda a derecha A36-B, SAE-B.

**Fuente:** Propia.

### 7.1.3 ANÁLISIS DEL ENSAYO DE PELAR

Se prepararon 6 probetas para realizar el ensayo de pelar en la máquina universal de ensayos, los resultados obtenidos de esta prueba fueron los siguientes:

**Tabla 7.3.** Resultados del ensayo de pelar.

Designación	Metal Base		Metal de Aporte	Área de traslape (mm <sup>2</sup> )
	Norma	Denominación comercial		
A36-B	ASTM A36	A36	RBCuZn-C	2128.9
A36-P	ASTM A36	A36	BCuP-3	2379.5
SAE-B	SAE 1045	Böhler V945	RBCuZn-C	1446.8
SAE-P	SAE 1045	Böhler V945	BCuP-3	1545.9
K100-B	AISI D3	Böhler K100	RBCuZn-C	1506.2
K100-P	AISI D3	Böhler K100	BCuP-3	1358.3

Fuente: Propia.

**Tabla 7.4.** Áreas de las probetas ensayadas.

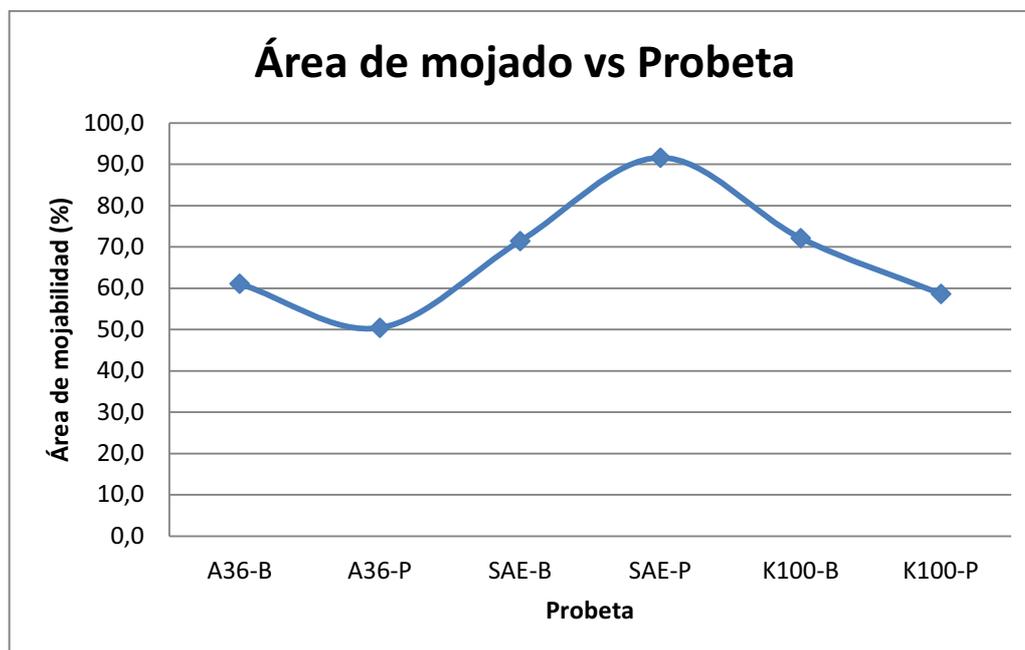
Designación	Metal Base		Área de traslape (mm <sup>2</sup> )	Área soldada (mm <sup>2</sup> )	Área total de defectos (mm <sup>2</sup> )	Área de mojado (%)
	Norma	Denominación comercial				
A36-B	ASTM A36	A36	2128.9	1300.2	828.7	61.1
A36-P	ASTM A36	A36	2379.5	1199.4	1180.1	50.4
SAE-B	SAE 1045	Böhler V945	1446.8	1033.0	413.8	71.4
SAE-P	SAE 1045	Böhler V945	1545.9	1415.6	130.3	91.6
K100-B	AISI D3	Böhler K100	1506.2	1086.0	420.2	72.1
K100-P	AISI D3	Böhler K100	1358.3	796.1	562.2	58.6

Fuente: Propia.

En la tabla 7.4 se observa que el área de mojado es superior en las probetas soldadas con metal de aporte RBCuZn-C independientemente del metal base, esto se debe en gran parte a las características del fundente (Argenta flux 200) utilizado, ya que este incrementa la fluidez del metal de aporte y esto ayuda a que exista un área de mojado mayor.

El área de mojado es superior en las probetas soldadas que fueron sometidas a un tratamiento de postsoldadura como es el caso del SAE 1045 y K100, este

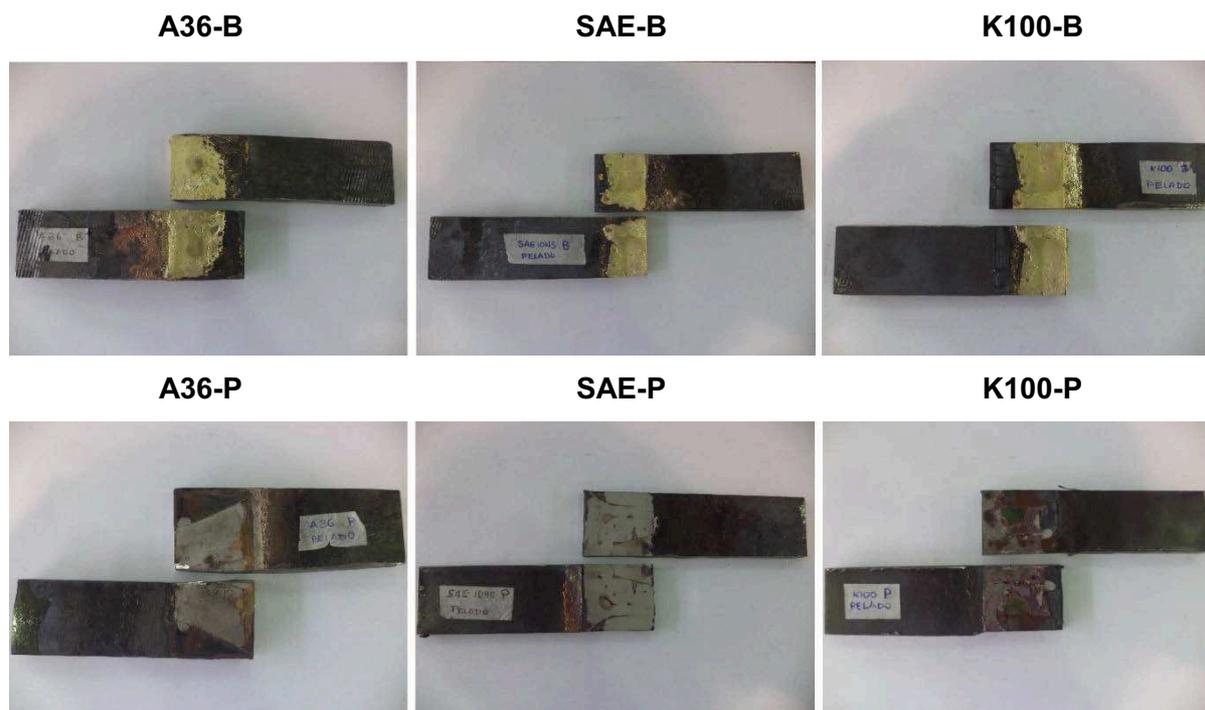
tratamiento postsoldadura evita un enfriamiento rápido del metal de aporte y con ello permite que exista un mayor flujo capilar.



**Figura 7.7.** Diagrama área de mojado vs probeta.

Fuente: Propia

En la figura 7.7 se observa que el punto más elevado de área de mojado corresponde a la probeta de acero SAE-P soldada con metal de aporte con contenido de plata (BCuP-3), esta área de mojado a pesar de ser mayor en comparación con el resto, no garantiza una buena adhesión en el área de traslape de la placa soldada, por tal motivo la soldadura no es la de mejor calidad.



**Figura 7.8.** Probetas del ensayo de pelar.

Fuente: Propia

En la figura 7.8 se observa que el área de mojado es más uniforme en las probetas soldadas con metal de aporte RBCuZn-C que en las probetas soldadas con BCuP-3, esto se debe a que el fundente (Gémini flux) utilizado para este último metal de aporte queda atrapado en la holgura durante la soldadura, lo que evita que el metal de aporte fluya correctamente por la holgura y por lo tanto no tenga una buena mojabilidad.

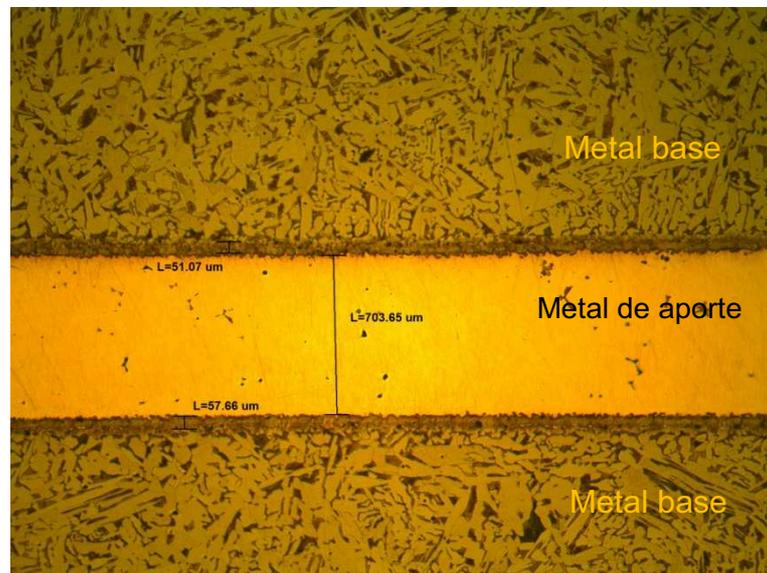
#### 7.1.4 ANÁLISIS DEL ENSAYO METALOGRÁFICO

El análisis metalográfico tiene el objetivo de mostrar el modo en que se adhiere el metal de aporte con el metal base, verificar la holgura determinada en el montaje de las piezas, como también de mostrar posibles transformaciones en la estructura del metal base producto del calentamiento en el horno especialmente de los aceros de medio y alto contenido de carbono los que se someten además a un tratamiento postsoldadura.

Para cumplir estos objetivos se analizan las uniones soldadas de acuerdo al metal de aporte utilizado para compararlas entre sí.

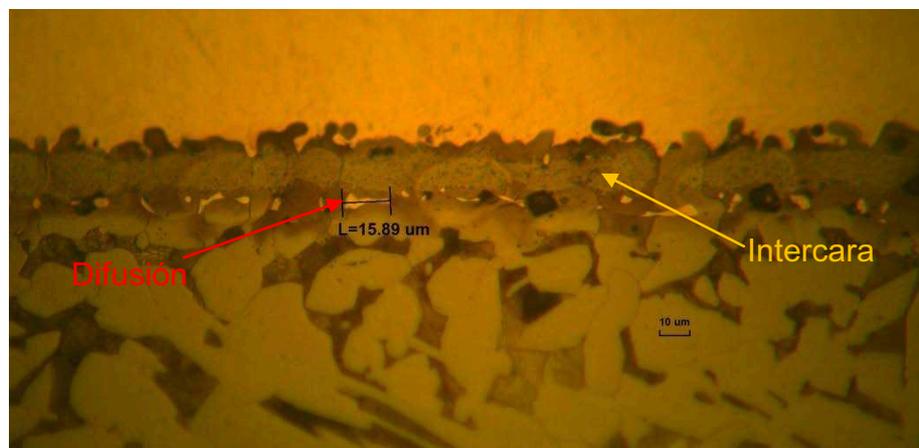
### 7.1.4.1 Soldadura fuerte metal base acero A36

#### 7.1.4.1.1 Análisis de la Soldadura con metal de aporte RBCuZn-C



**Figura 7.9.** Metalografía 100x, metal base acero A36 con material de aporte RBCuZn-C.

Fuente: Propia.



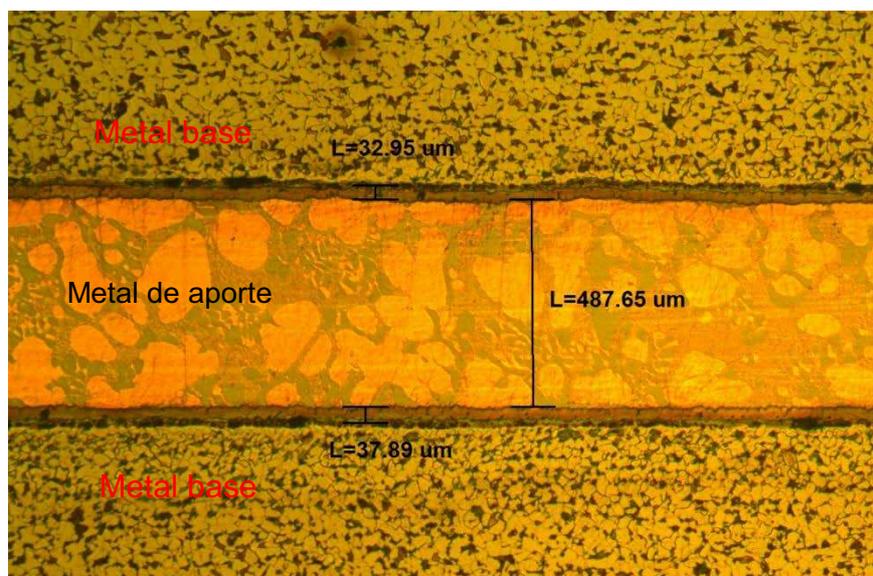
**Figura 7.10.** Metalografía 500x, metal base acero A36 con material de aporte RBCuZn-C.

Fuente: Propia.

- En la figura 7.9 se observa que la distancia de separación entre las placas es mayor a la recomendada y a la revisada en el montaje pero aún así ocurre la acción capilar del metal de aporte en la holgura, además existen intercaras de dimensiones 57.66 µm y 51.07 µm.

- La estructura del metal base de la junta no sufre transformación después de la operación de soldadura.
- En la figura 7.10 se observa que en la intercara tiene bordes definidos y existe una región de difusión del metal de aporte en el metal base.

#### 7.1.4.1.2 Análisis de la Soldadura con metal de aporte BCuP-3



**Figura 7.11.** Metalografía 100x, metal base acero A36 con material de aporte BCuP-3.

Fuente: Propia.



**Figura 7.12.** Metalografía 500x, metal base acero A36 con material de aporte BCuP-3.

Fuente: Propia.

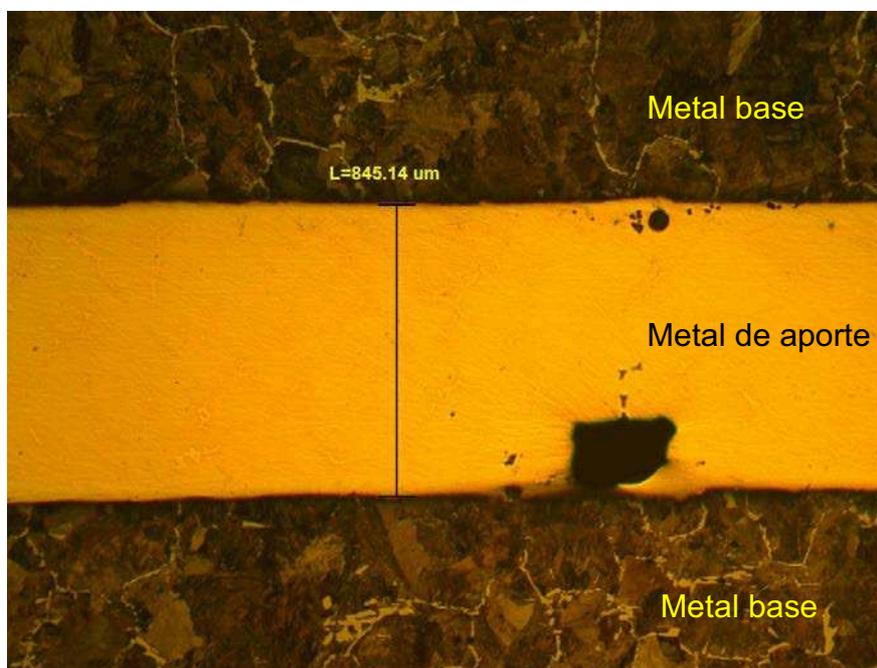
- En la figura 7.11 se observa que la distancia de separación entre las placas es mayor a la recomendada y a la revisada en el montaje pero es

menor a la separación con metal de aporte RBCuZn-C, además existen intercaras de dimensiones  $32.95 \mu\text{m}$  y  $37.89 \mu\text{m}$ .

- La estructura del metal base de la junta no sufre transformación después de la operación de soldadura.
- En la figura 7.12 se observa que la intercara tiene bordes definidos y no existe difusión del metal de aporte en el metal base pero se presenta una capa de fosfato producto de la limpieza.

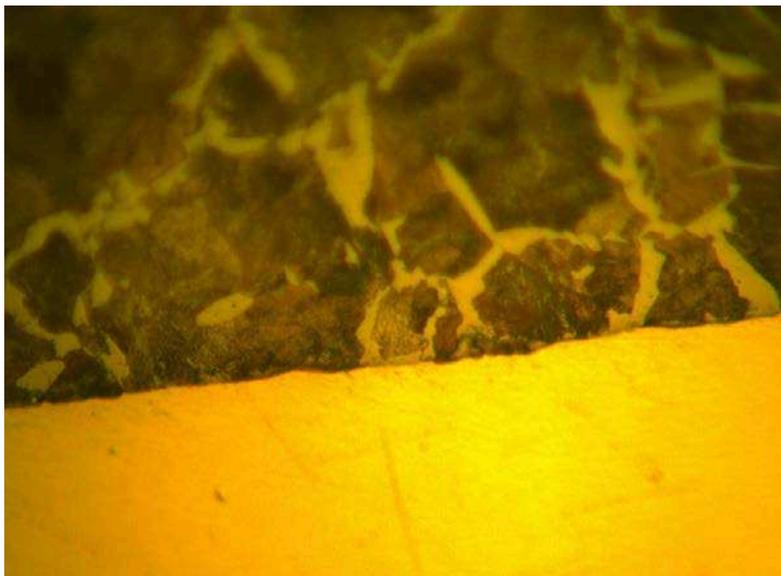
#### 7.1.4.2 Soldadura fuerte metal base acero SAE 1045

##### 7.1.4.2.1 Análisis de la Soldadura con metal de aporte RBCuZn-C



**Figura 7.13.** Metalografía 100x, metal base acero SAE 1045 con material de aporte RBCuZn-C.

Fuente: Propia.

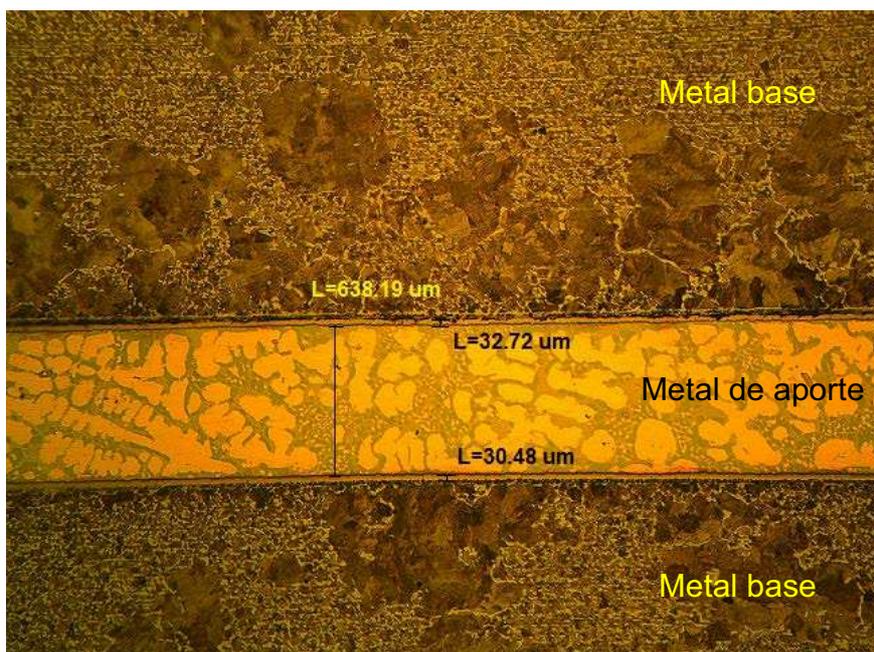


**Figura 7.14.** Metalografía 500x, metal base acero SAE 1045 con material de aporte RBCuZn-C.

**Fuente:** Propia.

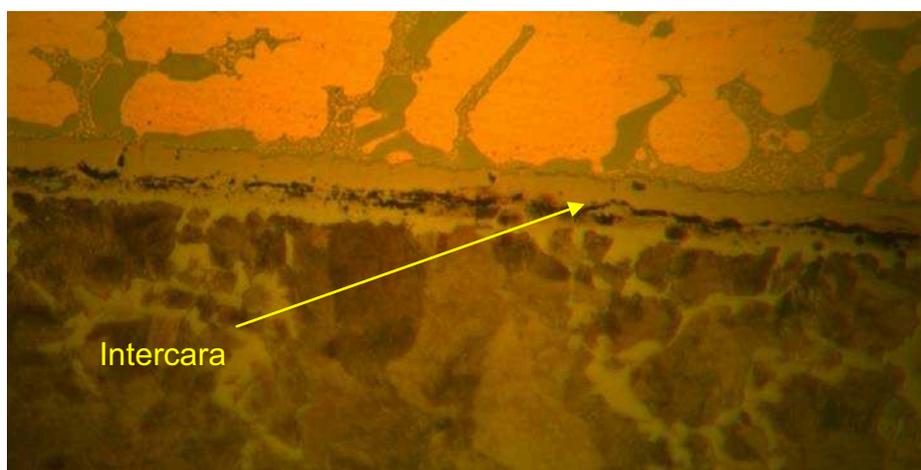
- En la figura 7.13 se observa que la distancia de separación entre las placas es mayor a la recomendada y a la revisada en el montaje, además es mayor a la separación con metal base A36 y el mismo metal de aporte RBCuZn-C.
- La estructura del metal base de la junta no sufre transformación después de la operación de soldadura.
- En la figura 7.14 no se distingue la intercara entre el metal base y el metal de aporte, se identifica claramente a los dos elementos en la zona de unión por lo que no se presenta difusión del metal de aporte en el metal base.

#### 7.1.4.2.2 Análisis de la Soldadura con metal de aporte BCuP-3



**Figura 7.15.** Metalografía 100x, metal base acero SAE 1045 con material de aporte BCuP-3.

Fuente: Propia.



**Figura 7.16.** Metalografía 500x, metal base acero SAE 1045 con material de aporte BCuP-3.

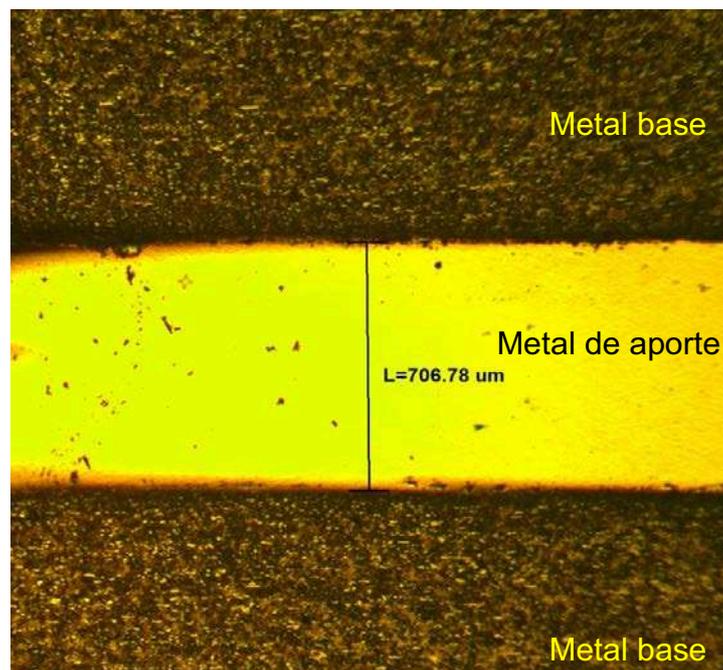
Fuente: Propia.

- En la figura 7.15 se observa que la distancia de separación entre las placas es mayor a la recomendada y a la revisada en el montaje, además es mayor a la separación con metal base A36 y el mismo metal de aporte BCuP-3, existen intercaras de dimensiones 32.72  $\mu\text{m}$  y 30.48  $\mu\text{m}$ .

- La estructura del metal base de la junta no sufre transformación después de la operación de soldadura.
- En la figura 7.16 se observa que la intercara tiene bordes definidos pero es irregular y no existe difusión del metal de aporte en el metal base pero se presenta una capa de fosfato producto de la limpieza.

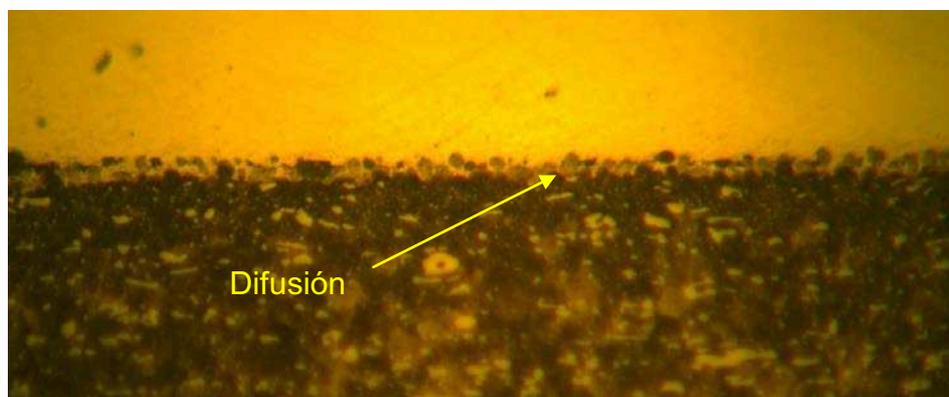
### 7.1.4.3 Soldadura fuerte metal base acero BÖHLER K100

#### 7.1.4.3.1 Análisis de la Soldadura con metal de aporte RBCuZn-C



**Figura 7.17.** Metalografía 100x, metal base acero Böhler K100 con material de aporte RBCuZn-C.

Fuente: Propia.

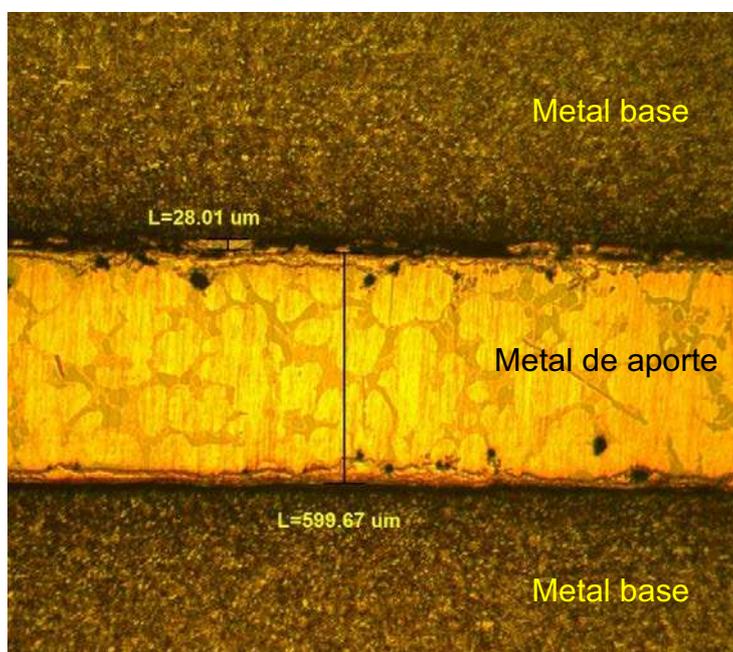


**Figura 7.18.** Metalografía 500x, metal base acero Böhler K100 con material de aporte RBCuZn-C.

Fuente: Propia.

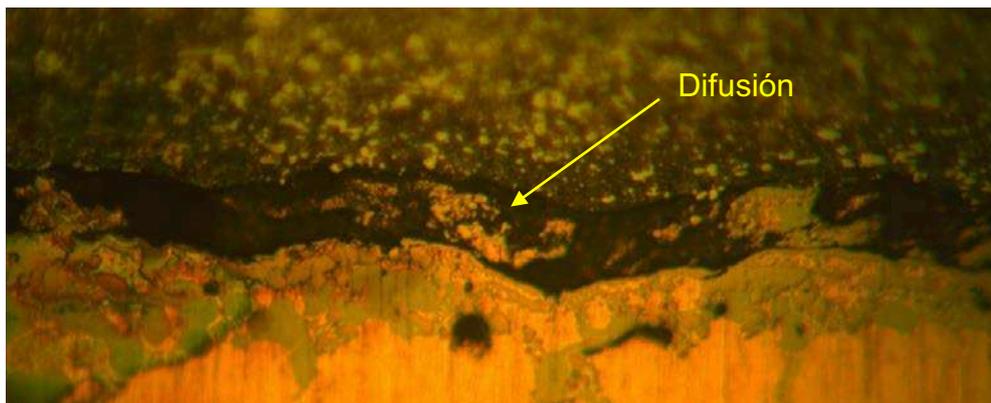
- En la figura 7.17 se observa que la distancia de separación entre las placas es mayor a la recomendada y a la revisada en el montaje, además es mayor a la separación con metal base A36 y menor a la del metal base SAE 1045 con el mismo metal de aporte RBCuZn-C.
- La estructura del metal base de la junta no sufre transformación después de la operación de soldadura.
- En la figura 7.18 se observa que la intercara no tiene bordes definidos y existe poca difusión del metal de aporte en el metal base.

#### 7.1.4.3.2 Análisis de la Soldadura con metal de aporte BCuP-3



**Figura 7.19.** Metalografía 100x, metal base acero Böhler K100 con material de aporte BCuP-3.

Fuente: Propia.



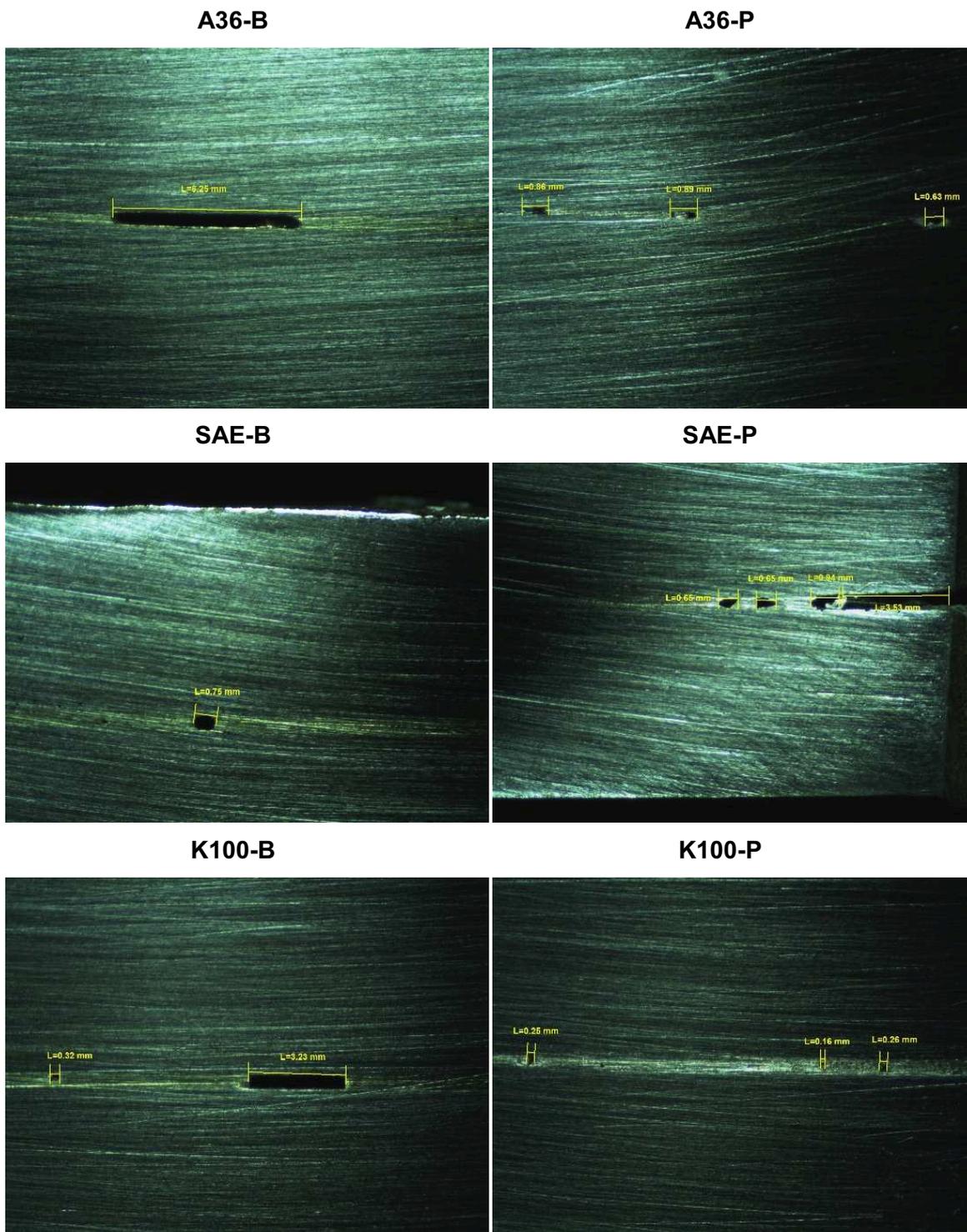
**Figura 7.20.** Metalografía 500x, metal base acero Böhler K100 con material de aporte BCuP-3.

**Fuente:** Propia.

- En la figura 7.19 se observa que la distancia de separación entre las placas es mayor a la recomendada y a la revisada en el montaje, además es mayor a la separación con metal base A36 y menor a la del metal base SAE 1045 con el mismo metal de aporte BCuP-3.
- La estructura del metal base de la junta no sufre transformación después de la operación de soldadura.
- En la figura 7.20 se observa que la intercara no es homogénea en su constitución y existe poca difusión del metal de aporte en el metal base.

### 7.1.5 MACROGRAFÍAS DE PROBETAS

En el proceso de soldadura fuerte por horno existen discontinuidades en la junta soldada, las cuales se observan en las siguientes macrografías.



**Figura 7.21.** Macrografía de las probetas soldadas.

Fuente: Propia.

En la figura 7.21 se observan las discontinuidades presentes en las juntas soldadas, tales como: poros, penetración irregular, falta de llenado y fluidez inadecuada del metal de aporte.

Los poros presentes van desde 0.25 a 0.94 mm siendo los de mayor tamaño los poros en la junta soldada con metal de aporte BCuP-3 y metal base SAE 1045, estos poros incluso llegan a ser del tamaño de la holgura, mientras que los poros más pequeños corresponden a la junta soldada con metal de aporte BCuP-3 y metal base Böhler K100, cabe mencionar que el mayor número de poros corresponden a las juntas soldadas con metal de aporte con plata como elemento de aleación.

La falta de llenado del material de aporte en la holgura se debe a una mala fluidez del metal de aporte lo que origina que el área de traslape no sea cubierta totalmente. Entonces la mayor falta de llenado se presenta en la junta soldada con metal de aporte RBCuZn-C y metal base A36.

El mayor número de defectos ya sea poros o falta de llenado se encuentran presentes en las juntas soldadas con material de aporte con plata como elemento de aleación (BCuP-3), esto da como resultado una soldadura menos resistente y susceptible a fallas.

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

El PQR detalla con claridad los datos reales utilizados en la obtención de la probeta de soldadura de acuerdo al procedimiento de soldadura fuerte por horno, así como los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en la misma probeta como sea requerido dentro de la norma. Las dimensiones de las probetas se basan en el código ASME Sección IX Parte QB Soldadura Fuerte, así como los criterios de aceptación y rechazo.

PQR REGISTRO DEL PROCEDIMIENTO DE CALIFICACIÓN								
ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO								
<b>Código:</b> ASME IX <b>Nombre de la Compañía:</b> TESIS –EPN <b>N° de Identificación:</b> 01 <b>Proceso de Soldadura:</b> Furnace Brazing <b>Posición de Soldadura:</b> 1G <b>Especificación Metal Aporte:</b> AWS RBCuZn-C					<b>Fundente:</b> Argenta Flux 200 <b>Pase Simple</b> ⊗ <b>Múltiple</b> ○ <b>Temperatura de Soldadura:</b> 1080 °C			
INSPECCIÓN VISUAL								
<b>Apariencia:</b> Buena <b>Porosidades:</b> Poca porosidad <b>Capilaridad:</b> Buena								
PRUEBA DE TRACCIÓN								
Probeta N°	Designación	Metal Base		Ancho (mm)	Área (in <sup>2</sup> )	Carga (lb)	Esfuerzo (psi)	Característica de Falla
		Norma	Denominación Comercial					
1	A36-B	ASTM A36	A36	19	1.2	29200	24201.5	en la soldadura
2	SAE-B	SAE 1045	Böhler V945	19	1.0	10100	10288.3	en la soldadura
3	K100-B	AISI D3	Böhler K100	19	1.1	6600	5861.5	en la soldadura
PRUEBA DE PELAR								
Probeta N°	Designación	Metal Base		Ancho (mm)	Área soldada (mm <sup>2</sup> )	Área de mojado (%)	Observaciones	
		Norma	Denominación Comercial					
1	A36-B	ASTM A36	A36	38	1300.2	61.1	Falta de mojado	
2	SAE-B	SAE 1045	Böhler V945	38	1033.0	71.4	Falta de mojado	
3	K100-B	AISI D3	Böhler K100	38	1086.0	72.1	Falta de mojado	
Realizado por:			Revisado por:			Aprobado por:		
_____ Guamangallo Juan Carlos  _____ Villarroel Edison			_____ Ing. Diego Espinosa			_____ Ing. Diego Espinosa		

**Figura 7.22.** Registro del Procedimiento de Calificación (PQR) – Material de Aporte RBCuZn-C.

PQR REGISTRO DEL PROCEDIMIENTO DE CALIFICACIÓN								
ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO								
<b>Código:</b> ASME IX <b>Nombre de la Compañía:</b> TESIS –EPN <b>N° de Identificación:</b> 02 <b>Proceso de Soldadura:</b> Furnace Brazing <b>Posición de Soldadura:</b> 1G <b>Especificación Metal Aporte:</b> AWS BCuP-3					<b>Fundente:</b> Gémini Flux <b>Pase Simple</b> ⊗ <b>Múltiple</b> ○ <b>Temperatura de Soldadura:</b> 980 °C			
INSPECCIÓN VISUAL								
<b>Apariencia:</b> Buena <b>Porosidades:</b> Poca porosidad <b>Capilaridad:</b> Buena								
PRUEBA DE TRACCIÓN								
Probeta N°	Designación	Metal Base		Ancho (mm)	Área (in <sup>2</sup> )	Carga (lb)	Esfuerzo (psi)	Característica de Falla
		Norma	Denominación Comercial					
1	A36-P	ASTM A36	A36	19	1.6	3200	2010.1	en la soldadura
2	SAE-P	SAE 1045	Böhler V945	19	1.3	2900	2283.5	en la soldadura
3	K100-P	AISI D3	Böhler K100	19	0.4	200	554.5	en la soldadura
PRUEBA DE PELAR								
Probeta N°	Designación	Metal Base		Ancho (mm)	Área soldada (mm <sup>2</sup> )	Área de mojado (%)	Observaciones	
		Norma	Denominación Comercial					
1	A36-P	ASTM A36	A36	38	1199.4	50.4	Falta de mojado	
2	SAE-P	SAE 1045	Böhler V945	38	1415.6	91.6	Falta de mojado	
3	K100-P	AISI D3	Böhler K100	38	796.1	58.6	Falta de mojado	
<b>Realizado por:</b>				<b>Revisado por:</b>			<b>Aprobado por:</b>	
_____ Guamangallo Juan Carlos  _____ Villarroel Edison				_____ Ing. Diego Espinosa			_____ - Ing. Diego Espinosa	

**Figura 7.23.** Registro del Procedimiento de Calificación (PQR) – Material de Aporte BCuP-3.

## CAPÍTULO 8

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 8.1 CONCLUSIONES

- Los mejores resultados en lo que a resistencia se refiere se obtiene en las probetas soldadas con metal de aporte RBCuZn-C, debido a que este tiene una base de cobre que permite una mayor adhesión a las superficies del metal base.
- Las juntas soldadas con metal de aporte BCuP-3 presentan una baja resistencia debido a que este metal de aporte contiene fósforo como elemento de aleación lo que provoca que la unión soldada sea más frágil.
- Los mejores resultados de resistencia a la tracción se obtiene en las juntas soldadas con metal base acero ASTM A36, ya que este presenta una buena soldabilidad por su bajo contenido de carbono.
- Las probetas soldadas con metal base acero Böhler K100 presentan una baja resistencia debido a que este acero tiene una baja soldabilidad por tener un alto contenido de carbono, el cual lo vuelve un material frágil, además la soldadura con este tipo de acero no es de buena calidad mas aún con el proceso de soldadura por horno en donde al estar la pieza a soldar dentro de una cámara no se puede controlar el ingreso correcto del metal de aporte en la holgura de la junta.
- El área de mojado es mayor con el metal de aporte BCuP-3 debido a que este contiene un porcentaje de plata, haciendo que el punto de fusión sea menor en comparación con otros metales de aporte, lo cual ayuda a que exista un mayor flujo capilar.
- El tener un área de mojado mayor no garantiza una soldadura con buena resistencia pues depende en gran medida de la capacidad de adhesión del metal de aporte en la superficie del metal base.

- Una selección adecuada del metal base, metal de aporte y fundente puede garantizar la obtención de una junta soldada de buena calidad como es el caso del acero ASTM A36 con metal de aporte RBCuZn-C y fundente Argenta Flux 200.
- El tratamiento de postsoldadura ayuda a que exista un mayor flujo capilar debido a que se evita la caída de temperatura en la junta soldada y por tal motivo al no enfriarse el metal de aporte sigue fluyendo por la holgura producto de la acción capilar.
- No se presenta un cambio de estructura en el metal base debido a que en el proceso de soldadura fuerte por horno la temperatura de trabajo no es tan alta como otros procesos por fusión, además que el tiempo en el horno no fue muy prolongado y se tuvo mucho cuidado en el proceso de enfriamiento.
- La difusión del metal de aporte en el metal base es más notoria en la junta soldada de acero ASTM A36 pues los átomos del metal de aporte se introdujeron en mayor cantidad en los espacios interatómicos dejados por el metal base producto del calentamiento de este último durante la soldadura.
- La falta de llenado en algunas probetas puede deberse a una limpieza inadecuada de los metales base lo que provoca un flujo capilar deficiente, provocando una junta soldada de baja resistencia.
- Los poros existentes en las juntas soldadas se deben a diferentes velocidades de contracción del metal base y metal de aporte durante la fase de enfriamiento.
- La dimensión de la holgura para que ocurra la acción capilar debe ser reducida debido a que ésta será deficiente si la dimensión es demasiado grande.

## 8.2 RECOMENDACIONES

- Ingresar el conjunto a soldar (metal base, metal de aporte, fundente y accesorios) en el menor tiempo posible para evitar una caída de temperatura considerable en el horno.
- Verificar la estabilidad de los tabiques refractarios en el horno antes del calentamiento.
- Verificar la holgura entre las placas
- El conjunto a soldar debe permanecer en forma inclinada durante la soldadura para beneficiar el ingreso del metal de aporte fundido en la holgura.
- Utilizar equipo de protección adecuado para el manejo del horno, debido a que las temperaturas de trabajo alcanzadas bordean los 1080°C.
- Es necesario una buena sujeción de las placas a soldar con las pinzas de acero inoxidable de tal forma que no ocurra un movimiento de las placas durante la soldadura y se vea afectada la dimensión de la holgura propiciando un deficiente flujo capilar.
- Los fundentes deben ser los apropiados para el metal de aporte seleccionado, caso contrario no se podrá evitar la formación de óxidos durante el proceso de soldadura.
- Utilizar el equipo de protección adecuado como guantes y mascarilla para evitar la inhalación de los gases tóxicos que puede desprender el fundente.

## BIBLIOGRAFÍA

1. FACULTAD DE INGENIERÍA. Universidad de Buenos Aires. Argentina  
<[http://materias.fi.uba.ar/6715/Material\\_archivos/Material%20complementario%2067.17/Aceros.pdf](http://materias.fi.uba.ar/6715/Material_archivos/Material%20complementario%2067.17/Aceros.pdf)>
2. SÉFÉRIAN, D; Las Soldaduras: TÉCNICA-CONTROL Soldabilidad de los metales; Primera Edición; Editorial URMO S.A; España; 1981.
3. AVNER, Sydney; Introducción a la metalurgia física; Segunda edición; Editorial McGRAW-HILL; México.
4. APRAIZ, Barreiro; Tratamiento térmico de los aceros; Editorial Dossat; Madrid; 1971.
5. UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS.  
<[http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/calderon\\_cj/Cap3.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/calderon_cj/Cap3.pdf)>
6. AMERICAN WELDING SOCIETY; Manual de Soldadura; Octava Edición; Tomo II; Editorial Prentize-Hall Hispanoamérica; México; 1996.
7. HARRIS-BRASTAK. Catálogo general: Aleaciones especiales para soldadura fuerte, soldadura, metalización y recubrimiento.  
<[http://www.harris-brastak.com.br/catalogo/catalogo\\_espanhol\\_web.pdf](http://www.harris-brastak.com.br/catalogo/catalogo_espanhol_web.pdf)>
8. LASHKÓ N y LASHKÓ A; Soldadura Indirecta de Metales; Editorial MIR; Moscú; 1979.
9. DEERE John; Soldadura; Primera Edición; Editorial Moline; Illinois; 1980.
10. HORWITZ, Heary; Soldadura: Aplicaciones y Práctica; Editorial Alfaomega; México D.F; 1997.
11. OBTESOL. Centro Tecnológico AIMEN. Observatorio Tecnológico de la Soldadura Brazing, Soldeo Fuerte.  
<[http://www.obtesol.es/index.php?option=com\\_content&task=view&id=130&Itemid=32](http://www.obtesol.es/index.php?option=com_content&task=view&id=130&Itemid=32) >.
12. AMERICAN WELDING SOCIETY. SFA AWS A5.8/A5.8M. Specification for Filler Metals for Brazing and Braze Welding. Estados Unidos. 2004.
13. SISA. Soldaduras Industriales S.A.  
<[http://www.sisa-brazing.com/pdf/files/consejos\\_soldadura.pdf](http://www.sisa-brazing.com/pdf/files/consejos_soldadura.pdf) >

14. AMERICAN WELDING SOCIETY. SFA ANSI/AWS A5.31-92R.  
Specification for Fluxes for Brazing and Braze Welding. Estados Unidos.  
1992.
15. THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME.  
Boiler and Pressure Vessel Code SECTION IX: Qualification Standard  
for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers, and Welding and  
Brazing Operators. Brazing Data. Estados Unidos. 2004.

## **ANEXOS**

## **ANEXO 1: Resultado de análisis por espectrometría de chispa**



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA**



**Resultados de análisis por Espectrometría de Chispa**

**Solicitante** : Ing. Diego Espinosa  
**Atención** : Srs. Juan Carlos Guamangallo y Edison Villarroel  
**No. Referencia** : RM - 7031  
**Fecha** : 12 - 06 - 2012  
**Muestras recibidas** : Tres muestras de acero

La cuantificación de los metales presentes en la muestra se realizó empleando el Espectrómetro de Chispa marca BRUKER modelo Q4TASMAN. A continuación los resultados obtenidos:

Metales	A 36 (%)	SAE 1045 (%)	K 100 (%)
Carbono (C)	0,085	0,161	0,337
Silicio (Si)	0,010	0,189	0,121
Manganeso (Mn)	0,784	0,797	0,601
Cromo (Cr)	0,008	0,797	0,008
Molibdeno (Mo)	0,006	0,043	0,007
Níquel (Ni)	0,005	0,077	0,021
Fósforo (P)	0,001	0,002	0,003
Azufre (S)	0,003	0,004	0,193
Cobre (Cu)	0,001	0,059	0,001
Aluminio (Al)	0,048	0,019	0,037
Vanadio (V)	0,001	0,069	0,001
Hierro (Fe)	99,03	97,49	98,66

Ing. Marcelo Lozada L.  
 Jefe de Departamento (e.)



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA**



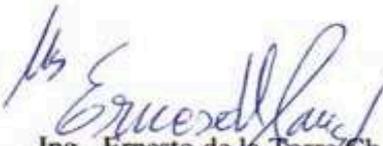
**Resultados de análisis por Espectrometría de Chispa**

**Solicitante** : Ing. Diego Espinosa  
**Atención** : Srs. Juan Carlos Guamangallo y Edison Villarroel  
**No. Referencia** : RM - 7031  
**Fecha** : 12 - 06 - 2012  
**Muestras recibidas** : Tres muestras de acero

La cuantificación de los metales presentes en la muestra se realizó empleando el Espectrómetro de Chispa marca BRUKER modelo Q4TASMAN. A continuación los resultados obtenidos:

<b>Metales</b>	<b>SAE 1045 (%)</b>	<b>K 100 (%)</b>
Carbono (C)	0,312	1,786
Silicio (Si)	0,167	0,196
Manganeso (Mn)	0,650	0,217
Cromo (Cr)	0,209	10,66
Molibdeno (Mo)	0,008	0,081
Níquel (Ni)	0,017	0,155
Fósforo (P)	0,003	0,016
Azufre (S)	0,004	0,007
Cobre (Cu)	0,003	0,058
Aluminio (Al)	0,040	0,031
Vanadio (V)	0,001	0,063
Hierro (Fe)	98,56	90,04

  
**Ing. Alicia Guevara C.**  
**Jefe de Departamento**

  
**Ing. Ernesto de la Torre Ch.**  
**Jefe de Laboratorios**

## **ANEXO 2: Propiedades acero BÖHLER K 100**

**BÖHLER K 100**

**Tipo de aleación:** C 2.00 Si 0.25 Mn 0.35 Cr 11.50 %

Color de identificación: Blanco - Amarillo  
 Estado de suministro: Recocido 248 HB (máx.)  
 Acabado: IBO ECOMAX

Equivalencia  
 AISI: -D3  
 DIN: X210Cr12  
 No. Mat. 1.2080

**PROPIEDADES:**

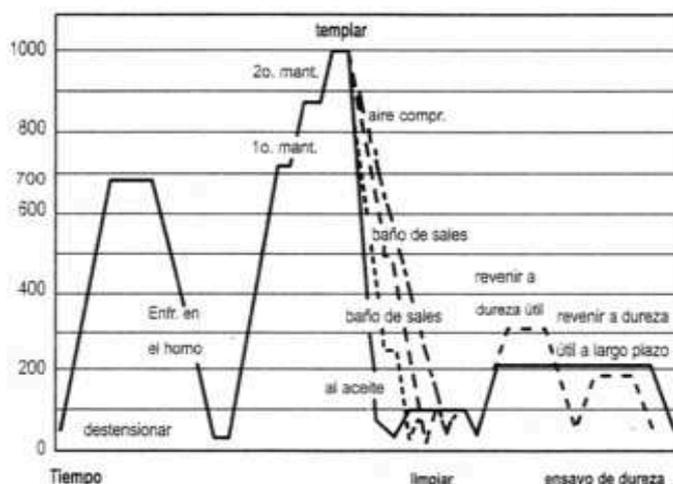
Marca estándar de los aceros ledeburíticos de alto porcentaje de carbono y cromo, de alta estabilidad dimensional en el tratamiento térmico y gran resistencia al desgaste.

**EMPLEO:**

Para la fabricación de herramientas para trabajo en frío como punzones y matrices para corte de lámina de hasta 4 mm de espesor, herramientas para trabajo en madera, rodillos de conformado en frío. Herramientas para el prensado de materiales cerámicos y farmacéuticos.

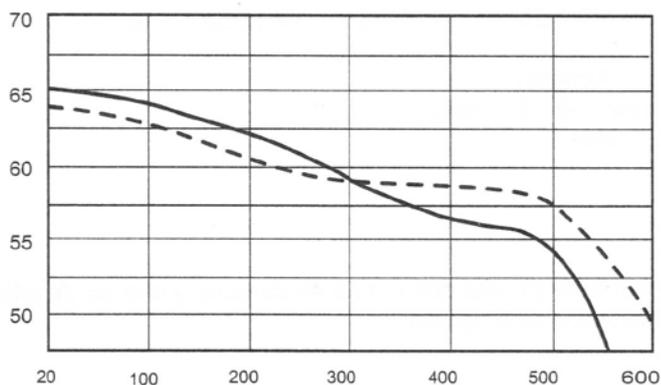
**TRATAMIENTO TÉRMICO:**

<b>Forjado:</b>	1050 - 850 °C
<b>Recocido:</b>	800 - 850 °C
enfriamiento lento en el horno	
<b>Distensionado:</b>	aprox. 650 °C
<b>Temple:</b>	940 - 970 °C
enfriamiento en: aceite, baño de sales (220 - 250 °C / 500 - 550 °C), aire y aire comprimido (espesores menores a 25 mm).	
<b>Dureza obtenible:</b>	63 - 65 HRC
<b>Revenido:</b>	ver en el diagrama de revenido las durezas obtenibles después del temple.

**Esquema de tratamiento térmico**

### DIAGRAMA DE REVENIDO

- Temperatura de temple: 950 °C.  
 - - - - Temperatura de temple: 1000 °C.  
 Mantenimiento a temperatura: 1 hora por 20 mm espesor  
 Sección de la probeta: cuadr. de 20 mm



### SOLDADURA DE REPARACIÓN

El proceso de soldadura en aceros de alto porcentaje de carbono no es recomendable, por el posible origen de fisuras de ser necesario puede utilizar los siguientes electrodos:

Electrodos recomendados: UTP 65 - UTP 63  
 Pre calentamiento: 150°C

### MEDIDAS EN STOCK:

ACERO	GEOMETRÍA	DIMENSIONES (mm)	PESO / METRO (kg)
K 100	cuadrado	20.00	3.16
K 100	cuadrado	30.00	7.11
K 100	cuadrado	35.00	9.68
K 100	cuadrado	40.00	12.64
K 100	cuadrado	45.00	16.00
K 100	cuadrado	50.00	19.75
K 100	cuadrado	60.00	28.44
K 100	cuadrado	70.00	38.71
K 100	cuadrado	80.00	50.56
K 100	cuadrado	90.00	63.99
K 100	cuadrado	100.00	79.00
K 100	cuadrado	120.00	113.76

ACERO	GEOMETRÍA	ESPESOR (mm)
K 100	lámina	6.00
K 100	lámina	10.00
K 100	lámina	12.00
K 100	lámina	15.00
K 100	lámina	16.00
K 100	lámina	22.00
K 100	lámina	25.00
K 100	lámina	40.00

ACERO	GEOMETRÍA	ESPESOR (mm)	ANCHO (mm)	PESO / METRO (kg)
K 100	platina	6.00	50.00	2.37
K 100	platina	6.00	60.00	2.84
K 100	platina	10.00	50.00	3.95
K 100	platina	10.00	80.00	6.32
K 100	platina	10.00	100.00	7.90
K 100	platina	12.00	50.00	4.74
K 100	platina	12.00	80.00	7.58
K 100	platina	12.00	100.00	9.48
K 100	platina	12.00	120.00	11.38
K 100	platina	15.00	50.00	5.93
K 100	platina	15.00	60.00	7.11
K 100	platina	15.00	70.00	8.30
K 100	platina	15.00	80.00	9.48
K 100	platina	15.00	100.00	11.85
K 100	platina	15.00	150.00	17.78
K 100	platina	16.00	200.00	25.28
K 100	platina	20.00	40.00	6.32
K 100	platina	20.00	100.00	15.80
K 100	platina	20.00	200.00	31.60
K 100	platina	20.00	300.00	47.40
K 100	platina	22.00	100.00	17.38
K 100	platina	22.00	200.00	34.76
K 100	platina	25.00	50.00	9.88
K 100	platina	25.00	60.00	11.85
K 100	platina	25.00	70.00	13.83
K 100	platina	25.00	80.00	15.80
K 100	platina	25.00	100.00	19.75
K 100	platina	25.00	200.00	39.50
K 100	platina	25.00	300.00	59.25
K 100	platina	30.00	70.00	16.59
K 100	platina	30.00	80.00	18.96
K 100	platina	30.00	90.00	21.33
K 100	platina	30.00	100.00	23.70
K 100	platina	30.00	130.00	30.81
K 100	platina	30.00	150.00	35.55
K 100	platina	30.00	200.00	47.40
K 100	platina	30.00	250.00	59.25
K 100	platina	30.00	300.00	71.10
K 100	platina	40.00	50.00	15.80
K 100	platina	40.00	80.00	25.28
K 100	platina	40.00	90.00	28.44
K 100	platina	40.00	100.00	31.60
K 100	platina	40.00	130.00	41.08
K 100	platina	40.00	150.00	47.40
K 100	platina	40.00	200.00	63.20
K 100	platina	40.00	250.00	79.00
K 100	platina	40.00	300.00	94.80
K 100	platina	50.00	100.00	39.50
K 100	platina	50.00	130.00	51.53
K 100	platina	50.00	150.00	59.25
K 100	platina	50.00	200.00	79.00
K 100	platina	50.00	250.00	98.75
K 100	platina	50.00	300.00	118.50
K 100	platina	50.00	350.00	138.25
K 100	platina	60.00	200.00	94.80

ACERO	GEOMETRÍA	DIMENSIONES (mm)	PESO / METRO (kg)
K 100	redondo	13.50	1.13
K 100	redondo	15.50	1.49
K 100	redondo	16.50	1.69
K 100	redondo	20.50	2.61
K 100	redondo	22.50	3.14
K 100	redondo	25.50	4.03
K 100	redondo	28.50	5.04
K 100	redondo	30.50	5.77
K 100	redondo	32.80	6.68
K 100	redondo	35.80	7.95
K 100	redondo	38.80	9.34
K 100	redondo	40.80	10.33
K 100	redondo	45.80	13.02
K 100	redondo	50.80	16.01
K 100	redondo	55.80	19.32
K 100	redondo	60.80	22.94
K 100	redondo	66.00	27.03
K 100	redondo	71.00	31.28
K 100	redondo	76.00	35.84
K 100	redondo	81.00	40.71
K 100	redondo	91.00	51.38
K 100	redondo	101.50	63.92
K 100	redondo	106.50	70.37
K 100	redondo	111.50	77.14
K 100	redondo	116.50	84.21
K 100	redondo	121.50	91.59
K 100	redondo	126.50	99.29
K 100	redondo	131.00	106.48
K 100	redondo	131.50	107.29
K 100	redondo	141.50	124.23
K 100	redondo	151.50	142.41
K 100	redondo	162.00	162.84
K 100	redondo	172.00	183.56
K 100	redondo	182.00	205.52
K 100	redondo	192.00	228.73
K 100	redondo	202.00	253.17
K 100	redondo	212.00	278.86
K 100	redondo	222.00	305.79
K 100	redondo	232.00	333.96
K 100	redondo	252.50	395.59
K 100	redondo	262.50	427.54
K 100	redondo	282.00	493.42
K 100	redondo	302.50	567.77
K 100	redondo	353.00	773.16



### **ANEXO 3: Propiedades acero BÖHLER V945**

## BÖHLER V 945



**Tipo de aleación:** C 0.45 Si 0.25 Mn 0.65 %

Color de identificación: Blanco  
Estado de suministro: Recocido 180 HB

Equivalencia	AISI: ~ 1045
	DIN: C45
	No. Mat. 1.1191

### PROPIEDADES:

Acero al carbono de alta calidad, de mayores propiedades mecánicas que el acero de transmisión, puede mejorar sus propiedades mecánicas si es bonificado.

### EMPLEO:

Para la fabricación de partes de maquinaria sometida a esfuerzos normales, como: árboles de transmisión, ejes, pernos, tuercas, ganchos, pines de sujeción, pasadores, cuñas, chavetas, portamatrices.

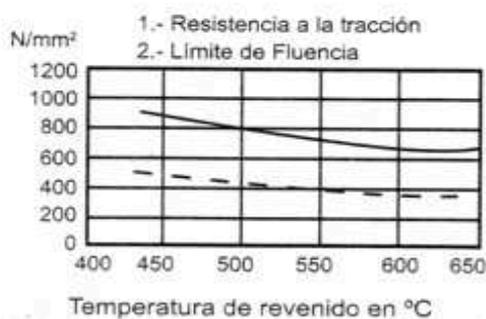
### TRATAMIENTO TÉRMICO:

<b>Forjado:</b>	1100 - 850 °C
<b>Recocido:</b>	650 - 700 °C
enfriamiento lento en el horno	
<b>Normalizado:</b>	840 - 870 °C
<b>Distensionado:</b>	500 °C
<b>Temple:</b>	820 - 850 °C
enfriamiento en: agua, aceite (piezas pequeñas)	
<b>Dureza obtenible:</b>	54 - 56 HRC
<b>Revenido:</b>	ver en el diagrama de bonificación la resistencia requerida.
<b>Nitruración:</b>	en baño de sales 580 °C

### PROPIEDADES MECÁNICAS

Estado	Diámetro mm	Límite de fluencia N/mm <sup>2</sup>	Resistencia a la tracción N/mm <sup>2</sup>	Alargamiento (Lo=Sd) min %	Contracción min. %
Recocido	16 - 100	340	650 - 750	17	35
	100 - 250	330	580 - 700	18	—

### DIAGRAMA DE BONIFICACIÓN



## SOLDADURA DE UNIÓN O REPARACIÓN

Electrodo recomendado: UTP 642, 63 ó 630

Precauciones:

UTP 642: No precalentar, excepto si la temperatura ambiente es menor a 0 °C (si es así, precalentar las uniones a soldar a 40 °C).

Post-calentamiento: recocido a 620 °C.

UTP 63 ó 630: No precalentar excepto que la temperatura ambiente sea menor a 0 °C.  
Dejar enfriar lentamente luego de soldar.

## MEDIDAS EN STOCK:

ACERO	GEOMETRÍA	ESPESOR (mm)	ANCHO (mm)	PESO / METRO (kg)
V 945	platina	25.00	76.00	15.01
V 945	platina	25.00	80.00	15.80
V 945	platina	25.00	100.00	19.75
V 945	platina	50.00	200.00	79.00

ACERO	GEOMETRÍA	ESPESOR (mm)
V 945	lámina	6.00
V 945	lámina	10.00
V 945	lámina	12.00
V 945	lámina	15.00
V 945	lámina	20.00
V 945	lámina	25.00
V 945	lámina	30.00
V 945	lámina	31.75
V 945	lámina	35.00
V 945	lámina	38.10
V 945	lámina	40.00
V 945	lámina	50.00
V 945	lámina	50.80
V 945	lámina	60.00
V 945	lámina	80.00
V 945	lámina	100.00
V 945	lámina	120.00

**\*Nota:**

Para pedido en lámina usted puede solicitar el ancho de platina que desea, el largo mínimo es un metro, en máquina sierracinta (corte en frío).

Para láminas de más de 30 mm. de espesor el servicio de corte es mediante oxicorte.

### BÖHLER E 910 cuadrado (AISI 1016)

ACERO	GEOMETRÍA	DIMENSIONES (mm)	PESO / METRO (kg)
E 910	cuadrado	4.76	0.18
E 910	cuadrado	6.40	0.32
E 910	cuadrado	7.90	0.49
E 910	cuadrado	9.50	0.71
E 910	cuadrado	12.70	1.27
E 910	cuadrado	15.90	2.00
E 910	cuadrado	19.10	2.88
E 910	cuadrado	22.20	3.89
E 910	cuadrado	25.40	5.10
E 910	cuadrado	31.80	7.99
E 910	cuadrado	38.10	11.47
E 910	cuadrado	50.80	20.39

ACERO	GEOMETRÍA	DIMENSIONES (mm)	PESO / METRO (kg)
V 945	redondo	12.70	1.00
V 945	redondo	15.90	1.57
V 945	redondo	20.00	2.48
V 945	redondo	22.20	3.06
V 945	redondo	25.40	4.00
V 945	redondo	28.00	4.86
V 945	redondo	28.60	5.08
V 945	redondo	29.00	5.22
V 945	redondo	30.00	5.58
V 945	redondo	31.80	6.27
V 945	redondo	34.90	7.56
V 945	redondo	38.00	8.96
V 945	redondo	40.00	9.93
V 945	redondo	45.00	12.56
V 945	redondo	50.00	15.51
V 945	redondo	50.80	16.01
V 945	redondo	52.00	16.78
V 945	redondo	55.00	18.77
V 945	redondo	57.10	20.23
V 945	redondo	60.00	22.34
V 945	redondo	63.50	25.02
V 945	redondo	65.00	26.21
V 945	redondo	70.00	30.40
V 945	redondo	75.00	34.90
V 945	redondo	76.20	36.03
V 945	redondo	80.00	39.71
V 945	redondo	85.00	44.83
V 945	redondo	90.00	50.26
V 945	redondo	100.00	62.05
V 945	redondo	105.00	68.41
V 945	redondo	110.00	75.08
V 945	redondo	115.00	82.06
V 945	redondo	120.00	89.35
V 945	redondo	130.00	104.86
V 945	redondo	140.00	121.61
V 945	redondo	150.00	139.60
V 945	redondo	155.00	149.07
V 945	redondo	160.00	158.84
V 945	redondo	170.00	179.31
V 945	redondo	180.00	201.03
V 945	redondo	190.00	223.99
V 945	redondo	200.00	248.19
V 945	redondo	210.00	273.63
V 945	redondo	230.00	328.23
V 945	redondo	250.00	387.79
V 945	redondo	280.00	486.45
V 945	redondo	300.000	558.42
V 945	redondo	310.00	596.27
V 945	redondo	330.00	675.69
V 945	redondo	350.00	760.07
V 945	redondo	400.00	992.75

## **ANEXO 4: Catálogo de ACEROS BÖHLER**

## Para los mejores del mundo

### TRATAMIENTOS TÉRMICOS

#### RECOCIDO

Es un TRATAMIENTO TÉRMICO que tiene como finalidad la disminución de dureza en los aceros recién fundidos, laminados o templados, obteniéndose una estructura más homogénea y haciendo que los aceros sean fácilmente maquinables.

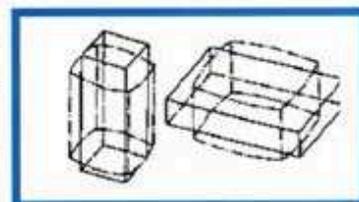
TIPO	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN
Recocido de homogeneización	Es un proceso que se realiza a altas temperaturas (1050 - 1200 °C) según el tipo de material, con un enfriamiento lento en el horno.	Para los aceros laminados en la laminación continua causada por segregaciones de los cristales. A este recocido se someten los productos laminados, forjados, fundidos, perforados, como también los lingotes de aceros laminados para disminuir la dureza y facilitar su desbastado antes de laminarlo.
Recocido de laminación	Es un proceso que se realiza a temperaturas por debajo de la transformación austenítica (550-650 °C) con un enfriamiento lento en el horno.	Es un proceso diseñado para atender las estructuras duras que se obtienen en la laminación en frío del acero o en el acabado en frío de alambres. Con este recocido se incrementa la tenacidad y la maquinabilidad del material.
Recocido de refinamiento	Este proceso se lo realiza eliminando los rangos de temperatura por debajo de la temperatura de transformación austenítica y por encima de la misma, además de un enfriamiento lento en el horno.	Con este proceso se obtiene la variación de la estructura perlítica en el acero desde tener hasta esfalerita. Este recocido aumenta la ductilidad, la maquinabilidad, además este estado es el más apropiado para operaciones de mecanizado y procesos de conformación en frío.
Normalizado	Es un proceso parecido al recocido de refinamiento, en cuanto a la temperatura de calentamiento (austenítico), sin embargo, en este se enfriamiento se realiza más rápido pudiendo realizar a temperatura ambiente.	Produce la normalización del acero y por lo tanto elimina la estructura de grano grueso que se tiene en los aceros que son fundidos o laminados. Se usa para mejorar las propiedades del acero fundido o laminado incrementando su tenacidad y ductilidad. Para los aceros de bajo carbono, aumenta la ductilidad pero garantiza la obtención de una superficie más limpia en el corte.



#### DISTENSIONADO

Es un TRATAMIENTO TÉRMICO que libera las tensiones internas del material las cuales son provocadas por soldaduras, maquinado intenso de la pieza de acero, geometras muy complejas, o el trabajo en sí de la pieza.

TIPO	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN
Distensionado por choque	Es un proceso que se realiza a temperaturas relativamente bajas, 500-600 °C, en este proceso se realiza un calentamiento en el horno, modificándose sus propiedades mecánicas como por ejemplo ductilidad y maquinabilidad.	Este proceso se utiliza para aliviar las tensiones originadas en el maquinado de una pieza o en el proceso de soldadura, con el fin de disminuir el riesgo de falla por acumulación de energía en concentradores de tensiones y en zonas de alta tensión térmica.
Distensionado de inducción	Es un proceso que se realiza a temperaturas relativamente bajas, 500-600 °C, en este proceso se realiza un calentamiento en el horno, modificándose sus propiedades mecánicas como por ejemplo ductilidad y maquinabilidad.	Este proceso se aplica para piezas que han sido sometidas a modificación por choque. Es a piezas que han cumplido tareas críticas de trabajo y se aplica con el fin de reducir las tensiones que se encuentran acumuladas debido al trabajo de la pieza.



#### TEMPLE

Es un TRATAMIENTO TÉRMICO que tiene como finalidad modificar la estructura del acero para así obtener diversas propiedades como aumento de dureza, aumento de resistencia mecánica, aumento de resistencia al desgaste, etc.

TIPO	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN
Temple superficial	Este proceso se realiza mediante un calentamiento superficial de la pieza mediante inducción de corriente eléctrica o mediante la aplicación directa de una flama alquímica, con un enfriamiento con una velocidad mayor que la crítica del material.	Este tratamiento se aplica en piezas en las cuales se requiere obtener una capa superficial dura con un núcleo tenaz, la cual también puede alcanzar profundidades, dependiendo del proceso utilizado, de hasta 2 mm de profundidad, como por ejemplo en ejes, bujes, cilindros de pistones de acero, etc.
Temple completo	Este proceso se realiza a toda la pieza, mediante un calentamiento por debajo de la temperatura de transformación austenítica, un calentamiento austenítico y un posterior enfriamiento a una velocidad mayor que la crítica del material.	Este tratamiento busca obtener un cambio estructural en el acero a fin de mejorar sus propiedades mecánicas de dureza, resistencia al desgaste, resistencia mecánica, ductilidad, tenacidad, etc., dependiendo del tipo de acero en el que se aplica, también las piezas y del tipo de temple que se aplica.
Normalizado	Es una operación final del tratamiento térmico que se realiza a media de acero que han sido templados y consiste en un calentamiento hasta una temperatura determinada por el tipo de acero y un posterior enfriamiento en un medio líquido (aire, horno).	El objetivo busca reducir o eliminar las tensiones internas que surgen en el acero durante el temple, eliminar la austenita retenida en el material, así como obtener en la pieza las propiedades requeridas de dureza y resistencia mecánica para el trabajo.



#### CEMENTACIÓN

Es un TRATAMIENTO TÉRMICO en el cual se introducen átomos de carbono en la superficie de un acero mediante temperatura con la finalidad de obtener en una misma pieza una capa superficial resistente al desgaste y un núcleo con alta tenacidad.

TIPO	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN
Cementación de alta dureza	La cementación de alta dureza superficial es un proceso que se realiza introduciendo a la pieza de acero en un medio de difusión de átomos de carbono a una temperatura por sobre la de transformación austenítica, según el tipo de acero, para obtener alta dureza en la capa superficial y tenacidad mecánica en el núcleo.	Este proceso está diseñado para obtener después del tratamiento termomecánico dos tipos de aceros, un fondo en un principio de hasta una pulgada, ya sea que gracias al momento del porcentaje de carbono en la capa superficial, este adquiere diferentes características mecánicas que el material que se encuentra por debajo de la capa cementada. El proceso de alta dureza está diseñado para piezas en las cuales se tiene alta exigencia de resistencia al desgaste superficial y alta tenacidad en el núcleo, por ejemplo: ejes, pistones de motor, muelles de válvulas de motor, etc.
Cementación de baja dureza	La cementación de baja dureza superficial es un proceso que se realiza introduciendo a la pieza de acero en un medio de difusión de átomos de carbono a una temperatura por sobre la de transformación austenítica, según el tipo de acero, para obtener alta dureza en la capa superficial y alta tenacidad en el núcleo.	Este proceso está diseñado para obtener después del tratamiento termomecánico dos tipos de aceros, un fondo en un principio de hasta una pulgada, ya sea que gracias al momento del porcentaje de carbono en la capa superficial, este adquiere diferentes características mecánicas que el material que se encuentra por debajo de la capa cementada. La cementación de baja dureza se utiliza en piezas en las cuales se necesita de resistencia mecánica de acuerdo con sobre la de resistencia al desgaste superficial, por ejemplo: ejes y resortes para locomotoras, resacas para trenes, etc.



#### NITRURACIÓN

Es un TRATAMIENTO TÉRMICO en el cual se introducen átomos de nitrógeno en la superficie de un acero mediante temperatura con la finalidad de obtener en una pieza una capa superficial con propiedades de resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión, sin cambiar las propiedades por debajo de la capa tratada.

TIPO	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN
Nitruración	La nitruración es un proceso de difusión de átomos de nitrógeno los cuales forman compuestos con los átomos de carbono del acero, obteniéndose un núcleo de hierro, nitrógeno de carbono, nitrógeno de tungsteno, etc. Los núcleos poseen una alta resistencia al desgaste y corrosión. Este proceso se realiza en un rango de temperatura desde 500 °C hasta 600 °C, con un tratamiento posterior en un baño de sales nitradas.	Al realizar la nitruración en el acero se forma una capa de difusión, la cual puede alcanzar espesores de hasta 0.5 mm y alcanzando durezas de hasta 900 HV (dependiendo de la cantidad de acero utilizado). A temperaturas muy por debajo de la de transformación austenítica, por lo cual no existe cambio estructural.
Nitruración de aceros inoxidables a baja temperatura	Este proceso se realiza a temperaturas menores que la transformación normal y es diseñado para los aceros inoxidables a la corrosión, por lo que, la nitruración a baja temperatura es adecuada para este tipo de aceros, la cual es la más apropiada para todas las características de la nitruración normal al afectar su resistencia a la corrosión.	En los aceros inoxidables la nitruración normal aporta una capa altamente resistente al desgaste, pero en detrimento de la resistencia a la corrosión, por lo que, la nitruración a baja temperatura es adecuada para este tipo de aceros, la cual es la más apropiada para todas las características de la nitruración normal al afectar su resistencia a la corrosión.



#### SUB CERO

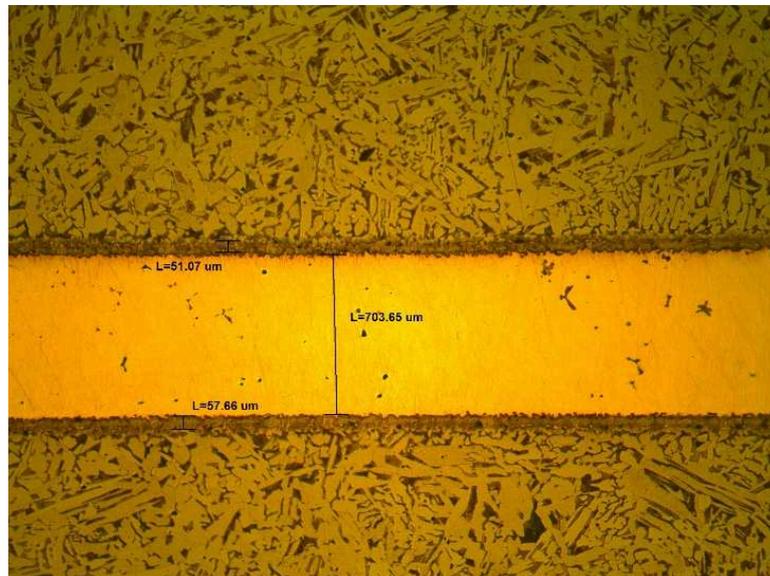
Es un TRATAMIENTO TÉRMICO que se realiza a temperaturas muy por debajo de los 0°C, provocando en las piezas de acero una homogeneización de su estructura y obteniéndose con ello mejora en sus propiedades de resistencia mecánica, resistencia a la fatiga, dureza, etc.

TIPO	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN
Sub-Cero	Este proceso se realiza a temperaturas muy por debajo de los 0°C y 40 a 140°C, con el fin de obtener una transformación total de la austenita presente en los aceros inoxidables laminados, como también como aceros cementados, y luego de lo cual se realiza una quench a temperatura ambiente y posterior proceso de revenido de acuerdo a la necesidad.	Este proceso homogeneiza la estructura interna del material con el fin de incrementar la resistencia mecánica, la resistencia a la fatiga y el impacto de la mayoría de los metales, aumento de dureza de los aceros templados de 1 a 3 puntos HRC, así como la resistencia al desgaste en más del 25% y aumento de la resistencia a la corrosión integral hasta en un 70%. Se lo puede realizar tanto a aceros inoxidables como a aceros cementados e incluye a piezas que ya han trabajado durante varias vidas y en las cuales se desea recuperar e incrementar sus propiedades.

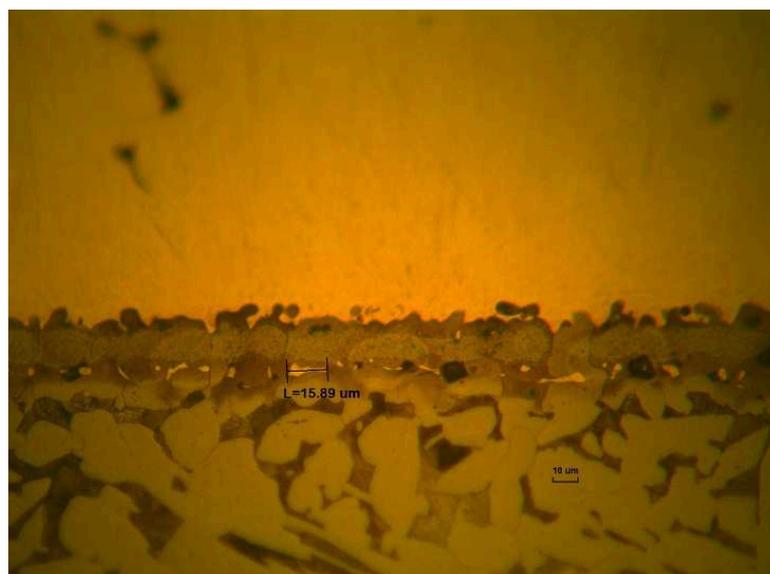




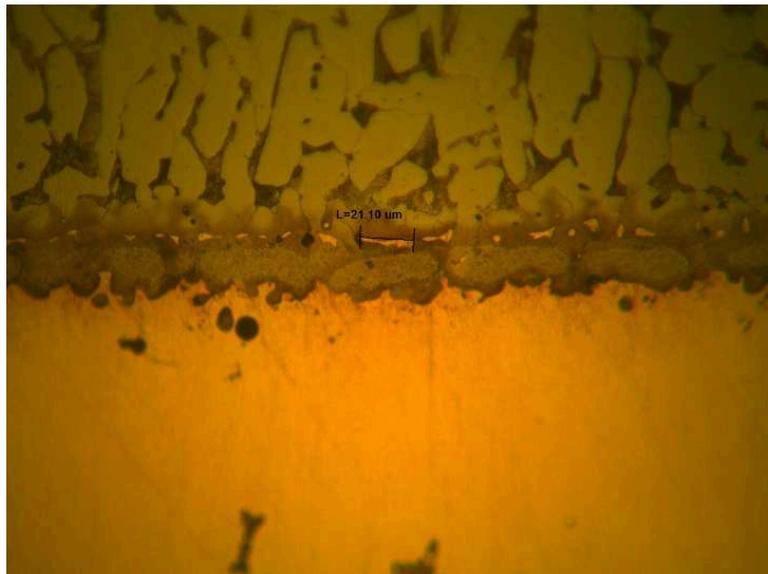
**ANEXO 5: Fotografías de microestructuras de la soldadura  
en acero ASTM A-36 con metal de aporte RBCuZn-C**



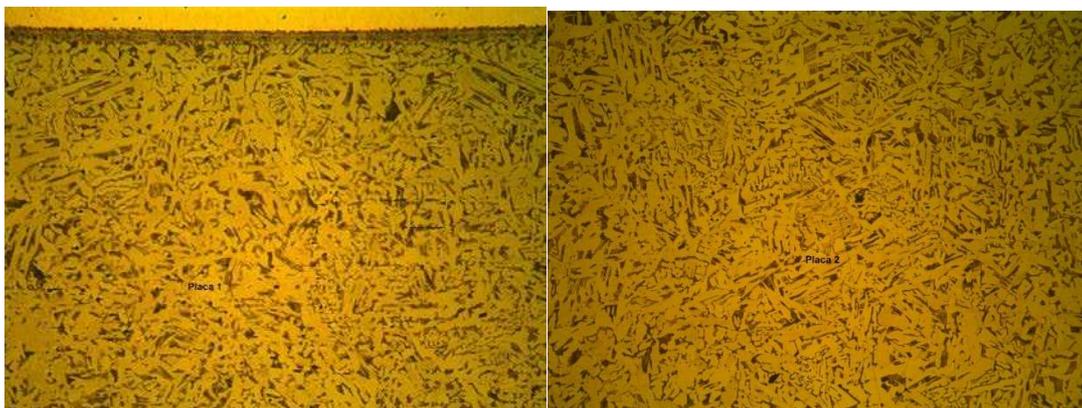
**Fotografía 1.** Unión soldada, amplificación 100x.



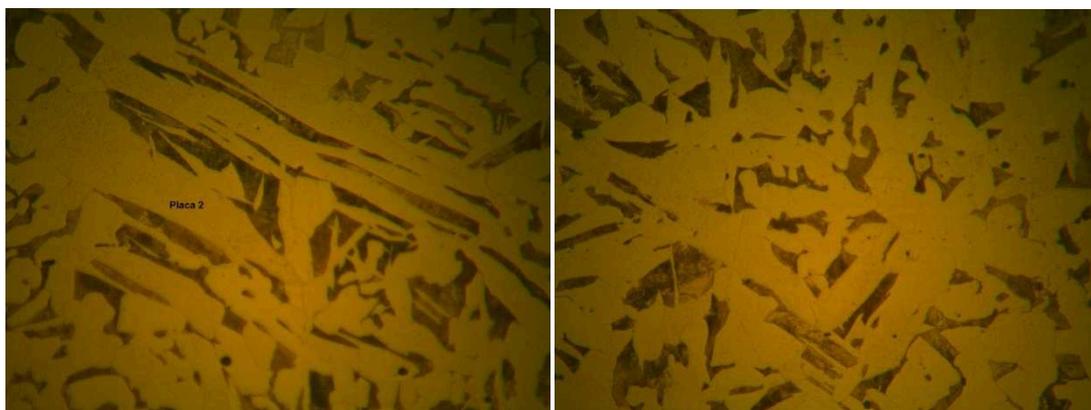
**Fotografía 2.** Difusión en la placa base 1, amplificación 500x.



**Fotografía 3.** Difusión en la placa base 2, amplificación 500x.



**Fotografía 4.** Microestructura de las placas base, de izquierda a derecha, placa base 1, placa base 2, amplificación 100x.

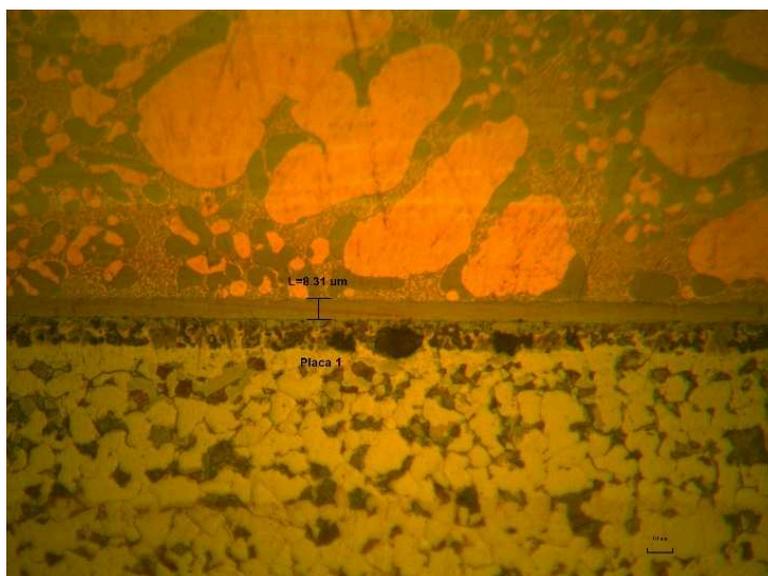


**Fotografía 5.** Microestructura de las placas base, de izquierda a derecha, placa base 1, placa base 2, amplificación 500x.

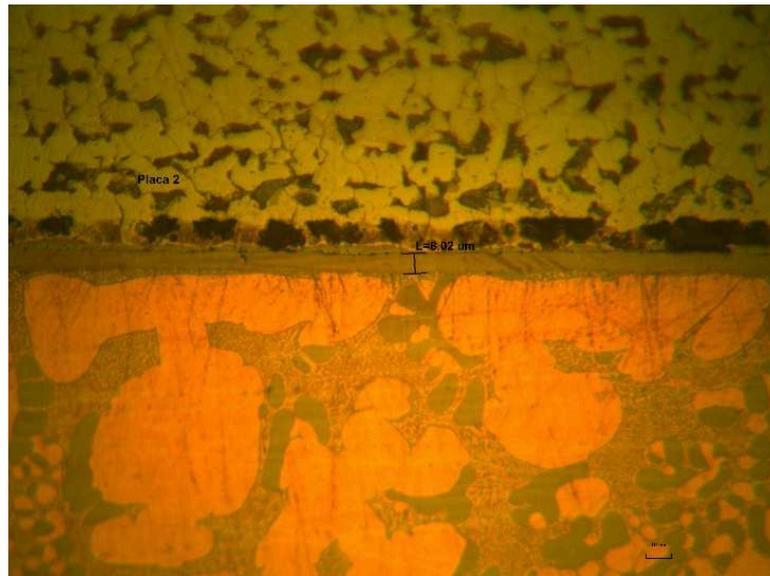
**ANEXO 6: Fotografías de microestructuras de la soldadura  
en acero ASTM A-36 con metal de aporte BCuP-3**



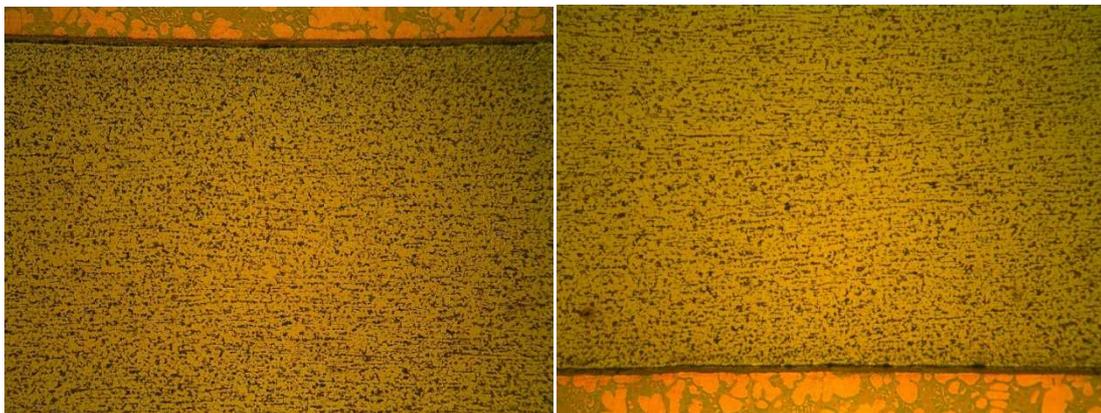
**Fotografía 6.** Unión soldada, amplificación 100x.



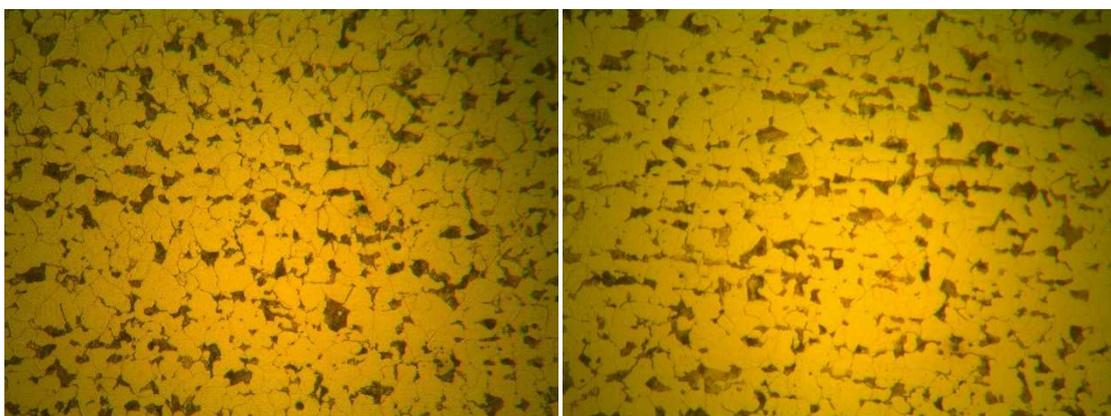
**Fotografía 7.** Intercara placa base 1, amplificación 500x.



**Fotografía 8.** Intercara placa base 1, amplificación 500x.



**Fotografía 9.** Microestructura de las placas base, de izquierda a derecha, placa base 1, placa base 2, amplificación 100x.

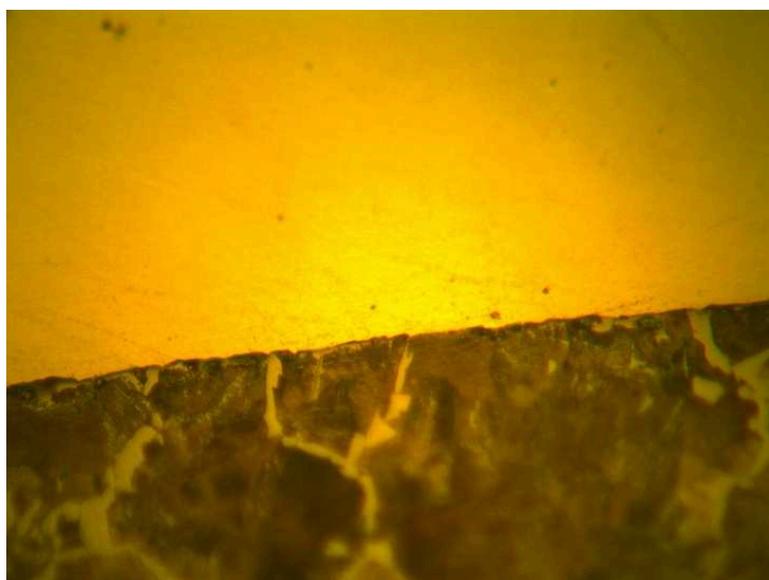


**Fotografía 10.** Microestructura de las placas base, de izquierda a derecha, placa base 1, placa base 2, amplificación 500x.

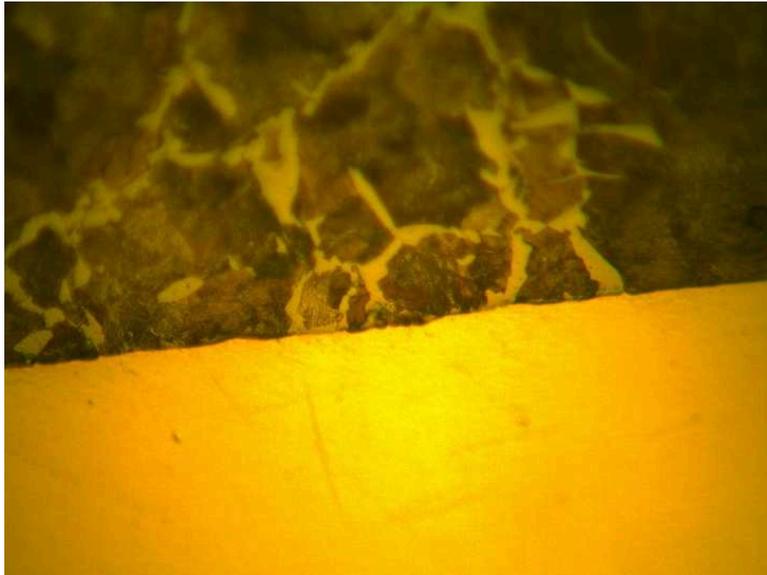
**ANEXO 7: Fotografías de microestructuras de la soldadura  
en acero SAE 1045 con metal de aporte RBCuZn-C**



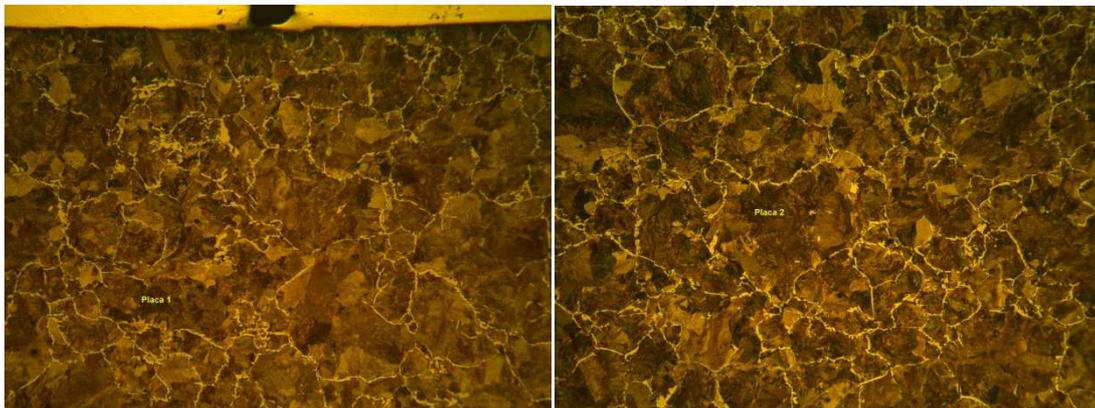
**Fotografía 11.** Unión soldada, amplificación 100x.



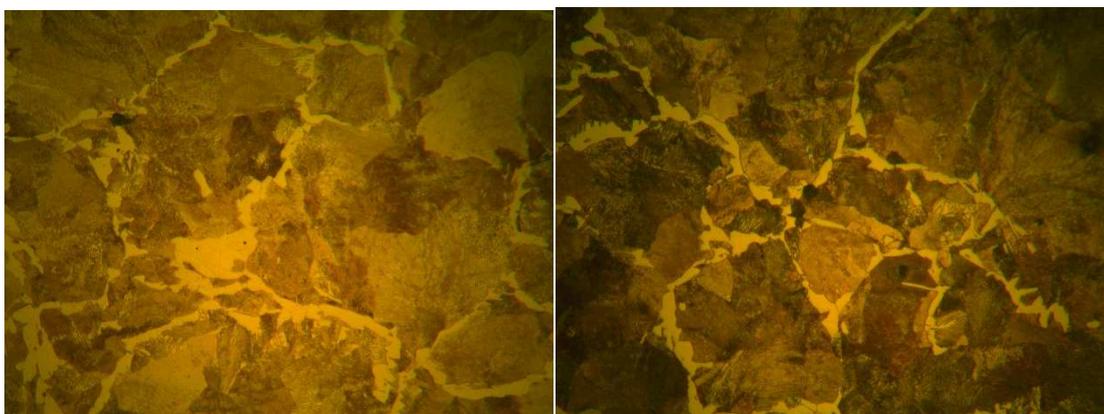
**Fotografía 12.** Intercara placa base 1, amplificación 500x.



**Fotografía 13.** Intercara placa base 2, amplificación 500x.



**Fotografía 14.** Microestructura de las placas base, de izquierda a derecha, placa base 1, placa base 2, amplificación 100x.

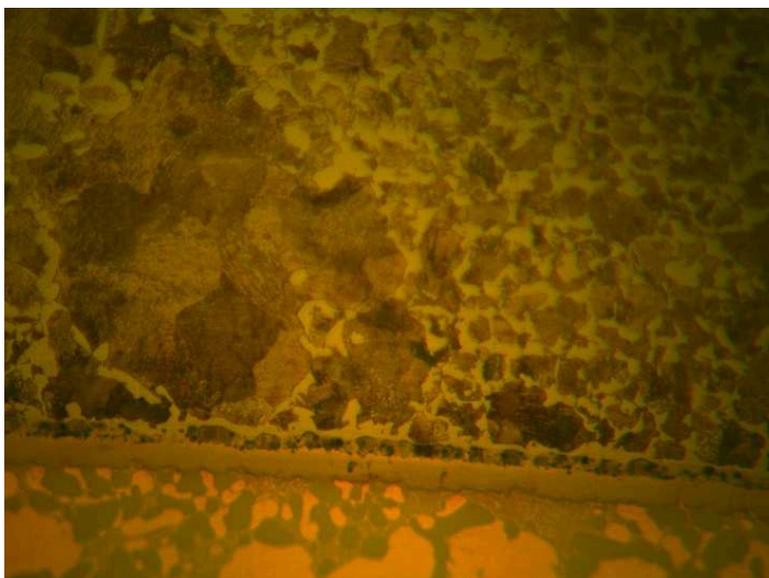


**Fotografía 15.** Microestructura de las placas base, de izquierda a derecha, placa base 1, placa base 2, amplificación 500x.

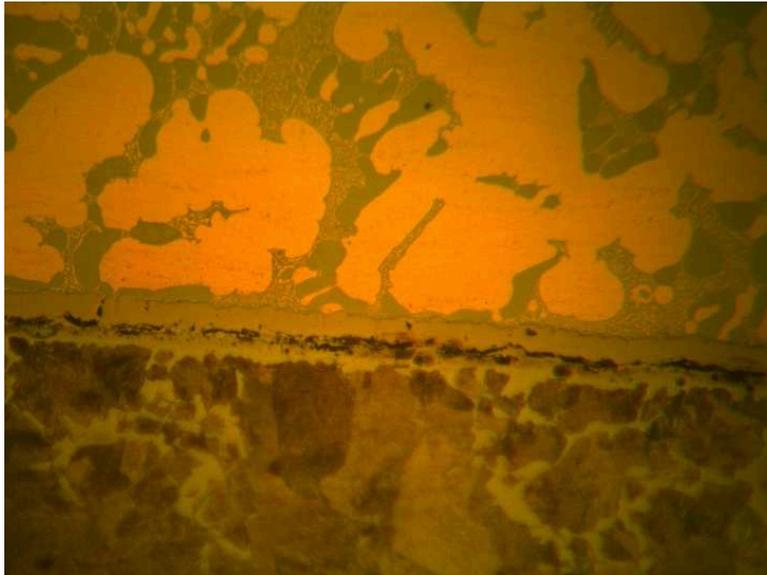
**ANEXO 8: Fotografías de microestructuras de la soldadura en acero SAE 1045 con metal de aporte BCuP-3.**



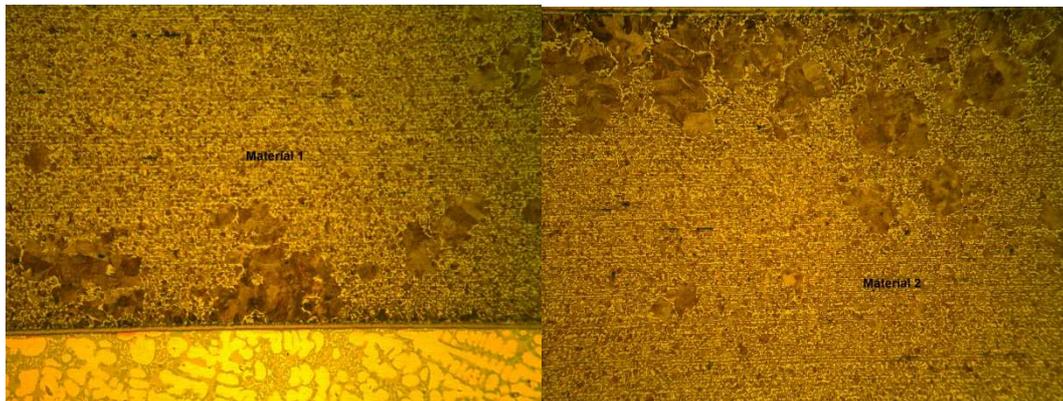
**Fotografía 16.** Unión soldada, amplificación 100x.



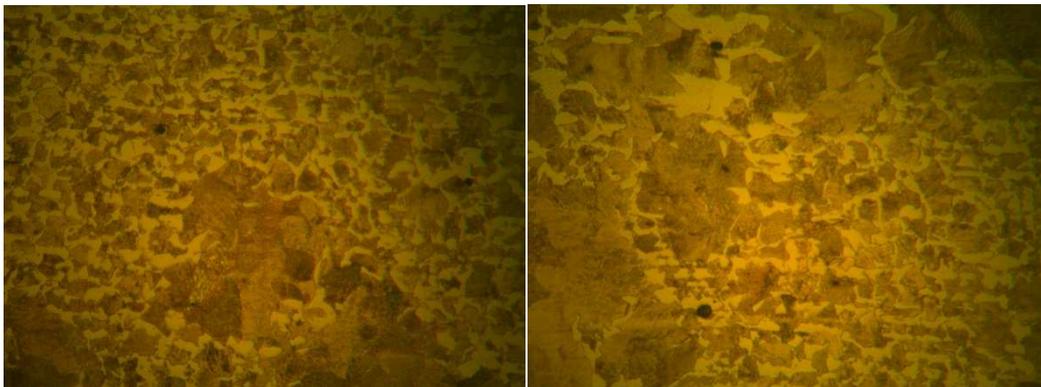
**Fotografía 17.** Intercara placa base 1, amplificación 500x.



**Fotografía 18.** Intercara placa base 2, amplificación 500x.

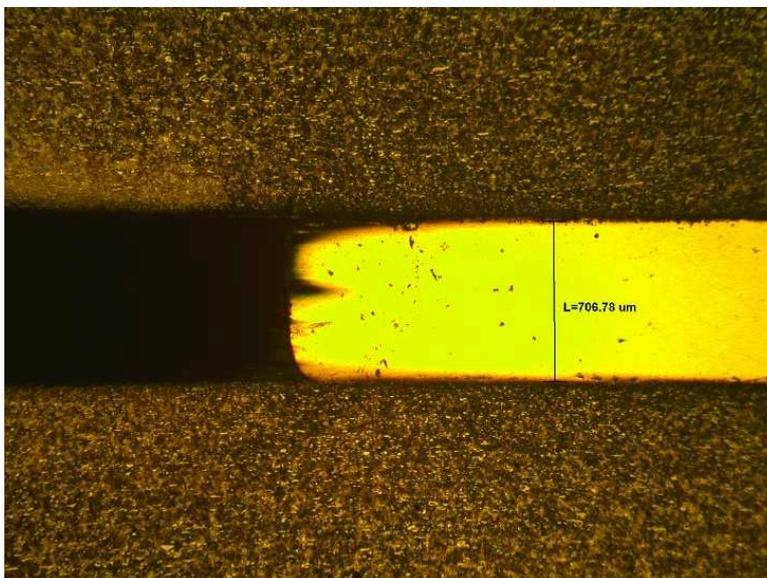


**Fotografía 19.** Microestructura de las placas base, de izquierda a derecha, placa base 1, placa base 2, amplificación 100x.

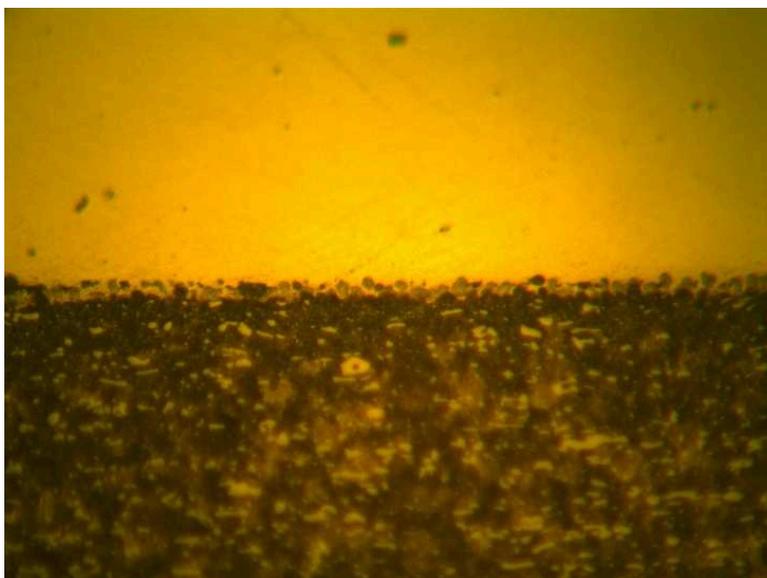


**Fotografía 20.** Microestructura de las placas base, de izquierda a derecha, placa base 1, placa base 2, amplificación 500x.

**ANEXO 9: Fotografías de microestructuras de la soldadura  
en acero BÖHLER K100 con metal de aporte RBCuZn-C**



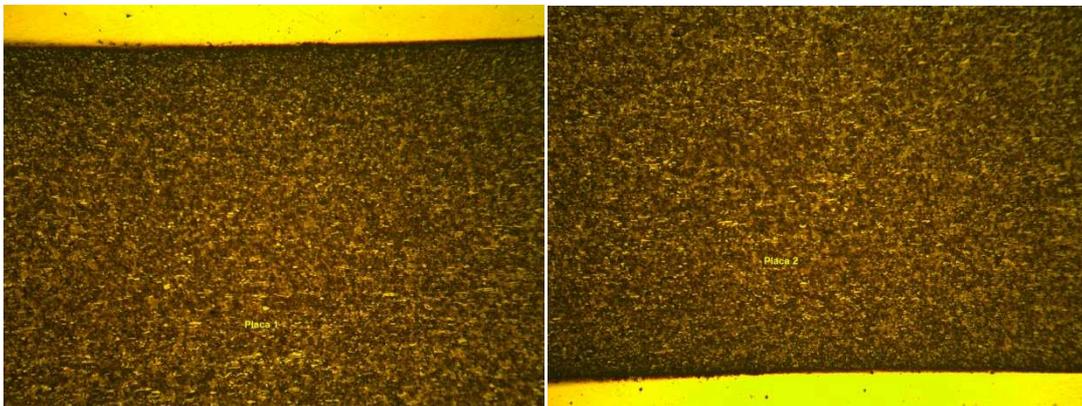
**Fotografía 21.** Unión soldada, amplificación 100x.



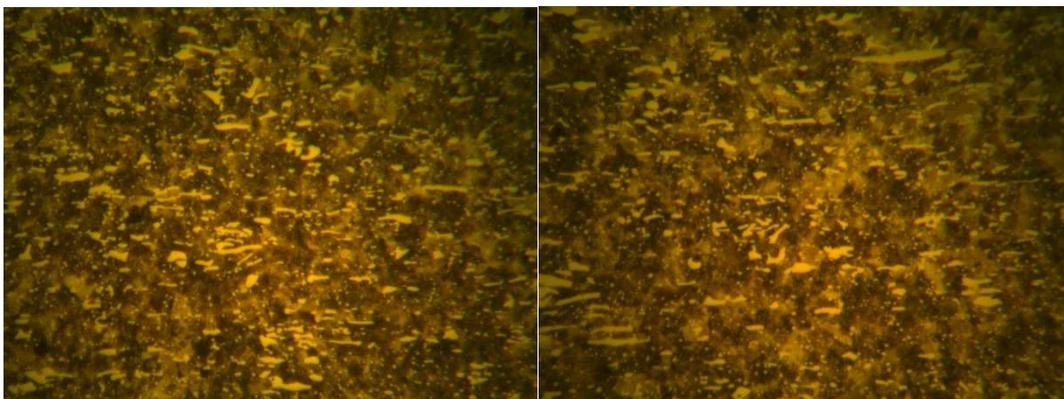
**Fotografía 22.** Intercara placa base 1, amplificación 500x.



**Fotografía 23.** Intercara placa base 2, amplificación 500x.

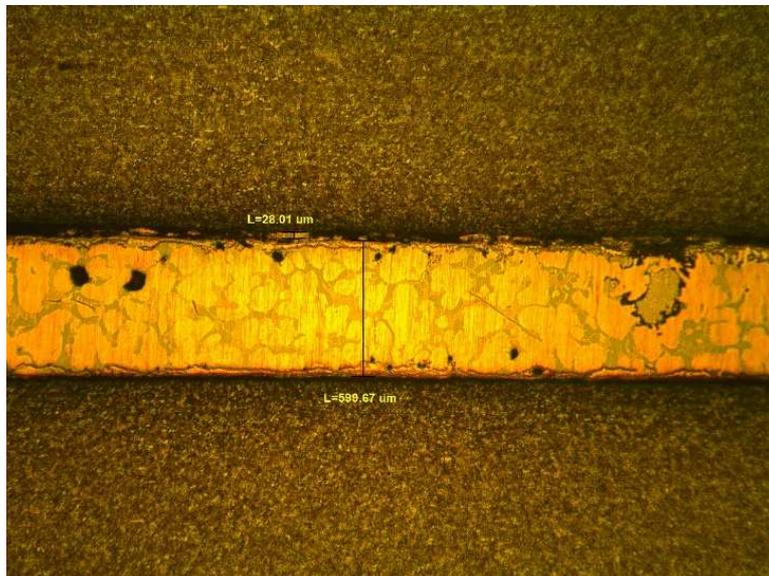


**Fotografía 24.** Microestructura de las placas base, de izquierda a derecha, placa base 1, placa base 2, amplificación 100x.

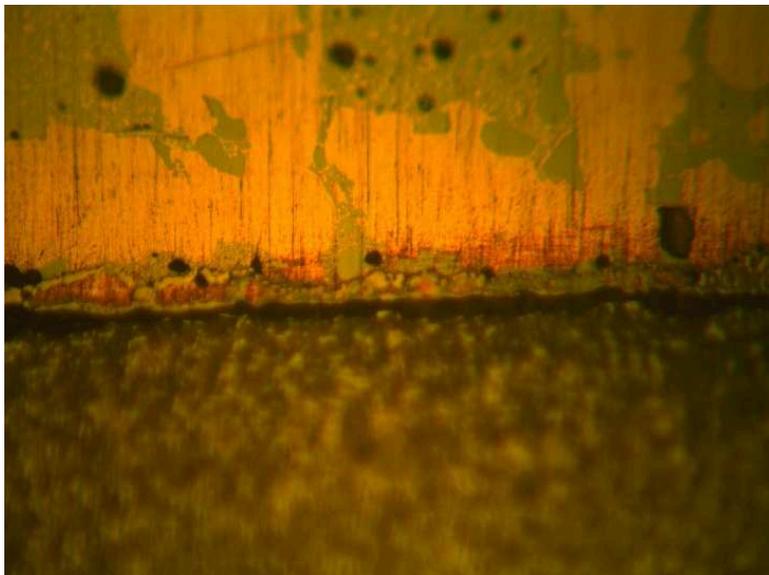


**Fotografía 25.** Microestructura de las placas base, de izquierda a derecha, placa base 1, placa base 2, amplificación 500x.

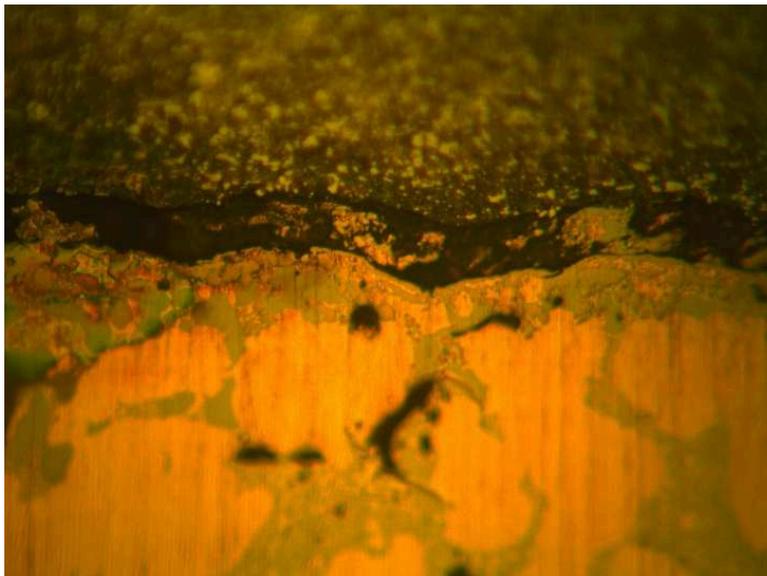
**ANEXO 10: Fotografías de microestructuras de la soldadura  
en acero BÖHLER K100 con metal de aporte BCuP-3**



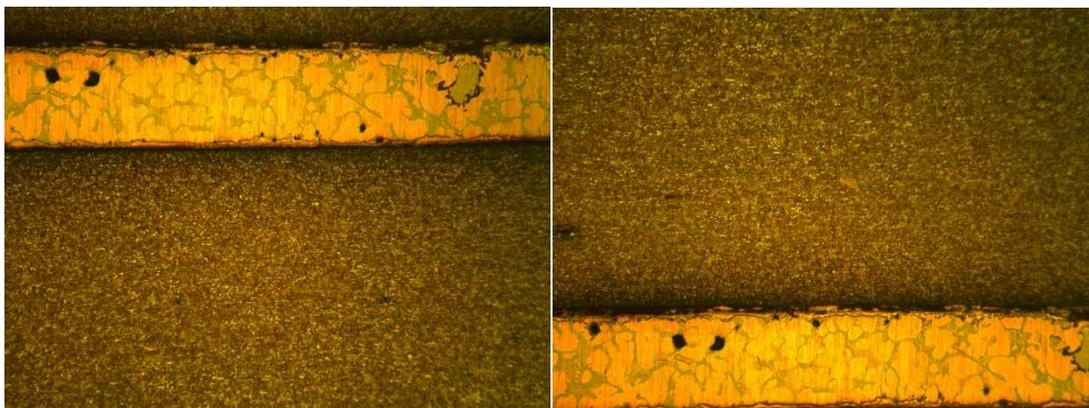
**Fotografía 26.** Unión soldada, amplificación 100x.



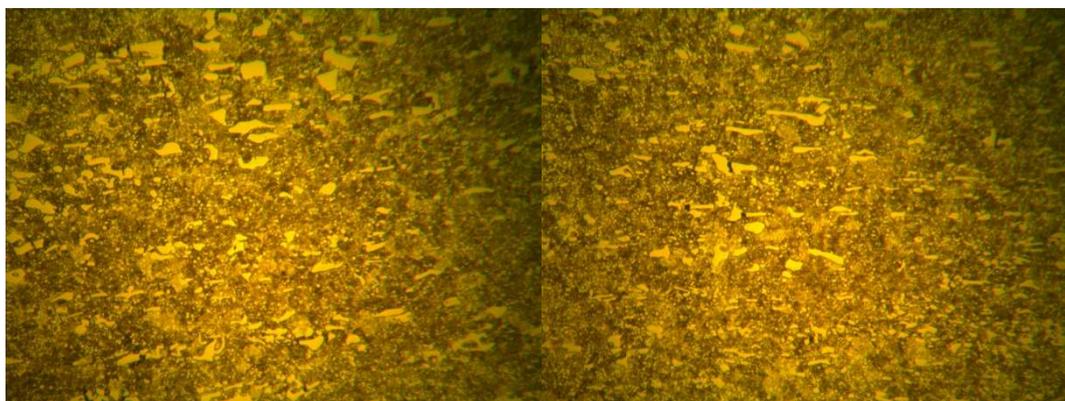
**Fotografía 27.** Intercara placa base 1, amplificación 500x.



**Fotografía 28.** Intercara placa base 2, amplificación 500x.



**Fotografía 29.** Microestructura de las placas base, de izquierda a derecha, placa base 1, placa base 2, amplificación 100x.



**Fotografía 30.** Microestructura de las placas base, de izquierda a derecha, placa base 1, placa base 2, amplificación 500x.

## **ANEXO 11: Fotografías de los hornos y probeta soldada**



**Fotografía 31.** Panel de control del horno de calentamiento.



**Fotografía 32.** Colocación de los tabiques refractarios en la cámara del horno.



**Fotografía 33.** Horno de tratamiento postsoldadura.



**Fotografía 34.** Probeta soldada.