

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN:

**APLICACIÓN DE LA
TECNOLOGÍA LÁSER
EN LA FABRICACIÓN
DE AUTOMÓVILES**

ÍNDICE GENERAL

1. DEFINICIÓN, OBJETIVOS Y FASES DEL PROYECTO	10
1.1 INTRODUCCIÓN	10
1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO	10
1.3 FASES DEL PROYECTO	11
1.4 PERSONAL IMPLICADO EN EL PROYECTO Y COLABORACIÓN CON EMPRESAS	12
2. FASE I: ESTADO DEL ARTE DE LA APLICACIÓN DEL LÁSER EN EL SECTOR DE LA AUTOMOCIÓN	14
2.1 FUNDAMENTOS DEL LÁSER	14
2.1.1. INTRODUCCIÓN	14
2.1.2 EL FENÓMENO DE LA EMISIÓN ESTIMULADA	14
2.1.3 ESTRUCTURA DE UN RESONADOR	16
2.1.4 INTERACCIÓN LÁSER MATERIA	17
2.1.5 FORMAS DE EMISIÓN DE UN LÁSER	18
2.1.6 PROPAGACIÓN Y FOCALIZACIÓN DEL HAZ	19
2.1.7 POLARIZACIÓN DEL HAZ	21
2.1.8 ABSORCIÓN DE LA ENERGÍA LÁSER: FORMAS DE DISTRIBUCIÓN Y PENETRACIÓN	21
2.2. TIPOS DE LÁSER UTILIZADOS EN SOLDADURA	22
2.2.1 EL LÁSER DE CO ₂	22
2.2.2 EL LÁSER DE Nd:YAG	25
2.3 ESTADO DEL ARTE DE LA SOLDADURA LÁSER	28
2.3.1 SOLDADURA POR CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	28
2.3.2 SOLDADURA POR KEY-HOLE.	28
2.3.3 MODOS DE EMISIÓN	29
2.3.4 GASES DE CONTROL Y PROTECCIÓN:	30
2.3.5 SOLDABILIDAD DE LOS MATERIALES	31
2.3.6 CONFIGURACIONES DE SOLDADURA	40
2.3.7. TOLERANCIAS	44
2.3.8 DEFECTOS ESTRUCTURALES EN LAS SOLDADURAS REALIZADAS POR LÁSER	47

3. FASE II: ESTUDIO DE LA SITUACIÓN DE LA APLICACIÓN DEL LÁSER EN EL MERCADO ESPAÑOL	50
3.1. INTRODUCCIÓN.	50
3.2 SITUACIÓN DEL MERCADO INTERNACIONAL.	51
3.2.1 EVOLUCIÓN DEL MERCADO MUNDIAL DE LÁSERES COMERCIALES.	51
3.2.3 CAMPOS DE APLICACIÓN DEL LÁSER A NIVEL MUNDIAL.	52
3.3 MERCADO DEL LÁSER PARA APLICACIONES INDUSTRIALES.	54
3.3.1 EVOLUCIÓN DEL MERCADO INTERNACIONAL.	54
3.3.2 TIPOS DE LÁSERES UTILIZADOS EN EL PROCESADO DE MATERIALES.	55
3.4 DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DEL MERCADO DE LÁSERES INDUSTRIALES. SITUACIÓN EN EUROPA.	56
3.4.1 PRODUCCIÓN MUNDIAL DE LÁSERES INDUSTRIALES.	56
3.4.2 DISTRIBUCIÓN MUNDIAL DE INSTALACIONES DE LÁSERES INDUSTRIALES.	58
3.5 APLICACIONES LÁSER EN EL PROCESADO DE MATERIALES.	60
3.6 DATOS ESTADÍSTICOS DE INSTALACIONES LÁSER EN ESPAÑA.	62
3.7 DATOS DE COMUNIDADES AUTÓNOMAS.	66
3.7.1 ARAGÓN.	66
3.7.2. CASTILLA Y LEÓN.	67
3.7.3 CATALUÑA	68
3.7.4 NAVARRA.	71
3.7.5 PAÍS VASCO.	73
3.8 FABRICANTES Y SUMINISTRADORES DE EQUIPOS Y SISTEMAS LÁSER EN ESPAÑA.	75
3.9 CONCLUSIONES.	77
4.9 PRINCIPALES CARENCIAS Y PROPUESTAS DE ACTUACIÓN.	80
4.9.1 PRINCIPALES CARENCIAS IDENTIFICADAS.	80
4.9.2 PROPUESTAS DE ACTUACIÓN.	80
4. FASE III: ESTUDIO DE LA SOLDADURA 3D PARA EL SECTOR DE LA AUTOMOCIÓN	82
4.1. REVISIÓN HISTÓRICA DE LA APLICACIÓN DEL LÁSER EN EL SECTOR DEL AUTOMÓVIL.	82

4.2 COMPARATIVA ENTRE LOS DISTINTOS TIPOS DE UNIÓN.	85
4.3. DETERMINACIÓN DE LOS REQUISITOS MÍNIMOS EN LA PREPARACIÓN DE UNIONES.	86
4.4. PREPARACIÓN DE UNIONES ENTRE CHAPA BASE Y REFUERZOS EN UNIONES ENGRAPADAS	88
4.4. DISEÑO DE UTILLAJES	90
4.5. ELECCIÓN DEL CABEZAL DE SOLDADURA	93
4.6 INFLUENCIA DE LA UTILIZACIÓN DE DIFERENTES GASES EN LA SOLDADURA.	95
5. FASE IV: VALORACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE SOLDADURA DE TECHOS DE AUTOMÓVIL CON CHAPA Y CHAPA ZINCADA	100
5.1 LA CHAPA ZINCADA EN EL SECTOR DE LA AUTOMOCIÓN	100
5.2 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL Y LAS PRUEBAS	101
5.3 PROCEDIMIENTO DE ENSAYO MACROSCÓPICO	109
5.3.1 MÉTODO DE MUESTREO.-	109
5.3.2 PROCEDIMIENTO DE TRABAJO	110
5.3.3 CONDICIONES DE ENSAYO	110
5.3.4 CRITERIOS DE EVALUACIÓN	110
5.4. EXAMEN MICROSCÓPICO	112
5.4.1 MÉTODO DE MUESTREO.-	112
5.4.2 PROCEDIMIENTO DE TRABAJO	113
5.4.3 CONDICIONES DE ENSAYO	116
5.4.4 CRITERIOS DE EVALUACIÓN.-	116
5.5 ENSAYO DE MICRODUREZA	116
5.5.1 MÉTODO DE MUESTREO.-	116
5.5.2 PROCEDIMIENTO DE TRABAJO	117
5.5.3 CONDICIONES DE ENSAYO.-	118
5.5.4 CRITERIOS DE EVALUACIÓN.-	118
5.6. ENSAYO DE TRACCIÓN TRANSVERSAL	119
5.6.1 MÉTODO DE MUESTREO	119
5.6.2 PROCEDIMIENTO DE TRABAJO	119
5.6.3 CONDICIONES DE ENSAYO	120

5.6.4 CRITERIOS DE EVALUACIÓN.-	120
5.7 CONCLUSIONES	121
6. estudio de la realización y mejora de la soldadura de tailored blanks	132
6.1 INTRODUCCIÓN	132
6.2. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA	133
6.2.1 DESCRIPCIÓN DE LA GEOMETRÍA	133
6.2.3 MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS	134
6.2.4 PARÁMETROS FUNCIONALES	136
6.3 ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS	144
6.3.1 OBSERVACIÓN MACRÓSCOPICA	144
6.3.2 RESULTADOS DE LA OBSERVACIÓN RADIOGRÁFICA DE LAS MUESTRAS	145
6.3.3 RESULTADOS DE LA OBSERVACIÓN MICROSCÓPICA DE LAS MUESTRAS	147
2.3.4 RESULTADOS DEL ENSAYO DE EMBUTICIÓN (TEST "OLSEN"):	156
2.4 CONCLUSIONES DE LOS ENSAYOS REALIZADOS	156
6.5 IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE SEGUIMIENTO "ON LINE" PARA EL CONTROL DE LA SOLDADURA.	157
6.5.1 IMPLEMENTACIÓN DEL EQUIPO DE MONITORIZACIÓN PROMETEC	157
6.5.2. INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE MONITORIZACIÓN PROMETEC (T330)	158
6.5.3 IMPLEMENTACIÓN DEL EQUIPO DE MONITORIZACIÓN JURCA	159
6.6 CONFRONTACIÓN DE LOS REGISTROS OBTENIDOS CON LA MONITORIZACIÓN:	162
6.6.1 EXAMEN RADIOGRÁFICO DE LAS MUESTRAS	163
6.6.2 EXAMEN METALOGRÁFICO DE LAS MUESTRAS	165
7. FASE VI: ACCIONES DE DIFUSIÓN DEL PROYECTO	177
7.1 TIPOS DE CURSOS STANDARD	177
7.1.1 CURSO DE INTRODUCCIÓN A LAS APLICACIONES INDUSTRIALES DEL LÁSER	178
7.1.2 OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS DE CORTE Y SOLDADURA	179
7.2 CURSOS REALIZADOS DURANTE 2001	180
7.3 CURSOS , JORNADAS Y CONGRESOS REALIZADOS DURANTE 2002	181

ÍNDICE DE IMÁGENES

FIG. 2.1: esquema de la emisión estimulada	15
Fig. 2.2: esquema de un resonador	17
Fig. 2.3: gráfica de absorción en función de la longitud de onda	18
Fig. 2.4: esquema de focalización de un haz	19
Fig. 2.5: polarización de un haz	21
Fig. 2.6 láser de flujo axial rápido modelo tlf de trumpf	24
Fig. 2.7 esquema de un resonador tipo slab.	28
Fig 2.8 Interior De Un Slab	24
Fig. 2.9 esquema de un láser de nd:yag bombeado por lámparas	26
Fig. 2.10 esquema de un láser de nd:yag bombeado por diodos	27
Fig. 2.11 soldadura por conductividad térmica	28
Fig. 2.12 soldadura por key-hole	33
Fig. 2.13 key hole en una soldadura a testa	29
Fig. 2.14 soldadura por contacto	42
Fig. 2.15 soldadura de tailored-blanks	43
Fig. 2.16 soldadura por transparencia	43
Fig. 2.17: soldadura por flanco	43
FIG. 2.18: soldadura a canto	43
FIG. 2.19: soldadura en t	44
Fig. 2.20 soldadura con filete	44
Fig. 2.21 tolerancia en el gap en una soldadura a testa	44
Fig. 2.22: tolerancia de mismatch	45
FIG. 2.23 tolerancia angular	45
Fig. 2.24 undercut en una soldadura por solape	46
Fig. 2.25 undercut en una soldadura por solape	46
Fig. 2.26 undercut en una soldadura por solape	47
Fig. 2.27 mismatch en una soldadura por solape	47
Fig. 3.1: evolución de ventas de láseres comerciales a nivel mundial.	51
Fig 3.2: : distribución, por campos de aplicación, de ventas de láseres comerciales a nivel mundial 2002.	53
Fig 3.3 : distribución de ventas por campos de aplicación a nivel mundial 2002.	54

Fig 3.4: evolución de las ventas de láseres para procesamiento de materiales.	
Millones de \$	55
Fig. 3.5: distribución por tipo de láser de ventas de láseres para procesamiento de materiales a nivel mundial durante el 2002	56
Fig 3.6: distribución geográfica de la producción mundial de láseres industriales. 2000 y 2001.	57
Fig 3.7: distribución geográfica de la producción mundial de láseres co2 y estado sólido. 2000	58
Fig 3.8: distribución geográfica de instalaciones láser a nivel mundial en el año 2000.	58
Fig 3.9: distribución por países de los láseres industriales de co ₂ de > 1kw.1999	59
Fig 3.10: número de instalaciones láser industriales por aplicación.	60
Fig 3.11: sectores industriales de aplicación del láser (cifra de ventas)	62
Fig. 3.13: distribución de instalaciones láser para procesamiento de materiales (excluido el mercado) en España.	63
Fig 3.14: distribución de los equipos láser por tipo de aplicación.	64
Fig. 3.15 distribución española de los equipos láser por medio activo según suministradores de gas.	65
Fig. 3.17: distribución por aplicaciones de equipos láser instalados en la comunidad de Aragón.	66
Tabla 3.3: instalaciones láser en Castilla y León	68
Fig. 3.18: distribución de láseres de potencia por provincias	69
Fig. 3.19: distribución de láseres de potencia por aplicación	70
Fig. 3.20: distribución por provincias de instalaciones láser en el País Vasco.	74
Fig. 4.1 esquema de la instalación de soldadura de SEAT	84
Fig. 4.2 interior de la cabina de soldadura de los modelos Ibiza y Córdoba	85
Fig. 4.3: porosidades por efecto del Zn en una chapa electrozincada	87
Fig. 4.5: detalle de diversos ejemplos de uniones engrapadas	88
Fig. 4.5: radio mínimo en una unión engrapada	89
Fig. 4.6: utillaje experimental para la soldadura de probetas en chapa plana	90
Fig. 4.7: utillaje experimental para la soldadura de puertas de automóvil	91
Fig. 4.8: soldadura de techos de carrocería con pre-punteo TIG	91

Fig. 4.9: esquema de un cabezal de soldadura	93
Fig. 4.10: diferentes perspectivas de un cabezal de soldadura.	95
Fig. 4.11 influencia del gas en la penetración para un láser de CO_2	97
Fig. 5.1 ejemplo de utillaje industrial para mantener el gap	101
Fig. 5.1: posiciones de las huellas individuales	117
Fig. 5.2: efecto de la variación del gap	123
Fig. 5.3: efecto de la variación de potencia-1	125
Fig. 5.4: efecto de la variación de velocidad-1	126
Fig. 5.5: efecto de la variación de velocidad-2	127
Fig. 5.6: efecto de la variación de velocidad-3	128
Fig. 5.8: parametrizaciones óptimas-2	130
Fig. 5.9: parametrizaciones óptimas-3	131
Fig. 6.1: clasificación de los "tailored blanks" en función de los porcentajes de fabricación	132
Fig. 6.2: geometría de las piezas a soldar	133
Fig. 6.3: esquema de la boquilla utilizada	136
Fig. 6.4: variación del decalaje	139
Fig. 6.9: microfotografía de una soldadura sin defectos apreciables (x40)	149
Fig. 6.10: detalle del cordón de soldadura de la figura 6.9 (x80)	149
Fig. 6.11: muestra sometida a ensayo de embutición	150
Fig. 6.12: detalle de la zona de rotura de una muestra sometida a ensayo de embutición (x40)	150
Fig. 6.13 muestra de un ensayo de embutición sobre una muestra con mordedura	151
Fig. 6.14: microfotografía de una soldadura con solapamiento (506)	152
Fig. 6.15: microfotografía de una soldadura con falta de fusión (401)	152
Fig. 6.16: microfotografía de una soldadura con mordedura (5011)	153
Fig. 6.17: microfotografía de una soldadura con poro (2011)	153
Fig. 6.18: microfotografía de una soldadura con sopladura (200)	154
Fig. 6.19: microfotografía de una soldadura con falta de fusión en los bordes (4011)	154
Fig. 6.20: microfotografía de una soldadura con falta de penetración (402)	155
Fig. 6.21: microfotografía de una soldadura con sopladura vermicular (2016)	155

Fig. 6.22: microfotografía de una soldadura con sopladura vermicular (2016)	156
Fig. 6.23: esquema de instalación del sistema de monitorización prometec	159
Fig. 6.24: esquema de la disposición de los detectores	160
Fig. 6.25: vista inferior de la disposición de los detectores	161
Fig. 6.27: vista frontal de la disposición de los detectores.	161
Fig. 6.28: microfotografía de la muestra ii 203 a	168
Fig. 6.29: microfotografía de la muestra ii 204 a	168
Fig. 6.30: microfotografía de la muestra ii 205 a	169
Fig. 6.31: microfotografía de la muestra ii 216 a	169
Fig. 6.32: microfotografía de la muestra ii 302 a	170
Fig. 6.33: microfotografía de la muestra ii 311 a	170
Fig. 6.34: microfotografía de la muestra ii 311 a	171
Fig. 6.35: microfotografía de la muestra ii 315 a	171
Fig. 6.36: microfotografía de la muestra ii 207 b	172
Fig. 6.37: microfotografía de la muestra ii 213 b	172
Fig. 6.38: microfotografía de la muestra ii 213 b	173
Fig. 6.39: microfotografía de la muestra ii 307 b	173
Fig. 6.40: microfotografía de la muestra ii 307 b	174
Fig. 6.40: microfotografía de la muestra ii 311 b	174

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: absorción de los materiales en función del tipo de láser	18
Tabla 2.2 comparativa bombeo por diodos-lámparas	27
Tabla 2.3: tolerancias en el posicionado	45
Tabla 3.1: ventas mundiales de equipos láser por campos de aplicación (miles de millones de euros).	52
Tabla 3.12. Estadística de aplicaciones en españa	63
Tabla 3.4: ingenierías en el país vasco	75
Tabla 4.5 fabricantes y distribuidores de resonadores.	77
Tabla 4.1: comparativa entre pre-puntear con tig, pre-puntear con láser y no puntear.	92
Tabla 5.1: esquema de la variación de parámetros-1	102
Tabla 5.2: esquema de la variación de parámetros-1	103
Tabla 5.3: esquema de la variación de parámetros-3	104
Tabla 5.4: esquema de la variación de parámetros-4	105
Tabla 5.5: esquema de la variación de parámetros-5	106
Tabla 5.6: esquema de la variación de parámetros-6	107
Tabla 5.7: listado de probetas metalográficas	115
Tabla 5.8: probetas de tracción transversal	119
TABLA 5.9: valores de rendija	122
Tabla 6.1: formato original de las piezas a soldar	134
Tabla 6.2: formato final de las piezas a soldar	134
Tabla 6.3: parámetros óptimos de soldadura	140
Tabla 6.5: resultados de la observación macroscópica	145
Tabla 6.6: resultados de la observación radiográfica	147
TABLA 6.7: DEFECTOS OBSERVADOS	151
Tabla 6.8: descripción de la nomenclatura utilizada en las tablas 6.9 y 6.10	163
Tabla 6.9: resultados de la observación radiográfica para muestras del tipo a	164
Tabla 6.10: resultados de la observación radiográfica para muestras del tipo b	165
Tabla 6.11 resultados de la observación microscópica	167

1. DEFINICIÓN, OBJETIVOS Y FASES DEL PROYECTO

1.1 INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos importantes de los fabricantes del automóvil es el de fabricar vehículos con altas prestaciones de seguridad y baja emisión de contaminantes como consecuencia de reducir los consumos de combustibles.

Para ello deben reducir el peso del vehículo sin perder prestaciones de seguridad, introduciendo nuevos diseños, materiales y tecnologías de fabricación de carrocerías. Entre otros métodos, se emplean aceros de alta resistencia, paneles soldados de aceros de diferentes espesores y materiales (TAILORED BLANKS, PATCHWORKS), o estructuras ligeras (HIDROFORMING).

Una de las nuevas tecnologías que permite conseguir estos objetivos es la soldadura láser, que está experimentando un gran progreso y una implantación cada vez mayor en la producción de piezas de carrocería de automóviles. La novedad y complejidad de esta tecnología hace que la optimización del proceso de soldadura sea difícil, interviniendo muchos y muy complejos factores.

Algunas de las ventajas de la soldadura láser son su gran flexibilidad, eficacia, minimización de la afectación térmica y de las deformaciones del material, manteniendo unas velocidades de proceso elevadas. Sin embargo, todavía es una tecnología cara, especialmente en las aplicaciones que requieren la utilización de helio como gas de protección.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

En este proyecto de investigación pre-competitiva, se han analizado en profundidad tres tipos diferentes de soldadura por láser de chapa zincada: soldadura a testa, soldadura por transparencia y soldadura con aporte de material. Estos métodos se utilizan para fabricar diferentes piezas de la carrocería.

Concretamente, los objetivos del proyecto han consistido en:

- Determinación de los requisitos de la materia prima, de posicionamiento y de equipos láser
- Optimización del proceso y determinación de los parámetros óptimos de soldeo
- Determinación de la influencia del gas de protección en la calidad de la soldadura
- Definición sistemática de la búsqueda de parámetros de soldeo para nuevas fabricaciones
- Difusión del know-how obtenido en el proyecto

Las aplicaciones estudiadas han sido:

- Soldadura en 2D a testa: , carrocería de automóviles y tailored blanks
- Soldadura en 3D: soldadura de paneles (techos y laterales) y soldadura por transparencia del canal vierteaguas
- Soldadura con aporte de material: soldadura de paneles (techos y laterales)

1.3 FASES DEL PROYECTO

El proyecto se ha estructurado en fases o hitos diferentes.

- Fase I: Estudio del estado del arte de la aplicación industrial de la soldadura por láser:
- Fase II: valoración de la implantación de la tecnología láser en España, en comparación con el resto de Europa y el mundo, estableciendo las tendencias de futuro y medidas de difusión a aplicar.
- Fase III: Parametrización y optimización de la soldadura 3D para el sector de la automoción. Realización de ensayos y colaboración con empresas para definir los requisitos necesarios en cuanto a:
 - 1.1. Soldabilidad de los materiales
 - 1.2. Juntas de unión soldables
 - 1.3. Requisitos de los sistemas de soldadura
 - 1.4. Influencia de los recubrimientos
 - 1.5. Efecto de la variación de los parámetros de soldadura
 - 1.6. Influencia del gas de aporte en la penetración de la soldadura

- Fase IV: Estudio del comportamiento de la soldadura de chapa zincada en el sector de la automoción
- Fase V: Optimización de procesos de soldadura de tailored blanks
- Fase VI: difusión de los resultados a través de curso, congresos y jornadas técnicas.

1.4 PERSONAL IMPLICADO EN EL PROYECTO Y COLABORACIÓN CON EMPRESAS

El equipo formado para la realización del proyecto ha sido:

- Francesc Tarongí
Director del proyecto
Ingeniero Informático
Gerente del Centro de Aplicaciones del Láser y Metalurgia de LGAI
- Elisabet Ribera
Investigador del equipo técnico
Dra. en Ciencias Químicas
Responsable de Innovación del Centro de Aplicaciones del Láser y Metalurgia de LGAI
- Juan Carlos Sánchez
Investigador del equipo técnico
Ingeniero Superior en Ingeniería Mecánica
Responsable de Ingeniería del Centro de Aplicaciones del Láser y Metalurgia de LGAI
- Fernando Sierra
Investigador del equipo técnico
Licenciado en Ciencias Físicas
Técnico del área de Innovación y Procesos Láser del Centro de Aplicaciones del Láser y Metalurgia de LGAI

- Jesús Ariño

Investigador del equipo técnico

Licenciado en Ciencias Físicas

Responsable de Formación del Centro de Aplicaciones del Láser y Metalurgia de LGAI

- Iban González

Investigador del equipo técnico

Licenciado en Ciencias Químicas

Técnico del área de Metalurgia del Centro de Aplicaciones del Láser y Metalurgia de LGAI

- Joan Lluís Martí

Investigador del equipo técnico

Licenciado en Ciencias Químicas

Técnico del área de Metalurgia del Centro de Aplicaciones del Láser y Metalurgia de LGAI

- Rafael Martínez

Investigador del equipo técnico

Licenciado en Ciencias Químicas

Responsable del área de Metalurgia del Centro de Aplicaciones del Láser y Metalurgia de LGAI

La realización del proyecto se ha llevado a cabo en:

- Instalaciones y equipamiento de LGAI en Bellaterra (Barcelona)
- Instalaciones de SEAT en Martorell (Barcelona)
- Instalaciones de Solblank en Castellbisbal (Barcelona)
- Instalaciones de Mercedes Benz en Vitoria

2. FASE I: ESTADO DEL ARTE DE LA APLICACIÓN DEL LÁSER EN EL SECTOR DE LA AUTOMOCIÓN

2.1 FUNDAMENTOS DEL LÁSER

2.1.1. INTRODUCCIÓN

El concepto de láser nació a principios de siglo, más concretamente en 1917 cuando Einstein dio a conocer sus trabajos sobre la emisión estimulada. Sin embargo no fue hasta 1954 cuando se desarrolló un láser que emitía en la región de las microondas (MASER).

Actualmente y de manera paralela al desarrollo de la electrónica y la óptica el láser ha experimentado un crecimiento muy notable, de tal manera que se encuentra presente en prácticamente en todos los sectores industriales

La palabra LASER es un acrónimo de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (amplificación de la luz por emisión estimulada de radiaciones).

2.1.2 EL FENÓMENO DE LA EMISIÓN ESTIMULADA

En un átomo los electrones se encuentran situados en niveles concretos de energía, siendo esta energía menor cuanto más cerca se encuentren del núcleo. Precisamente son los niveles más bajos de energía los que tienden a asumir los electrones, ya que en cualquier sistema físico sus componentes siempre tienden a tener estados de energía lo más pequeños posibles.

El paso de un nivel a otro se realiza mediante la absorción o emisión de energía, que en el caso del láser se realiza mediante la absorción o emisión de un fotón.

Los fotones son los cuantos o componentes de la luz. Estos tienen una determinada energía que define de manera unívoca su longitud de onda (característica que a su vez determinará los diferentes colores del espectro visible). Un aspecto a tener en cuenta es que no hay que confundir la energía de salida del haz láser con la energía de los fotones.

Esta energía viene determinada por $E = hc/\lambda$, donde c es la velocidad de la luz (3×10^8 m/s), λ la longitud de onda y h la llamada constante de Planck y de valor 6.624×10^{-34} J/s.

Si tenemos un electrón en un estado excitado, el paso de un fotón con una energía correspondiente a la diferencia de ese nivel con otro inferior, puede provocar (además de la absorción de un electrón que se encuentre en dicho estado inferior) la desexcitación del electrón del nivel superior, emitiéndose en ese momento un fotón idéntico al anterior, es decir, emitido en la misma dirección y oscilando de la misma manera y al mismo tiempo (coherencia espacial y temporal de la luz). Se tienen por tanto dos fotones idénticos que se pueden convertir en más si se sigue produciendo la emisión estimulada. Este es el fundamento de la emisión láser.

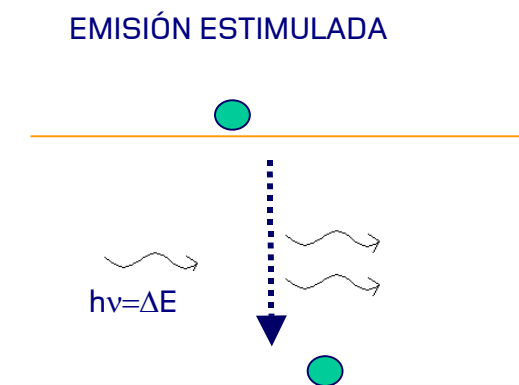


Fig. 2.1: esquema de la emisión estimulada

Por tanto la diferencia fundamental entre la luz emitida por un láser y la emitida por cualquier otra fuente de luz es la direccionalidad. Esto unido a la coherencia temporal (oscilación en fase) le confieren una capacidad de concentración imposible de conseguir con cualquier otro tipo de luz. De hecho las máquinas láser no producen haces de una gran energía asociada (valores típicos para soldadura láser se dan a partir de 2 KW para un láser de Nd:YAG). La diferencia estriba en que con un sistema de focalización correcto se pueden obtener diámetros del haz en la pieza de entre 0.2 y 0.5 mm de diámetro y por tanto densidades de potencia superiores a los 10^6 W/cm^2

Este dato indica la principal característica diferenciadora de la soldadura láser con respecto al resto de tecnologías (excepción hecha de la soldadura por haz de electrones): si bien la concentración de calor en la pieza es muy alta la

energía total que se le suministra es muy inferior al resto de técnicas con lo que la afectación y distorsión térmica de la pieza es mucho menor.

2.1.3 ESTRUCTURA DE UN RESONADOR

La emisión estimulada que se produciría simplemente con la inversión de población y la desexcitación de los electrones no sería suficiente para conseguir energías lo suficientemente altas como para permitir el procesamiento de materiales. Es necesario tener, por tanto, algún sistema que nos permita amplificar más la emisión de este tipo de luz. Este sistema es a lo que se llama resonador y que suele constar de dos espejos, uno totalmente reflectante y otro parcialmente transmisivo, de tal manera que parte de la radiación se refleja al interior del resonador aumentando la amplificación y parte sale al exterior. Finalmente se alcanza un equilibrio en la potencia de la radiación de salida.

Por otra parte los resonadores se pueden clasificar en dos tipos: estables e inestables dependiendo de como se propague la radiación en el interior.

En los resonadores inestables la onda reflejada no se propaga de la misma manera que la onda incidente. Un caso particular de este tipo de resonadores son aquellos en los que no hay un medio parcialmente transmisivo, sino que la radiación se va reflejando en un sistema de espejos de tal manera que no tiene que atravesar ningún medio. Esto permite conseguir potencias de salida del resonador más altas, ya que siempre que haya un medio transmisivo se va a producir un porcentaje de absorción más alto que en las reflexiones, llegándose al caso en que para potencias muy altas se puede acabar destruyendo el material. Sin embargo los resonadores inestables proporcionan peores calidades de haz que los estables, por lo que para aplicaciones donde se requiera una alta calidad de haz no son aconsejables.

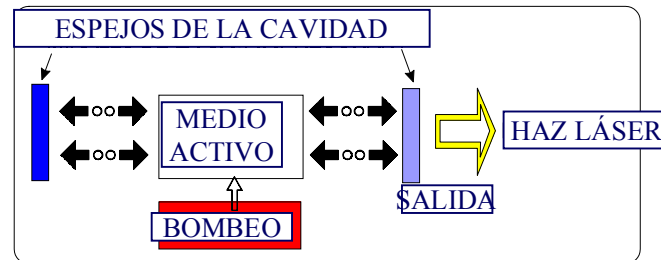


Fig. 2.2: esquema de un resonador

2.1.4 INTERACCIÓN LÁSER MATERIA

La absorción de la luz en el material produce un calentamiento puntual de éste y una disipación de dicho calor a las zonas adyacentes. Por tanto todos los fenómenos de corte y soldadura van a tener en común la importancia de las propiedades térmicas del material en cuestión, ya que el "único" resultado que va a producir el láser va a ser el calentamiento del material. Hemos de definir, por tanto, el láser como herramienta térmica.

Sin embargo no toda la radiación luminosa que llega a un material es absorbida. De hecho se puede llegar a porcentajes de reflexión superiores al 90% en condiciones concretas, como por ejemplo el Al frente a la radiación de un láser de CO_2 . Por contra los materiales plásticos pueden ser transparentes a determinadas longitudes de onda y no presentar apenas absorción, como puede ser el caso del metacrilato ante la longitud de onda del Nd:YAG.

La siguiente tabla muestra de manera cualitativa cómo las distintas longitudes de onda de los principales láseres industriales son absorbidas en distintos materiales:

		ABSORCIÓN EN			
Tipo láser	λ (nm)	Madera	Polímeros	Acero	Otros metales
CO ₂	10.600	Excelente	Excelente	Buena-regular	Mala
Nd:YAG	1.064	Regular	Mala	Buena	Buena
Diodo	800-1.000	Regular	Mala	Buena	Buena

Tabla 2.1: Absorción de los materiales en función del tipo de láser

Más concretamente y para el caso de metales obtenemos la siguiente gráfica de absorción

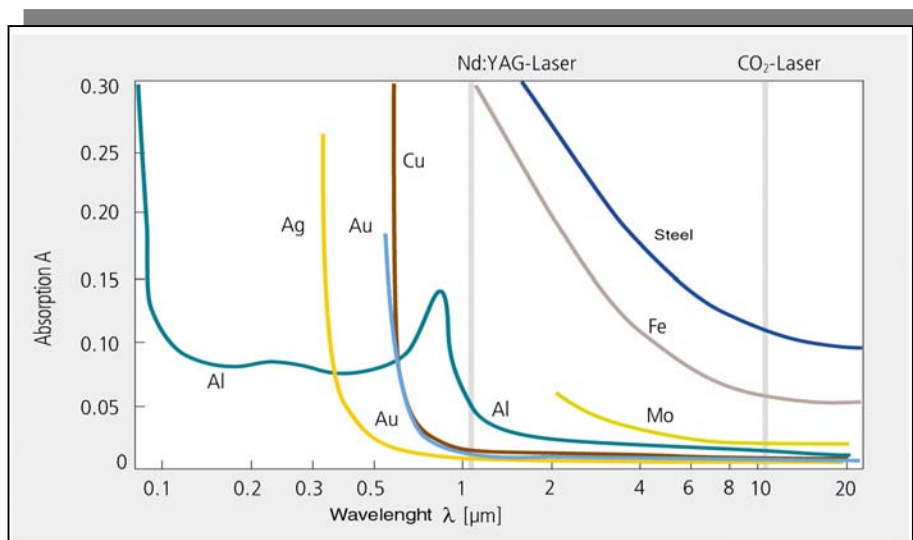


Fig. 2.3: gráfica de absorción en función de la longitud de onda

2.1.5 FORMAS DE EMISIÓN DE UN LÁSER

Adicionalmente a la capacidad de absorción que tenga un determinado láser en un determinado momento, la respuesta térmica que ofrece el material ante la aplicación de radiación láser depende en gran medida del régimen de emisión; es decir, de si estamos en un régimen de emisión continuo o pulsado.

Para la aplicación de la misma cantidad de energía la difusión del calor a las zonas adyacentes a la zona de proceso depende de la duración de la aplicación de dicha energía. Así una duración de pulso corta con una potencia de pico alta

implica una menor respuesta térmica del material, con lo que la acción del calor aplicado es mucho más efectiva que para pulsos largos. Generalmente y si los parámetros de pulsado están optimizados, el corte o soldadura mediante emisión pulsada produce una mejor calidad de proceso.

Sin embargo, y como regla general, los procesos en pulsado implican una potencia media inferior a la que se obtiene mediante la emisión en continuo (hay que recordar que la emisión en pulsado implica espacios de tiempo en los que no hay emisión de láser). Dado que la velocidad de proceso depende principalmente de la energía media que se aplique a la pieza se obtiene la siguiente regla general:

- Proceso continuo: mayor velocidad de proceso con menor calidad final
- Proceso en pulsado: menor velocidad de proceso con mayor calidad final. Se añade la dificultad de parametrizar el pulsado.

2.1.6 PROPAGACIÓN Y FOCALIZACIÓN DEL HAZ

En la figura siguiente se puede ver una focalización típica de un haz mediante una lente:

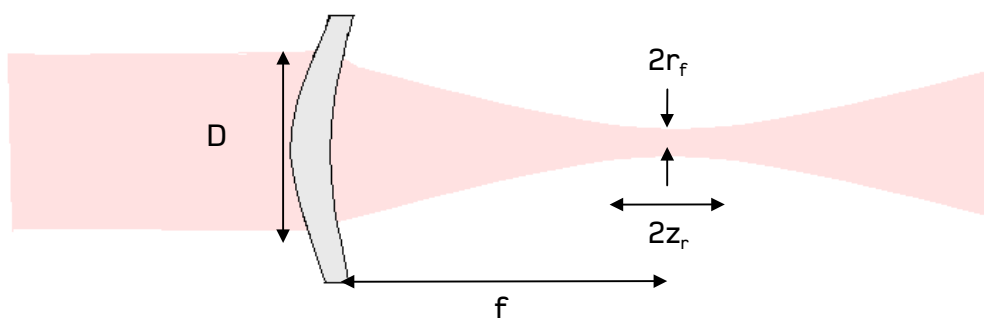


Fig. 2.4: esquema de focalización de un haz

Donde f es la distancia focal de la lente, en la cual se alcanza la máxima densidad de potencia, ya que el radio del haz se reduce a r_f . Este punto es el llamado spot. Matemáticamente el radio del haz tiene la siguiente expresión:

$$r_f = \frac{2\lambda}{\pi} \frac{f}{D} \frac{1}{K}$$

En la ecuación anterior D es el diámetro con el que el haz llega a la lente y K es un parámetro intrínseco del haz que indica su calidad (divergencia del haz en función de los parámetros de focalización)

Por otra parte el parámetro z_r , es la llamada longitud de Rayleigh y que podríamos considerar como la zona en la que el haz permanece fuertemente focalizado y por tanto la zona en la que podemos trabajar sin sufrir una pérdida excesiva de densidad de potencia que nos impida el procesado del material. La expresión matemática que lo define es la siguiente:

$$z_r = \frac{\pi}{\lambda} r_f^2 k$$

Como se puede apreciar de las dos ecuaciones anteriores cuanto más pequeña sea la focal, menor será el spot y por tanto más focalizado tendremos el haz. Sin embargo también se puede ver que esta disminución del radio del haz en el foco se realiza a costa de una pérdida de longitud de Rayleigh y por tanto mayor precisión necesitaremos en el posicionado de la pieza y en el caso de la soldadura es posible que, dependiendo del espesor de la pieza, no lleguemos a producir una penetración total.

Para finalizar es necesario añadir que aunque se ha puesto como ejemplo la focalización mediante una lente, este no es el único medio que tenemos para hacerlo, ya que también se puede realizar mediante la utilización de espejos parabólicos.

La diferencia entre utilizar espejos o lentes estriba en que en las reflexiones se produce una absorción menor que en las transmisiones, lo cual nos es muy útil cuando trabajamos a altas potencias. Esto se hace más importante todavía si tenemos en cuenta que los espejos se pueden refrigerar por la parte posterior de una manera relativamente sencilla, al contrario que las lentes.

Por el contrario con las lentes podemos conseguir spots menores, hecho al cual se añade la ventaja de que son más baratas. Por ejemplo una lente de

ZnSe para un láser tipo Slab de 2.5 KW tiene un coste de alrededor de las 480 €, mientras que un espejo para el mismo láser ronda los 1.600 €.

2.1.7 POLARIZACIÓN DEL HAZ

La luz lleva asociada un campo eléctrico, el vector del cual puede vibrar en cualquier dirección pero siempre en un plano perpendicular a la dirección de propagación del haz.

Cuando es imposible determinar el estado de vibración del campo eléctrico en un estado posterior a otro determinado, se habla de luz natural o no polarizada, mientras que en caso contrario se trata de luz polarizada.

El estado de polarización puede ser muy variado, yendo desde el caso más general en que la vibración del vector campo eléctrico describe una elipse (describiendo entonces la llamada elipse de polarización), pasando por estados en los que esta elipse se convierte en un círculo hasta el caso más común en que la luz vibra siempre en la misma dirección en cuyo caso diremos que la luz está linealmente polarizada.

En el caso más general:

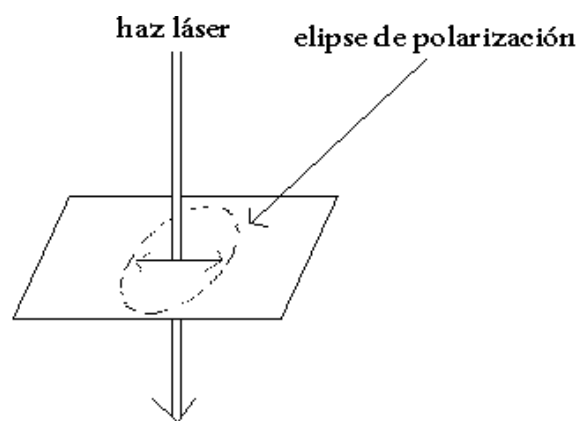


Fig. 2.5: polarización de un haz

2.1.8 ABSORCIÓN DE LA ENERGÍA LÁSER: FORMAS DE DISTRIBUCIÓN Y PENETRACIÓN

La penetración de la intensidad del haz dentro de un material sigue la ley de Beer cuya expresión matemática es:

$$I(z) = I_0 \exp(-\alpha z)$$

donde z es la profundidad de penetración en el material, I_0 la intensidad incidente y α un coeficiente que depende del material y cuyo valor es:

$$\alpha = 4\pi k / \lambda$$

donde λ es la longitud de onda de la luz incidente y k una cte. más grande que la unidad en el infrarrojo y en el espectro visible.

Realizando los cálculos se ve que prácticamente toda la energía es absorbida en una longitud del orden de la longitud de onda incidente. Por tanto todos los fenómenos de corte, soldadura, etc., se van a producir por la conducción del calor producido en la superficie del material.

2.2. TIPOS DE LÁSER UTILIZADOS EN SOLDADURA

2.2.1 EL LÁSER DE CO₂

El láser de CO₂ es, hoy en día, uno de los más ampliamente utilizados a nivel industrial, debido principalmente a que poseen una gran potencia de salida, una eficiencia aceptable (teóricamente de un 30% y de un 10% en la práctica) y una buena calidad de haz.

El funcionamiento de un láser de CO₂ se basa en la combinación de tres gases: CO₂, He y N₂

La emisión de luz láser se produce gracias a la desexcitación del CO₂. Sin embargo para conseguir excitar este gas es conveniente realizarlo de manera indirecta, es decir, excitar primero otro gas distinto que por choques moleculares con el CO₂ eleve a éste hasta el nivel deseado: esta es la función del N₂. Por otra parte la desexcitación del CO₂ es sumamente complicada, ya que próximo al nivel fundamental se encuentra un estado metastable que impide una excitación eficiente posterior. Para conseguir una buena desexcitación necesitamos utilizar algún tipo de gas con alto poder “refrigerante”. Este gas

es el He y es el que en mayor proporción se encuentra dentro del resonador (~80 %). La proporción de N₂ es de alrededor del 15% y la de CO₂ inferior al 10 % (las proporciones exactas dependerán de cada modelo de resonador en concreto).

Paradójicamente el gas que en menor proporción se encuentra es el CO₂, ya que es necesaria la utilización de He y N₂ en una proporción aproximada del 80% y el 10% respectivamente, aunque las proporciones exactas dependen del fabricante.

La longitud de onda de emisión de un láser de CO₂ es de 10.600 nm, lo que provoca una alta reflexión en metales unido a la imposibilidad de transmisión a través de fibra óptica.

Como contrapartida la calidad del haz es muy buena, lo que implica una capacidad de focalización superior a otros tipos de láser.

La tecnología de láser de CO₂ se subdivide a su vez en otras cuatro subclases:

Láseres sellados: en este tipo de láser no existe flujo de gas. Son muy compactos y manejables. Sin embargo el hecho de no poder emitir en potencias superiores a los 500 W hace que su uso no sea técnicamente viable en procesos de soldadura de acero.

Láseres de flujo transversal: Se produce un flujo de gas transversal a la dirección de salida del haz. Las calidades de haz no son buenas pero las potencias que se pueden conseguir son muy altas.

Láseres de flujo axial rápido: Se produce un flujo de gas longitudinal a la dirección de salida del haz. Las calidades de haz son buenas y las potencias conseguidas también. Al igual que en los láseres de flujo transversal es necesaria la instalación de una rampa de gases.

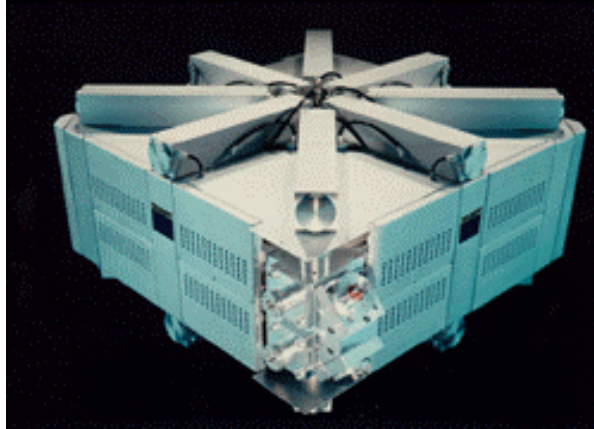


Fig. 2.6 Láser de flujo axial rápido modelo LTF de Trumpf

Láseres de tipo slab: son los más avanzados tecnológicamente. El funcionamiento es similar al de los láseres sellados, pero con una potencia de salida mucho mayor (hasta 3.5 KW. La calidad de haz es muy buena ($K=0.8$ sobre un valor máximo de 1). Además no es necesaria la instalación de una rampa de gas, ya que el suministro se realiza con una única bombona que se coloca en el interior del resonador. Es precisamente este tipo de resonador uno de los utilizados durante el proyecto.

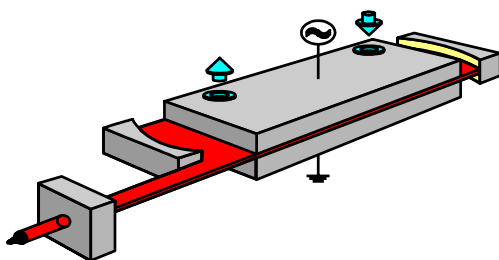


Fig. 2.7 Esquema de un resonador tipo slab.



Fig 2.8 Interior de un slab

2.2.2 EL LÁSER DE Nd:YAG

Los láseres de Nd:YAG están compuestos por un cristal de granate aluminio e itrio (Yttrium Aluminium Garnet) dopado con impurezas de Nd^{3+} en una proporción de aproximadamente el 1%.

Este tipo de láser emite en una longitud de onda de 1064 nm, lo que le confiere unas propiedades de transmisión, reflexión y absorción en los materiales totalmente diferentes a las de los haces de CO_2 (10.600 nm). Estas propiedades permiten transmitir el haz a través de fibra óptica, flexibilizando de esta manera la instalación de soldadura y reduciendo costes de utillajes y medios de transmisión.

Hoy en día el hecho de poder dirigir el haz a robots industriales de alta precisión y repetitibilidad hace que la decisión entre utilizar un láser de Nd:YAG o uno de CO_2 se decante hacia la primera posibilidad.

En el caso de los láseres de Nd:YAG el bombeo (excitación de los electrones) se realiza de forma óptica, es decir, se aplica luz a la barra de YAG mediante la utilización de lámparas o diodos láser.

Es precisamente el medio de proporcionar la energía luminosa lo que diferencia a estos dos tipos en otras dos subclases: láseres de Nd:YAG bombeados por lámparas y bombeados por diodos.

En el caso del bombeo por lámparas se aplica una fuente de luz policromática, de la cual solamente es útil una pequeña parte. Además la emisión se realiza de manera aproximadamente isotrópica. Para evitar este último efecto se añade un reflector cerámico que redirija la luz hacia la barra. Sin embargo la efectividad de este método es limitado, lo que, junto a todos los fenómenos físicos producidos en el interior del resonador limitan la eficiencia energética del sistema a valores de entre el 2% y el 3%.

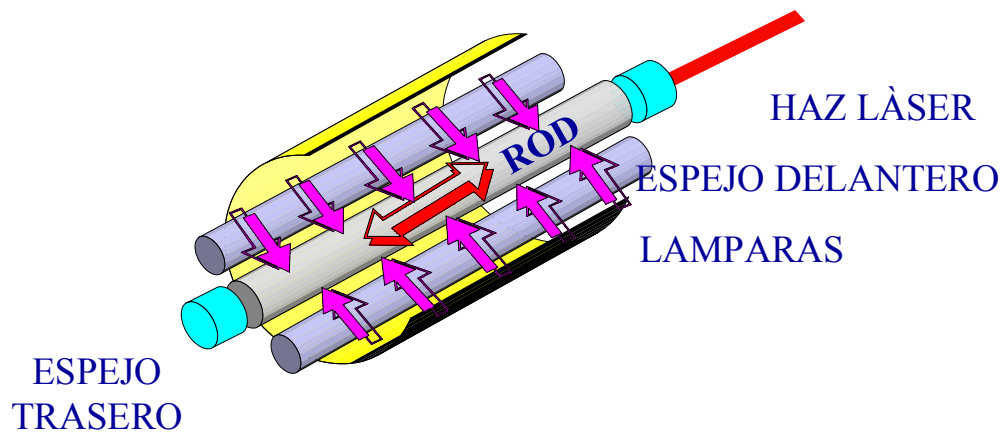


Fig. 2.9 Esquema de un láser de Nd:YAG bombeado por lámparas

Por contra la utilización de láseres de diodo para bombear el medio activo permite la utilización de una fuente de luz monocromática y direccional, lo que implica un aumento de la eficiencia energética hasta un valor del 10%. Además la física del sistema permite obtener mejores calidades de haz y por tanto la posibilidad de la utilización de fibras ópticas de menor diámetro. Esto se traduce en la capacidad de una mejor focalización del haz y por tanto un mayor rendimiento de proceso.

Otra ventaja importante de los láseres de Nd:YAG bombeados por diodos frente a los bombeados por lámparas es el incremento de los tiempos de mantenimiento, ya que en el segundo caso es necesario realizar un cambio de las lámparas cada 1.000 horas, mientras que en el segundo el tiempo se incrementa a 10.000 horas.

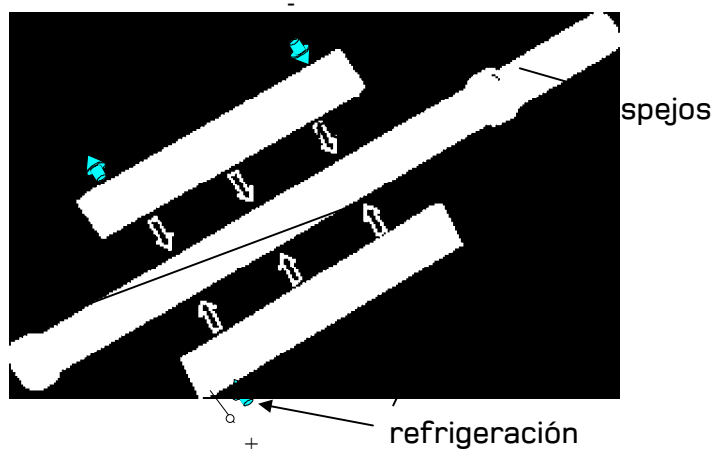


Fig. 2.10 Esquema de un láser de Nd:YAG bombeado por diodos

La siguiente tabla muestra una comparación entre las características técnicas de un láser bombeado por diodos y uno bombeado por lámparas.

	BOMBEADO POR LÁMPARAS	BOMBEADO POR DIODOS
CALIDAD DE HAZ	25 mm x mrad	12 mm x mrad
Consecuencia	Menor longitud de Rayleigh para una determinada focal. Necesidad de trabajar con focales grandes para grandes espesores.	Mejor focalización y posibilidad de trabajar con focales más cortas para espesores grandes.
EFICIENCIA	~2-3 %	10%
Consecuencia	Consumo energético muy elevado	Menor consumo de energía y equipo de refrigeración más sencillo.
CAMBIO LÁMPARAS/DIODOS	Cada 1.000 horas aproximadamente	Cada 10.000 horas aproximadamente
Consecuencia	Es necesario realizar paradas programadas en intervalos cortos de tiempo. Peligro de explosión de las lámparas	Intervalos de cambio muy largos en comparación con las lámparas

Tabla 2.2 Comparativa bombeo por diodos-lámparas

2.3 ESTADO DEL ARTE DE LA SOLDADURA LÁSER

2.3.1 SOLDADURA POR CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

En una soldadura por conductividad térmica se produce una fusión del material base junto con el material de aporte (si lo hay). Mediante esta fusión se crea una única estructura continua que al resolidificarse produce el cordón de soldadura.

La soldadura por conductividad térmica se puede producir mediante el láser aplicando bajas potencias (menos de 1 KW), pudiéndose procesar únicamente espesores finos.

La soldadura por conductividad térmica de grandes espesores requiere de una preparación previa de las piezas, junto con un aporte de energía muy alto que puede provocar grandes distorsiones térmicas en el material

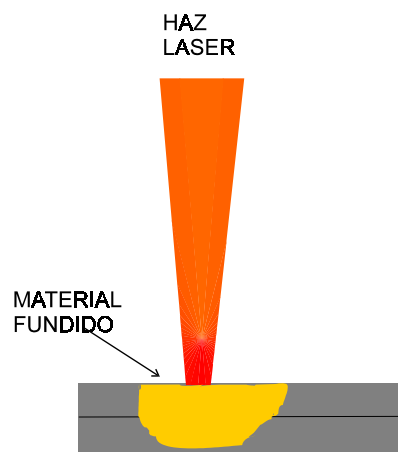


Fig. 2.11 Soldadura por conductividad térmica

2.3.2 SOLDADURA POR KEY-HOLE.

La soldadura por key-hole es la soldadura característica del láser.

En ella se produce una vaporización brusca de la superficie del metal. A su alrededor se forma una masa de material fundido que se enfría en las zonas adyacentes, produciéndose corrientes de convección. Mediante estas corrientes se forma un canal de material fundido (key-hole), en el cual se sigue absorbiendo la radiación láser.

La soldadura por key-hole es, por tanto, un proceso dinámico que en la mayoría de los casos es sin aporte de material. Es vital el equilibrio entre el flujo de

material fundido y la velocidad de avance del láser, ya que en caso contrario no obtendremos buenas soldaduras.

Como en el caso de la soldadura por conductividad térmica el cordón de soldadura se termina formando cuando se resolidifica el metal. Sin embargo, en la soldadura por key-hole se consiguen penetraciones muy altas (hasta 20 mm en acero), utilizándose para ello potencias de láser muy elevadas (hasta 20 KW)

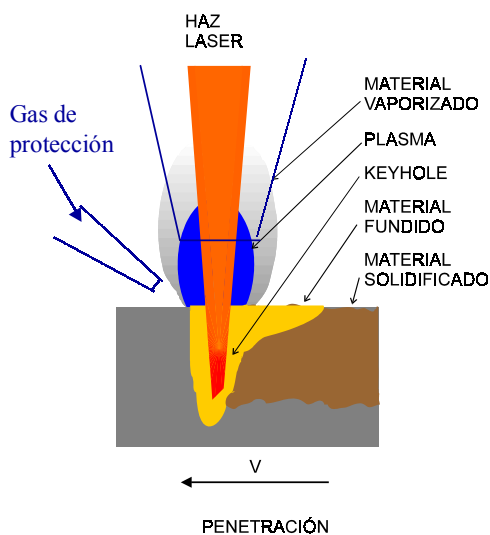


Fig. 2.12 Soldadura por key-hole

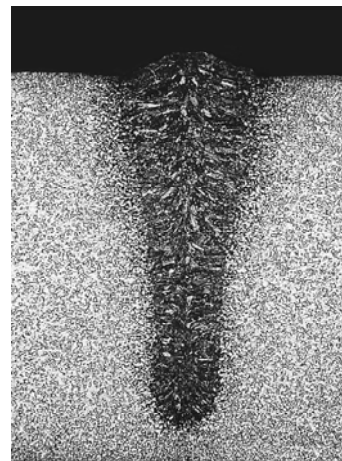


Fig. 2.13 Key hole en una soldadura a testa

2.3.3 MODOS DE EMISIÓN

Los dos tipos de láser utilizados en la soldadura industrial (CO_2 y Nd:YAG) pueden trabajar en modo continuo (en algunos casos quasicontinuo) o pulsado. Cuando se trabaja en modo pulsado quiere decir que se procesa el material mediante una serie de puntos de soldadura que se solapan unos con otros. Dichos solapamientos oscilan entre el 60 y el 80 % del área de los pulsos. La aplicación del modo pulsado implica una mayor concentración en el tiempo de la energía aplicada (mayor potencia de pico). Esto permite una menor

transferencia de calor a las zonas adyacentes al cordón de soldadura, lo que se traduce en una menor distorsión térmica y una anchura de la ZAT menor.

El inconveniente principal de trabajar en modo pulsado estriba en la imposibilidad de alcanzar las velocidades de soldadura que se alcanzan en modo continuo. Además existe el peligro de producir los llamados spikes (poros en forma de clavos), aunque el número de estos puede ser reducido de una manera muy notable mediante la optimización del solapamiento y los demás parámetros de soldadura.

2.3.4 GASES DE CONTROL Y PROTECCIÓN:

El gas de aporte en la soldadura tiene la función de proteger la zona soldada de la oxidación y controlar el plasma generado durante la soldadura.

El plasma se genera durante la soldadura debido al enorme calentamiento producido sobre el material. Dicho plasma es necesario, en la soldadura láser, para conferir las propiedades finales al cordón soldado. Sin embargo, dependiendo del tipo del láser tenemos que controlar la cantidad de plasma generado de una manera más o menos eficiente. Esto viene dado por el hecho de que la transmisión (T) del plasma a la radiación del láser depende de manera inversa del cuadrado de la longitud de onda (λ).

$$T \propto \frac{1}{\lambda^2}$$

Por tanto de aquí se desprende la necesidad de utilizar gases de aporte y protección con un alto potencial de ionización (He) en el caso de la soldadura con láser de CO_2 , mientras que en el caso de la soldadura con láser de Nd:YAG no es necesario un control tan exhaustivo del plasma generado, optándose por la utilización de Ar e incluso por no aportar gas (dependiendo de la aplicación). En ocasiones para obtener buenos resultados pero disminuyendo costes se puede utilizar una mezcla de He y Ar.

En el caso del CO_2 , si no se elimina el plasma, éste se puede continuar calentando aumentando mucho la presión de gas en esa zona, hasta el punto de

existir la posibilidad de producirse una explosión de plasma. Esta explosión puede ser en forma subsónica formando una LSC (*laser Suported Combustion*) o incluso en forma supersónica formando entonces una LSD (*Láser Suported Detonation*).

Por otra parte podríamos pensar que aumentando mucho la presión de gas se consigue un mejor control del plasma, pero esto presenta dos inconvenientes:

1. Un aumento del caudal del gas puede suponer un aumento de la presión de dicho gas sobre la pieza, provocando un descolgamiento del material fundido por la parte inferior de la soldadura.
2. Una cantidad excesiva de gas puede provocar su inclusión dentro del canal de soldadura, provocando la formación de poros internos.

2.3.5 SOLDABILIDAD DE LOS MATERIALES

La primera diferencia en el comportamiento de los distintos materiales frente a la luz del láser es, precisamente, la diferente absorción que presentan cada uno de ellos ante ésta. Pero no sólo eso, sino que además, dentro de un mismo material existen diferencias de comportamiento dependiendo de los elementos dopantes y aleantes del propio material base.

En los metales la estructura final tras la solidificación dependerá, además de la composición del metal, de la tasa de enfriamiento de éste, es decir, de lo rápido o lento que se produzca la disminución de temperatura.

De esta manera si el enfriamiento es lento se producirían procesos determinados por la búsqueda del equilibrio termodinámico. Pero si el enfriamiento es muy rápido (tal y como sucede en la soldadura láser) habrá fases intermedias que no precipitarán, dándose un proceso sin equilibrio termodinámico.

Las tasas de enfriamiento son muy altas pudiendo llegar a los 10^{11} K/s en los instantes iniciales del enfriamiento, por lo que los diagramas TTA no son válidos.

Otro aspecto en el que hay que incidir es en el tamaño de grano, siendo este el tamaño de las microestructuras que se producen dentro del material. En una

soldadura interesa un tamaño de grano pequeño, ya que tamaños de grano grande fragilizan la estructura.

Realizando una descripción más concreta de los diferentes materiales se obtienen las siguientes características:

ACEROS:

Los aceros presentan una buena absorción respecto a los dos láseres que más se utilizan a nivel industrial y que son el CO_2 y el Nd:YAG.

El principal problema que presentan estos materiales para soldarlos viene dado por la tendencia que tienen a presentar estructuras endurecidas en las ZAT (Zonas Afectadas Térmicamente). En estas zonas la estructura se transforma, debido a la presencia de carbono, en una estructura austenítica; pero si el enfriamiento del acero es demasiado rápido se puede producir martensita, que tiene una estructura muy dura pero muy frágil, siendo muy alta la posibilidad de formación de grietas.

La cantidad de carbono que tenga un acero determina la cantidad de martensita que se formará (cuanto más carbono haya más posibilidad de formación de martensita), por lo que el contenido de carbono dentro de un acero se limita a un 0.2% de cara a la soldadura por láser, aunque en la práctica se han podido soldar aceros con contenidos de hasta el 0.4% sin ningún tratamiento posterior. Si la cantidad de carbono presente en la zona a soldar supera el 0.4 % es necesario aplicar métodos que disminuyan el endurecimiento, como pueden ser tratamientos de revenido o precalentamientos de la chapa en un intervalo de entre 300 y 400 grados. Otros procesos que también se pueden aplicar son la utilización de un segundo haz desfocalizado, aunque esto encarece mucho el proceso y todavía no se ha podido conseguir la viabilidad económica.

Además del carbono hay otros elementos como el oxígeno, el azufre y el fósforo, la presencia de los cuales afecta de una manera muy clara a la calidad de la soldadura.

El oxígeno generado en el propio proceso de soldadura puede reaccionar con el carbono produciendo CO_2 . Este gas puede quedar atrapado dentro del cordón de soldadura, formando poros y fragilizando la estructura.

Los elementos como el S y el P son del todo indeseables dentro de la soldadura, siendo imprescindible una presencia conjunta de los dos elementos inferior al 0.04%, y esto, si la pieza a soldar no ha de soportar grandes cargas en su estructura durante el servicio. Si el contenido supera el 0.04% se tienen problemas por la formación de grietas, reduciéndose las características de resistencia de la soldadura.

Además es necesario tener en cuenta la presencia de otros elementos aleantes como el Mn, el Cr, el Mo, el V y el Cu. Para determinar su importancia y la cantidad máxima en la que pueden estar presentes en conjunto se hace uso del llamado carbono equivalente. Éste parametriza los elementos especificados anteriormente reduciendo el comportamiento al endurecimiento al de un material en el que sólo se tuviera hierro y carbono. El equivalente recomendado por el *International Institut of Welding* viene dado aproximadamente por:

$$C = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$$

Por otra parte con una clasificación más detallada de los diversos tipos de acero se obtienen los siguientes comportamientos:

ACEROS CON POCO CONTENIDO EN CARBONO: Si además presentan un contenido de P y S extremadamente bajo presentarán una muy buena disponibilidad para ser soldados con láser.

ACEROS CON CONTENIDOS MEDIOS Y ALTOS DE CARBONO: pueden ser soldados siempre y cuando se apliquen medidas adicionales como por ejemplo un precalentamiento o un tratamiento de revenido.

ACEROS ALEADOS: si la tasa de enfriamiento de la soldadura es muy grande se obtiene una estructura muy dura que presenta problemas por agrietamiento. Un precalentamiento o la introducción de elementos dopantes que ayuden a la cristalización puede ser una solución. La adición de Ni reduce la dureza y por tanto la posibilidad de formación de grietas.

ACEROS FERRÍTICOS: Pueden ser bien soldados si los contenidos de C y Cr no son excesivamente altos. Debe controlarse el crecimiento de grano mediante una soldadura con velocidades altas.

Con contenidos de Cr de entre el 18 y el 20% un tiempo excesivamente alto en la zona de entre 900 y 500 °C puede dar lugar a una precipitación de un compuesto intermetálico y frágil de Cr y Fe: la fase sigma FeCr. Un revenido sobre los 900 °C puede deshacer esta fase, pero entonces será necesario un enfriamiento muy rápido para no volver a generarla.

ACEROS AUSTENÍTICOS: la formación de la fase sigma y la predisposición al crecimiento de grano es menos pronunciada que con los aceros ferríticos.

Algunos tipos de aceros austeníticos presentan tendencia a la corrosión intercrystalina que puede causar problemas. Esta corrosión se da si mantenemos el material durante demasiado tiempo en una temperatura entre 450 °C y 850 °C . El uso de aceros adecuados reduce este problema.

De cara a posibles combinaciones con aceros austeníticos es necesario tener en cuenta que mientras la transferencia de calor es aproximadamente un tercio de la que tienen otros tipos de aceros, la elongación es el doble, lo que puede dar lugar a fracturas debido a las altas tensiones soportadas.

ACEROS MARTENSÍTICOS: estos materiales exhiben una dureza muy alta, pero acompañada de una fragilidad también muy elevada. Con contenidos por encima del 1% de C se han de utilizar materiales de aporte austeníticos, con la finalidad de evitar la formación de grietas. No obstante la zona afectada térmicamente va a permanecer frágil, lo que hace necesario, una vez más, utilizar tratamientos auxiliares como el revenido o el precalentamiento.

HIERRO DE FUNDICIÓN (CAST IRON):

La soldadura de piezas compuestas de este material requiere unas precauciones especiales, ya que su alta fragilidad puede dar lugar a la formación de grietas durante el calentamiento en la zona de la soldadura. El cordón de soldadura, la ZAT (zona afectada térmicamente) y el material base deben tener la misma cantidad, forma y distribución de microestructuras.

No debe, bajo ningún concepto, permitir la formación de martensita, por lo que la soldadura sin precalentamiento alrededor de los 200–300 °C de estos materiales debe reducirse a casos muy especiales. Un proceso de revenido para disminuir tensiones puede seguir al proceso de soldadura.

ALUMINIO Y ALEACIONES:

Uno de los principales problemas existentes a la hora de soldar aluminio es la alta reflexión que posee este metal a la luz láser

Posibles soluciones para este problema pueden ser por ejemplo, hacer una soldadura por pulsos, dando a los primeros una energía mucho más alta que la que se adquirirá después. Esto puede servir para producir el *key-hole*, dentro del cual la luz se irá absorbiendo en las paredes, por lo que, aunque en principio haya una reflexión muy alta, en cada una de ellas se absorberá una parte del haz hasta que prácticamente todo sea absorbido.

Otra solución es, manteniendo la energía de los pulsos (o la energía aplicada en caso de una soldadura continua), no adquirir la velocidad de soldadura inmediatamente, sino hacer permanecer el haz estacionario respecto a la pieza durante un tiempo suficiente para producir el *key-hole*, pudiendo después adquirir la velocidad de soldadura.

Por último se puede añadir que una solución perfectamente válida es combinar de forma efectiva las dos anteriores, pero teniendo en cuenta que un aporte excesivo de energía en el material puede llegar a producir un descolgamiento del material fundido por la zona inferior de la soldadura.

Pero estos problemas no son los únicos; el aluminio presenta una conductividad térmica muy alta que hace que se disipe mucho el calor aplicado en el *key-hole*, produciéndose de esta manera una ZAT muy grande. Además es un material que en estado fundido tiene una viscosidad muy baja lo que hace que el canal de soldadura sea muy inestable. Si a esto unimos el hecho de que el aluminio tiene un intervalo de fusión estrecho (vaporiza a una temperatura no muy superior a la de fusión), se obtiene una alta predisposición a la formación de superficies

irregulares del cordón de soldadura, así como a la presencia de poros. Además no se ha de olvidar la formación de grietas y la evaporación de los elementos aleantes, así como la alta solubilidad que presenta el hidrógeno dentro del material fundido y que puede dar lugar a la formación de poros durante la resolidificación.

Concluyendo: la soldadura del aluminio mediante láser es difícil, dependiendo esta soldabilidad del espesor del material y de los elementos aleantes.

Los elementos que con más frecuencia se utilizan para las aleaciones son el Mg y el Zn, los cuales tienden a vaporizarse causando la formación de poros, además del cambio en la composición del cordón de soldadura respecto al material base.

Con aleaciones endurecidas por precipitación se puede producir una disminución de la dureza en la ZAT, por lo que es recomendable soldar antes de endurecer. En caso que esto no sea posible la soldadura no es recomendable.

Un método que se utiliza con mucha frecuencia para soldar aluminio es la utilización de material de aporte para reducir la cantidad de grietas y poros. Este material de aporte suele ser una aleación de Al con alto contenido en Mg o Si.

ACEROS CON RECUBRIMIENTOS DE Zn (P.E. CHAPAS GALVANIZADAS):

El principal problema de estos recubrimientos es el bajo punto de evaporación que presenta el Zn, provocándose por este hecho la formación de burbujas de gas dentro de la soldadura, las cuales se transforman en poros en la resolidificación. En soldadura por solapamiento y si el recubrimiento de Zn es de menos de 20 μm estas burbujas pueden permanecer bien distribuidas y no presentar fragilización de la estructura. Para recubrimientos de espesores superiores es necesario dejar una pequeña separación entre las piezas (del orden de 0.1 mm), para dejar escapar los vapores de Zn y evitar la formación de poros.

ACEROS CON RECUBRIMIENTOS DE Ni:

Generalmente los aceros con recubrimientos de Ni no son susceptibles de soldar con láser debido a la formación de grietas.

ACEROS CON RECUBRIMIENTOS DE ALUMINIO:

Estos dan buenos resultados al soldar por láser. No obstante hay una tendencia al crecimiento de grano (formación de agrupaciones de cristales más grandes) que fragilizan la estructura.

ACEROS CON RECUBRIMIENTOS DE Cd:

El cadmio tiene un punto de evaporación aún más bajo que el Zn, concretamente de 760°C, lo que hace que ambos materiales presenten problemas similares.

ACEROS PINTADOS:

Muchas pinturas contienen Zn, por lo que se deben tomar las mismas precauciones que en los materiales tratados con recubrimientos de Zn, es decir, dejar un pequeño gap entre las piezas para permitir la salida de vapores.

ACEROS CON SUPERFICIES CARBURIZADAS:

Con contenidos nominales del 0.2% de C se obtienen desde un 0.6% a un 0.8% de carbono en la superficie, por lo que hay un alto riesgo de endurecimiento por formación de martensita, con los perjuicios que esto supone. Una posible solución puede ser no carburizar por aquellas zonas por donde posteriormente se va a soldar.

ACEROS CON SUPERFÍCIES NITRURADAS:

Los aceros, la superficie de los cuales ha recibido una nitruración no presentan una buena aptitud para la soldadura con láser. La razón es que la solubilidad del nitrógeno dentro de la soldadura disminuye muy rápidamente a medida que disminuye la temperatura, motivo por el cual en la resolidificación del cordón se forma una mezcla de cristales supersaturados, apareciendo además un fenómeno de envejecimiento de la superficie unido a agujeros en esta.

Conclusión: si se ha de aplicar una soldadura mejor no nitrurar.

ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS:

Generalmente los aceros inoxidable presentan una buena predisposición a la soldadura mediante láser. Sin embargo, los austeníticos (serie 300) pueden presentar tendencia al agrietamiento debido a la adición de azufre y selenio.

Debido a su baja conductividad térmica (aproximadamente un tercio de la del acero al carbono) y su alta absorción, es posible conseguir buenas penetraciones (sobre un 5-10 % más que en aceros al carbono).

Los aceros inoxidable austeníticos presentan capacidad para ser soldados cuando el Cr/Ni equivalente es más grande que 1.6, ya que si es más pequeño se produce una fuerte tendencia al agrietamiento.

El Cr/Ni tiene aproximadamente la siguiente expresión matemática:

$$Cr_{equ} \cong Cr + Mo + 0.7Nb + 3Ti$$

$$Ni_{equ} \cong Ni + 35C + 20N$$

ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS (SERIE 400)

Este tipo de aceros generalmente presentan una mayor maleabilidad y ductilidad que si los comparamos con otros procesos de soldadura. De cualquier manera, debido a la formación de martensita y el crecimiento de grano asociado a la soldadura por fusión, la resistencia del cordón ante tensiones y ante la corrosión disminuye, aunque de una manera mucho menor que en los procesos de soldadura convencionales.

ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS

Estos presentan la peor aptitud a ser soldados de todos los aceros inoxidable, produciendo soldaduras muy duras y frágiles con una tendencia muy fuerte al agrietamiento. El precalentamiento y el templado puede ser utilizado con aceros martensíticos donde el contenido de carbono sea menor del 0.1 %.

COBRE Y ALEACIONES

El principal problema de estos materiales es la alta reflexión que presentan a la luz del láser, llegando éste al 99% en el caso del CO_2 , por lo que se hace aconsejable utilizar láseres de Nd:YAG. Además la soldadura de cobre mediante láser únicamente resulta viable si soldamos pequeños espesores de este material.

Por otra parte se añade el problema de la presencia de oxígeno, ya que durante la resolidificación del material fundido se forma Cu_2O que precipita en medio de los cristales de cobre, tanto en el cordón de soldadura como en la ZAT, dando lugar a una fragilización de la estructura. El contenido de Cu_2O dentro del material debe ser menor del 0.001% para poder soldar el cobre.

Una de las aleaciones de Cu más comunes es el latón, teniendo éste el Zn como elemento aleante. Es precisamente el Zn el que nos va a dar problemas por su bajo punto de evaporación (aproximadamente 900°C). Esto hace necesario utilizar aleaciones con bajo contenido en Zn, siendo detectable la evaporación de éste durante la soldadura debido al oscurecimiento que presenta el latón en ausencia de él.

Otra aleación de cobre es el bronce. Este exhibe una buena predisposición a la soldadura por láser gracias a la combinación de su bajo punto de fusión (232°C), junto con su alto punto de evaporación (2270°C)

TITANIO

A la hora de soldar este material se hace necesario seleccionar cuidadosamente los parámetros de soldadura para cada caso en concreto, ya que un enfriamiento excesivamente rápido puede producir la formación de martensita en algunos casos, además de fases intermetálicas frágiles.

Es necesario tener en cuenta además que el material fundido durante la soldadura tiende a absorber O_2 y N_2 , aunque la utilización de gas inerte como el helio o el argón puede eliminar este efecto y producir soldaduras de buena calidad.

2.3.6 CONFIGURACIONES DE SOLDADURA

La soldadura de piezas metálicas por láser permite soldar en automático más configuraciones que los métodos de soldadura convencionales: placas metálicas entre si, hilos, tubos, tubos con piezas masivas etc. Para obtener soldadura de una calidad aceptable para los requisitos funcionales de las piezas soldadas es imprescindible que el sistema de sujeción de las piezas asegure unas tolerancias de posicionado correctas, sin que exista una desalineación y gaps excesivos entre las partes a soldar, ya que esto tendría un efecto negativo en la absorción de la energía del láser. El desalineamiento vertical y el gap entre piezas no debe ser mayor de 0.25% del espesor mayor a soldar y 0.1 mm respectivamente (variable en función del diámetro del haz láser). La verificación de estas restricciones permite obtener una mayor eficiencia de soldeo y una buena reproducibilidad y calidad de las soldaduras.

Para disminuir los requisitos de gap siempre se puede proceder a desfocalizar y aumentar la potencia o bien disminuir la velocidad, pero estas acciones hacen que se pierdan las ventajas de la soldadura por laser en comparación con las soldaduras al arco convencionales. Durante los últimos años se han hecho importantes esfuerzos para idear equipos que permitan aumentar la calidad de la soldadura y disminuir los requisitos de preparación de las piezas, pero todos ellos son en detrimento de la velocidad de proceso. En la actualidad se investiga en los procesos de soldadura híbrida (láser-inducción, plasma-inducción) y con sistemas doble spot (en láseres CO₂ con espejos bifocales y en Nd:YAG con sistemas bifibras) con objetivo de no disminuir velocidades de soldadura y abaratar costes.

Estos métodos innovadores se deben aun optimizar para asegurar una mejor apariencia de las soldadura y un aumento de la resistencia mecánica de las uniones.

La tolerancia al gap depende normalmente del diámetro del spot disponible y segundo del defecto aceptable de falta de penetración de la pieza en servicio. Para espesores y tipo de láser utilizado el aumento de gap entre las piezas a soldar en la configuración testa a testa disminuye el área de unión y

consecuentemente reduce la resistencia mecánica de la unión. Para gaps menores de 0.08 no hay diferencias normalmente en las penetraciones conseguidas para unos mismos parámetros de soldeo. Para gaps entre 0.08 y 0.1 mm aparecen ya defectos de soldadura (irregularidades de cordón, convexidad y concavidad en parte superior y inferior). Para gaps mayores de 0.1 – 0.12 el haz láser no produce soldadura de calidad pues el liquido fundido no tiene tiempo de llenar el gap antes de su solidificación. Los defectos observados son porosidades superiores, porosidades penetrantes y falta de penetración).

El tipo de configuración de soldadura depende del diseño de la pieza soldar. La soldadura testa a testa es la más favorable para obtener soldadura de calidad. El uso de otros tipos de configuración necesita unos requerimientos de preparación de uniones y de fijación de piezas más complejo para industrializar.

Unas de las configuraciones más desfavorables en la junta en forma de L. El perfil de la junta de soldadura es tal que la incidencia del haz directa a la junta causa un rápido calentamiento no uniforme de la zona de acción del láser haciendo que las zonas de fusión en cada uno de los materiales sea diferente. Como el gap no es evitable generalmente, cada parte de la soldadura contribuye con fracciones diferentes en la formación del baño fundido. Este efecto empeora para soldaduras circulares. Para asegurar un calentamiento, fusión y recristalización homogénea de la zona fundida se debe preparar muy bien la zona a soldar.

En este caso los sistemas de fijación y apriete y las secuencias de soldadura deberán considerarse detenidamente en el proceso de diseño de los productos para evitar contracciones y distorsiones de las piezas debidas a los utillajes que no son evidentes para pequeñas series pero sin pueden afectar los requerimientos de posicionado de las piezas posteriormente

Cuando se realiza soldadura en forma de circunferencias aparecen problemas en el solape entre la posición inicial y final, tal como ocurre en soldadura de tubos a superficies planas o en juntas tubulares. Dos problemas ocurren

cuando se apaga el láser rápidamente: (a) una importante depresión debido al efecto de cierre del keyhole bajo la influencia de la gravedad y las tensiones termocapilares. , (b) fragilización y aparición de porosidades en la zona de solape. Estos problemas son más graves para los espesores más importantes. Para reducir considerablemente estos problemas se puede programar una rampa de bajada en potencia o de desaceleración de la velocidad de soldadura. El efecto satisfactorio de estas acciones requiere no obstante un riguroso plan de experiencias de pruebas y errores.

Los aceros con altas concentraciones de carbono o altos niveles de azufre y fósforo tienen tendencia a formar fisura en frío después de la soldadura. Las altas tensiones de contracción y las deformaciones del líquido fundido en el enfriamiento facilitan el inicio y formación de fisuras. Este efecto es más pronunciado en soldadura con penetración parcial en comparación con las soldadura con penetración total donde el líquido no queda totalmente confinado por el sólido. Para evitar estos procesos se suele mecanizar una regata más profunda que la zona de unión a uno lado de la zona de unión que actúa como barrera térmica permitiendo la disminución de las velocidades de enfriamiento que provocan estos efectos.

TIPOS BÁSICOS DE SOLDADURA:

- Por contacto (a testa):



Fig. 2.14 Soldadura por contacto

- "Tailored blank" si tenemos espesores diferentes:

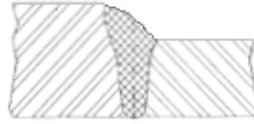


Fig. 2.15 Soldadura de tailored-blanks

- Por transparencia (por solape):

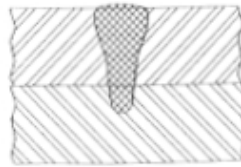


Fig. 2.16 Soldadura por transparencia

- Soldadura por flanco:

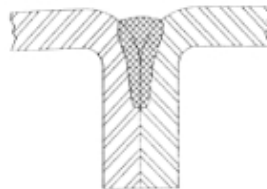


Fig. 2.17: soldadura por flanco

- Soldadura a canto:

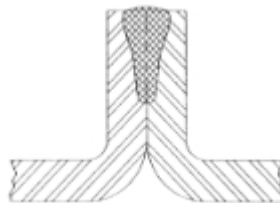


fig. 2.18: soldadura a canto

- Soldadura en T:

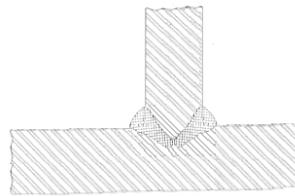


fig. 2.19: soldadura en t

- Soldadura con filete:

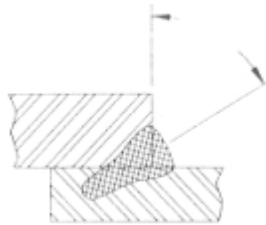


Fig. 2.20 soldadura con filete

De este tipo de soldadura se pueden encontrar dos subtipos, siendo la única diferencia entre ellas el ángulo de incidencia del haz, ya que es posible incidir bien con un ángulo de entre 40 y 60° grados con respecto a la perpendicular a la pieza, bien con un ángulo de entre 60 y 80°.

2.3.7. TOLERANCIAS

Gap:

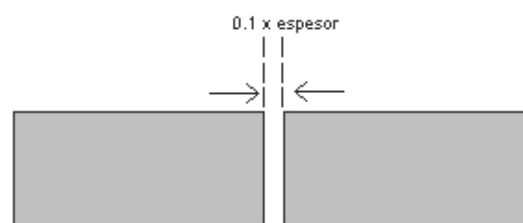


Fig. 2.21 Tolerancia en el gap en una soldadura a testa

Mismatch

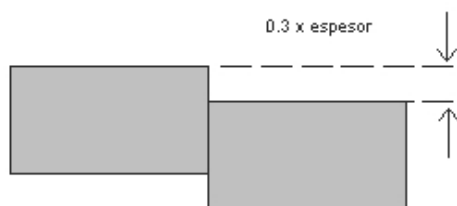


Fig. 2.22: tolerancia de mismatch

Tolerancia angular

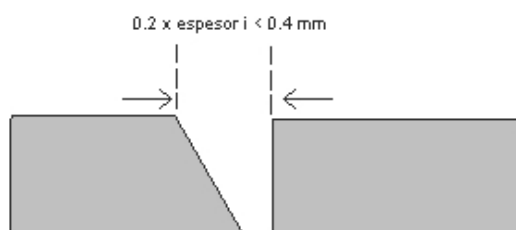


Fig. 2.23 tolerancia angular

A parte de estos límites generales se deben tener en cuenta que no se han de superar las siguientes tolerancias:

	TIPO DE SOLDADURA				
	Por contacto	Por solapamiento	A canto	Por flanco	Con filete
Gap máximo (mm)	0.1	0.1	0.125	0.125	0.25
Posición focal (mm)	± 0.25	± 0.25	± 0.25	± 0.25	-----
Mismatch vertical (mm)	< 0.2	-----	± 0.25	± 0.50	-----
Desviación del centro de la junta (mm)	± 0.05	-----	< 0.1	< 0.15	Lateral: a)

Tabla 2.3: Tolerancias en el posicionado

Algunos defectos ocasionados por no respetar las tolerancias anteriores así como algunas soldaduras correctas se presentan en la página siguiente:

“Undercut” en una soldadura por solapamiento de chapa electrozincada debido a un excesivo gap :

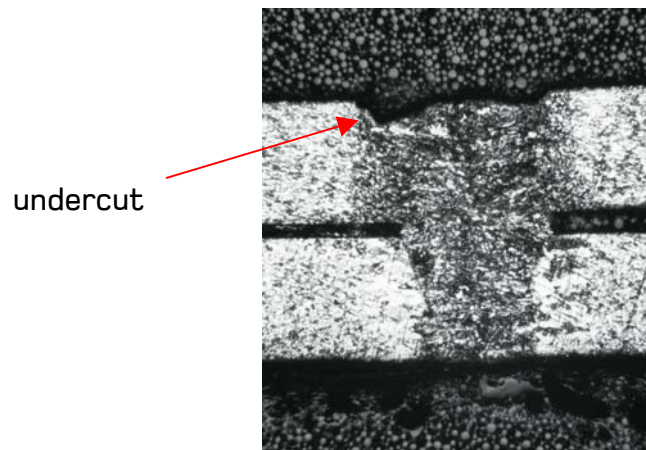


Fig. 2.24 Undercut en una soldadura por solape

Soldadura por solapamiento con gap correcto:

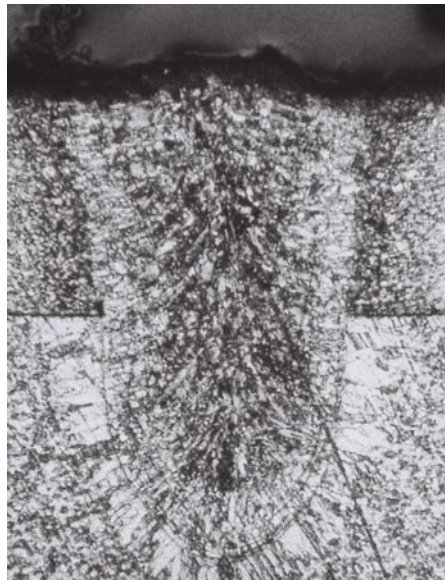


Fig. 2.25 Undercut en una soldadura por solape

“Undercut” debido a un excesivo gap en una soldadura por contacto:

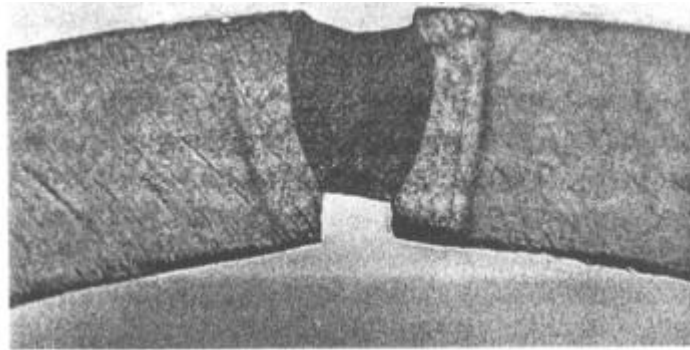


Fig. 2.26 Undercut en una soldadura por solape

Mismatch en una soldadura por contacto:

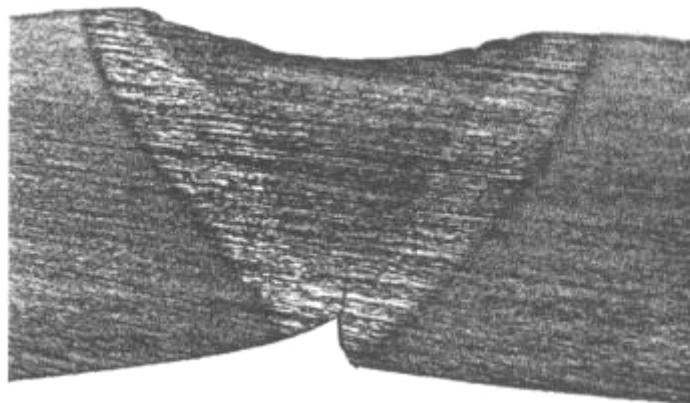


Fig. 2.27 Mismatch en una soldadura por solape

2.3.8 DEFECTOS ESTRUCTURALES EN LAS SOLDADURAS REALIZADAS POR LÁSER

GRIETAS

El proceso de soldadura es un proceso que provoca variaciones de temperatura muy grandes, tanto en el enfriamiento como en el calentamiento.

Debido a eso el material resolidificado se ve sometido a tensiones térmicas muy altas que en ocasiones no es capaz de soportar, formándose las grietas. Cuanto más rápido es el enfriamiento más posibilidades de sufrir este tipo de defecto existe. No obstante la velocidad de enfriamiento no es el único factor que interviene en la formación de este tipo de defectos, ya que la presencia de S y P dentro de la soldadura de aceros aumenta en gran medida la posibilidad de formación de grietas, por lo que para disminuir el riesgo se hace necesario una presencia de ambos nunca superior al 0.04 % del peso total del material, así como aumentar en la medida de lo posible el contenido de Mn en la aleación. Otro riesgo para la formación de grietas es el endurecimiento en la ZAT por la presencia de carbono. Este endurecimiento puede representar una fragilización de esta zona que puede derivar en la formación de grietas. Para evitar esto se ha de tratar no soldar aceros con contenidos de carbono superiores al 0.4%, o bien hacerlo con tratamientos adicionales como un precalentamiento de toda la pieza que disminuya la tasa de enfriamiento, o un tratamiento de revenido que alivie tensiones y desfragilice la estructura. La velocidad de procesamiento también es un factor importante a la hora de hablar de grietas, ya que está comprobado que velocidades altas de soldadura tienden a crear una línea fronteriza central que no soporta bien las tensiones durante la resolidificación, mientras que velocidades de soldadura bajas producen grandes estructuras dendríticas mucho más favorables de cara a soportar tensiones.

Otro tipo de grietas son las que se producen por acumulación de hidrógeno, el cual provoca el agrietamiento comenzando por la ZAT. Para contrarrestarlo lo mejor es utilizar materiales libres de hidrógeno, o bien realizar un revenido entre 250-280 °C durante un tiempo suficiente para provocar una difusión del hidrógeno fuera del material.

POROSIDAD:

Este defecto viene provocado principalmente por el atrapamiento dentro de la zona resolidificada de gases provenientes de:

- ♦ Contaminación de la superficie (aceites, grasas, vapor de agua,...). La solución para evitar los poros causados por este motivo es clara: controlar el proceso de producción del material desde el principio hasta el final con el fin de eliminar estos contaminantes.
- ♦ Gases disueltos en el material base, sobretodo N_2 i O_2 . La utilización de aceros saturados de Al o la utilización de materiales de aporte con materiales desoxidantes como el Si o el Al poden reducir la porosidad por esta causa.
- ♦ Gases de protección: una buena parametrización del flujo aplicado y una orientación correcta de éste puede disminuir mucho la porosidad causada por la acumulación de He o Ar dentro del metal solidificado. La pureza del gas también es importante, ya que las impurezas pueden afectar como en el caso de gases disueltos en el material a soldar.

3. FASE II: ESTUDIO DE LA SITUACIÓN DE LA APLICACIÓN DEL LÁSER EN EL MERCADO ESPAÑOL

3.1. INTRODUCCIÓN.

En colaboración con los centros que componen la Red Española de Tecnología Láser (Consortio REDLASER) se ha realizado un estudio sobre la situación de la aplicación de la tecnología láser en el estado español

Los resultados del presente estudio han permitido conocer la madurez de la aplicación del Láser en cada comunidad autónoma,

Este conocimiento, junto con el del estado del arte de la tecnología láser (presentado en el capítulo anterior) es necesario para:

- Definir el punto de partida en la realización de los estudios de soldadura
- Conocer las empresas y entidades que utilizan la tecnología láser en el campo de la soldadura, al objeto de establecer colaboraciones en la realización del estudio
- Definir estrategias de actuación de cara a la difusión de los resultados del proyecto: dependiendo del grado de madurez en la utilización del láser en cada comunidad autónoma será necesario definir la información de base a partir de la cual difundir los resultados obtenidos.

A la hora de presentar los resultados se recoge en primer lugar el mercado mundial de la tecnología láser y sus campos de aplicación, para analizar en segundo término la situación a nivel nacional.

La implantación del láser en la industria Española es muy baja si la comparamos con otros países europeos. En este documento se refleja esta situación a partir del trabajo de búsqueda de datos realizado.

Pese a los años transcurridos, las aplicaciones láser y más concretamente las aplicaciones industriales del láser de potencia, tienen todavía un grandísimo campo de desarrollo en nuestro país. De hecho, de las aplicaciones industriales del láser, sólo el corte y el marcado tienen una relativamente alta implantación en las empresas españolas.

Como se recoge en las conclusiones, el desconocimiento de la tecnologías y de sus ventajas es el primer freno para una mayor utilización del láser en la industria y actuar en este sentido, con acciones de difusión, es el punto de partida que se plantea.

3.2 SITUACIÓN DEL MERCADO INTERNACIONAL.

3.2.1 EVOLUCIÓN DEL MERCADO MUNDIAL DE LÁSERES COMERCIALES.

El año 2002 supuso, por segundo año consecutivo, una importante caída en el nivel de ventas de equipos láser comerciales a nivel mundial. Tal y como se muestra en la figura 4.1, el mercado mundial de equipos láser comerciales en el 2002 fue del orden de 3.975 Millones de Euros, con una caída cercana al 24% respecto al año anterior.

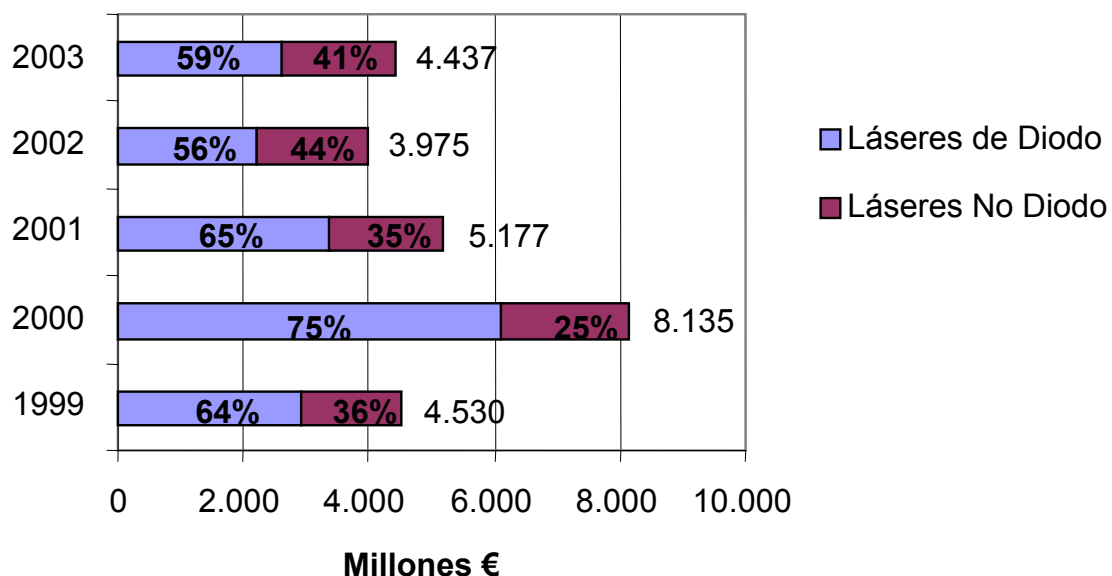


Fig. 3.1: Evolución de ventas de láseres comerciales a nivel mundial.

Esta evolución negativa del mercado mundial del láser se debe principalmente a las caídas en las ventas de láseres de diodo, equipos mayoritariamente utilizados en aplicaciones del sector de las telecomunicaciones y con nula aplicación en la soldadura. Tras el despunte del año 2000 en los dos años siguientes las ventas de láseres de diodo sufrieron importantes caídas pasando de representar el 75% de las ventas al 56%.

Frente a las fuertes caídas en las ventas de láseres de diodos, el comportamiento del mercado de láseres “No Diodo” fue más positivo con caídas mucho más moderadas (4% en el 2002 respecto al año anterior).

El mercado del láser se vio afectado por la situación económica mundial de los años 2000 y 2001 y en especial la crisis vivida en los sectores de telecomunicaciones y fabricación de semiconductores. La crisis vivida en estos sectores afectó de manera importante a las empresas suministradoras de láseres, óptica, fibra óptica, etc. La evolución en las ventas para algunos de los sectores de aplicación de los láseres se muestra en la siguiente tabla:

	2000	2001	% Crecimiento
Telecomunicaciones	4,2	2,1	-51%
Procesado de Materiales	1,55	1,45	-7%
Impresoras, electrónica de consumo, Tecnologías de la Información	1,0	0,75	-25%
Medicina	0,7	0,55	-20%
Medición e Investigación	0,21	0,24	+15%

Tabla 3.1: Ventas Mundiales de equipos láser por campos de aplicación (Miles de Millones de Euros).

3.2.3 CAMPOS DE APLICACIÓN DEL LÁSER A NIVEL MUNDIAL.

Los campos de aplicación más representativos de la tecnología láser en el contexto internacional son los siguientes:

- Telecomunicaciones
- Procesado de materiales
- Medicina
- Investigación y desarrollo
- Almacenamiento óptico de información
- Impresión
- Inspección y metrología.

De acuerdo con los datos disponibles de 2002, el mercado mundial de generadores láser asciende a unos 3.975 Millones de €. El reparto de este mercado por aplicaciones se muestra en la figura 2.2.

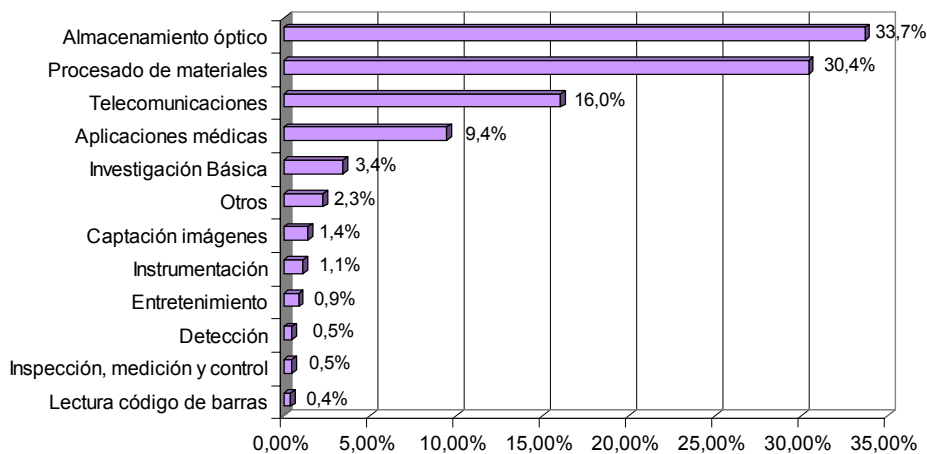


Fig 3.2: : Distribución, por campos de aplicación, de ventas de láseres comerciales a nivel mundial 2002.

Como puede apreciarse en la figura 3.2, el primer lugar en cuanto a volumen de ventas [33,7%] corresponde a aplicaciones de almacenamiento óptico (lectores/reproductores de CD, DVD, discos ópticos, etc.). Las aplicaciones de Telecomunicaciones, debido a la crisis vivida en el sector en los años 2001 y 2002, pasó a ocupar el tercer lugar en cuanto a ventas, representando el 16%. Las ventas realizadas en estos dos campos de aplicación (almacenamiento óptico y Telecomunicaciones) correspondieron fundamentalmente a láseres de diodo. El 90% de las ventas mundiales de láseres de diodo correspondieron a estos dos campos de aplicación.

El segundo lugar en importancia lo ocuparon las aplicaciones de procesado de materiales, representando un 30% de las ventas totales de láseres a nivel mundial. En este caso las ventas correspondieron a láseres No Diodo. Las aplicaciones de procesado de materiales representaron un 67% de las ventas mundiales de láseres No Diodo.

LÁSERES DE DIODO

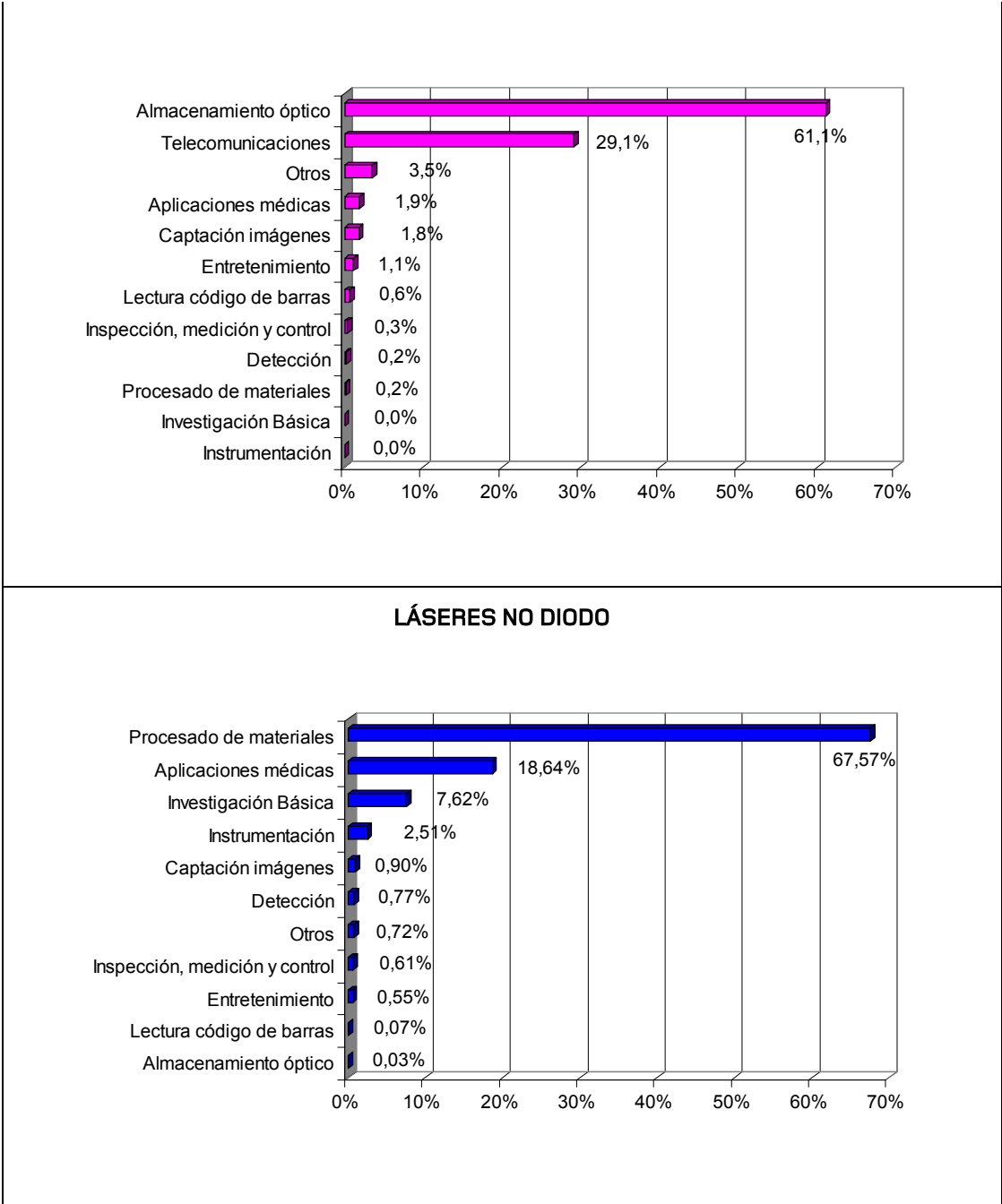


Fig 3.3 : Distribución de ventas por campos de aplicación a nivel mundial 2002.

3.3 MERCADO DEL LÁSER PARA APLICACIONES INDUSTRIALES.

3.3.1 EVOLUCIÓN DEL MERCADO INTERNACIONAL.

El principal campo de aplicación del láser en la industria es el procesado de materiales, que como se ha indicado en el apartados anteriores supone un 30% de las ventas de láseres comerciales a nivel mundial.

Desde 1975 se han instalado a nivel mundial del orden de 175.000 láseres industriales, de los cuales un 75% se mantiene en funcionamiento y 3.000 de los cuales están instalados en máquinas de corte.

La evolución de las ventas de láseres para procesamiento de materiales en los últimos años muestra, ver figura 3.4, el efecto de la desfavorable situación económica con un descenso del nivel de ventas en el 2001 respecto al año precedente. Esta tendencia se invirtió en el 2002, habiéndose experimentado un muy moderado incremento de ventas, en torno al 3%, respecto al año anterior.

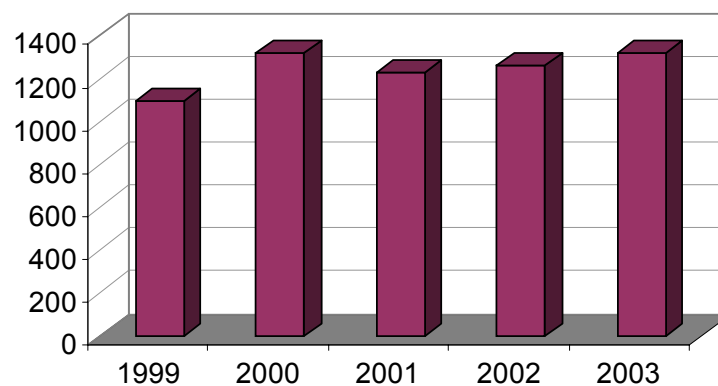


Fig 3.4: Evolución de las ventas de láseres para procesamiento de materiales. Millones de \$

3.3.2 TIPOS DE LÁSERES UTILIZADOS EN EL PROCESADO DE MATERIALES.

En aplicaciones de procesamiento de materiales se utilizan principalmente los láseres No Diodo, siendo los más vendidos, por orden de importancia: CO₂, Nd-Yag y Excímeros.

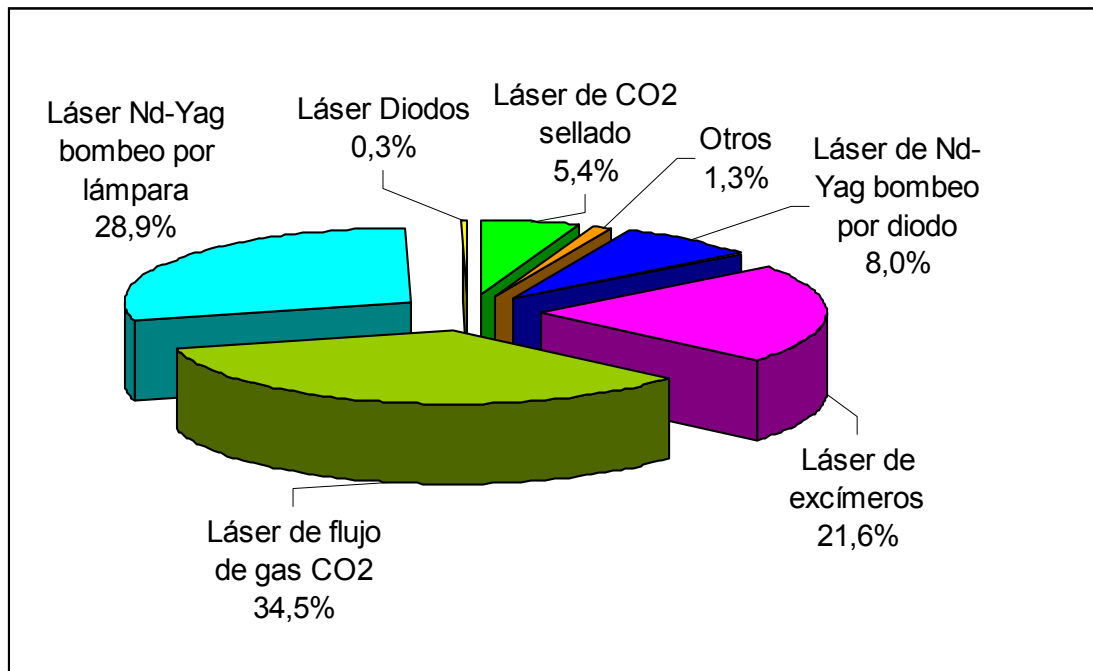


Fig. 3.5: Distribución por tipo de láser de ventas de láseres para procesamiento de materiales a nivel mundial durante el 2002

Los láseres de excímeros experimentaron un importante crecimiento en las ventas en los últimos años, representando en el 2002 el 21,6% de las ventas de láseres a nivel mundial. Este tipo de láseres, debido a la alta energía de los fotones emitidos, generan una eliminación de materia con gran eficiencia reduciendo al máximo el daño térmico al material adyacente. Sus principales campos de aplicación son la fotolitografía en la industria electrónica y algunas aplicaciones de marcado de productos.

El grueso del mercado corresponde a los láseres de CO₂ [39,9%] y Nd-Yag [36,9%], tipo de láseres mayormente utilizados en aplicaciones de corte, marcado, microprocesado y soldadura.

3.4 DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DEL MERCADO DE LÁSERES INDUSTRIALES. SITUACIÓN EN EUROPA.

3.4.1 PRODUCCIÓN MUNDIAL DE LÁSERES INDUSTRIALES.

El mercado mundial de láseres industriales, principalmente se divide entre: EEUU, Europa y Japón. La distribución geográfica en cuanto a la producción mundial de láseres industriales está representada en los gráficos de la figura 3.5.

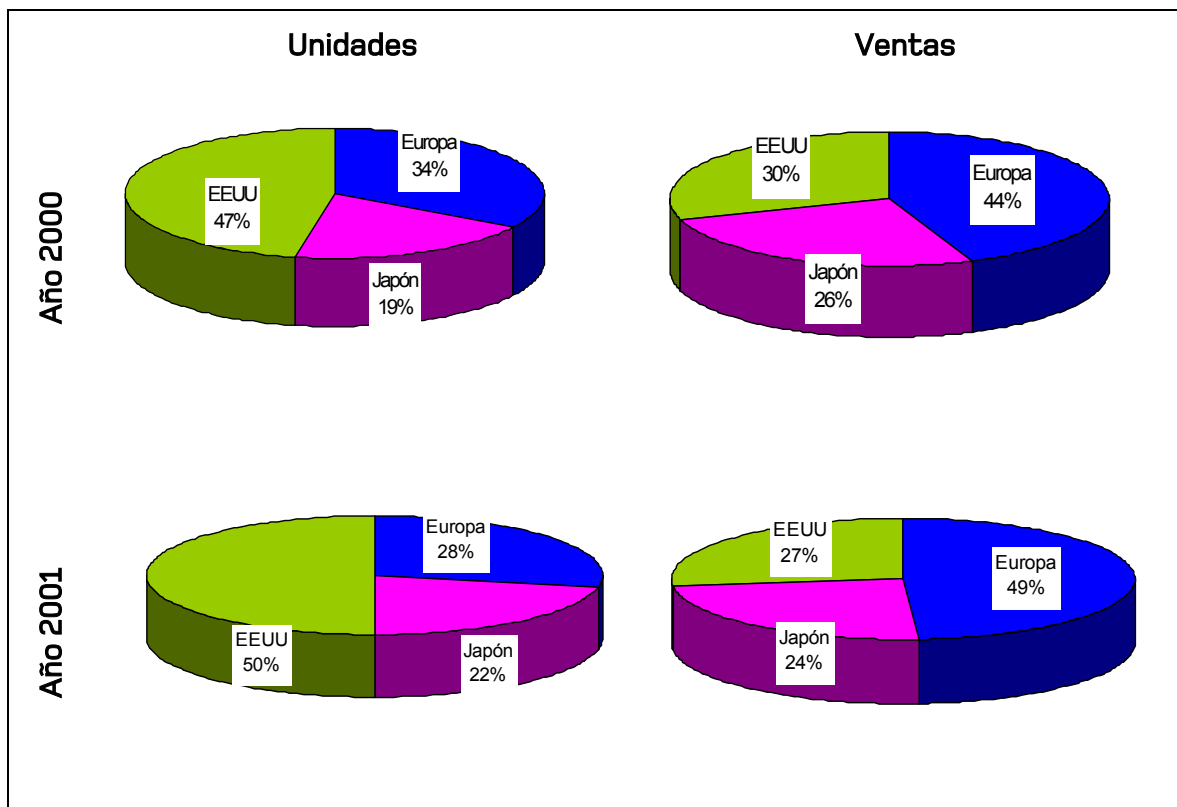


Fig 3.6: Distribución geográfica de la producción mundial de láseres industriales. 2000 y 2001.

Como se aprecia en la figura, si bien EEUU ocupa el primer lugar en cuanto a número de unidades producidas (50% en 2001), esta primacía corresponde a Europa en lo que respecta al nivel de ventas. En el año 2001 el 49% del volumen de negocio estaba en Europa, este hecho se debe a que la producción en Europa corresponde a sistemas o equipos láser de mayor potencia.

Además la cifra de ventas en Europa ha seguido una evolución positiva, pasando de representar el 44% del volumen de negocio en el 2000, al 49% en el 2001.

Analizando la producción por tipos de láseres, EEUU concentra el 54% de la producción mundial de láseres de CO₂, mientras Europa es el principal productor (41%) de láseres de estado sólido. Sin embargo en cuanto a cifras de ventas, Europa ocupa el primer lugar para ambos tipos de láseres debido a la producción de unidades de mayor potencia.

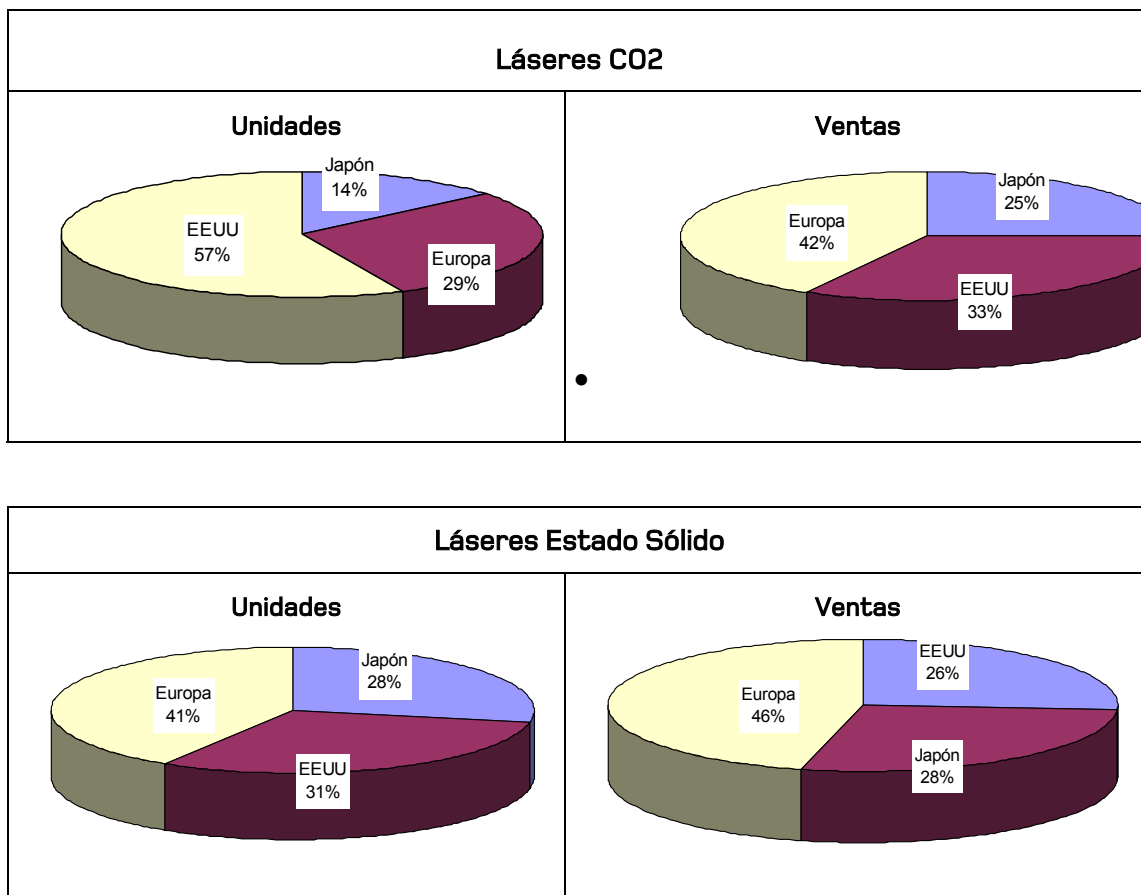


Fig 3.7: Distribución geográfica de la producción mundial de láseres CO2 y Estado sólido. 2000

3.4.2 DISTRIBUCIÓN MUNDIAL DE INSTALACIONES DE LÁSERES INDUSTRIALES.

EEUU y Europa son los principales mercados para las instalaciones industriales de láseres, concentrando en torno al 60% de las instalaciones a nivel mundial.

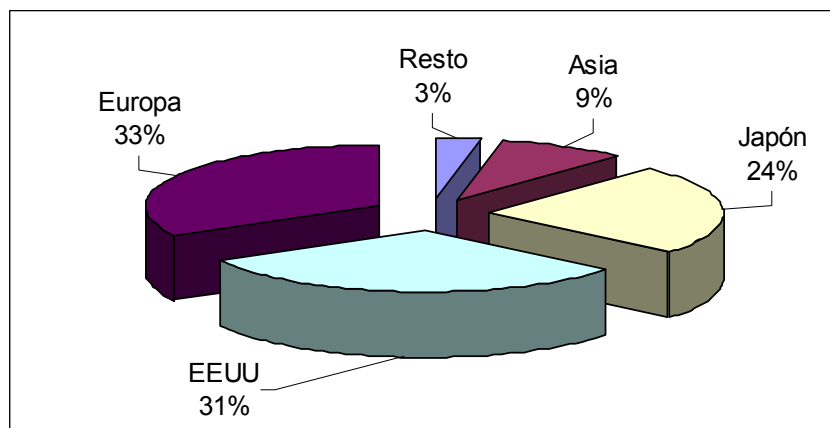


Fig 3.8: Distribución geográfica de instalaciones láser a nivel mundial en el año 2000.

Si se compara el mercado láser europeo con el resto se aprecia que Europa se sitúa por delante de EE.UU. en las aplicaciones industriales de láser para procesamiento de materiales, debido principalmente al impulso de sectores industriales muy fuertes en Europa como son la Máquina-Herramienta y la industria de automoción. Por ejemplo, mientras que el mercado láser en la industria de la automoción se ha establecido ya en Europa, en EE.UU. está empezando a aplicarse.

El mercado de EEUU en tecnología láser está más dirigido a la industria de semiconductores y electrónica.

En el mercado europeo, Alemania destaca frente al resto de los países europeos tanto en la utilización como en el desarrollo de la tecnología láser. No se dispone de datos totales de láseres industriales instalados en Europa. Como referencia se puede tomar la distribución geográfica de láseres de CO₂ de alta potencia que son los utilizados mayoritariamente en las aplicaciones de corte, aplicación principal de los láseres industriales.

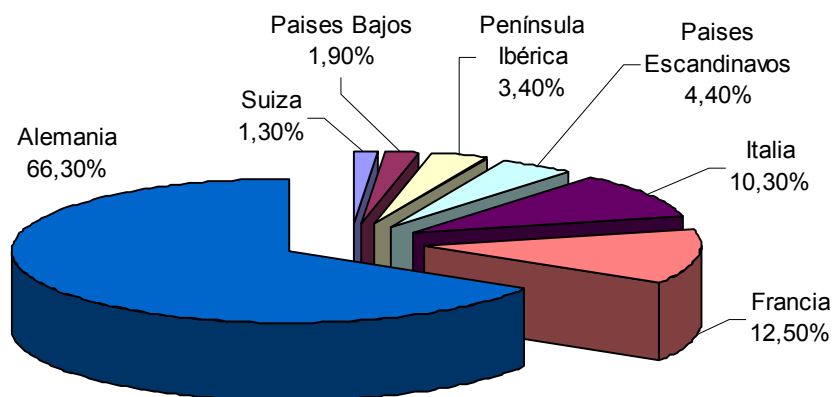


Fig 3.9: Distribución por países de los láseres industriales de CO₂ de > 1KW.1999

En esta distribución se observa la baja implantación de la tecnología en la industria española. En los últimos años y debido principalmente al empuje del sector de automoción la situación española ha mejorado en cierta medida, pero se mantiene una gran diferencia con respecto a países como Alemania, Francia e Italia.

3.5 APLICACIONES LÁSER EN EL PROCESADO DE MATERIALES.

En el año 2001 el corte de materiales, representando en torno al 31% del número total de instalaciones de láser a nivel mundial, se situó como la principal aplicación de los láseres industriales. En segundo lugar se encuentran las instalaciones láser para operaciones de marcado que representan en torno al 20% y la soldadura con un 19%.

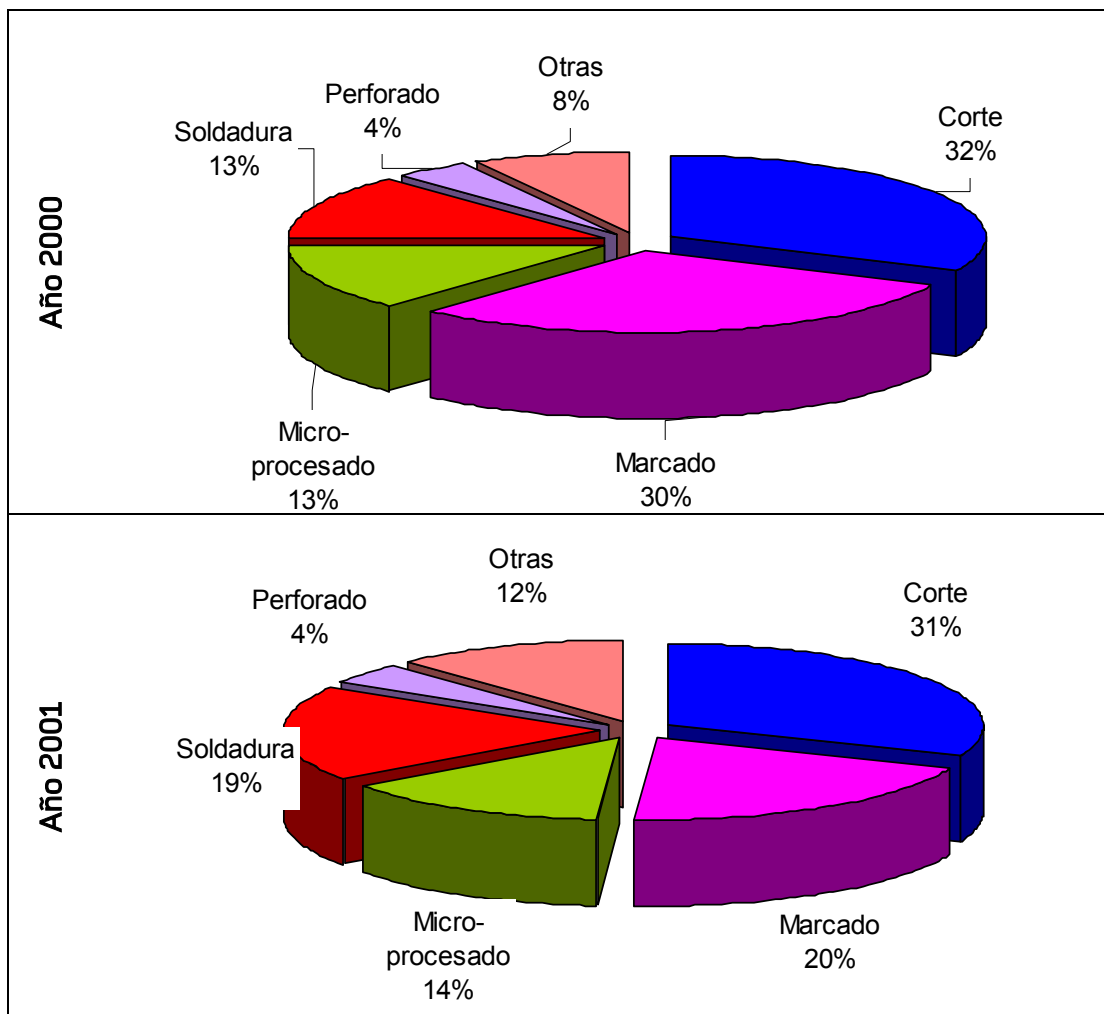


Fig 3.10: Número de instalaciones láser industriales por aplicación.

Analizando los datos de los años 2000 y 2001 cabe reseñar:

- Un pequeño descenso en las aplicaciones de corte pasando del 32% al 31%.
- Un importante descenso en cuanto a las aplicaciones de marcado que pasaron de representar el 30% de las instalaciones al 20% en el 2001.
- Un crecimiento en las aplicaciones de soldadura que pasaron de representar el 13% en el 2000 al 19% en el 2001.

La tecnología de soldadura láser poco a poco, pero de un modo seguro aumentará su porción en el mercado europeo de los equipamientos para soldadura, imponiéndose sobre otras técnicas de soldadura ahora rivales.

Este crecimiento se verá impulsado por las altas prestaciones que ofrece esta tecnología reflejadas en la alta calidad de las soldaduras que proporciona, que requieren además menos trabajos sobre el metal una vez que se ha soldado. De momento la soldadura láser es cara, pero gracias a áreas como la industria de la automoción en la que su uso se está extendiendo, se podrá mejorar su precio.

Las previsiones apuntan a que en los próximos años el mayor crecimiento se producirá en las aplicaciones de soldadura (cuatruplicando las cifras actuales) y en corte (que triplicará sus cifras). Los desarrollos actuales de nuevos tipos de láser, como el de diodo de alta potencia o los láseres de Nd-Yag bombeados por diodo, abren un amplio abanico de posibilidades de aplicación de la tecnología láser de manera competitiva y eficaz en el campo de la soldadura, concretamente en la unión de aceros de alta resistencia y de termoplásticos. Además se dan nuevas aplicaciones, como la soldadura láser remota que se considera puede llegar a ser un campo de aplicación de gran importancia en un futuro próximo.

Otro importante campo que se abre para el láser con estos avances es el del tratamiento de superficies, restringido hasta la fecha a técnicas convencionales.

La industria de la máquina- herramienta europea también hace uso de las ventajas que le ofrece el procesado láser en diseño de producto, optimización de la producción.

El mercado de etiquetas para coches, el mercado láser de tarjetas inteligentes y el mercado de cristales son nuevas aplicaciones en las que las compañías europeas son líderes.

Otras aplicaciones que han experimentado crecimiento en los últimos años son el microcorte y la microsoldadura, y seguirán haciéndolo en el futuro.

El potencial de la tecnología láser aplicada al procesamiento de materiales es día a día más importante, pero la introducción de esta tecnología en la industria como herramienta sólo acaba de comenzar. Estudios económicos realizados a nivel mundial predicen que el número de aplicaciones existentes en la actualidad se verá duplicado en los próximos cuatro años.

En cuanto a los sectores industriales en los que se aplica el láser, la industria del automóvil ha sido pionera en su aplicación y es uno de los sectores industriales en los que más implantada está esta tecnología.

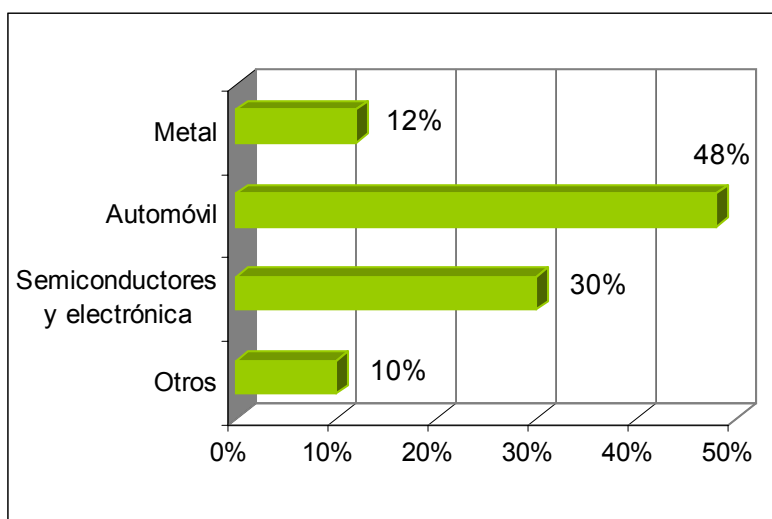


Fig 3.11: Sectores Industriales de aplicación del láser (cifra de ventas)

3.6 DATOS ESTADÍSTICOS DE INSTALACIONES LÁSER EN ESPAÑA.

Como ya se ha descrito en apartados anteriores, la implantación de la tecnología láser en el sector industrial Español está muy por debajo respecto a otros países europeos.

Los datos disponibles sobre el número de instalaciones de láseres industriales existentes en España son muy escasos. Para analizar la situación a nivel nacional se ha recurrido a suministradores de generadores láser y suministradores de gas a fin de obtener datos actualizados sobre el número y distribución de instalaciones láser existentes en España en aplicaciones de procesamiento de materiales.

Los datos obtenidos se resumen en la siguiente tabla:

- Entre 520 a 580 instalaciones láser para procesamiento de materiales (excluido el marcado)
- De ellas unas 60 instalaciones son de soldadura
- Más de 1.500 instalaciones de marcado en la Península Ibérica (España + Portugal)

Tabla 3.12. Estadística de aplicaciones en España

El marcado es una aplicación en la que los equipos son compactos y que está bastante extendida. Es difícil saber a ciencia cierta cuántas empresas cuentan con máquinas láser de marcado. Se estiman más de 1.500 instalaciones de marcado existentes entre España y Portugal.

Excluyendo estos equipos para marcado, el número de instalaciones láser en España para aplicaciones de procesamiento de materiales se sitúa entre las **520-580**. El mayor número de dichas instalaciones se sitúa en Cataluña, con un 34,8% del total, seguido de País Vasco, Madrid y Aragón.

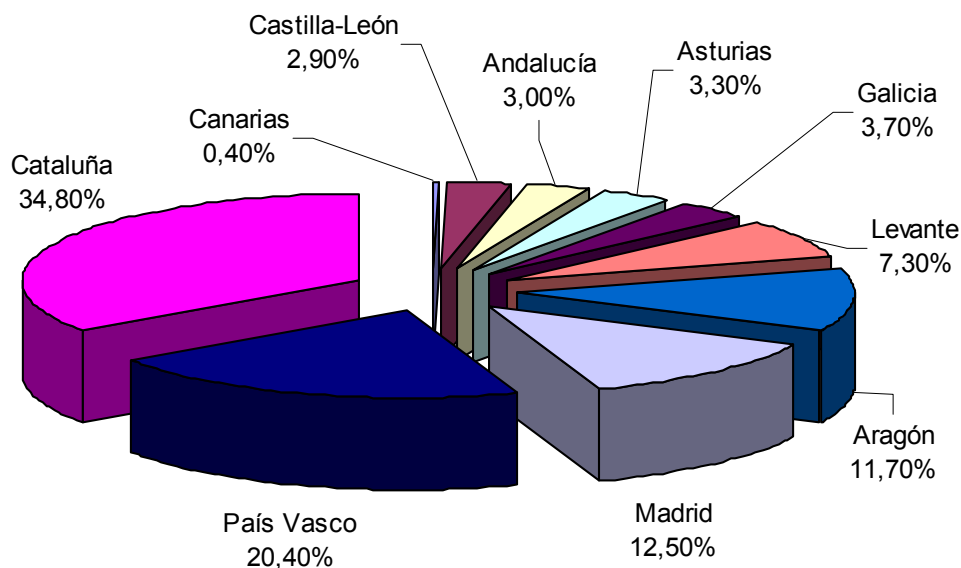


Fig. 3.13: Distribución de instalaciones láser para procesamiento de materiales (excluido el marcado) en España.

La aplicación mayoritaria de las instalaciones de láseres industriales implantadas en España es el corte. Es un campo en el que fabricantes e

integradores han avanzado notablemente, presentando soluciones “llave en mano” que satisfacen en general la demanda de la industria. En este sentido, hay numerosas empresas que en los últimos diez años han implantado el láser para actividad de corte, bien en la fabricación de sus propios productos ó bien para subcontratación.

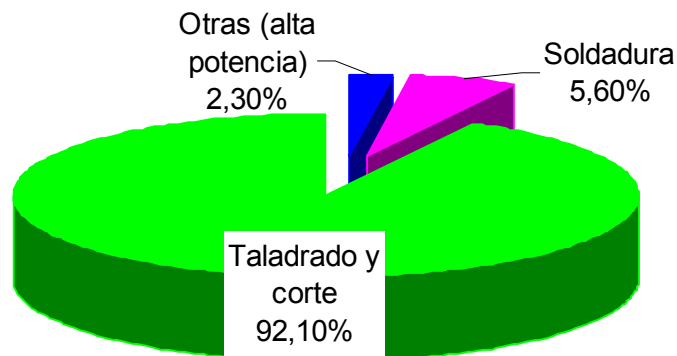


Fig 3.14: Distribución de los equipos láser por tipo de aplicación.

Sin embargo, otro tipo de aplicaciones industriales del láser de potencia a nivel nacional todavía no han alcanzado un gran desarrollo. Este es el caso de la soldadura que pese a ser uno de los grandes campos de aplicación industrial del láser y en el que se están realizando actualmente importantes avances, tiene un grado de implantación muy bajo a nivel nacional. Exceptuando fabricantes de automóviles y algunas empresas proveedoras de automoción, hay muy pocos láseres implantados en España para aplicaciones de soldadura a nivel industrial. Entre los potenciales usuarios de la soldadura láser sigue habiendo bastante desconocimiento y en muchos casos desconfianza.

Hay un hecho también fundamental que caracteriza a la soldadura láser y es que pese a sus indudables ventajas frente a otras tecnologías mas implantadas, necesita de una preparación de bordes, juntas, etc. bastante buena, lo que muchas veces puede implicar un cambio de diseño en el conjunto soldado y/o un encarecimiento, que no suele ser bien encajado por el posible cliente. Todo esto unido a la necesidad de aplicación automatizada (por medio de CNC, robot, etc.), acota el campo y puede explicar, en parte, junto con la falta de una mayor difusión del proceso y sus ventajas, la relativa escasez de implantación de la aplicación de soldadura láser.

Las aplicaciones de tratamiento superficial (principalmente temple) y recubrimiento (cladding) no tienen prácticamente ninguna implantación industrial. Sin embargo, estos campos tienen una proyección de futuro evidente en temas de endurecimiento local y en reparación de componentes de alto valor añadido por las muestras de interés materializadas en colaboraciones que se han mantenido con algunas empresas españolas.

En cuanto al tipo de láseres instalados en España en aplicaciones de procesamiento de materiales, mayoritariamente son láseres de CO₂ de alta potencia.

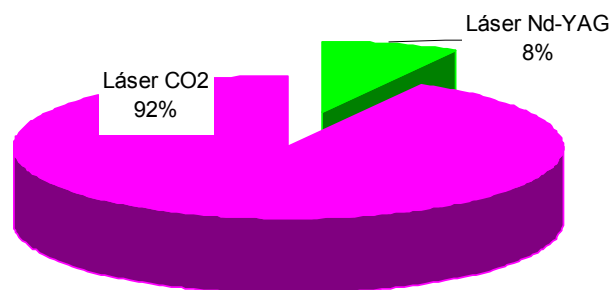


Fig. 3.15 Distribución española de los equipos láser por medio activo según suministradores de gas.

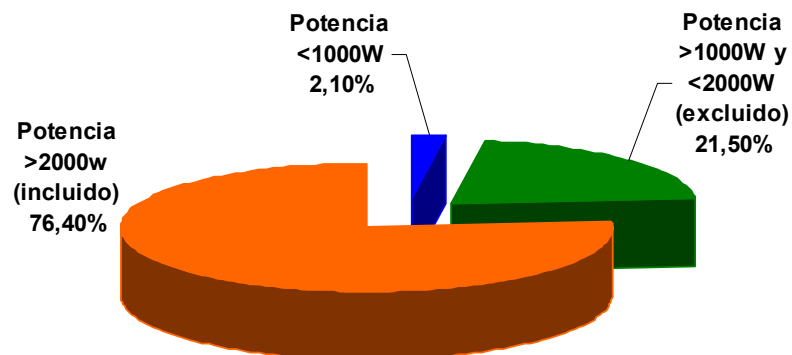


Fig. 3.16: Distribución española de los equipos láser por rangos de potencia según suministradores de gas.

3.7 DATOS DE COMUNIDADES AUTÓNOMAS.

3.7.1 ARAGÓN.

Los datos disponibles de instalaciones láser en Aragón indican del orden de 65 equipos láser instalados en la comunidad repartidos de la siguiente forma por aplicaciones:

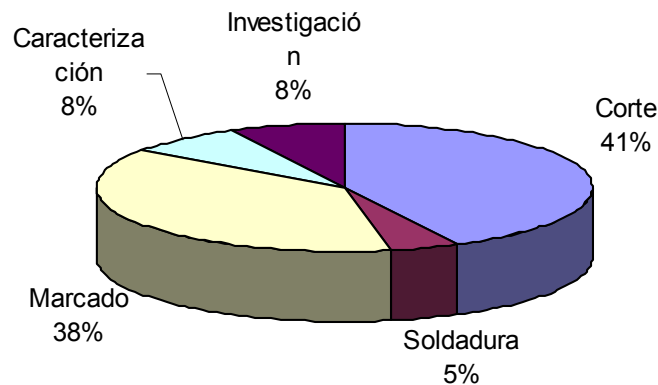


Fig. 3.17: Distribución por aplicaciones de equipos láser instalados en la comunidad de Aragón.

- Como reflejan estos datos, el mayor número de equipos láser (todos ellos de CO₂) se encuentra en aplicaciones de corte. En este campo en Aragón cuentan con equipo láser diversos tipos de empresas, tales como:

- Empresas que ofrecen servicios de corte. En este grupo se puede nombrar a LASER ARAGON y LASER EBRO con 4 equipos láser cada una de ellas.
- Algunas empresas fabricantes de componentes para automoción.
- Una empresa de maquinaria agrícola.
- Una empresa de fabricación de camas.
- CAF. Empresa fabricante de vagones para ferrocarril y metro.
- El marcado ocupa el segundo lugar en cuanto a equipos láser instalados en la comunidad. En torno al 90% de los equipos láser para marcado son de Nd-Yag.

En cuanto a la aplicación de soldadura láser es muy minoritaria, con 3 equipos instalados en OPEL ESPAÑA y TAILOR METAL.

3.7.2. CASTILLA Y LEÓN.

Es de destacar que la implantación de la tecnología láser en las empresas nacionales se realiza a un ritmo mucho más lento del que se observa en otros países europeos. Esta situación es muy acusada en el entorno de la comunidad de Castilla-León, donde existen escasos antecedentes de implantación industrial, y donde la demanda de tecnología láser se limita prácticamente a aplicaciones suficientemente desarrolladas como pueda ser el caso del corte de laminados metálicos. En este campo, pese a que existen en Castilla y León algunas empresas dedicadas a prestar servicios de corte mediante láser (BURGUILÁSER, Burgos), la demanda se desvía principalmente al País Vasco.

Se conocen algunas empresas que hacen uso de instalaciones láser de media potencia para operaciones de corte de materiales plásticos (Metacrilatos BURGOS) y textiles (VIRTO, Valladolid) así como operaciones de marcado y grabado industrial (Grabaciones BURGOS).

En el campo de la soldadura, la empresa FASA – RENAULT (Valladolid) dispone de dos líneas automatizadas con láseres de alta potencia para la generación de tailored-blanks.

Finalmente, en el campo de la investigación aplicada, la Fundación CIDAUT (Valladolid) dispone de instalaciones láser de media y alta potencia de las que se hace uso para el desarrollo de proyectos en los campos del corte, marcado y soldadura de materiales metálicos y no metálicos, y el extenso campo del tratamiento de superficies (ablación, temple, recubrimiento, aleación superficial e inyección de materiales cerámicos en sustratos metálicos).

A continuación se indican algunos datos acerca del número de instalaciones láser existentes en Castilla y León a las que proveen los suministradores de gases:

CARBUROS METÁLICOS	Número de equipos a los que sirven en la comunidad de Castilla y León
Palencia:	1 de corte
Valladolid:	3 soldadura, 2 corte
Burgos:	8 corte(+1 previsto)
Salamanca:	1 corte
Resto de provincias:	0

AIR LIQUIDE	Número de equipos a los que sirven en la comunidad de Castilla y León
Valladolid:	RENAULT: 5 equipos de soldadura
	Facultad de Ciencias:1 equipo
	FEYFRI(Santovenia):1 equipo de corte
Burgos:	1 de corte

Tabla 3.3: Instalaciones láser en Castilla y León

Fabricantes y suministradores.

A nivel regional, existe el antecedente de NICOLÁS CORREA (Burgos), empresa desde la que se han hecho intentos de fabricar y comercializar sistemas de corte industrial.

Las empresas suministradoras de fuentes láser y componentes ópticos para aplicaciones industriales a nivel nacional distribuyen productos que se fabrican principalmente en Alemania y EEUU. Ninguna de estas empresas se encuentra ubicada en Castilla y León

3.7.3 CATALUÑA

Cataluña es la comunidad donde se concentra el mayor número de instalaciones láser para el procesado de materiales de toda España. Se calcula que hay instalados más de 170 equipos con potencias superiores a los 1.000 W, de los cuales un 91% corresponden al tipo CO₂ y un 9% a Nd:YAG. La mayor

concentración de estos equipos la encontramos en el cinturón industrial de Barcelona en especial en la comarca del Vallés.

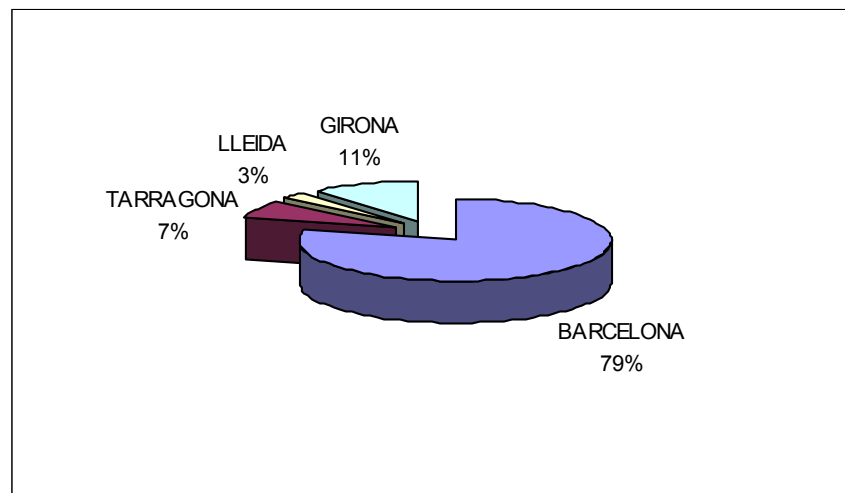


Fig. 3.18: Distribución de láseres de potencia por provincias

Al igual como en el resto de las comunidades la utilización de los equipos de alta potencia se encuadra dentro dos sectores, en el de la transformación metálica, por lo que respecta a las aplicaciones de corte, y en el sector del automóvil por lo que se refiere a las aplicaciones de soldadura.

En el caso del corte, la actividad principal se lleva a cabo a través de los operadores de servicios de subcontratación, de los que destaca RECAM-LASER por gestionar directamente o a través de otros nombres comerciales más de 15 máquinas. Es importante comentar que en los últimos meses se han detectado algunos movimientos de grandes grupos europeos con el fin de afincarse en nuestro país, ya sea directamente o a través de alianzas con jobshops nacionales. Sin duda la aparición de grandes grupos pondrá en peligro las empresas de subcontratación de tamaño pequeño, si estas no son capaces de especializarse por tipo de servicio (servicios urgentes, pequeñas series, procesado de materiales especiales, etc.)

Por lo que respecta a la soldadura, cabe resaltar el liderazgo de la empresa SEAT en la utilización del láser para la soldadura de carrocerías, y la empresa SOLBLANK en la utilización del láser para la soldadura de tailored-blanks.

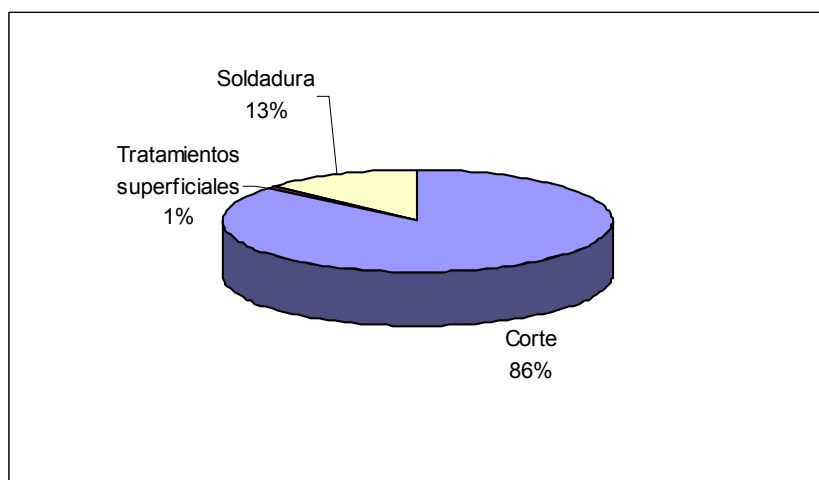


Fig. 3.19: Distribución de láseres de potencia por aplicación

Por encima de las aplicaciones de potencia (corte metálico, soldadura y tratamientos superficiales), si tenemos en cuenta el número de equipos instalados (> 400 en Cataluña) encontramos la aplicación de marcado y grabado, utilizadas principalmente para la codificación industrial.

INGENIERÍAS Y EMPRESAS QUE DESARROLLAN APLICACIONES LÁSER.

En cuanto a la oferta en aplicaciones Cataluña también se sitúa en una posición destacada en especial aquellas que están especializadas en aplicaciones para el sector automovilístico como:

- KUKA (sistemas robotizados de corte y soldadura)
- EDAG (sistemas robotizados de soldadura)
- ABB (sistemas robotizados de soldadura)
- EINA (sistemas robotizados de corte de plásticos)
- IDASA (sistemas robotizados de corte de plásticos)
- SERRA SOLDADURA (sistemas de soldadura para TAILORED-BLANKS)

Existen otras ingenierías que realizan proyectos para diferentes sectores como DILASER, BERMAQ, o el propio LGAI Centro Tecnológico.

Dentro de este grupo cabe destacar la empresa manresana MACSA, la cual se ha erigido como uno de los líderes mundiales de sistemas de codificación y marcado por láser.

En resumen, podríamos decir que en Cataluña la tecnología de corte y marcado está totalmente transferida con un grado de actividad totalmente maduro. Es en el campo de la soldadura y otras aplicaciones (Soldadura híbrida, cladding, soldering, etc) donde todavía queda mucho recorrido para alcanzar los niveles de utilización europeos. Esto será posible, por un lado si somos capaces de extender el grado de conocimiento y la potencialidad de la tecnología a las empresas y en especial a sus técnicos, y por el otro, si se genera un tejido de oferta tecnológica (centros y empresas que desarrollen soluciones que ayuden a la aplicación de la tecnología: equipos, ópticas, software, sensores, etc.) eficaz, competitiva y cercana a la industria.

3.7.4 NAVARRA.

Navarra fue pionera en España en la implantación de la tecnología láser para aplicaciones industriales, creándose en el año 1986 el CENTRO LASER NAVARRA que posteriormente en el año 1989 se integró en CETENASA.

Prácticamente desde el principio, se dividió la actividad del centro en servicios directos a clientes (fundamentalmente subcontratación en corte de piezas y estudios de viabilidad) y en proyectos de ámbito regional, nacional y europeo. Los campos o aplicaciones fundamentales en los que se ha trabajado en CETENASA han sido el taladrado y corte, la soldadura, el tratamiento térmico superficial, el recubrimiento ("cladding") y, en menor medida, otras aplicaciones como el marcado, LAM (Laser Assisted Machining) o la aleación superficial por láser

Analizando la implantación de láser por tipo de aplicación, podemos indicar:

1. La aplicación de corte por láser en Navarra, como prácticamente sucede actualmente en todos los lugares donde se aplica, se considera "transferida" a la industria. En este sentido, hay numerosas empresas que en los últimos diez años han implantado el láser (sobre todo de CO₂) para actividad de corte, bien en la fabricación de sus

propios productos ó bien para subcontratación, siendo éste un hecho que se percibe no sólo en Navarra, sino en el resto del Estado.

2. La soldadura (tanto de alta penetración por key-hole como por conducción), pese a ser uno de los grandes campos de aplicación industrial del láser desde prácticamente su descubrimiento su aplicación en la industria navarra es aún muy reducida. Si exceptuamos algunas importantes empresas multinacionales del automóvil (en el caso de Navarra: VOLKSWAGEN) que utilizan láseres de Nd-YAG con fibra óptica para soldadura de partes estructurales (carrocerías, etc.) y algunas auxiliares que sueldan “tailored blanks”, hay muy pocos láseres implantados para otras aplicaciones de soldadura a nivel industrial. Los centros tecnológicos o entes similares son los que han hecho proyectos y estudios de viabilidad y trabajos en serie, pero evidentemente no se puede decir, ni mucho menos, que haya una transferencia efectiva a la industria.

3. Las aplicaciones de tratamiento superficial (principalmente temple) y recubrimiento (cladding) no tienen prácticamente ninguna implantación industrial, aunque bien es cierto que desde CETENASA se está trabajando bastante en estos campos últimamente a nivel de proyectos, estudios de viabilidad y servicios directos, aplicando principalmente el láser de diodo. Hay una empresa en España que asesorada por CETENASA utiliza el láser de diodo para el tratamiento térmico (temple) de una zona de componentes de automoción. Sin embargo, estos campos tienen una proyección de futuro evidente en temas de endurecimiento local y en reparación de componentes de alto valor añadido.

EMPRESAS QUE PROPORCIONAN SERVICIOS LÁSER.

En Navarra existen varias empresas que se dedican al corte por láser, tanto para su producción como para otras empresas (subcontratación). Dentro del grupo de empresas que se dedican a la subcontratación de corte por láser tenemos en la comunidad Navarra cuatro empresas (tres están situadas en el cinturón industrial de Pamplona teniendo una de ellas, además, otro taller en la zona sur de la provincia.).

El marcado es otra aplicación láser en la que hay empresas dedicadas a la subcontratación. A diferencia del corte u otras aplicaciones, el marcado es una aplicación en la que los equipos son compactos y a unos precios más asequibles, por lo que está bastante extendida y es difícil saber a ciencia cierta cuántas empresas cuentan con máquinas láser de marcado. De cualquier manera, en la comunidad Navarra la utilización de los láseres para marcado va desde motivos publicitarios hasta grabado en herramientas, pasando por aplicaciones diversas. En este sentido, cabe destacar una empresa que lleva a cabo este tipo de aplicaciones desde prácticamente su fundación en 1987.

3.7.5 PAÍS VASCO.

El País Vasco es una de las comunidades autónomas de mayor implantación de la tecnología láser a nivel nacional. Los sectores principales en los que está implantada esta tecnología son la industrial de transformación metálica, máquina-herramienta y empresas suministradoras del sector de automoción.

Al igual que en el resto de comunidades autónomas, la gran mayoría de instalaciones existentes en el País Vasco son de corte, principalmente de productos metálicos. El número de instalaciones láser en la comunidad del País Vasco ronda el centenar, de las cuales se tienen identificadas en torno a 60 empresas. De las empresas identificadas con equipos láser destaca el número de empresas de subcontratación, de servicios de corte y/o caldererías que disponen de equipos de corte por láser. Se cuentan en torno a 50 empresas de este tipo repartidas principalmente entre las provincias de Vizcaya y Guipúzcoa.

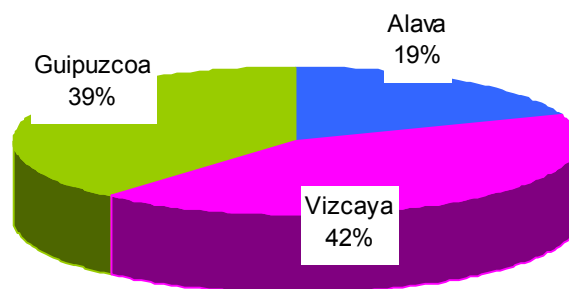


Fig. 3.20: Distribución por provincias de instalaciones láser en el País Vasco.

Dentro de estas empresas, además de las empresas cuyos servicios son exclusivos de corte láser, se incluyen en torno a 20 empresas de calderería que fabrican, mayormente bajo plano, productos para diversos sectores tales como:

- Bienes de equipo eléctrico: Cajas, armarios, cuadros, bastidores y conjunto metálicos para la industria eléctrica y electrónica.
- Carenados para: Maquinas de juego, equipamiento bancario, Maquina-Herramienta, etc.

Como se ha indicado mayoritariamente las empresas que ofrecen servicios de corte por láser se centran en el corte de materiales metálicos. Se conoce alguna empresa cuya actividad se centra en ofrecer servicios de corte de plásticos, como es el caso de PLASTILUX (Guipuzcoa).

Dentro de las aplicaciones de corte resulta mayoritaria la implantación de equipos de corte 2D utilizando pórticos de corte por láser CO₂. Aunque en menor medida, hay empresas que ofrecen servicios de corte en 3D como es el caso de BMS System (Alava) o APARICIO (Vizcaya).

Además de empresas de subcontratación, la aplicación del corte por láser es utilizada por empresas diversas entre las que se ha identificado a:

- Fabricantes de mobiliario metálico. Estanterías, estructuras metálicas.
- Una empresa fabricante de material para personas minusválidas.
- Empresa fabricante de equipos de manutención.
- Empresas de componentes para automoción entre las que podemos mencionar el grupo GESTAMP, Tenneco Automotive Ibérica, etc.
- así como CAF en la fabricación de vagones de ferrocarril.

En cuanto a la aplicación de soldadura láser y repitiendo la situación que se da en otras comunidades, su implantación en la industria del País Vasco es muy reducida y prácticamente centrada en empresas auxiliares de automoción. En otros sectores se puede indicar a ORMAZABAL, empresa fabricante de equipos para el sector eléctrico, que dispone de una instalación de soldadura láser para la soldadura de las celdas para equipos de subestaciones eléctricas.

Si bien la implantación en la industria de la soldadura láser es aún muy baja, el interés de las empresas por esta tecnología es creciente. Muestra de ello es la mayor demanda de información, pruebas y estudios de viabilidad que desde las empresas llega a ROBOTIKER. En este sentido un campo en el que algunas empresas (ingenierías y empresas suministradoras de componentes de automoción) muestran interés es la soldadura remota.

Ingenierías que desarrollan aplicaciones láser.

En el País Vasco existen varias ingenierías que realizan el diseño y desarrollo de sistemas láser, de máquinas de corte por láser. Podemos citar:

Empresa	Provincia
LAZPIUR	GUIPUZCOA
FAGOR ARRASATE S. Coop.	GUIPUZCOA
GOITI.	GUIPUZCOA
GAINDU, S.A.	GUIPUZCOA
I2M GRUPO TECNOLOGICO	GUIPUZCOA

Tabla 3.4: Ingenierías en el País Vasco

Se trata principalmente de empresas fabricantes de máquina-herramienta o maquinaria especial. ROBOTIKER ha colaborado con alguna de estas ingenierías sobre todo en la integración del láser con la máquina.

3.8 FABRICANTES Y SUMINISTRADORES DE EQUIPOS Y SISTEMAS LÁSER EN ESPAÑA.

En el campo de la fabricación de sistemas industriales para procesado láser, el mercado nacional se centra en equipos de máquina – herramienta destinados

preferentemente a operaciones de corte en 2D y 3D. La mayor parte de los fabricantes se ubica en el País Vasco.

Es de destacar que la experiencia de LÁSER QUANTA, S.A. (Madrid) ha sido la única emprendida a nivel nacional destinada a la fabricación de equipos láser de potencia. Esta empresa se aventuró, sin éxito alguno, en la fabricación de sistemas industriales láser de CO₂.

MONOCROM, S.L., en Tarragona, es la única empresa que conocemos que pueda estar relacionada con el diseño y fabricación propia de componentes ópticos destinados al desarrollo de aplicaciones láser.

Sí existen, a nivel nacional, empresas suministradoras de fuentes láser y componentes ópticos para aplicaciones industriales. El material que distribuyen se fabrica principalmente en Alemania y EEUU. La siguiente tabla recoge a los principales suministradores de generadores y equipos láser a nivel nacional.

FABRICANTE	DISTRIBUIDOR	PRODUCTOS
TRUMPF	TRUMPF MAQUIARIA	SISTEMAS LÁSER (CORTE, SOLDADURA, MARCADO, ETC.)
PRIMA INDUSTRIE	CHARTERINA HNOS.	SISTEMAS LÁSER (CORTE, SOLDADURA Y TRAT. TÉRMICO).
AMADA SCHIAVI	AMADA SCHIAVI	SISTEMAS DE CORTE POR LÁSER.
LASERVALL	MACSA	SISTEMAS PARA MARCADO Y SOLDADURA POR PUNTOS.
GLI	GLI	SISTEMAS PARA MARCADO
MAZAK	LASCOM	SISTEMAS DE CORTE
ADIRA	LORENZO MUÑOZ	SISTEMAS DE CORTE
SALVAGNINI	METALES Y FORMAS	SISTEMAS DE CORTE
REIS ROBOTICS	REIS ROBOTICS	SISTEMAS DE CORTE Y SOLDADURA
CR ELECTRONIC	GRUPO REDIMA	SISTEMAS DE CORTE
FOBA	PÉREZ CAMPS	SISTEMAS DE GRABADO

		Y MARCADO
ROFIN SINAR	ROFIN ESPAÑA	RESONADORES LÁSER (CO ₂ , YAG Y DIODO)
QUANTRONIX	INNOVA	SISTEMAS DE MARCADO
PRC	INNOVA	RESONADORES CO ₂
LASERLINE	INNOVA	RESONADOR DE DIODO
COHERENT	INNOVA	RESONADORES CO ₂ SELLADOS

Tabla 4.5 Fabricantes y distribuidores de resonadores.

3.9 CONCLUSIONES.

- Como ha quedado reflejado en apartados anteriores, **la implantación de la tecnología láser en las empresas nacionales se realiza a un ritmo mucho más lento del que se observa en otros países europeos.**
- En la actualidad hablamos de cerca de 600 instalaciones láser industriales y más de 1.000 equipo de marcado láser en España. **Pese al número creciente de instalaciones no existe una regulación Española en materia de seguridad para este tipo de instalaciones.**
- La aplicación mayoritaria en el mercado nacional es el corte por láser. Esta aplicación la consideramos de alguna manera “transferida” a la industria. Excepto en cuestiones muy puntuales, como pueden ser algunos materiales especiales o cuestiones colaterales, no podemos decir que se preste a importantes desarrollos desde el punto de vista de los centros ó institutos tecnológicos.
- Es, sin embargo, en otro tipo de aplicaciones industriales del láser de potencia donde todavía hay mucho por hacer y que a nivel nacional todavía no han alcanzado un gran desarrollo:
- La soldadura, campo en el que se están realizando actualmente importantes avances, tiene un grado de implantación muy bajo a nivel nacional. Exceptuando fabricantes de automóviles y algunas empresas proveedoras de automoción, hay muy pocos láseres implantados a nivel industrial. Los centros tecnológicos o entes similares son los que han hecho proyectos, estudios de viabilidad y trabajos en serie, pero evidentemente no se puede decir, ni mucho menos, que haya una transferencia efectiva a la industria.

- Entre los potenciales usuarios de la soldadura láser sigue habiendo bastante desconocimiento y en muchos casos desconfianza.
- Las aplicaciones de tratamiento superficial (principalmente temple) y recubrimiento (cladding) no tienen prácticamente ninguna implantación industrial, aunque bien es cierto que algunos de los centros tecnológicos trabajan bastante en estos campos últimamente a nivel de proyectos, viabilidades y servicios directos. Estos campos tienen una proyección de futuro evidente en temas de endurecimiento local y en reparación de componentes de alto valor añadido por las muestras de interés materializadas en colaboraciones que hemos mantenido con algunas empresas españolas.
- A nivel industrial los sectores donde mayor implantación práctica tiene la tecnología láser en España son el de automoción: fabricantes de automóvil y algunos proveedores de automoción. Sin embargo los sectores potenciales de aplicación de esta tecnología son muy amplios.
- La mayor parte de las aplicaciones láser desarrolladas hasta el momento permiten su implantación en muchos de los subsectores del sector metal – mecánico: estampación y embutición de metal, tratamiento y revestimiento de metales, fabricación de maquinaria, etc. El desarrollo experimentado en los últimos tiempos por aplicaciones láser relacionadas con el tratamiento de superficies (recubrimiento, aleaciones superficiales, inyección de materiales cerámicos en sustratos metálicos, etc.) permitirá su implantación en muchos de los sectores mencionados.
- El desarrollo de técnicas láser de soldadura dirigidas a la unión de aleaciones de interés industrial (aleaciones de aluminio y aleaciones ligeras) permitirá su implantación en sectores como el aeronáutico y el aeroespacial.
- Las aplicaciones dirigidas al procesado de materiales no metálicos permitirán su implantación en los sectores relacionados con la industrial del plástico. En este sentido, la técnica láser de soldadura de materiales termoplásticos ha suscitado el suficiente interés como para que algunos fabricantes diseñen formulaciones específicas de cara a aumentar las características de soldabilidad de sus productos mediante esta técnica.

Esta potencialidad e interés de la tecnología láser para diversos sectores industriales españoles ha sido recogido en diversos trabajos y estudios sectoriales realizados en España. Muestra de ello es el **Estudio de Prospectiva sobre “Nuevas Tecnologías de Fabricación de Productos Metálicos”** llevado a cabo por OPTI en 1999. En dicho estudio el láser fue incluido como una de las 7 áreas temáticas analizadas. Entre las conclusiones que en dicho estudio se reflejan para el área del láser podemos destacar las siguientes:

- Respecto a la fecha de materialización por áreas temáticas, el estudio concluye que el desarrollo de estas tecnologías evolucionará en el medio o largo plazo (2004-2008, 2008-2014) y refleja la idea de que el láser es una tecnología todavía muy desconocida y poco desarrollada.
- El estudio resalta la baja capacidad científica y tecnológica a nivel nacional en tecnología láser. El panel de expertos llegó a la conclusión de que este bajo desarrollo de las tecnologías láser en España se debe a que en general existe una total falta de comunicación entre los centros de investigación y la industria. Cuando las empresas por cuestiones de exigencia de calidad necesitan aplicar tecnología láser recurren a centros extranjeros. Por tanto se tendría que hablar más de una falta de conocimiento de lo que se está llevando a cabo e investigando en España que de una falta de capacidad tecnológica.
- En lo que respecta a las medidas recomendadas a adoptar para el área temática del láser, destaca la necesidad de cooperación entre la industria y los centros de investigación y tecnológicos. Los centros de investigación y tecnológicos son considerados por los expertos como el mejor vehículo entre la Administración Pública y las industrias permitiendo llevar a cabo de forma efectiva muchos proyectos de investigación y facilitando su implantación en el mundo industrial.

4.9 PRINCIPALES CARENCIAS Y PROPUESTAS DE ACTUACIÓN.

4.9.1 PRINCIPALES CARENCIAS IDENTIFICADAS.

- **La principal limitación que encuentra la tecnología láser de cara a una mayor implantación industrial en nuestro país es la del desconocimiento que de ella se tiene.** Con frecuencia se pasa de la desconfianza en su capacidad para la realización de determinadas operaciones a la creación de falsas expectativas en cuanto a su verdadero potencial.
- **Otras limitaciones de índole práctico radican en la absoluta dependencia de quien invierte en este tipo de tecnología de proveedores extranjeros o de empresas suministradoras nacionales** no demasiado preparadas para ofrecer servicios de mantenimiento y reparación.
- **Por el momento, la tecnología láser exige una inversión inicial alta por lo que resulta necesario realizar un adecuado estudio de amortización de cara a su implantación a nivel productivo.**
- **Un aspecto importante a considerar en la implantación de tecnologías láser es el relativo a la seguridad de la instalación y de su utilización. En este sentido se detecta una carencia, a nivel nacional, en cuanto a la regulación en materia de seguridad de las instalaciones láser instaladas.**
- **Además esta tecnología exige formación específica tanto de operarios suficientemente cualificados para su manejo como de técnicos o expertos en aplicaciones láser (técnico en soldadura láser, ..).**

4.9.2 PROPUESTAS DE ACTUACIÓN.

- **Una manera de contribuir a vencer las limitaciones mencionadas consiste en la realización de una fuerte actividad divulgativa por parte de los centros tecnológicos acerca del potencial de la técnica láser para la realización de operaciones concretas en la industria.** Entre estas operaciones han de encontrarse aquellas ya desarrolladas (corte, marcado, grabado), como otras en vías de desarrollo (soldadura, tratamiento de superficies).
- **Un mayor apoyo e impulso desde la Administración hacia el desarrollo de tecnología nacional tanto en lo que respecta a fuentes láser, óptica, etc., como a empresas desarrolladoras de instalaciones** a fin de reducir la total dependencia actual de tecnología extranjera.

- **Difusión, fomento y potenciación de las capacidades disponibles en los centros tecnológicos a nivel nacional.** Fomento del apoyo que desde los centros tecnológicos se puede dar a las empresas a través de la realización de pruebas, estudios de viabilidad, preseries, etc.
- **El establecimiento de una reglamentación a nivel nacional en cuanto a la seguridad de las instalaciones láser se considera una actuación necesaria.**
- **Potenciar las acciones o actividades de formación relativas a la tecnología láser** dirigidas tanto a formar personal de empresas que incorporen esta tecnología en sus procesos como a formación de técnicos expertos en tecnología láser. Fomentar una formación regulada o reconocida se considera necesario.

4. FASE III: ESTUDIO DE LA SOLDADURA 3D PARA EL SECTOR DE LA AUTOMOCIÓN

4.1. REVISIÓN HISTÓRICA DE LA APLICACIÓN DEL LÁSER EN EL SECTOR DEL AUTOMÓVIL.

El sector de la automoción, es, sin lugar a dudas, el principal motor de las aplicaciones de soldadura en el campo industrial. Desde las primeras aplicaciones con sistemas tipo pórtico y láser de CO₂, hasta las actuales instalaciones de SEAT con cuatro láseres de Nd:YAG en la misma cabina multiplexados a través de fibra óptica a 12 robots diferentes.

La primera parte de esta fase del proyecto consistió en la revisión a través de la documentación disponible de la evolución y el estado del arte de la soldadura láser en carrocerías de automóvil.

- VOLVO:

Desde el año 1991 y con la introducción del modelo 850, Volvo incorporó el láser a sus procesos productivos.

El primer sistema estaba compuesto de un láser de CO₂ con un sistema tipo pórtico. Fue implantado, tal y como se ha dicho en el año 1991 para los modelos 850/S70 y 855/V70 Classic.

Posteriormente en el año 1994 se ideó un sistema de transmisión por robots con espejos incorporados mientras que a partir del año 1995 se empezaron a soldar los techos de los modelos C70 y XC90 mediante la aplicación de láseres de Nd:YAG con transmisión a través de fibra y sistemas de manipulación de ésta robotizados.

- BMW:

Cuando BMW lanzó el modelo de la serie 5, incorporó la soldadura láser en el proceso de fabricación, realizando hasta 11 de cordón en cada coche, lo que supone 12 km diarios en la planta de Dingolfing

- FORD:

En su planta de Colonia sueldan el techo del modelo Scorpio con láser de Nd:YAG.

- AUDI:

Emplea láseres de Nd:YAG para soldar los techos de los modelos A3 y A4 en su planta de Inolstadt. Emplea láseres de CO₂ para una soldadura equivalente en el modelo A6 en la planta de Neckarsulum. En el 2002 introdujo la soldadura láser en el modelo A8.

- VOLKSWAGEN:

Introdujo la soldadura con láser de Nd:YAG con el lanzamiento del nuevo Passat. Emplea sistemas de 2 KW de potencia en sus plantas de Emden y Mosel. En la planta que posee en Pamplona emplea láseres de Nd:YAG de 4 KW para el modelo Polo.

Las puertas de aluminio del VW Phaeton se sueldan con:

- 7 cordones MIG
- 11 cordones láser
- 48 cordones de soldadura láser híbrida.

La longitud total de los cordones de una puerta es de 4980 mm.

- DAIMLER CHRYSLER:

Aplica la soldadura láser en las puertas de Al de los modelos 57 y 62 de Maybach. Se sueldan aluminios de las series 5000 y 6000.

Parámetros de soldadura:

- Geometría de la junta: a solape.
- 75 cordones de soldadura de 25 ÷ 1200 mm de longitud
- Longitud total de cordones por cada puerta: 4900 ÷ 6500 mm
- Velocidad de soldadura: 1.8 ÷ 7.5 m/min
- Uso parcial de aporte de hilo

Generador láser:

- Láser de Nd:YAG HL 4006D de 4 KW

- Distancia focal: 150 mm
- Diámetro de spot: 0.45 mm

Adhesivo utilizado:

- Engatillado con adhesivo epoxy Gurit Essex BM 1496
- Adhesivo antivibraciones para el panel exterior: Teroson Terostat 3211-2

- SEAT:

- En 1992 aplicaba la soldadura láser para los largueros del modelo S03 (Seat Ibiza)
- En 1998 empezó a aplicar la soldadura láser para la unión del techo y lateral del modelo SE 110 (Seat Arosa).
- En 1999 comenzó la unión del techo y lateral del modelo SE 340 (Seat León).
- En 2000 empezó a realizar con láser la unión techo y lateral del modelo SE 341 (Seat Toledo).

En febrero de 2002 SEAT dio un paso más en la integración del láser en líneas de producción, introduciendo en una misma cabina 4 generadores láser (1 de ellos redundante) de Nd:YAG con 4 KW de potencia. Los haces se multiplexan a través de fibra óptica a 8 robots tal y como indica las figuras siguientes:

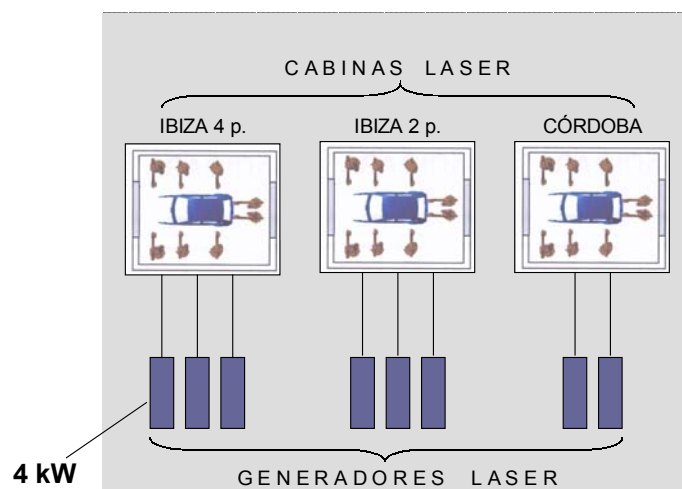


Fig. 4.1 Esquema de la instalación de soldadura de SEAT



Fig. 4.2 Interior de la cabina de soldadura de los modelos Ibiza y Córdoba

4.2 COMPARATIVA ENTRE LOS DISTINTOS TIPOS DE UNIÓN.

La experiencia demuestra que la elección de un determinado tipo de unión tiene que venir determinada por los requisitos finales de la pieza tanto en funcionalidad, como en diseño y resistencia. La utilización de un tipo de junta u otro presenta una serie de ventajas y desventajas que se resumen a continuación (ver el apartado 2.3.6 para obtener una descripción gráfica de las juntas).

- Unión en flanco: mediante este tipo de unión se tiene una buena accesibilidad a la zona de unión, sin embargo presenta el inconveniente de que la soldadura no presenta una penetración total, además de la dificultad de mantener el gap. Es una junta idónea para realizar los procesos de brazing.
- Soldadura por contacto (a testa): Presenta la ventaja de no sumar espesores, por lo que la velocidad de soldadura es muy elevada. Como contrapartida se tiene la necesidad de tener un acabado muy bueno de los flancos de soldadura y la dificultad del seguimiento de junta.

- Soldadura por solape: es la más resistente de todas (especialmente si se realiza con penetración total). Tiene la ventaja añadida de que no es necesario realizar un seguimiento de junta. La dificultad viene dada porque la suma de espesores provoca que la velocidad de soldadura disminuya con respecto a otras técnicas
- Soldadura en T (por transparencia). Es una de las más complicadas, ya que es necesario entrar en la soldadura con un determinado ángulo. Este vendrá determinado por las dimensiones de las piezas, lo que determinará el resultado final de la soldadura láser. Además existe el problema añadido de no poder realizar una penetración total en la soldadura disminuye el comportamiento mecánico de esta.

En cualquier tipo de junta se han determinado los siguientes parámetros críticos:

- Posicionado correcto de las chapas respetando las tolerancias establecidas
- Centraje (o decalaje correcto) sobre la junta de soldadura

4.3. DETERMINACIÓN DE LOS REQUISITOS MÍNIMOS EN LA PREPARACIÓN DE UNIONES.

Tanto en el presente proyecto como en los procesos de soldadura industriales que ya se están realizando la soldadura por láser se realiza aplicando un haz de entre 0.2 y 0.5 mm de diámetro.

Es, por tanto, una soldadura de alta precisión, lo que implica que la separación entre piezas y por tanto el acabado de las piezas en la zona de unión debe ser responder a esta precisión.

A partir de aquí y con la experiencia adquirida se determina que:

- Para espesores finos el corte por láser produce buenas soldaduras a posteriori. Sin embargo es preferible realizarlo con nitrógeno ya que el corte con oxígeno puede dejar una estriación excesiva que haga que en zonas localizadas se superen las tolerancias máximas especificadas en el apartado 2.3.7

- El corte por cizalla produce flancos de corte lisos que permiten una buena soldadura posterior.
- Cuando se realiza un tratamiento posterior al corte para pulir las superficies o cuando se corta con herramientas que pueden depositar restos hay que tener sumo cuidado porque puede afectar de manera grave al resultado final. Se ha llegado a dar el caso de fallos en la soldadura debido a la micro-deposición de cal en los flancos debido a obras en el interior de la planta. Por tanto es necesario realizar tratamientos de limpieza posteriores al corte cuando pueda haber deposición de impurezas en las zonas de soldadura.
- En relación con las impurezas, las debidas a la propia preparación de las chapas (como por ejemplo el aceite de protección) no son perjudiciales si no son excesivamente grandes y la soldadura se realiza a testa. En cualquier otro caso es necesario limpiar la zona de soldadura o bien dejar un pequeño gap (de alrededor de 0.1 mm) que permita la salida de los vapores generados.

En cuanto a los recubrimientos, durante el proyecto se han determinado los siguientes efectos:

- Electrozincado: en soldadura a testa y si no hay presencia de zinc en las aristas, la soldadura no presenta problemas. Cuando la soldadura se realiza por solape es necesario dejar un pequeño gap (de alrededor de 0.1 mm) para permitir la salida de los vapores de Zn. En caso contrario existe una alta probabilidad de formación de poros alineados en la parte superior de la junta.

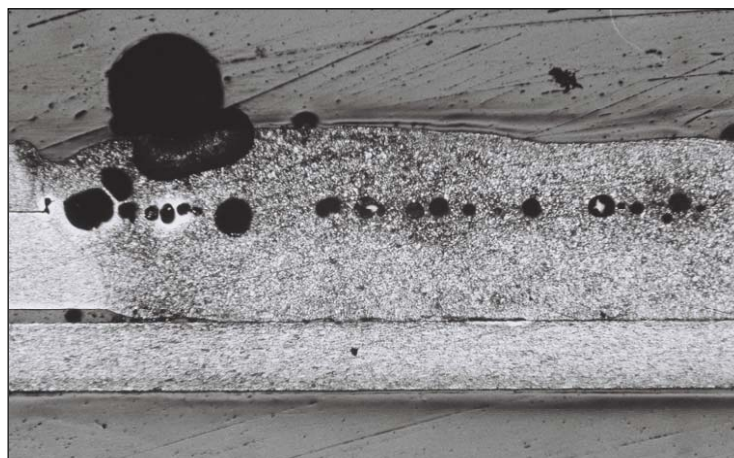


Fig. 4.3: Porosidades por efecto del Zn en una chapa electrozincada

- Galvanizado: el efecto es el mismo que el del electrozincado. Sin embargo el proceso de galvanizado produce zonas con sobreespesor de Zn, por lo que existirán partes del cordón de soldadura con una gran acumulación de poros (y por tanto con gran probabilidad de rotura en servicio), mientras que en otras la presencia de poros será prácticamente inexistente.
- Anodizados o barnizados: debe eliminarse el recubrimiento en la zona de la soldadura.
- Recubrimientos de níquel: se producen grietas superficiales finas en recubrimientos electrolíticos y grietas de solidificación en otros tipos de recubrimiento (presencia de fósforo): es necesario optimizar el pulsado a frecuencias de alrededor de 150 Hz , con duraciones efectivas de pulso de 1 ms
- Aluminizado: la temperatura de evaporación del aluminio se sitúa alrededor de los 2450 °, por lo que existe poca probabilidad de formación de poros. Sin embargo existe una tendencia al crecimiento de grano con resistencias ~ 15% menor que las del material base.
- Nitruraciones: existe una gran tendencia a formar poros y grietas por lo que no son susceptibles de soldar con láser.

4.4. PREPARACIÓN DE UNIONES ENTRE CHAPA BASE Y REFUERZOS EN UNIONES ENGRAPADAS

Se podría considerar una unión engrapada como un caso especial de una unión a solape. Sin embargo existen algunas características que la diferencian

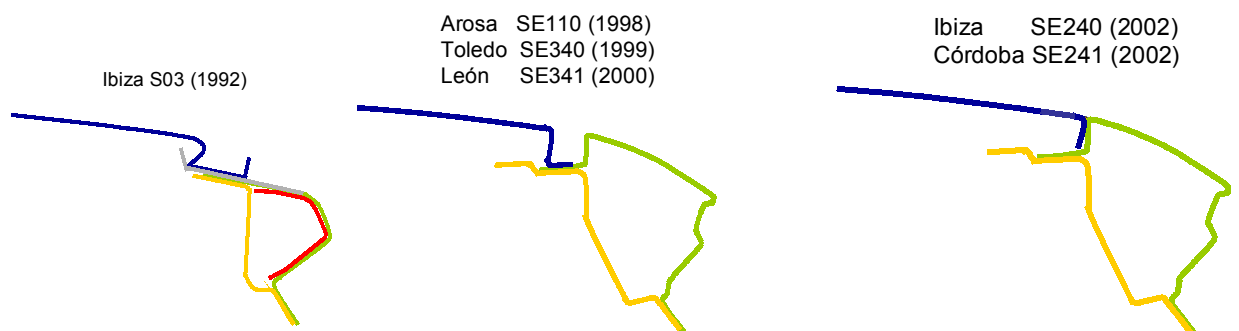


Fig. 4.5: Detalle de diversos ejemplos de uniones engrapadas

- La soldadura se realiza entre la chapa engrapada y la que la engrapa, pero sólo por una de las partes de esta última. La otra parte queda a la vista en la pieza definitiva, no pudiendo quedar afectada.
- La soldadura se realiza siempre por el lado de la pestaña
- La anchura de la pestaña debe ser superior a los 8 mm en los caso en los que se utilice una roldana de pisado. Esta anchura garantiza espacio para los siguientes elementos:
 - Anchura de la roldana
 - Distancia roldana-cordón de soldadura
 - Anchura del cordón
 - Distancia cordón-borde de la chapa.
- Cuando no exista roldana de pisado la anchura de la roldana y la distancia roldana-cordón de pisado dejan de tener sentido, por lo que la anchura de la pestaña se reduce.
- Cuando se sueldan zonas curvas del engatillado, el radio de curvatura debe ser superior a los 20 mm para garantizar que el conjunto cabezal-roldana pueda maniobrar durante la soldadura.

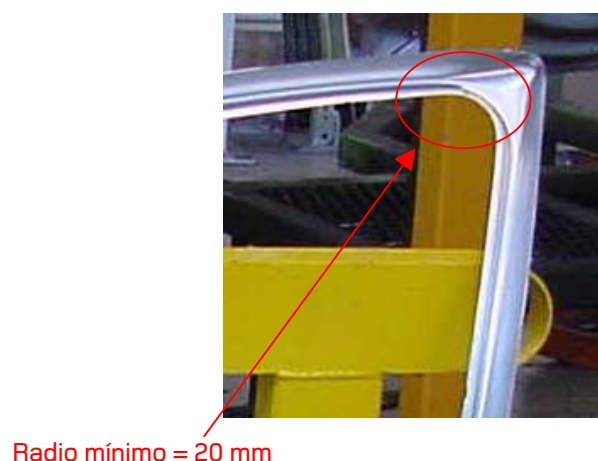


Fig. 4.5: radio mínimo en una unión engrapada

4.4. DISEÑO DE UTILLAJES

Como se ha venido diciendo en capítulos anteriores la soldadura por láser es una soldadura de precisión, por lo que los utillajes deben garantizar un correcto posicionado de las piezas. A partir del estudio realizado se ha determinado que los utillajes utilizados en soldadura láser para cualquier geometría deben:

- Garantizar un correcto alineamiento de las chapas, evitando gaps excesivos o desalineamientos
- Eliminar el efecto de distorsión térmica
- Permitir un acceso fácil a la zona a soldar
- Ser flexibles (en la medida de lo posible) a cambios de formato o de pieza
- Permitir un ajuste fino de la sujección de las piezas
- Ser resistentes a posibles incidencias accidentales del láser
- Permitir cambios rápidos de pieza
- Permitir la máxima automatización posible del proceso

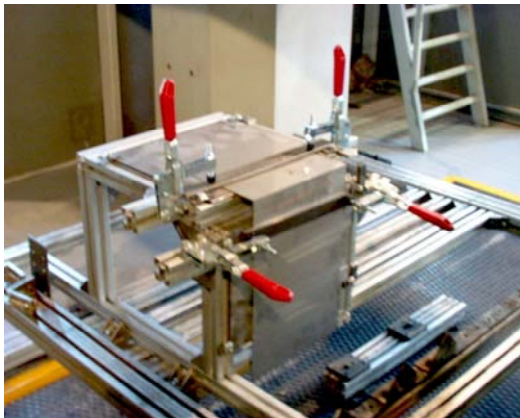


Fig. 4.6: Utillaje experimental para la soldadura de probetas en chapa plana

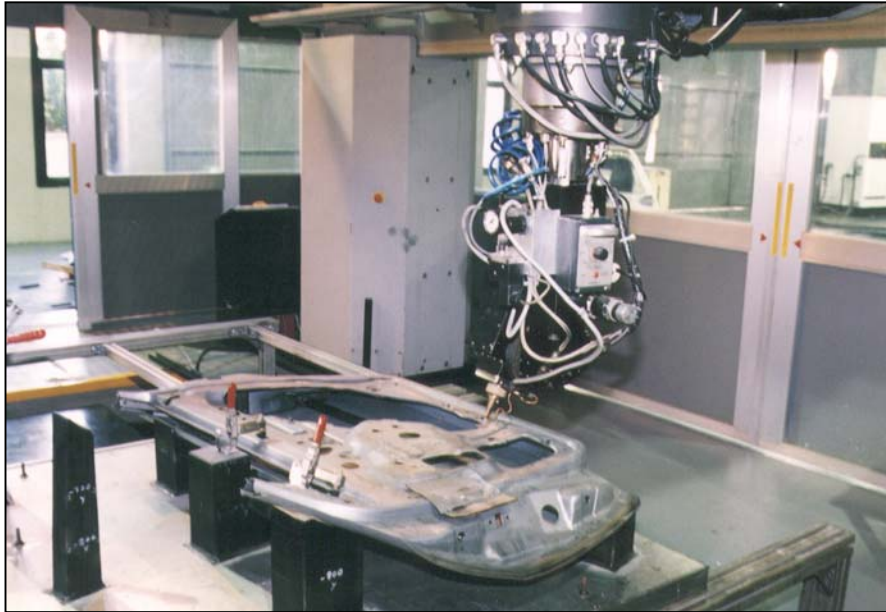
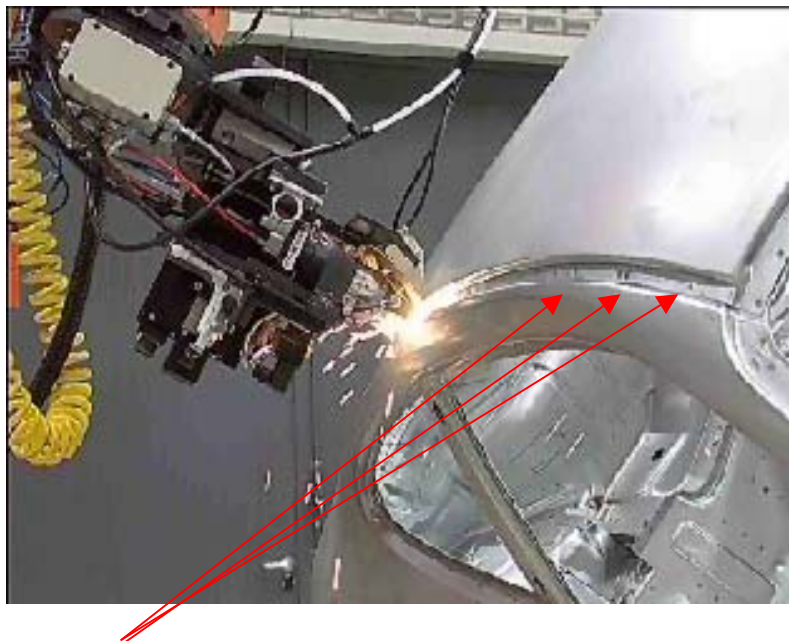


Fig. 4.7: Utillaje experimental para la soldadura de puertas de automóvil

Para simplificar los utillajes se puede optar por realizar un prepunteo con el propio láser o, más comúnmente con alguna otra técnica de soldadura para preposicionar las piezas y simplificar el utillaje. La siguiente imagen muestra un ejemplo de este estilo para la soldadura de los techos:



Puntos TIG

Fig. 4.8: Soldadura de techos de carrocería con pre-punteo TIG

Tras los estudios realizados se han determinado las siguientes ventajas y desventajas de pre-puntear con TIG, pre-puntear con láser o no puntear

PROCESO	A - soldadura con punteo láser.	B - soldadura sin punteo previo	C - soldadura con punteo TIG)
CALIDAD			
Evita gap final	4	3	2
Evita deformación para unión caras	3	5	2
Menor riesgo tecnológico	3	2	4
Menor nivel de rechazos / retrabajos	3	2	4
Mejor aspecto visual	4	4	2
Evita seguimiento de junta	3	5	2
Simplicidad de utillaje	4	2	5
Bajo coste utillaje	2	1	4
Mayor nivel de aprovechamiento de	2	2	3
Mayor facilidad de automatización	3	2	4
Menor nivel de automatización requerida	3	2	4
Minimización del lay-out	3	4	2
Menor nivel de stock intermedio	4	4	2
Mayor flexibilidad para desarrollar nuevos modelos	3	2	4
Menor coste mantenimiento	3	2	4
PRODUCCION			
Menor nº de operaciones	3	4	2
Menor tiempo de proceso	3	4	2

Tabla 4.1: Comparativa entre pre-puntear con TIG, pre-puntear con láser y no puntear.

En cuanto a los sistemas de fijación y de entre todos los estudiados merece especial atención el sistema de pinzas de la serie ALPHA de TUNKERS, diseñado específicamente para amarre de piezas en operaciones de soldadura con láser. Se trata de mordazas neumáticas que permiten ajustar la fuerza de pisado de forma individual de una forma precisa. Este ajuste permite controlar el buen

acostaje de las piezas a lo largo de toda la junta de soldadura. Las elevadas fuerzas de apriete, con un tamaño reducido del brazo, que se pueden conseguir con estas mordazas permiten la sustitución de 3 elementos convencionales por uno de TUNKERS. En estos casos pueden acoplarse a las mordazas ajustadores de tensión que copian la forma de la pieza y permiten el apriete a lo largo de toda la junta de soldadura.

4.5. ELECCIÓN DEL CABEZAL DE SOLDADURA

En soldadura láser un cabezal apropiado debe garantizar tanto la focalización del haz como un correcto flujo de gas que minimice la acción del plasma y proteja la soldadura de la oxidación.

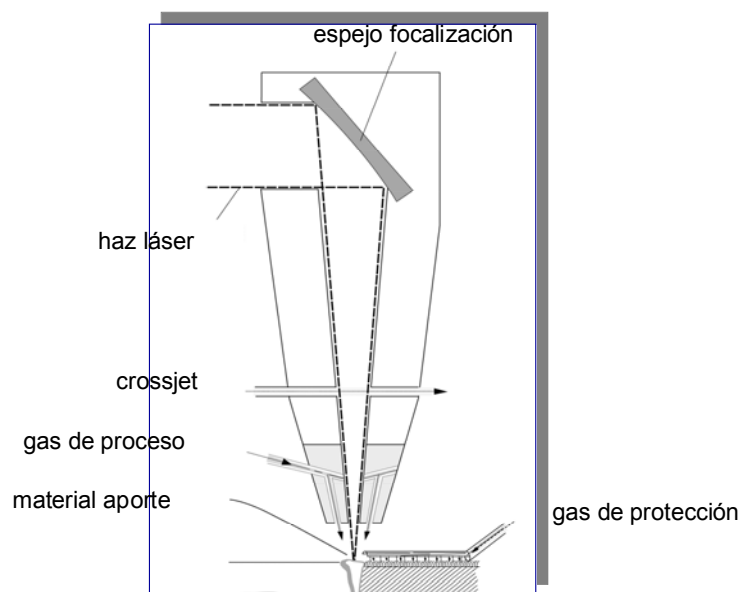


Fig. 4.9: Esquema de un cabezal de soldadura

En concreto se ha determinado que el cabezal de soldadura tiene que estar diseñado de tal forma que se garanticen los siguientes puntos:

- Acceso correcto de la zona a soldar
- Flexibilidad en la focalización para hacer frente a los posibles cambios en el formato de las piezas

- Cuando la soldadura se realice con aporte de material es necesario un sistema de aporte de hilo de diámetro variable y con regulación de ángulo de aportación
- Flujo de gas correcto (en caudal y dirección de aporte) sobre la zona de soldadura
- Si el sistema incorpora un sistema de pisado (por ejemplo una roldana) se debe garantizar una presión correcta que no deforme mecánicamente las chapas, pero que a su vez permita una correcta separación de estas (sin superar las tolerancias de gap establecidas).

Sobretudo en soldadura a testa es muy frecuente añadir a los elementos especificados en el esquema un sistema de seguimiento de junta y de control de calidad on-line de la soldadura (Ver Fase V del proyecto).

El sistema de seguimiento garantiza un correcto posicionado del foco sobre la junta de unión, mientras que los sistemas de control on-line se basan en los siguientes parámetros:

- Temperatura de la unión
- Posibles fluctuaciones de temperatura durante el proceso de soldadura
- Generación de plasma (a través de la medición de la radiación U.V.).
- Fluctuaciones en el plasma generado.

A partir de estos datos se puede determinar si la soldadura se está realizando en las condiciones preestablecidas. No obstante se ha podido determinar que existen un gran número de falsas alarmas generadas, por lo que es necesario seguir trabajando en la mejora de estos sistemas.

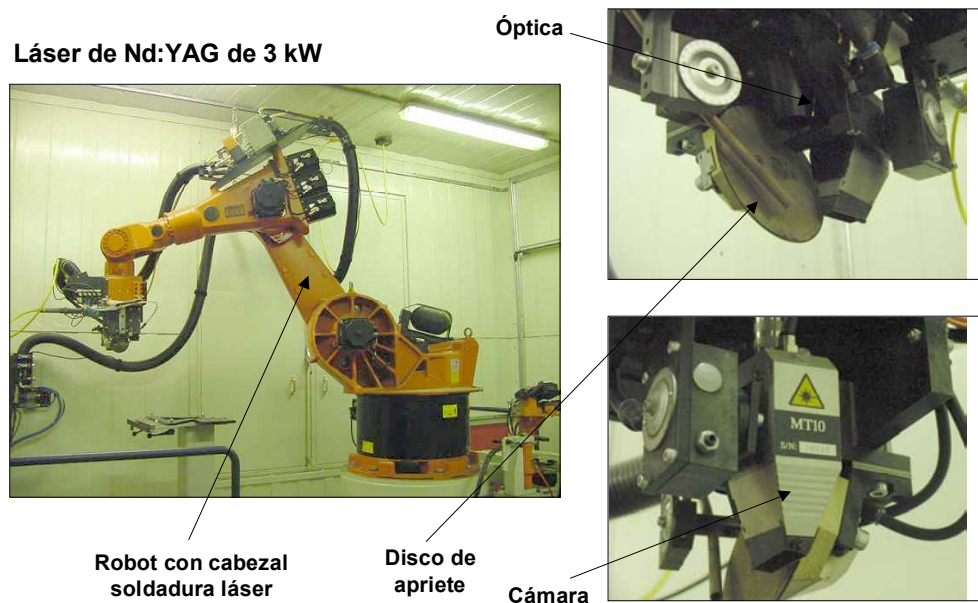


Fig. 4.10: Diferentes perspectivas de un cabezal de soldadura.

4.6 INFLUENCIA DE LA UTILIZACIÓN DE DIFERENTES GASES EN LA SOLDADURA.

Además de los gases propios del resonador en soldadura láser, se hace necesario, en muchos casos, la utilización de algún tipo de gas específico sobre la zona de soldadura. La función del gas es doble: por un lado disminuir el efecto negativo del plasma sobre la acción del láser en la pieza y por otra proteger la junta de soldadura de la oxidación

La utilización de gas, dependiendo de si está destinado al interior del resonador o como gas de aporte requiere de unas purezas mínimas en cada caso.

El uso de gases insuficientemente puros o mezclas en proporciones distintas a las necesarias puede producir:

- Degradación del resonador
- Disminución de la potencia de salida
- Defectos en la soldadura

Se ha determinado que se pueden utilizar gases de baja pureza como gases de aporte si se disminuye la velocidad de soldadura. Sin embargo esto produce dos efectos muy negativos en el resultado final:

- Disminución de la productividad con el consiguiente encarecimiento del coste por pieza
- Mayor disipación del calor en la pieza, lo que provoca un mayor nivel de distorsión térmica y una anchura del cordón y de la ZAT (Zona Afectada Térmicamente) mayor. Esto a su vez disminuye las características de resistencia mecánica de la unión soldada.

Además de lo dicho es necesario tener en cuenta algunos aspectos adicionales cuando se utiliza aporte de gas en entornos industriales:

- La calidad del gas que debería utilizarse en las condiciones de producción.
- Si es necesario buscar gases extremadamente puros, perfectamente fiables pero también caros, o los de grado “industrial” son suficientes.
- Cuáles son los componentes químicos que se introducen dentro de o se generan en la cavidad láser y cuáles son sus efectos (tanto en el procesado como medioambientales).

Se han realizado pruebas con He y Ar y N₂ al objeto de determinar la profundidad de penetración:

Las condiciones de ensayo fueron:

- Tipo de láser: CO₂
- Potencia: 2375 W
- Régimen de emisión: continuo
- Focal = 200 mm
- Posición focal: 0 (sobre la superficie)
- Velocidad de proceso: 1 m/min
- Caudal gas: 17 l/min

- Diámetro de boquilla: 8 mm
- Ángulo de la boquilla: 45°

La siguiente metalografía muestra la diferencia de penetración que se puede conseguir utilizando estos dos gases:

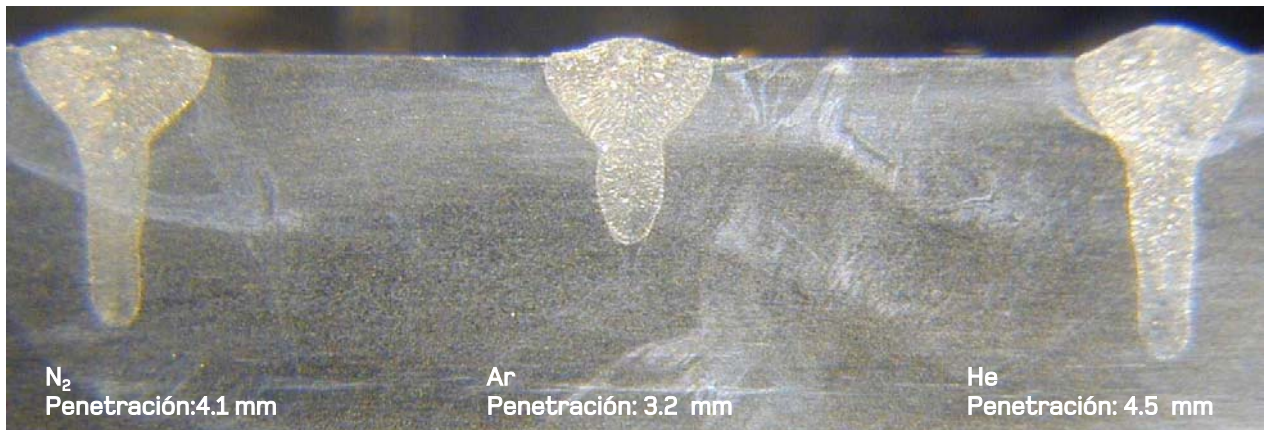


Fig. 4.11 Influencia del gas en la penetración para un láser de CO₂

Experimentalmente y a partir de los datos de la figura anterior se infiere que la utilización de He o N₂ produce una penetración mucho mayor que si se realiza la soldadura con aporte del mismo caudal de Ar. Por tanto en soldadura con láser de CO₂ la soldadura con aporte de He mejora sensiblemente la profundidad de penetración con respecto a la soldadura con aporte de Ar. Esto viene motivado por la diferencia de potenciales de ionización entre uno y otro gas.

En el caso de realizar la soldadura con N₂ se ha detectado un efecto de nitruración de la zona soldada, lo que disminuye las propiedades mecánicas del cordón de soldadura y por tanto su utilización no es viable en el sector de la automoción.

La utilización de Ar disminuye los costes debido al aporte de gas. Sin embargo es necesario utilizar potencias más altas que con la utilización de He, o, alternatively, disminuir la velocidad de soldadura, con el consiguiente decremento en la velocidad de producción, lo cual en automoción vuelve a ser otro dato que implica la inviabilidad de la soldadura con láser de CO₂ y aporte de Ar puro.

El efecto del gas no depende solamente de éste, ya que se ha determinado que si bien el plasma produce una disminución importante de la radiación láser que llega sobre la pieza, dicha disminución dependerá fuertemente de la longitud de onda de la radiación incidente.

De esta manera se encuentra la siguiente relación experimental:

$$T \propto \frac{1}{\lambda^2}$$

Donde T es la transmisión del plasma a la radiación láser y λ es la longitud de onda de emisión (1064 nm para el Nd:YAG y 10.600 nm para el CO₂).

De aquí se infiere que el efecto del plasma es, cuantitativamente, 100 veces peor en la soldadura con láser de CO₂ que con láser de Nd:YAG.

Por tanto la principal misión del gas en los láseres de CO₂ será controlar la formación de plasma para evitar su efecto nocivo sobre la soldadura, mientras que en el caso de la soldadura con láser de Nd:YAG este efecto no será tan importante y predominará la protección de la soldadura.

Las propiedades físicas del gas ejercen influencia en el comportamiento de humidificación, la profundidad de penetración, la velocidad de soldadura y el comportamiento de ignición.

Además del tipo de gas utilizado y el flujo también ejerce un papel fundamental la geometría de aporte. Así tras los estudios realizados se ha podido constatar de forma cualitativa que:

- Un flujo de gas coaxial a la soldadura produce una mejor calidad de ésta, ya que controla muy bien la temperatura del plasma (y por tanto su formación) sin eliminarlo (la presencia de un plasma sin fluctuaciones es imprescindible para obtener una buena calidad de soldadura)
- Un flujo de gas transversal al láser aumenta la velocidad de la soldadura, ya que lo elimina y por tanto se desplaza de la zona de soldadura una fuente importante de absorción de la luz láser. Sin embargo el hecho de eliminar el

plasma implica que la soldadura es más inestable, y por tanto la calidad disminuye

Los mejores resultados de soldadura en cuanto a compromiso velocidad-calidad se han obtenido con aportaciones de gas con ángulos de entre 30° y 45° con respecto al haz láser.

Si la aportación de gas se realiza de manera transversal o con un cierto ángulo de inclinación también tiene importancia si el aporte de gas se realiza por delante o por detrás al avanzar el cabezal. Así, si el aporte se realiza por delante (con anterioridad al paso del láser) se elimina el aire atmosférico de la zona de soldadura con más efectividad creándose dos efectos dependiendo del tipo de gas utilizado:

- Si se utiliza Ar se puede disminuir el caudal de gas aportado. De hecho altos caudales implican la formación de plasma de Ar disminuyendo la efectividad de la soldadura.
- Si se aporta He se realiza un control muy bueno del plasma de la soldadura y no es útil disminuir el caudal

Si por el contrario el aporte de gas se realiza por detrás del avance del cabezal se optimiza la protección a la corrosión durante el enfriamiento.

Existen en el mercado boquillas que evitan el efecto de la diferencia de comportamiento mediante la utilización de varias salidas dispuestas de forma simétrica alrededor del orificio de salida del láser y con ángulos de salida del gas de alrededor de 15° con respecto al eje del cabezal.

5. FASE IV: VALORACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE SOLDADURA DE TECHOS DE AUTOMÓVIL CON CHAPA Y CHAPA ZINCADA

5.1 LA CHAPA ZINCADA EN EL SECTOR DE LA AUTOMOCIÓN

Gracias a las buenas propiedades anticorrosión que ofrece el Zn, éste se ha convertido hoy en día, en parte imprescindible del recubrimiento de las chapas de la carrocería de los automóviles.

Sin embargo, lo que por una parte supone una garantía frente a la oxidación por otra supone un auténtico quebradero de cabeza frente a la soldadura por láser. Tal y como se ha ido viendo en las fases precedentes del informe, la soldadura por láser es una soldadura de alta precisión, lo que supone que la separación entre piezas debe ser mínima al objeto de evitar el descolgamiento y/o agrietamiento de la soldadura.

Pero por otra parte el Zn posee un punto de vaporización muy bajo dentro de los metales ($\sim 900\text{ K}$), lo que implica que en la soldadura láser (donde se pueden llegar a alcanzar puntualmente 10.000 K) se produce una vaporización explosiva de éste. Esta vaporización produce porosidades internas en la soldadura por solape próximas a la unión entre chapas, reduciéndose de esta manera la resistencia a la fatiga y tracción de la unión soldada.

La influencia del Zn depende claramente del espesor de recubrimiento de la chapa, por lo que la forma de aplicación tendrá una influencia decisiva en el resultado final de la soldadura. Así el electrozincado será más favorable a la aplicación del láser, ya que proporciona una capa más fina y uniforme de recubrimiento, mientras que el galvanizado introduce muchos problemas debido a la dificultad de producir una capa homogénea teniendo, por tanto, una alta probabilidad de encontrar sobreespesores de recubrimiento.

Para evitar el efecto del Zn en soldadura por solape es necesario utilizar utillajes especiales que permitan la salida de los vapores de Zn a través de la separación entre piezas. No obstante la separación nunca debe exceder los límites dados por las tolerancias descritas en los capítulos anteriores.

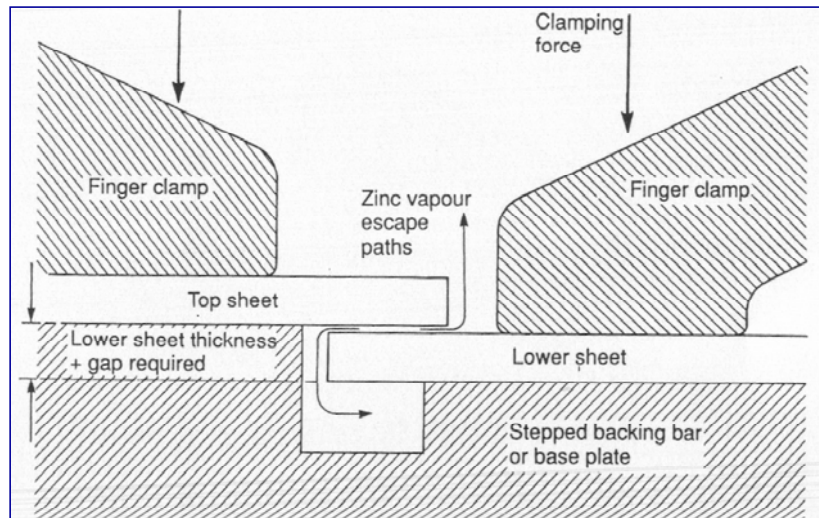


Fig. 5.1 Ejemplo de utillaje industrial para mantener el gap

5.2 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL Y LAS PRUEBAS

El objeto del estudio es determinar los parámetros óptimos de soldadura y como afecta la variación de los distintos parámetros al resultado final. De esta manera se puede determinar con mucha exactitud cual ha sido la causa de la aparición de un defecto durante el proceso de producción.

El material utilizado ha sido acero St-14 y St-14 ZE. Con él se han realizado 156 cordones de soldadura a solape, variando los parámetros tal y como se especifican en las tablas siguientes:

Variantes de chapa

Techo Pared  3ª chapa (75 mm)

1) **0,75 mm** **0,75 mm** **0,75 mm**

a) Rendija variable (P=3000W; V =4,5 m/min; F= 20Kg/Cm²)

Parámetros	0	0,1 mm	0,2 mm	0,3 mm	0,4 mm	0,5 mm
2 X	✓	✓	✓	✓	✓	✓
1A-8A	9A-16A	17A-24A	25A-32A	33A-40A	41A-48A	
49A-56A	57A-64A	17A-24A	73A-80A	81A-88A	89A-96A	

Dígitos estampados
Lápiz eléctrico

b) Potencia variable (Rendija=0; V =4,5 m/min; F= 20Kg/Cm²)

Parámetros	1 X	3400 W	3200 W	2900 W	2800 W	2600 W
	✓	✓	✓	✓	✓	✓
97A-104A	105A-112A	113A-120A	121A-128A	129A-136A		

c) Potencia variable (Rendija=0; V_{Redundancia}=6,5m/min; F= 20Kg/Cm²)

Parámetros	1 X	4000 w	3800 w	3600 w	3400 w	3200 w	3000 w
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
137A-144A	145A-152A	153A-160A	161A-168A	169A-176A	177A-184A		

d) Velocidad variable (Rendija=0; P =3000W; F= 20Kg/Cm²)

Parámetros	1 X	5,5m/min	5,3m/min	5,1m/min	4,9m/min	4,7m/min	4,5m/min	4,3m/min	4,1m/min	3,9m/min	3,7m/min	3,5m/min
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
185A-192A	193A-200A	201A-208A	209A-216A	217A-224A	225A-232A	233A-240A	241A-248A	249A-256A	257A-264A	265A-272A	273A-280A	

e) Velocidad redundancia variable (Rendija=0; P =4000W; F= 20Kg/Cm²)

Parámetros	1 X	7,5m/min	7,3m/min	7,1m/min	6,9m/min	6,7m/min	6,5m/min	6,3m/min	6,1m/min	5,9m/min	5,7m/min	5,5m/min
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
281A-288A	289A-296A	297A-304A	305A-312A	313A-320A	321A-328A	329A-336A	337A-344A	345A-352A	353A-360A	361A-368A	369A-376A	

f) Potencia variable para pruebas tracción

Parámetros (Rendija=0; V =4,5 m/min; F= 20Kg/Cm2)

Parámetros	1 X	3400 W	3200 W	3000 W	2900 W	2800 W	2600 W
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
377A-384A	385A-392A	393A-400A	401A-408A	409A-416A	417A-424A		

(Rendija=0; V =6,5 m/min; F= 20Kg/Cm2)

Parámetros	4000 w	3800 w	3600 w	3400 w	3200 w	3000 w
	✓	✓	✓	✓	✓	✓
425A-432A	433A-440A	441A-448A	449A-456A	457A-464A	465A-472A	

Tabla 5.1: Esquema de la variación de parámetros-1

Variantes de chapa

Techo Pared  3ª chapa (75 mm)

2) **0,8 mm 0,8 mm 0,8 mm**

a) Rendija variable (P=3000W; V =4,5 m/min; F= 5Kg/Cm²)

Parámetros	0	0,1 mm	0,2 mm	0,3 mm	0,4 mm	0,5 mm
2 X	✓	x ✓	x ✓	x x	-	-
1B-8B		9B-16B	17B-24B	25B-32B	33B-40B	41B-48B
49B-56B		57B-64B	65B-72B	73B-80B	81B-88B	89B-96B

Dígitos estampados
Lápiz eléctrico

b) Potencia variable (Rendija=0; V =4,5 m/min; F= 20Kg/Cm²)

Parámetros	1 X	3400 W	3200 W	2900 W	2800 W	2600 W
	✓	✓	✓	✓	✓	✓
97B-104B		105B-112B	113B-120B	121B-128B	129B-136B	

c) Potencia variable (Rendija=0; V_{Redundancia}=6,5m/min; F= 20Kg/Cm²)

Parámetros	1 X	4000 w	3800 w	3600 w	3400 w	3200 w	3000 w
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
137B-144B		145B-152B	153B-160B	161B-168B	169B-176B	177B-184B	

d) Velocidad variable (Rendija=0; P =3000W; F= 20Kg/Cm²)

Parámetros	1 X	5,5m/min	5,3m/min	5,1m/min	4,9m/min	4,7m/min	4,6m/min	4,4m/min	4,3m/min	4,1m/min	3,9m/min	3,7m/min	3,5m/min
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
185B-192B		193B-200B	201B-208B	209B-216B	217B-224B	225B-232B	233B-240B	241B-248B	249B-256B	257B-264B	265B-272B	273B-280B	

e) Velocidad redundancia variable (Rendija=0; P =4000W; F= 20Kg/Cm²)

Parámetros	1 X	7,5m/min	7,3m/min	7,1m/min	6,9m/min	6,7m/min	6,6m/min	6,4m/min	6,3m/min	6,1m/min	5,9m/min	5,7m/min	5,5m/min
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
281B-288B		289B-296B	297B-304B	305B-312B	313B-320B	321B-328B	329B-336B	337B-344B	345B-352B	353B-360B	361B-368B	369B-376B	

f) Potencia variable para pruebas tracción

Parámetros (Rendija=0; V =4,5 m/min; F= 5Kg/Cm2)

1 X	3400 W	3200 W	3000 W	2900 W	2800 W	2600 W
377B-384B	385B-392B	393B-400B	401B-408B	409B-416B	417B-424B	

(Rendija=0; V =6,5 m/min; F= 5Kg/Cm2)

4000 w	3800 w	3600 w	3400 w	3200 w	3000 w
425B-432B	433B-440B	441B-448B	449B-456B	457B-464B	465B-472B

Tabla 5.2: Esquema de la variación de parámetros-1

Variantes de chapa

Techo Anillo  3ª chapa

3) 0,75 mm 1,2 mm 0,8 mm

a) Rendija variable (P=3000W; V=4,5 m/min; F= 20Kg/Cm²)

Parámetros	0	0,1 mm	0,2 mm	0,3 mm	0,4 mm	0,5 mm
2 X	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ELA	0C-7C	8C-15C	16C-23C	24C-31C	32C-39C	40C-47C
ICP	49C-56C	57C-64C	65C-72C	73C-80C	81C-88C	89C-96C

Dígitos estampados
Lápiz eléctrico

b) Potencia variable (Rendija=0; V=4,5 m/min; F= 20Kg/Cm²)

Parámetros					
1 X	3400 W	3200 W	2900 W	2800 W	2600 W
	✓	✓	✓	✓	✓
	97C-104C	105C-112C	113C-120C	121C-128C	129C-136C

c) Potencia variable (Rendija=0; V_{Redundancia}=6,5m/min; F= 20Kg/Cm²)

Parámetros	
1 X	
4000 w	3800 w
✓	✓
	3600 w
	✓
	3400 w
	✓
	3200 w
	✓
	3000 w
	✓
137C-144C	145C-152C
	153C-160C
	161C-168C
	169C-176C
	177C-184C

d) Velocidad variable (Rendija=0; P=3000W; F= 20Kg/Cm²)

Parámetros							
1 X							
5,5m/min	5,3m/min	5,1m/min	4,9m/min	4,7m/min	4,6m/min	4,5m/min	3,5m/min
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
185C-192C	193C-200C	201C-208C	209C-216C	217C-224C	225C-232C	233C-240C	241C-248C
						249C-256C	257C-264C
							265C-272C
							273C-280C

e) Velocidad redundancia variable (Rendija=0; P=4000W; F= 20Kg/Cm²)

Parámetros	7,5m/min	7,3m/min	7,1m/min	6,9m/min	6,7m/min	6,6m/min	6,4m/min	6,3m/min	6,1m/min	5,9m/min	5,7m/min	5,5m/min
1 X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	281C-288C	289C-296C	297C-304C	305C-312C	313C-320C	321C-328C	329C-336C	337C-344C	345C-352C	353C-360C	361C-368C	369C-376C

f) Potencia variable para pruebas tracción

Parámetros (Rendija=0; V=4,5 m/min; F= 20Kg/Cm²)

1 X	3400 W	3200 W	3000 W	2900 W	2800 W	2600 W
	377C-384C	385C-392C	393C-400C	401C-408C	409C-416C	417C-424C

(Rendija=0; V=6,5 m/min; F= 20Kg/Cm²)

4000 w	3800 w	3600 w	3400 w	3200 w	3000 w
425C-432C	433C-440C	441C-448C	449C-456C	457C-464C	465C-472C

Tabla 5.3: Esquema de la variación de parámetros-3

Variantes de chapa

SERIE A

Techo Pared  3ª chapa (75 mm)

1) 0,75 mm 0,75 mm 0,75 mm

a) Rendija variable (P=3000W; V =4,5 m/min; F= 20Kg/Cm²)

Parámetros	0	0,1 mm	0,2 mm	0,3 mm	0,4 mm	0,5 mm
2 X	✓	✓	✓	✓	✓	✓
1A-8A	9A-16A	17A-24A	25A-32A	33A-40A	41A-48A	
Subserie a	49A-56A	57A-64A	17A-24A	73A-80A	81A-88A	89A-96A
Grupos	1	2	3	4	5	6

Dígitos estampados
Lápiz eléctrico

b) Potencia variable (Rendija=0; V =4,5 m/min; F= 20Kg/Cm²)

Parámetros

1 X	3400 W	3200 W	2900 W	2800 W	2600 W
	✓	✓	✓	✓	✓
Subserie b	97A-104A	105A-112A	113A-120A	121A-128A	129A-136A
Grupos	7	8	9	10	11

c) Potencia variable (Rendija=0; V Redundancia=6,5m/min; F= 20Kg/Cm²)

Parámetros

1 X	4000 w	3800 w	3600 w	3400 w	3200 w	3000 w
	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Subserie c	137A-144A	145A-152A	153A-160A	161A-168A	169A-176A	177A-184A
Grupos	12	13	14	15	16	17

d) Velocidad variable (Rendija=0; P =3000W; F= 20Kg/Cm²)

Parámetros

1 X	5,5m/min	5,3m/min	5,1m/min	4,9m/min	4,7m/min	4,6m/min	4,4m/min	4,3m/min	4,1m/min	3,9m/min	3,7m/min	3,5m/min
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Subserie d	185A-192A	193A-200A	201A-208A	209A-216A	217A-224A	225A-232A	233A-240A	241A-248A	249A-256A	257A-264A	265A-272A	273A-280A
Grupos	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29

e) Velocidad redundancia variable (Rendija=0; P =4000W; F= 20Kg/Cm²)

Parámetros

1 X	7,5m/min	7,3m/min	7,1m/min	6,9m/min	6,7m/min	6,6m/min	6,4m/min	6,3m/min	6,1m/min	5,9m/min	5,7m/min	5,5m/min
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Subserie e	281A-288A	289A-296A	297A-304A	305A-312A	313A-320A	321A-328A	329A-336A	337A-344A	345A-352A	353A-360A	361A-368A	369A-376A
Grupos	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41

f) Potencia variable para pruebas tracción

Parámetros (Rendija=0; V =4,5 m/min; F= 20Kg/Cm2)

1 X	3400 W	3200 W	3000 W	2900 W	2800 W	2600 W
Subserie f	377A-384A	385A-392A	393A-400A	401A-408A	409A-416A	417A-424A
Grupos	7	8	1	9	10	11

(Rendija=0; V =6,5 m/min; F= 20Kg/Cm2)

4000 w	3800 w	3600 w	3400 w	3200 w	3000 w
	425A-432A	433A-440A	441A-448A	449A-456A	457A-464A
	465A-472A				
	12	13	14	15	16
					17

Tabla 5.4: Esquema de la variación de parámetros-4

Variantes de chapa

SERIE B

Techo Pared  3ª chapa (75 mm)

2) 0,8 mm 0,8 mm 0,8 mm

a) Rendija variable (P=3000W; V=4,5 m/min; F= 5Kg/Cm²)

Parámetros	0	0,1 mm	0,2 mm	0,3 mm	0,4 mm	0,5 mm
2 X	✓	✓	✓	✗	✗	-
1B-8B	9B-16B	17B-24B	25B-32B	33B-40B	41B-48B	
Subserie a	49B-56B	57B-64B	65B-72B	73B-80B	81B-88B	89B-96B
Grupos	42	43	44			

Dígitos estampados
Lápiz eléctrico

b) Potencia variable (Rendija=0; V=4,5 m/min; F= 20Kg/Cm²)

Parámetros

1 X	3400 W	3200 W	2900 W	2800 W	2600 W
	✓	✓	✓	✓	✓

Subserie b

97B-104B	105B-112B	113B-120B	121B-128B	129B-136B	
Grupos	45	46	47	48	49

c) Potencia variable (Rendija=0; V_{Redundancia}=6,5m/min; F= 20Kg/Cm²)

Parámetros

1 X

4000 w	3600 w	3400 w	3200 w	3000 w
✓	✓	✓	✓	✓

Subserie c	137B-144B	145B-152B	153B-160B	161B-168B	169B-176B	177B-184B
Grupos	50	51	52	53	54	55

d) Velocidad variable (Rendija=0; P=3000W; F= 20Kg/Cm²)

Parámetros

1 X

5,5m/min	5,3m/min	5,1m/min	4,9m/min	4,7m/min	4,5m/min	4,3m/min	4,1m/min	3,9m/min	3,7m/min	3,5m/min
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Subserie d

185B-192B	193B-200B	201B-208B	209B-216B	217B-224B	225B-232B	233B-240B	241B-248B	249B-256B	257B-264B	265B-272B	273B-280B	
Grupos	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67

e) Velocidad redundancia variable (Rendija=0; P=4000W; F= 20Kg/Cm²)

Parámetros

7,5m/min	7,3m/min	7,1m/min	6,9m/min	6,7m/min	6,5m/min	6,3m/min	6,1m/min	5,9m/min	5,7m/min	5,5m/min
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Subserie e

261B-268B	269B-296B	297B-304B	305B-312B	313B-320B	321B-328B	329B-336B	337B-344B	345B-352B	353B-360B	361B-368B	369B-376B	
Grupos	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79

f) Potencia variable para pruebas tracción

Parámetros (Rendija=0; V=4,5 m/min; F= 5Kg/Cm2)

1 X

3400 W	3200 W	3000 W	2900 W	2800 W	2600 W

Subserie f

377B-384B	385B-392B	393B-400B	401B-408B	409B-416B	417B-424B
Grupos	45	46	47	48	49

(Rendija=0; V=6,5 m/min; F= 5Kg/Cm2)

4000 w	3800 w	3600 w	3400 w	3200 w	3000 w

425B-432B	433B-440B	441B-448B	449B-456B	457B-464B	465B-472B
50	51	52	53	54	55

Tabla 5.5: Esquema de la variación de parámetros-5

Variantes de chapa

SERIE C

Techo Anillo  3ª chapa

3) 0,75 mm 1,2 mm 0,8 mm

a) Rendija variable ($P=3000W$; $V=4,5$ m/min; $F=20Kg/Cm^2$)

Parámetros	0	0,1 mm	0,2 mm	0,3 mm	0,4 mm	0,5 mm
2 X	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ELA	0C-7C	8C-15C	16C-23C	24C-31C	32C-39C	40C-47C
Subserie a	49C-56C	57C-64C	65C-72C	73C-80C	81C-88C	89C-96C
Grupos	80	81	82	83	84	85

Dígitos estampados
Lápiz eléctrico

b) Potencia variable (Rendija=0; $V=4,5$ m/min; $F=20Kg/Cm^2$)

Parámetros

1 X	3400 W	3200 W	2900 W	2800 W	2600 W
✓	✓	✓	✓	✓	✓

Subserie b

97C-104C	105C-112C	113C-120C	121C-128C	129C-136C
86	87	88	89	90

c) Potencia variable (Rendija=0; $V_{Redundancia}=6,5$ m/min; $F=20Kg/Cm^2$)

Parámetros

1 X	4000 w	3600 w	3400 w	3200 w	3000 w
✓	✓	✓	✓	✓	✓

Subserie c

137C-144C	145C-152C	153C-160C	161C-168C	169C-176C	177C-184C
91	92	93	94	95	96

d) Velocidad variable (Rendija=0; $P=3000W$; $F=20Kg/Cm^2$)

Parámetros

1 X	5,5m/min	5,3m/min	5,1m/min	4,9m/min	4,7m/min	4,5m/min	4,3m/min	4,1m/min	3,9m/min	3,7m/min	3,5m/min
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Subserie d

185C-192C	193C-200C	201C-208C	209C-216C	217C-224C	225C-232C	233C-240C	241C-248C	249C-256C	257C-264C	265C-272C	273C-280C
97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108

e) Velocidad redundancia variable (Rendija=0; $P=4000W$; $F=20Kg/Cm^2$)

Parámetros

1 X	7,5m/min	7,3m/min	7,1m/min	6,9m/min	6,7m/min	6,5m/min	6,4m/min	6,3m/min	6,1m/min	5,9m/min	5,7m/min	5,5m/min
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Subserie e

281C-288C	289C-296C	297C-304C	305C-312C	313C-320C	321C-328C	329C-336C	337C-344C	345C-352C	353C-360C	361C-368C	369C-376C
109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120

f) Potencia variable para pruebas tracción

Parámetros (Rendija=0; $V=4,5$ m/min; $F=20Kg/Cm2$)

1 X	3400 W	3200 W	3000 W	2900 W	2800 W	2600 W
86	87	80	88	89	90	

Subserie f

377C-384C	385C-392C	393C-400C	401C-408C	409C-416C	417C-424C
86	87	80	88	89	90

(Rendija=0; $V=6,5$ m/min; $F=20Kg/Cm2$)

4000 w	3800 w	3600 w	3400 w	3200 w	3000 w
91	92	93	94	95	96

Subserie f

425C-432C	433C-440C	441C-448C	449C-456C	457C-464C	465C-472C
91	92	93	94	95	96

Tabla 5.6: Esquema de la variación de parámetros-6

Una vez realizadas y catalogadas las pruebas, éstas han sido sometidas a los siguientes ensayos:

- Examen macroscópico
- Examen metalográfico
- Ensayo de microdureza
- Ensayo de tracción transversal

Los exámenes macroscópico y microscópico, así como el ensayo de microdurezas, han sido llevados a cabo únicamente sobre aquellas ciento veinte muestras tipo "*probetas de soldadura láser a solape*" identificadas expresamente para ello. Sobre las treinta y seis muestras restantes sólo ha sido realizado el ensayo de tracción transversal de los cordones de soldadura correspondientes.

Debido a la gran cantidad de muestras recibidas, y a efectos de facilitar la identificación de las mismas en la presentación de resultados pertinentes, dichas muestras han sido diferenciadas y agrupadas según el siguiente criterio:

Series ⁽¹⁾	Subseries ⁽²⁾	Grupos ⁽³⁾
A	A	1 a 6
	B	7 a 11
	C	12 a 17
	D	18 a 29
	E	30 a 41
B	A	42 a 44
	B	45 a 49
	C	50 a 55
	D	56 a 67
	E	68 a 79
C	A	80 a 85
	B	86 a 90
	C	91 a 96
	D	97 a 108
	E	109 a 120

NOTAS:

- (1) Las "series" indican y agrupan aquellos materiales soldados según sus espesores de chapa correspondientes.
- (2) Las "subseries" indican y agrupan aquellas probetas de soldadura en las cuales ha sido variado un mismo y único parámetro de proceso a lo largo de las mismas.
- (3) Los "grupos" indican el valor del parámetro variado a lo largo de la subserie correspondiente.
- (4) Apréciase que, las pruebas preparadas explícitamente para la realización de los ensayos de tracción transversal del cordón de soldadura, han sido reagrupadas según los criterios (1), (2) y (3).

Debido además a la gran cantidad de información acumulada se ha optado por mostrar en el presente informe únicamente los resultados globales correspondientes a los ensayos tomando como muestra algunas de las imágenes más representativas. El conjunto de todos los resultados aparece en el Anexo I: "Resultados de la pruebas de la fase .IV"

5.3 PROCEDIMIENTO DE ENSAYO MACROSCÓPICO

5.3.1 MÉTODO DE MUESTREO.-

La observación macroscópica superficial se ha llevado a cabo sobre todos los cordones de soldadura láser realizados, salvo aquellos que fueron preparados explícitamente para realizar el ensayo de tracción transversal.

Por lo tanto, dicho examen ha sido efectuado sobre un total de trescientos sesenta (360) cordones de soldadura y correspondientes a los tres primeros cordones de cada uno de los grupos (del 1 al 120, ambos incluidos).

5.3.2 PROCEDIMIENTO DE TRABAJO

El examen que nos ocupa se ha llevado a cabo según las condiciones especificadas en la norma UNE-EN 1321:1997 (“Ensayos destructivos de soldaduras en materiales metálicos. Examen macroscópico y microscópico de soldaduras”) por ambas superficies vistas del cordón de soldadura (cara y raíz) en su estado de recepción, es decir, sin ningún tipo de manipulación previa de acondicionamiento y/o tratamiento de acabado superficial.

5.3.3 CONDICIONES DE ENSAYO

La observación exhaustiva del estado superficial que presentan las diferentes muestras recibidas, ha sido efectuada, tanto a simple vista, como con la ayuda de un sistema de microscopia estereoscópica marca ZEISS, modelo SV-8 y nº de inventario LGAI 11-XX-014, de una resolución máxima de 64 aumentos.

5.3.4 CRITERIOS DE EVALUACIÓN

La evaluación de los resultados experimentales se ha llevado a cabo asimilando como válidas las prescripciones establecidas en la norma UNE-EN ISO 13919-1:1997 (“Soldeo. Uniones soldadas por haz de electrones y por láser. Guía sobre los niveles de calidad en función de las imperfecciones. Parte 1: Acero”) y para un nivel de calidad B (Elevado).

Además, y teniendo en cuenta que las imperfecciones incluidas en dicha norma así como los requisitos de calidad comprendidos están establecidos para una configuración genérica de soldadura a testa, se ha creído oportuno, en base a nuestro criterio técnico y debido a la configuración a solape de las muestras recibidas, realizar las siguientes modificaciones a partir de la norma anterior:

1) Se ha tomado el porcentaje aceptable en la dimensión de la imperfección según la norma UNE-EN ISO 13919-1:1997 para un nivel de calidad B y respecto a la suma de espesores de las chapas superior e intermedia (Techo y Pared), sin contar la separación y/o rendija entre las mismas, para las imperfecciones tipo:

Poros y sopladuras (3)	Exceso de sobreespesor (11)
Porosidad lineal y agrupada (4)	Exceso de penetración (12)
Rechupes (5)	

2) Se ha tomado el porcentaje aceptable en la dimensión de la imperfección según la norma UNE-EN ISO 13919-1:1997 para un nivel de calidad B y respecto al espesor de la chapa superior (Techo), para las imperfecciones tipo:

Mordedura (10)
Falta de metal de soldadura (15)

3) Se ha considerado no admisible bajo ningún precepto y de acuerdo con lo establecido en la norma UNE-EN ISO 13919-1:1997, la presencia de las imperfecciones tipo:

Grietas (1)	Falta de fusión (7)
Grietas de cráter (2)	Falta de penetración (8)

Adicionalmente ha sido prescrita una profundidad de penetración total para las dos primeras chapas soldadas, es decir, la chapa superior y la chapa intermedia (Techo y Pared).

4) En cuanto a las imperfecciones tipo comprendidas en la norma UNE-EN ISO 13919-1:1997, no se ha procedido a la valoración de las mismas y sólo ha sido indicada su existencia según correspondiera en cada caso:

Salpicaduras o proyecciones (18)

5) Si bien, y según la norma mencionada, la presencia de las imperfecciones tipo "Inclusiones (6)" no debe ser considerada relevante, a partir de nuestra experiencia profesional consideramos que, para la soldadura de chapas electrozincadas debería establecerse prescripción relativa al defecto y puesto que las inclusiones de restos de zinc y óxido de zinc localizadas en la línea de fusión pudieran generar discontinuidades internas del cordón de soldadura que mermarían considerablemente sus características mecánicas.

A falta de dichas prescripciones, se ha considerado oportuno la cuantificación de estas imperfecciones durante el examen micrográfico correspondiente tal y como se pone de manifiesto en la presentación de resultados.

6) Finalmente, a falta de otras prescripciones en la norma UNE-EN ISO 13919-1:1997, para la presencia de imperfecciones no comprendidas en la misma tales como "Picaduras" y "Perforaciones", se ha procedido a la valoración de las primeras mediante el mismo criterio utilizado en el caso de las imperfecciones tipo "Poros (4)" (puesto que aquellas deben entenderse como "poros abiertos a la superficie por la cara de soldadura"), mientras que, en el caso de discontinuidades del tipo "Perforaciones", la presencia de estas no se ha considerado admisible en ningún caso (y puesto que bien pudieran considerarse como una "falta total de metal de soldadura").

NOTA:

Los criterios de evaluación mencionados en este apartado son válidos tanto para los resultados que procedentes del examen macroscópico como aquellos que han sido obtenidos por examen microscópico, y según concierna la detección y/o cuantificación de las imperfecciones existentes mediante el método de análisis adecuado.

5.4. EXAMEN MICROSCÓPICO

5.4.1 MÉTODO DE MUESTREO.-

El examen metalográfico se ha llevado a cabo para cada uno de los ciento veinte (120) grupos de muestra identificados al respecto.

Por defecto, han sido realizadas secciones transversales del tercer cordón de soldadura existente en cada grupo de muestra y tomadas al azar. Sin embargo, y condicionados por los resultados obtenidos en el examen previo llevado a cabo, también se ha procedido, de forma adicional, a la preparación y examen de secciones transversales y/o longitudinales de otros cordones de soldadura y sólo para algunos grupos de muestra según fuera la presencia de imperfecciones relevantes en los mismos.

5.4.2 PROCEDIMIENTO DE TRABAJO

El examen que nos ocupa se ha llevado a cabo según las condiciones especificadas en la norma UNE-EN 1321:1997 (“Ensayos destructivos de soldaduras en materiales metálicos. Examen macroscópico y microscópico de soldaduras”) y para las secciones transversales y longitudinales seleccionadas, preparadas y acondicionadas de forma adecuada.

Las muestras han sido preparadas por métodos metalográficos convencionales. Partiendo de las mismas en su estado de recepción original, se ha procedido a un despiece preliminar de los cordones de soldadura mediante corte por cizalla. El acondicionamiento definitivo de los cordones de soldadura seleccionados para el examen metalográfico ha sido realizado de forma precisa mediante discos abrasivos lubricados.

A continuación, se ha efectuado el montaje de los objetos muestreados por embutición de los mismos en resina acrílica y/o epoxi, según fuera el caso. Una vez obtenidas las probetas metalográficas de los distintos cordones de soldadura, se ha procedido a una primera etapa de desbaste de las mismas mediante papel abrasivo de SiC, lubricado/refrigerado con agua corriente y siguiendo la secuencia granulométrica #180, #400, #1200 y #4000. La posterior etapa de pulido se ha realizado mediante el uso de discos de paño duro con polvo de diamante de 6 y 3 μm y, finalizando el proceso, sobre un disco de paño elástico con polvo de diamante de 1 μm .

En todos los casos, y sin aplicar ningún otro tipo de sistema final de pulido, también se ha procedido al ataque químico de las superficies pulidas con el fin de revelar la micro y/o macroestructura del material. Para el caso que nos ocupa, se ha utilizado un reactivo químico denominado "Nital" y compuesto por solución etílica de ácido nítrico al 2 % (v/v).

El ataque de las muestras se ha realizado por inmersión de éstas en la solución reactiva correspondiente durante un tiempo aproximada de 10 segundos. Seguidamente, se han retirado las muestras del reactor y se ha procedido a su limpieza para la posterior observación mediante microscopía óptica.

Finalmente, y una vez finalizados todos los exámenes y registros fotográficos, se ha procedido al lacado de las probetas metalográficas en vistas a su conservación y evitar la posible alteración de su estado superficial.

En la tabla siguiente se muestra un listado correspondientes a las 62 probetas metalográficas. preparadas para los distintos cordones de soldadura seleccionados. Todas y cada una de las probetas conllevan una identificación numérica propia que, según la configuración de las mismas y a partir del listado mencionado, permite deducir la referencia exacta de cada uno de los cordones de soldadura que las integran.

La numeración de las preparaciones se ha llevado según la codificación interna del Laboratorio de Preparación Metalográfica de Applus-CTC.

Listado de Probetas Metalográficas

Nº Probeta	Cordón a	Cordón b	Cordón c	Nº Probeta	Cordón a	Cordón b	Cordón c
37 - 1	51 A	59 A	67 A	39 - 16	290 B		
37 - 2	75 A	83 A	99 A	39 - 17	291 B		
37 - 3	107 A	123 A	115 A	44 - 1	59 C	67 C	75 C
37 - 4	131 A	147 A	139 A	44 - 2	83 C	107 C	139 C
37 - 5	163 A	159 A	171 A	44 - 3	147 C	155 C	171 C
37 - 6	179 A	193 A	187 A	44 - 4	131 C	163 C	267 C
37 - 7	195 A	103 A	211 A	44 - 5	307 C	331 C	339 C
37 - 8	219 A	227 A	235 A	44 - 6	91 C	123 C	355 C
37 - 9	243 A	251 A	259 A	44 - 7	187 C	178 C	114 C
37 - 10	267 A	283 A	275 A	44 - 8	211 C	203 C	195 C
37 - 11	291 A	299 A	307 A	44 - 9	275 C	227 C	219 C
37 - 12	315 A	323 A	331 A	44 - 10	259 C	250 C	243 C
37 - 13	339 A	355 A	347 A	44 - 11	299 C	291 C	283 C
37 - 14	363 A	371 A		44 - 12	346 C	324 C	314 C
37 - 15	81 A			44 - 13	371 C	363 C	
37 - 16	90 A			44 - 14	50 C		
39 - 1	315 A	323 A	331 A	44 - 15	82 C		
39 - 2	307 B	283 B	229 A	44 - 16	90 C		
39 - 3	259 B	267 B	275 B	44 - 17	98 C		
39 - 4	243 B	235 B	251 B	44 - 18	130 C		
39 - 5	211 B	219 B	227 B	44 - 19	115 C		
39 - 6	195 B	187 B	203 B	44 - 20	370 C		
39 - 7	186 B	179 B	171 B	44 - 21	274 C		
39 - 8	155 B	163 B	147 B	44 - 22	51 C		
39 - 9	123 B	131 B	139 B	44 - 23	99 C		
39 - 10	115 B	99 B	107 B	44 - 25	146 C		
39 - 11	51 B	91 A	66 B	44 - 29	273 C		
39 - 12	51 B			44 - 31	322 C		
39 - 13	355 B	339 B	347 B	44 - 32	330 C		
39 - 14	363 B	371 B		44 - 33	338 C		
39 - 15	67 B			44 - 34	347 C		

Configuración de las preparaciones metalográficas e identificación de los distintos cordones

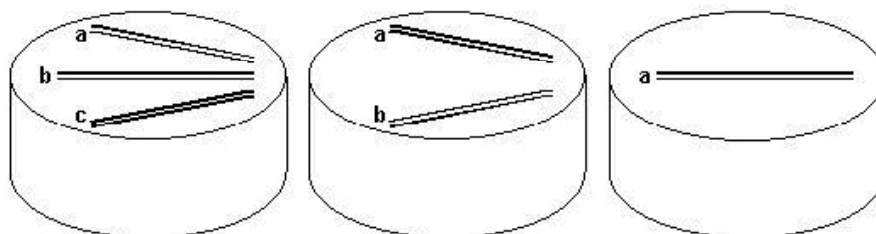


Tabla 5.7: Listado de probetas metalográficas

5.4.3 CONDICIONES DE ENSAYO

El examen metalográfico ha sido realizado con la ayuda de un microscopio óptico tipo “banco metalográfico” marca REICHERTER-JUNG, modelo MeF3 y nº de inventario LGAI 11-XX-012, de una resolución máxima de 1000 aumentos.

En todos los casos, las observaciones pertinentes se han realizado tanto sobre las superficies pulidas de las secciones transversales y/o longitudinales preparadas, como también una vez estas mismas superficies han sido atacadas con el reactivo de Nital.

5.4.4 CRITERIOS DE EVALUACIÓN.-

La evaluación de los resultados experimentales se ha llevado a cabo asimilando como válidas las prescripciones establecidas en la norma UNE-EN ISO 13919-1:1997 (“Soldeo. Uniones soldadas por haz de electrones y por láser. Guía sobre los niveles de calidad en función de las imperfecciones. Parte 1: Acero”) y para un nivel de calidad B (Elevado).

Además, y teniendo en cuenta que las imperfecciones incluidas en dicha norma así como los requisitos de calidad comprendidos están establecidos para una configuración genérica de soldadura a testa, se ha creído oportuno, en base a nuestro criterio técnico y debido a la configuración a solape de las muestras recibidas, realizar las modificaciones ya señaladas en el apartado 6.3.4 del presente documento.

5.5 ENSAYO DE MICRODUREZA

5.5.1 MÉTODO DE MUESTREO.-

El ensayo que nos ocupa se ha llevado a cabo, a priori, para cada uno de los ciento veinte (120) grupos de muestra identificados al respecto.

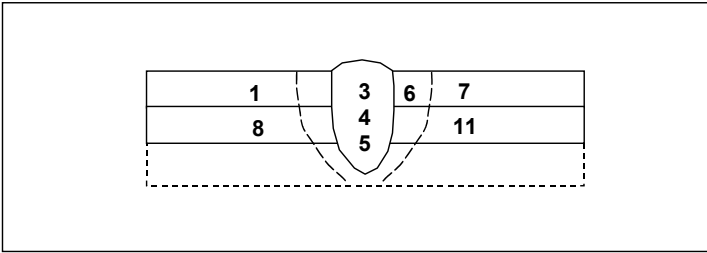
Estas determinaciones han sido realizadas sobre las probetas metalográficas ya preparadas convenientemente para la ejecución del examen metalográfico. En este sentido, todos los ensayos de dureza correspondientes han sido llevados a cabo sobre secciones transversales de los cordones de soldadura, y salvo de

aquellos cordones que presentan defectos de gran magnitud y/o falta total de unión de soldadura.

5.5.2 PROCEDIMIENTO DE TRABAJO

La determinación de la dureza se ha llevado mediante el ensayo de microdureza en escala Vickers y de acuerdo con el procedimiento de ensayo contemplado en el Apartado 6.2 de la norma UNE-EN 1403-2:1997 (“Ensayos destructivos de soldaduras en materiales metálicos. Ensayo de dureza. Parte 2: Ensayos de microdurezas en uniones soldadas”).

Las posiciones de las huellas individuales efectuadas en cada una de las muestras ensayadas son aquellas que se representan en el esquema adjunto.



Zona	Posición de las huellas
1	Metal base, no afectado, chapa superior izquierda (Techo)
2	Metal base, zona afectada térmicamente, chapa superior izquierda (Techo)
3	Cordón de soldadura, sector superior
4	Cordón de soldadura, sector central
5	Cordón de soldadura, sector inferior
6	Metal base, zona afectada térmicamente, chapa superior derecha (Techo)
7	Metal base, no afectado, chapa superior derecha (Techo)
8	Metal base, no afectado, chapa intermedia izquierda (Pared)
9	Metal base, zona afectada térmicamente, chapa intermedia izquierda (Pared)
10	Metal base, zona afectada térmicamente, chapa intermedia derecha (Pared)
11	Metal base, no afectado, chapa intermedia derecha (Pared)

Fig. 5.1: Posiciones de las huellas individuales

5.5.3 CONDICIONES DE ENSAYO.-

◇ Aparato utilizado: Microdurómetro Vickers marca "LECO", modelo M-400

(Número de inventario del LGAI: 11-XX-013)

◇ Símbolo de dureza HV 0,1
aplicado:

- Penetrador de Pirámide recta de base cuadrada de diamante
- ensayo: 0,981 N (0,100 Kg)
- Carga de ensayo: 15 segundos
- Durada aplicación
carga:

◇ Temperatura de ensayo: $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$

5.5.4 CRITERIOS DE EVALUACIÓN.-

La evaluación de los resultados experimentales se ha llevado a cabo asimilando como válidas las prescripciones establecidas en la norma UNE-EN 288-3/A1:1997 ("Especificación y cualificación de los procedimientos de soldeo para los materiales metálicos. Parte 3: Cualificación del procedimiento para el soldeo por arco de aceros") según la cual, y para materiales incluidos en el grupo 1 no tratados térmicamente (como es el caso que nos ocupa), el valor máximo de dureza HV 10 admisible es de 380 unidades.

5.6. ENSAYO DE TRACCIÓN TRANSVERSAL

5.6.1 MÉTODO DE MUESTREO

El ensayo solicitado se ha llevado a cabo sobre en aquellos grupos de muestra identificados explícitamente para la realización del ensayo.

En este sentido, los ensayos han sido efectuados sobre un total de ciento tres (103) cordones de soldadura y correspondientes a tres de los cuatro cordones que conforman cada uno de los grupos de muestra.

5.6.2 PROCEDIMIENTO DE TRABAJO

El ensayo se ha llevado a cabo sobre probetas de tracción preparadas y mecanizadas a partir de las muestras suministradas y según la norma UNE-EN 895:1995 ("Ensayos destructivos de uniones soldadas en materiales metálicos. Ensayo de tracción transversal").

De esta manera, todas las probetas han sido mecanizadas de acuerdo con las dimensiones que se indican a continuación (véase también el esquema del **Anexo 12**) e utilizando una sola probeta para cubrir la totalidad del espesor del conjunto soldado.

Denominación	Símbolo	Dimensión (mm)		
		<i>Serie A</i>	<i>Serie B</i>	<i>Serie C</i>
Longitud total	L_t	162.8	154.0	154.9
Anchura de la zona de amarre	b_1	23.5	24.1	24.8
Anchura de la longitud calibrada	b	12.1	12.0	12.0
Longitud de la zona paralela	L_c	65.2	65.8	62.9
Radio de acuerdo con el amarre	r	> 25	> 25	> 25
Espesor de la probeta en la zona de soldadura	a	1.50	1.60	1.95

Tabla 5.8: Probetas de tracción transversal

La configuración de la probeta de ensayo escogida desacuerda las direcciones iniciales establecidas, las cuales concluían en la mecanización de una probeta de ensayo con simetría rectangular, es decir, sin radio de acuerdo.

La forma definitiva de la probeta de ensayo ha sido seleccionada por este laboratorio con el fin de asegurar la rotura de la muestra por la zona de interés, de lo contrario, ésta se hubiera producido casi sistemáticamente en la zona de amarre probeta-mordaza máquina. Dicha elección se obró en base a los resultados del informe **"Pruebas de viabilidad para ensayos de tracción transversal en probetas de soldadura láser"** emitido y presentado por LGAI en fecha 20/10/2002.

Sin embargo, cabe señalar que, las probetas de ensayo mecanizadas y que fueron objeto del mismo, excluían los puntos de inicio y final del cordón soldadura puesto que éstas comprendían únicamente su zona central.

5.6.3 CONDICIONES DE ENSAYO

Todos los ensayos se han llevado a cabo en una máquina universal de ensayos marca, modelo 5585 y a una velocidad de cabezal constante de $2,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

5.6.4 CRITERIOS DE EVALUACIÓN.-

La evaluación de los resultados experimentales se ha llevado a cabo de acuerdo a las prescripciones establecidas en el Apartado 7.4.1 de la norma UNE-EN 288-3/A1:1997 ("Especificación y cualificación de los procedimientos de soldeo para los materiales metálicos. Parte 3: Cualificación del procedimiento para el soldeo por arco de aceros") según la cual, la carga de rotura de la probeta no debe ser inferior al valor mínimo especificado correspondiente al material base.

A partir de la información facilitada al respecto por el mismo Peticionario, el valor de tensión máxima admisible en las probetas ensayadas a tracción debe ser superior o igual a 270 MPa. Además, y en base a nuestro criterio técnico, para la evaluación de resultados también han sido consideradas prescripciones relativas a la ubicación de la rotura. De esta manera, la aceptación de los

resultados del ensayo de tracción requiere de una resistencia mecánica superior a 270 MPa y, a su vez, la localización de la rotura en el material base. Por lo tanto, no se considera admisible en ningún caso la rotura de la probeta a través del cordón de soldadura.

5.7 CONCLUSIONES

Dada la gran cantidad de información obtenida a partir de los diversos ensayos y/o exámenes practicados sobre la totalidad de muestras recibidas, se ha creído oportuna la confección de tres niveles de conclusión para el presente estudio.

Los dos primeros, y realizados en base a los resultados independientes obtenidos para cada grupo de muestra y, según un primer orden de agrupación, en base a las tendencias de comportamiento observadas entre aquellos grupos de muestra correspondientes a una misma subserie, han sido recogidos en un documento específico, el cual, dada su extensión hemos creído inviable incluir dentro del presente informe.

El tercer nivel de conclusión, y que se presenta a continuación, se corresponde a un segundo orden de agrupación a partir del cual se han extraído las conclusiones generales para cada una de las tres series de probetas láser estudiadas.

De este modo, el presente estudio permite obtener, entre otras, las conclusiones que se detallan a continuación:

1) Para las dos primeras series de probetas láser estudiadas, es decir, la serie *A* y la serie *B*, se corrobora que, el sistema de posicionamiento utilizado para la obtención de una determinada rendija (o separación entre las chapas a unir) no garantiza que, para la mayoría de los casos, el valor real de la misma se corresponda aproximadamente a su valor estimado. A continuación se presentan a modo de ejemplo las diferencias observadas entre el valor de rendija estimado y el valor real medido para la serie *A*:

Grupo	1	2	3	4	5	6
<i>Valor estimado</i> (mm)	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
<i>Valor medido</i> (mm)	0,24	0,35	0,60	0,36	0,07	---

Tabla 5.9: Valores de rendija

Este hecho ha impedido la extracción de conclusiones fidedignas a partir de las subseries con rendija variable, es decir, de las subseries cuyo único parámetro variado es precisamente el valor de rendija. Dichas conclusiones han debido ser asimiladas a partir de los resultados obtenidos para la subserie *C a* para la cual, y de carácter generalizado para toda la serie *C*, han sido minimizadas las diferencias entre el valor de rendija estimado y el valor real medido.

Además, la no reproducibilidad del parámetro rendija no solo afecta a la gran mayoría de subseries correspondientes a la serie *A* y la serie *B* sino que también han sido encontradas diferencias significativas dentro de un mismo grupo.

Por lo tanto, debemos concluir que no ha sido posible garantizar un valor de rendija reproducible para las distintas probetas de soldadura que integran una determinada subserie, ni tampoco ha sido posible asegurar que dicho valor de rendija sea igualmente reproducible para los distintos cordones de soldadura que conforman una determinada probeta (grupo).

De esta manera, debemos considerar los resultados del ensayo de tracción transversal sólo a título informativo puesto que, en ningún caso podemos asegurar que las probetas soldadas al respecto mantengan un valor de rendija real aproximadamente igual a aquellas probetas soldadas en las mismas condiciones estimadas y que fueron objeto de la caracterización metalográfica.

2) La extensa consideración descrita en el punto anterior y relativa a la no reproducibilidad del parámetro rendija, ha sido debida al hecho que, del estudio global de las probetas ensayadas y/o examinadas en este laboratorio se corrobora que, la rendija o separación entre las chapas a unir es un parámetro

crítico relacionada directamente con la calidad del cordón de soldadura resultante.

De esta manera, a partir de los resultados obtenidos para la subserie *C a* y que se resumen a continuación,

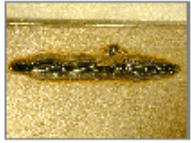
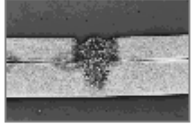
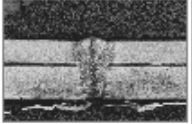
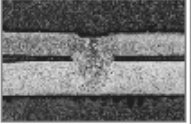
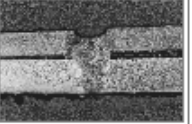
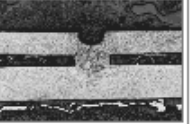
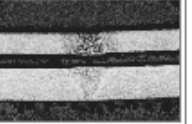
Grupo 80	Grupo 81	Grupo 82	Grupo 83	Grupo 84	Grupo 85
					
					
Rendija estimada: 0 mm	Rendija estimada: 0,1 mm	Rendija estimada: 0,2 mm	Rendija estimada: 0,3 mm	Rendija estimada: 0,4 mm	Rendija estimada: 0,5 mm
Rendija medida: 0,01 mm	Rendija medida: 0,08 mm	Rendija medida: 0,17 mm	Rendija medida: 0,29 mm	Rendija medida: 0,36 mm	Rendija medida: mm

Fig. 5.2: Efecto de la variación del gap

se observa que, un aumento del parámetro rendija (entre 0,1 y 0,4 mm) está directamente relacionado con una pérdida en la profundidad de penetración, y a su vez, una pérdida de la sección efectiva del cordón de soldadura por desprendimiento del material fundido en la chapa superior (Techo) y a través del espacio originado por la separación entre chapas. En el caso extremo, un valor de rendija excesivo (0,5 mm) origina una falta total de unión soldada o bien un descuelgue total del material fundido en la primera chapa y con el mismo efecto anterior.

Dichas consideraciones pueden asimilarse también para las series *A* y *B* (teniendo siempre en cuenta la aleatoriedad observada a lo largo de las subseries correspondientes). Sin embargo, y tal como queda reflejado en los resultados mostrados anteriormente, se observa que, un valor de rendija próximo a 0,0 mm produce efectos nocivos sobre el cordón de soldadura que, presumiblemente, están directamente relacionados con el recubrimiento electrocincado existente sobre la chapa intermedia (Pared) y sólo para aquellas probetas correspondientes a la serie *C*.

De esta manera, a partir del estudio de los resultados correspondientes a otros cordones de la serie *C* con un mismo valor de rendija, se aprecia una merma significativa en la calidad de los mismos y de una forma muy generalizada. Dicha merma, que se manifiesta en la formación de cordones de soldadura irregulares y heteroformes acompañados de una expulsión significativa de material fundido, es característica del soldeo láser de chapas electrocincadas a solape para las cuales no ha sido considerada una separación mínima entre ellas que posibilite la liberación y/o evacuación de los vapores y humos compuestos por zinc y óxidos de zinc generados durante el proceso.

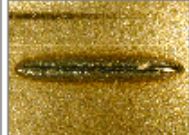
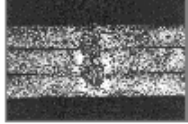
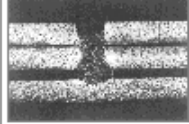
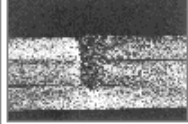
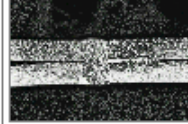
En cambio, para las series *A* y *B* (las cuales no presentan chapas electrozincadas en el conjunto soldado), el efecto de un valor de rendija 0,0 mm no se manifiesta en una pérdida de calidad del cordón de soldadura sino todo lo contrario, puesto que, en unas condiciones de potencia y velocidad determinadas, dicho valor optimiza la calidad del cordón de soldadura para una profundidad de penetración total.

Llegados a este punto, podemos concluir que, el valor de rendija óptimo para la soldadura láser de las distintas series estudiadas se encuentra entre 0,0 y 0,1 mm para las series *A* y *B* y aproximadamente 0,1 mm para la serie *C*.

3)En cuanto a la variación de la potencia láser a lo largo de las subseries correspondientes, se ha observado que, de forma generalizada para las tres series *A*, *B* y *C*, una disminución en el valor de potencia se manifiesta en una pérdida en la profundidad de penetración y, a su vez, un aumento de la velocidad de proceso requiere de un aumento significativo de la potencia láser para conseguir una profundidad de penetración total.

Estas conclusiones se reflejan en el resumen de resultados que se presenta en la página siguiente y donde se aprecia como, para dos subseries llevadas a cabo en distintas velocidades de procesado, la potencia necesaria para la obtención de un cordón de soldadura con penetración total es tanto más elevada cuanto mayor es la velocidad de proceso.

Serie A b

Grupo 7	Grupo 8	Grupo 9	Grupo 10	Grupo 11
				
				
Potencia: 3400 W Velocidad: 4,5 m/min	Potencia: 3200 W Velocidad: 4,5 m/min	Potencia: 2900 W Velocidad: 4,5 m/min	Potencia: 2800 W Velocidad: 4,5 m/min	Potencia: 2600 W Velocidad: 4,5 m/min

Serie A c

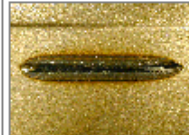
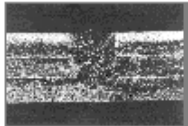
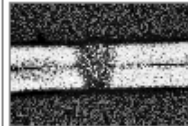
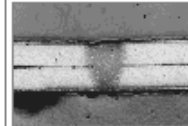
Grupo 12	Grupo 13	Grupo 14	Grupo 15	Grupo 16	Grupo 17
					
					
Potencia: 4000 W Velocidad: 6,5 m/min	Potencia: 3800 W Velocidad: 6,5 m/min	Potencia: 3600 W Velocidad: 6,5 m/min	Potencia: 3400 W Velocidad: 6,5 m/min	Potencia: 3200 W Velocidad: 6,5 m/min	Potencia: 3000 W Velocidad: 6,5 m/min

Fig. 5.3: Efecto de la variación de potencia-1

4) En cuanto a la variación de la velocidad de proceso a lo largo de las subseries correspondientes, se ha observado que, de forma generalizada para las tres series A, B y C, un aumento en el valor de velocidad se manifiesta en una pérdida en la profundidad de penetración y, a su vez, un aumento de la potencia posibilita un aumento muy significativo de la velocidad de proceso necesaria para conseguir una profundidad de penetración total.

Estas conclusiones se reflejan en el resumen de resultados que se presenta a continuación y donde se aprecia como, para dos subseries soldadas a distintas potencias, la velocidad de procesamiento necesaria para la obtención de un cordón

de soldadura con penetración total es tanto más elevada cuanto mayor es la potencia láser.

Serie A d

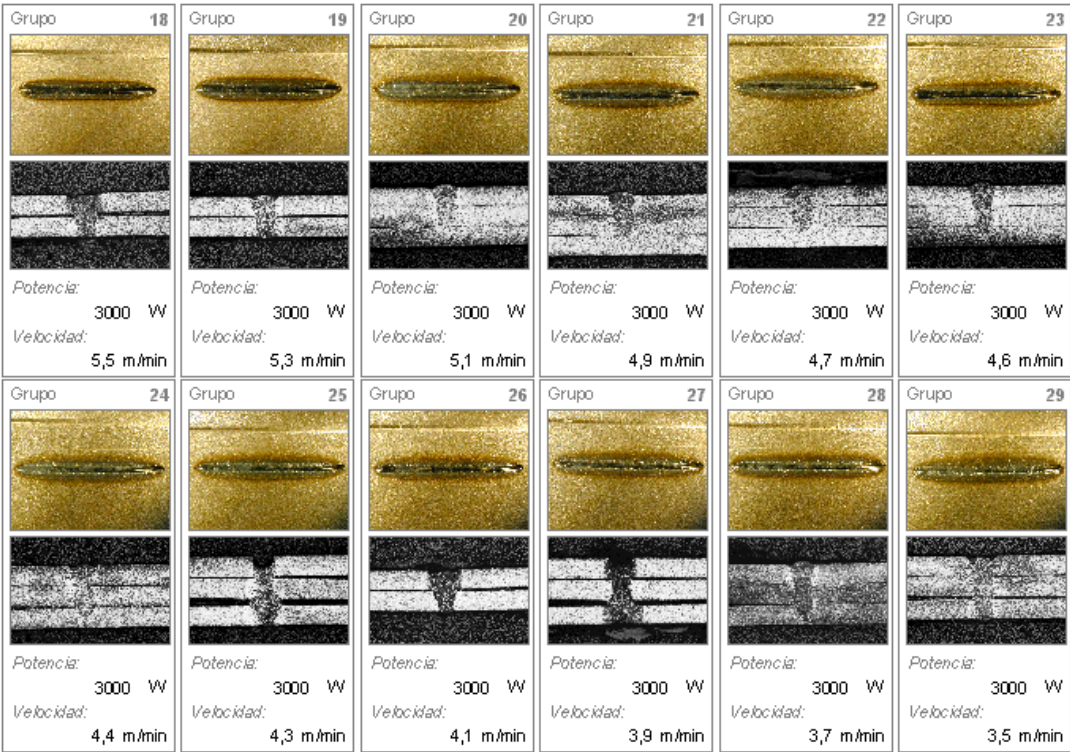


Fig. 5.4: Efecto de la variación de velocidad-1

Serie A e

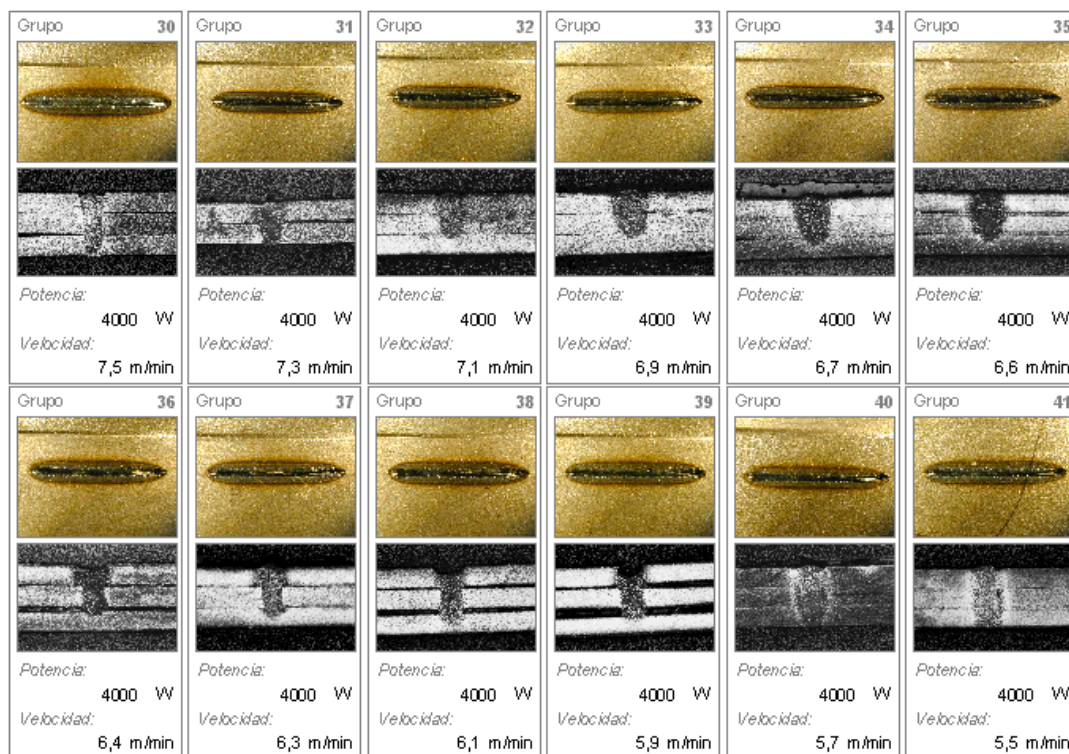


Fig. 5.5: Efecto de la variación de velocidad-2

5) Asimismo, una vez establecidas las tendencias generales asociadas a cada subserie, se ha procedido a la correlación de las mismas y para las tres series A, B y C, pudiendo constatar los siguientes puntos:

- ♦ Se observa que el incremento de la densidad de energía aportado en la pieza está relacionado directamente con el aumento en la profundidad de penetración del cordón de soldadura.

Entendiendo densidad de energía como la energía aportada por unidad de área (magnitud que comprende la relación entre la potencia láser, la velocidad de procesado y el tamaño del haz láser sobre la pieza).

Así mismo, esta tendencia puede asociarse a un endurecimiento progresivo de la Zona Afectada Térmicamente (ZAT) y por la raíz de los cordones de soldadura, según puede concluirse a partir de los resultados del ensayo de

microdureza que se encuentran detallados en el documento "FICHAS". Sin embargo, las variaciones de dureza observadas son ligeras y poco pronunciadas, puesto que, en todos los casos, los valores obtenidos se mantienen dentro de los límites prescritos.

Serie A b

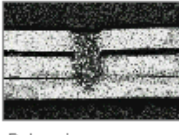
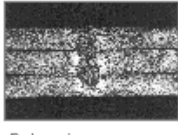
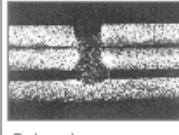
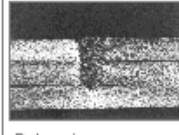
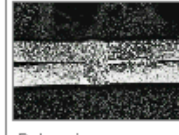
Grupo 7	Grupo 8	Grupo 9	Grupo 10	Grupo 11
				
				
Potencia: 3400 W	Potencia: 3200 W	Potencia: 2900 W	Potencia: 2800 W	Potencia: 2600 W
Velocidad: 4,5 m/min	Velocidad: 4,5 m/min	Velocidad: 4,5 m/min	Velocidad: 4,5 m/min	Velocidad: 4,5 m/min
Dureza ZAT: 197 ÷ 221	Dureza ZAT: 128 ÷ 158	Dureza ZAT: 124 ÷ 145	Dureza ZAT: 128 ÷ 133	Dureza ZAT: 115 ÷ 131

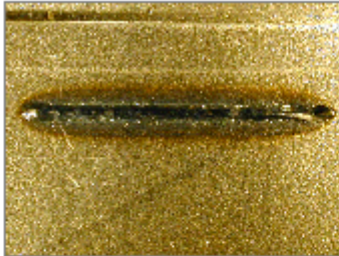
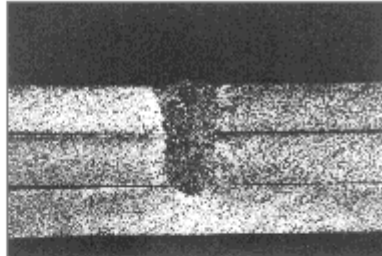
Fig. 5.6: Efecto de la variación de velocidad-3

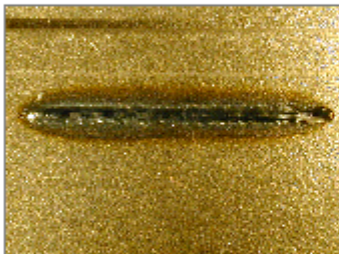
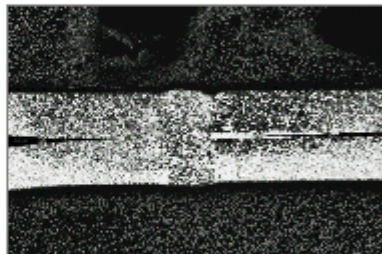
- ♦ En aquellos casos que se ha detectado un exceso en la profundidad de penetración superando así, el espesor de las dos primeras chapas (Techo y Pared), la separación no controlada del techo y respaldo implica un desprendimiento del material fundido en la chapa superior (Techo) y a través de esta separación (homólogo a lo sucedido con el parámetro rendija en el punto 1 de conclusiones de este informe).

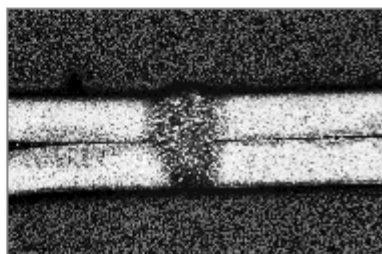
6) Finalmente, como resumen final de las conclusiones extraídas del presente estudio, a continuación se presentan aquellas parametrizaciones óptimas encontradas para cada una de las subseries analizadas, es decir, aquellas condiciones para las cuales se obtienen cordones de soldadura láser con nivel de calidad B según norma UNE-EN ISO 13919-1:1997 y cuyas

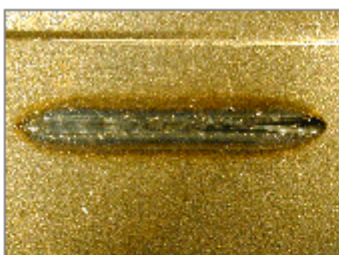
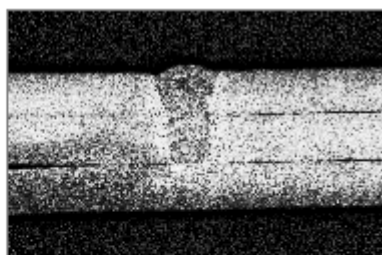
propiedades mecánicas son correctas y se ajustan a las especificaciones correspondientes.

PARAMETRIZACIONES ÓPTIMAS

☒	Serie A b - Grupo 10		
	Potencia: 2800 W		
	Velocidad: 4,5 m/min		
	Velocidad de redundancia: m/min		
	Rendija: 0 mm real: 0,03 mm		
	Fuerza: 20 Kg/cm^2		

☒	Serie A b - Grupo 11		
	Potencia: 2600 W		
	Velocidad: 4,5 m/min		
	Velocidad de redundancia: m/min		
	Rendija: 0 mm real: 0,01 mm		
	Fuerza: 20 Kg/cm^2		

☒	Serie A c - Grupo 15		
	Potencia: 3400 W		
	Velocidad: m/min		
	Velocidad de redundancia: 6,5 m/min		
	Rendija: 0 mm real: 0,02 mm		
	Fuerza: 20 Kg/cm^2		

☒	Serie A d - Grupo 20		
	Potencia: 3000 W		
	Velocidad: 5,1 m/min		
	Velocidad de redundancia: m/min		
	Rendija: 0 mm real: mm		
	Fuerza: 20 Kg/cm^2		

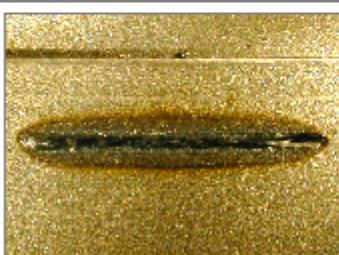
☒	Serie A d - Grupo 21		
	Potencia: 3000 W		
	Velocidad: 4,9 m/min		
	Velocidad de redundancia: m/min		
	Rendija: 0 mm real: mm		
	Fuerza: 20 Kg/cm^2		

Fig. 5.7: Parametrizaciones óptimas-1

✓	Serie A e - Grupo 31		
Potencia: 4000 W Velocidad: m/min Velocidad de redundancia: 7,3 m/min Rendija: 0 mm real: 0,12 mm Fuerza: 20 Kg/cm ²			
✓	Serie A e - Grupo 32		
Potencia: 4000 W Velocidad: m/min Velocidad de redundancia: 7,1 m/min Rendija: 0 mm real: 0,02 mm Fuerza: 20 Kg/cm ²			
✓	Serie B b - Grupo 49		
Potencia: 2600 W Velocidad: 4,5 m/min Velocidad de redundancia: m/min Rendija: 0 mm real: mm Fuerza: 20 Kg/cm ²			
✓	Serie B c - Grupo 50		
Potencia: 4000 W Velocidad: m/min Velocidad de redundancia: 6,5 m/min Rendija: 0 mm real: 0,08 mm Fuerza: 20 Kg/cm ²			
✓	Serie B d - Grupo 59		
Potencia: 3000 W Velocidad: 4,9 m/min Velocidad de redundancia: m/min Rendija: 0 mm real: 0,02 mm Fuerza: 20 Kg/cm ²			

Fig. 5.8: Parametrizaciones óptimas-2

✓	Serie B d - Grupo 60 Potencia: 3000 W Velocidad: 4,7 m/min Velocidad de redundancia: m/min Rendija: 0 mm real: 0,05 mm Fuerza: 20 Kg/cm ²		
✓	Serie C a - Grupo 81 Potencia: 3000 W Velocidad: 4,5 m/min Velocidad de redundancia: m/min Rendija: 0,1 mm real: 0,08 mm Fuerza: 20 Kg/cm ²		
✓	Serie C c - Grupo 91 Potencia: 4000 W Velocidad: m/min Velocidad de redundancia: 6,5 m/min Rendija: 0 mm real: 0,09 mm Fuerza: 20 Kg/cm ²		

Fig. 5.9: Parametrizaciones óptimas-3

6. estudio de la realización y mejora de la soldadura de tailored blanks

6.1 INTRODUCCIÓN

Los tailored blanks consisten en formatos planos de diferente espesor que una vez soldados son sometidos a estampación para darles la forma definitiva. El hecho de combinar varios espesores permite:

- 1) Reforzar determinadas partes del vehículo que deben permanecer rígidas en caso de impacto.
- 2) Controlar la deformación en caso de impacto, ya que las partes más delgadas tenderán a deformarse absorbiendo parte de la energía del choque y contribuyendo, de esta manera disminuir la deformación de las partes más gruesas.
- 3) Disminuir el peso del coche contribuyendo a la reducción del consumo.

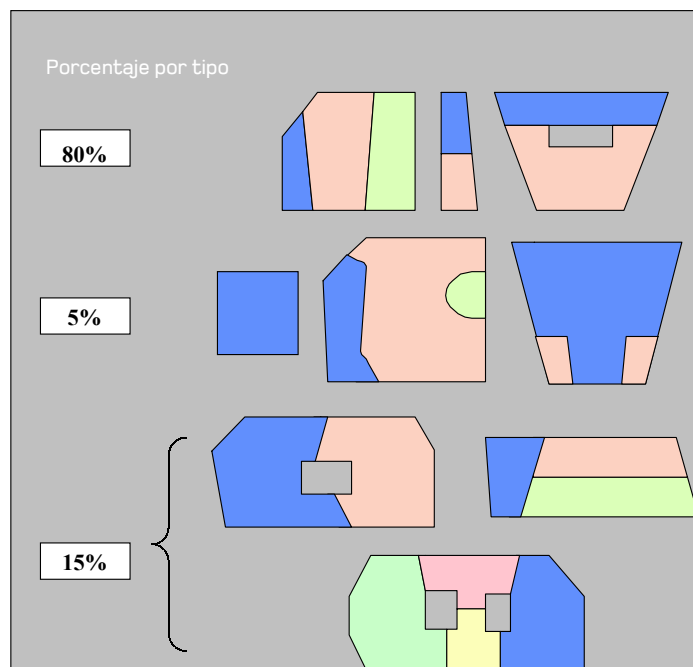


Fig. 6.1: Clasificación de los "tailored blanks" en función de los porcentajes de fabricación

6.2. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA

6.2.1 DESCRIPCIÓN DE LA GEOMETRÍA

Esta primera parte ha consistido en el estudio práctico de la soldadura de chapa cincada entre diferentes espesores.

En esta parte del estudio se han realizado pruebas sobre dos tipos de soldaduras:

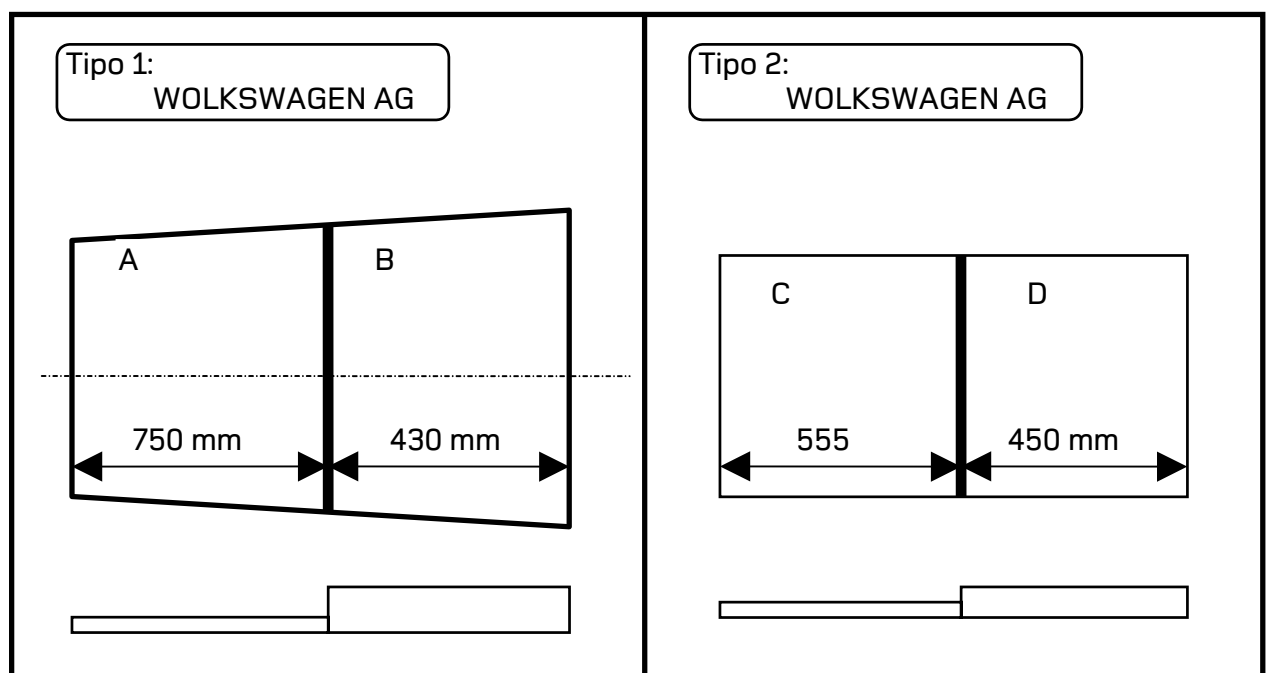


Fig. 6.2: Geometría de las piezas a soldar

	Medidas formato original [mm]	Material VW50111		Medidas formato original [mm]	Material VW50111
Chapa A	0,8x750x469	St05Z 100MB	<i>Chapa C</i>	0,8x555x370	St05Z 100MB
Chapa B	1,2x430x547	St05Z 100MB	<i>Chapa D</i>	1,0x450x370	St05Z 100MB

Tabla 6.1: Formato original de las piezas a soldar

Este estudio ha servido para obtener los parámetros funcionales óptimos de soldadura, que conjuntamente con los resultados obtenidos de los estudios metalográficos servirán como punto de referencia para el parametrizado de los equipos de monitorización de soldadura.

6.2.3 MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS

Antes de iniciar los trabajos de soldadura se adecuó el sistema mecánico de manipulación existente a los útiles proporcionados por SOLBLANK para la consecución del proceso.

Debido a las dimensiones del utillaje, fue necesario adecuar las dimensiones de las distintas chapas especificadas en la tabla 6.1 Para esto, se acortaron dichas chapas longitudinalmente, dejando intacto el lado de la chapa previsto para ser soldado.

Por tanto las dimensiones quedaron como sigue:

	Medidas formato pruebas [mm]	Material VW50111		Medidas formato original [mm]	Material VW50111
Chapa A	0,8x246x469	St05Z 100MB	<i>Chapa C</i>	0,8x246x370	St05Z 100MB
Chapa B	1,2x246x547	St05Z 100MB	<i>Chapa D</i>	1,0x246x370	St05Z 100MB

Tabla 6.2: Formato final de las piezas a soldar

Con el fin de evitar que las partículas de zinc vaporizadas por el efecto del láser sobre el material penetraran en el camino óptico del sistema, se rediseñó la boquilla existente, agregando a esta una entrada de aire con el fin de generar una barrera aerodinámica tal y como viene especificado en la figura 6.3. En caso contrario, los espejos del sistema, especialmente el espejo parabólico, se verían recubiertos por dichas partículas provocando aberraciones ópticas y un descenso de la energía del haz.

El equipo utilizado para la realización de las pruebas en esta fase ha sido el siguiente:

Fuente láser RS 10000 RF de CO₂ excitado por radiofrecuencia (27 MHz) marca Rofin Sinar con las siguientes características técnicas

- Configuración de resonador inestable,
- Haz múltimodo
- Diámetro del haz a la salida del resonador = 46 mm,
- Divergencia < 1.5 mrad ,
- Factor de calidad del haz $K > 0.2$,
- Polarización lineal, 45° relativo al plano horizontal,
- Frecuencia de pulsado de 0 a 25 KHz,

El sistema de manipulación es un sistema de cinco ejes X, Y, Z, A y B con pieza móvil y con una superficie hábil de trabajo en 2D (X,Y) de 800x800 mm.

La focalización se realiza con un espejo de cobre parabólico de 200 mm de focal. El gas de asistencia utilizado ha sido el Helio (ver apartado 4.6) y se ha aportado lateralmente al eje del haz láser tal como muestra la figura 6.3 al objeto de minimizar el tiempo de ciclo.

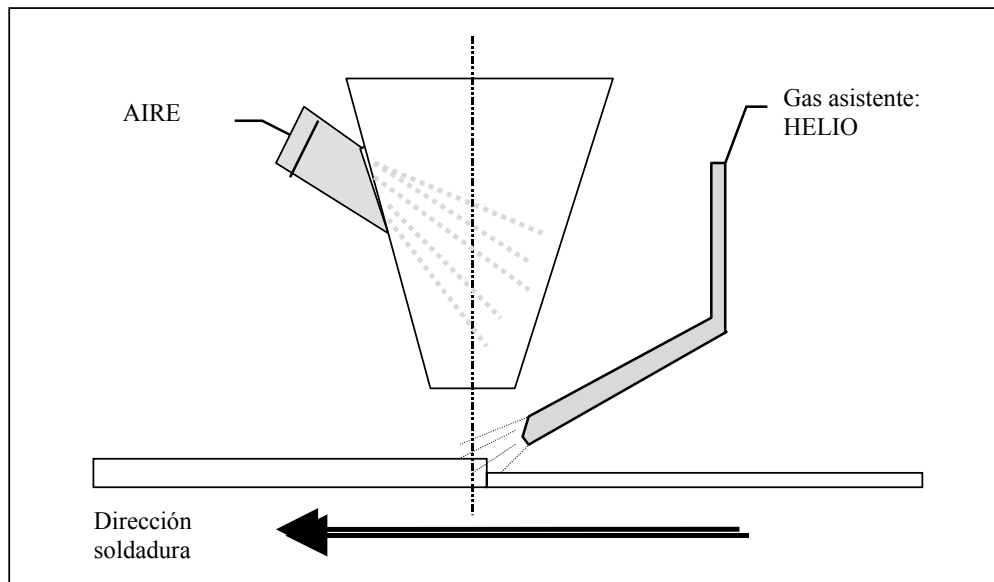


Fig. 6.3: Esquema de la boquilla utilizada

Por lo que respecta al útil de sujeción de las chapas facilitado por SOLBLANK, una de sus bases rectificadas, concretamente la que soporta la chapa de espesor superior, ha tenido que ser suplementada en 0.1 mm con el fin de que el decalaje vertical de las dos chapas no fuera superior al 10% del espesor de la chapa más fina.

Por otro lado, se han colocado varios puntos de referencia en dicho útil para facilitar el posicionado de las chapas.

6.2.4 PARÁMETROS FUNCIONALES

Durante esta fase se han realizado alrededor de 300 soldaduras fundamentadas en tres objetivos distintos :

- Búsqueda de parámetros óptimos.
- Estudio del comportamiento de la soldadura con los parámetros óptimos y condiciones reales de trabajo.
- Realización de soldaduras con fallos mediante la variación de parámetros y análisis de sus consecuencias.

Los trabajos en esta parte han ido destinados a obtener mediante experimentación los parámetros funcionales que permitan conseguir una soldadura visualmente óptima, valorándose los siguientes parámetros de calidad:

- Continuidad de la soldadura,
- Ausencia de porosidad,
- Geometría del cordón (convexo o cóncavo),
- Largo del poro.

Para lograr un cordón con las características anteriormente citadas se ha seguido el procedimiento que detallamos a continuación. En este procedimiento se han tenido en cuenta los siguientes parámetros:

- Potencia media del láser.
- Pulsado.
- Distancia Focal.
- Velocidad de soldadura.
- Gas de aportación.
- Caudal del gas de aportación.
- Presión de aire de los pistones de sujeción del útil.
- Punto de incidencia del láser con la unión de las dos chapas.

Las soldaduras en esta tarea se han llevado a cabo procurando que las chapas estuvieran limpias de partículas sólidas (suciedad) y de aceite. Este procedimiento se utiliza para evitar que cualquiera de estos agentes externos influya de manera negativa distorsionando el trabajo experimental.

Las fases para la búsqueda de parámetros óptimos han sido las siguientes:

1. Búsqueda del punto de focalización: Esta operación consiste en hallar la cota del eje Z en la que el tamaño de spot mínimo (0,7 mm) se sitúe en la superficie de la chapa con el espesor superior. A este punto que llamaremos punto de focalización "0" coincide con :

- Para chapa de 1,2 mm de espesor: **Z = 552,85**
- Para chapa de 1 mm de espesor: **Z = 553,05**

2. Relación Potencia / Velocidad: una vez hallado el punto de focalización 0, se procede a determinar los valores aproximados de la relación Potencia / Velocidad que permitan obtener una buena penetración del cordón de soldadura. Esto se consigue realizando diferentes pasadas lineales sobre una chapa de espesor igual al superior de las chapas a soldar. Primero se prefija un valor de potencia relativamente alto (6,5 KW) y se intenta obtener la velocidad de avance más rápida para esta potencia. Seguidamente se va disminuyendo la potencia y aumentando la velocidad gradualmente, hasta el umbral de penetración. Finalmente se varia la posición del foco +/- para mejorar el aspecto del cordón. Los parámetros obtenidos en esta primera etapa de aproximación fueron:

- -Punto de focalización: 0
- -Potencia salida: 5.500 W
- - Velocidad: 8,250 m/min

3. Gas de protección:

Se han realizado varias pruebas con el fin de determinar el caudal óptimo de helio para conseguir una buena interacción laser/materia.

Los mejores resultados se han obtenido entre los 23 y 25 l/min.

4. Decalaje punto de soldadura:

Hasta este momento solo se habían tenido en cuenta los parámetros estrictamente relacionados con el efecto del haz láser sobre el material, siendo, por tanto necesario plantear la optimización de los parámetros relacionados con la unión.

Es por eso que se han realizado diferentes pasadas variando el punto de incidencia del haz perpendicularmente al sentido de la soldadura, tal como muestra la figura 6.4. Este decalaje siempre se ha efectuado sobre la chapa de más espesor, ya que de lo contrario no se produciría el efecto deseado de fusión de las dos superficies.

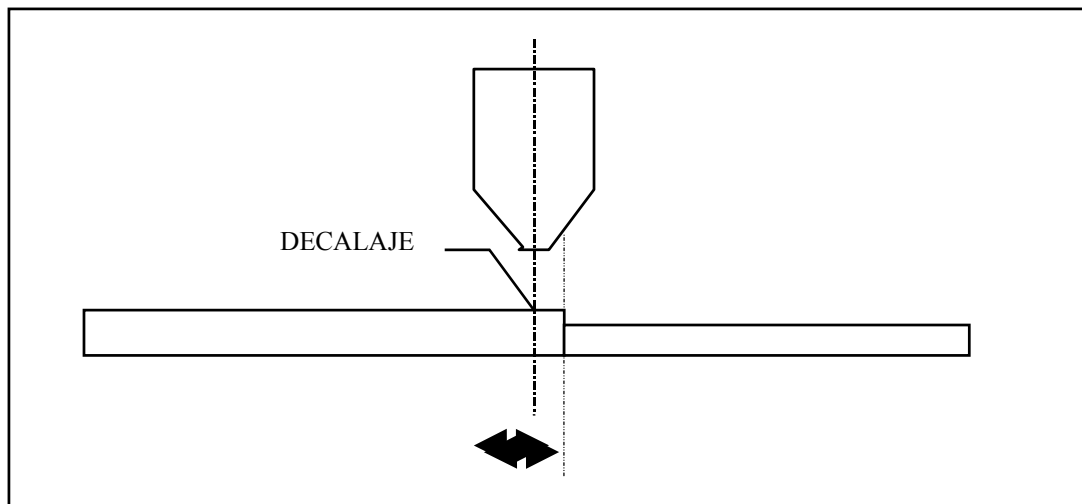


Fig. 6.4: Variación del decalaje

El decalaje óptimo se ha encontrado entre 0,15 y 0,25 mm. para la unión de los espesores 1,2 y 0,8 mm . Para la unión de los espesores de 1 y 0,8 mm , el decalaje se situó entre 0,1 y 0,2 mm.

5. Presión de unión (“clamping”):

Otro parámetro decisivo para la consecución de una buena soldadura es la presión a la que se someten las dos chapas a unir. Si esta presión es débil, se producen discontinuidades en la soldadura, pero si por el contrario esta es demasiado fuerte puede llegar a deformar el punto de unión de las dos chapas. Una presión adecuada a aplicar al sistema neumático sería la situada entre 3,0 y 4 bar. .

6. Optimización:

Finalmente, se ha procedido a la optimización de los parámetros orientativos.

Tras realizar series de verificación, es decir repetir una soldadura con los mismos parámetros 25 veces obteniendo un 100% de efectividad (inspección visual), se ha considerado que los parámetros óptimos son:

unión	potencia (W)	velocidad (mm/min)	decalaje (mm)	dist. focal (Eje Z)	caudal He (l/min)	presión chapas (bar)
Tipo 1 AB	5.300	8.000	+0.2	552.85 (foco 0)	24 +/- 2	3,5
Tipo 2 CD	5.000	8.100	+0.15	553.05 (foco 0)	24 +/- 2	3,5

Tabla 6.3: Parámetros óptimos de soldadura

Comportamiento de la soldadura con los parámetros óptimos y condiciones reales de trabajo.

Una vez conocidos de cuales son los parámetros más adecuados para obtener una soldadura óptima, se procedió a utilizar estos para la realización de soldaduras en condiciones de trabajo normales. Es decir, en las que no se aplica ningún tratamiento corrector de limpieza previo a la chapa, dejando ésta en sus condiciones originales.

Con este método se trata de ver como influyen estos elementos en el proceso de soldadura.

El procedimiento estadístico escogido para llevar a cabo esta tarea, ha consistido en la realización de distintas series variando ligeramente algunos parámetros en cada una de ellas y contrastándolas con los resultados obtenidos con las chapas tratadas, comprobando la influencia de la suciedad en la calidad del proceso.

Las siguientes tablas y gráficas muestran el porcentaje de soldaduras realizadas con respecto al número máximo (25) realizado para los parámetros óptimos.

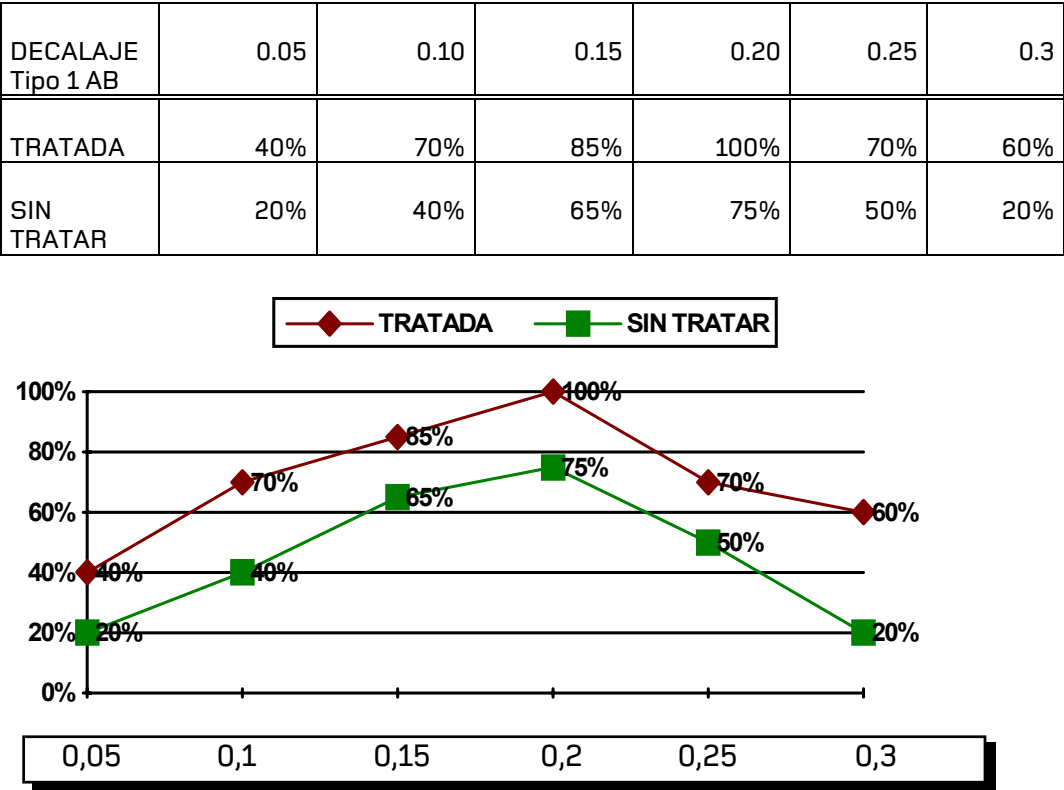


Fig. 6.5: Porcentaje de pruebas variando el decalje para piezas del tipo 1AB

DECALAJE Tipo 2 CD	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.3
TRATADA	50%	70%	100%	90%	70%	20%
SIN TRATAR	20%	60%	75%	75%	30%	0%

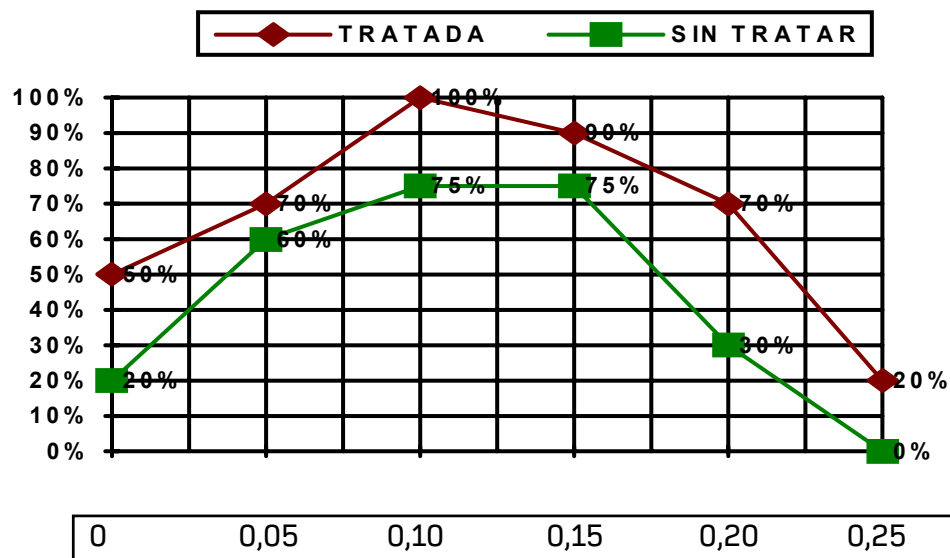


Fig. 6.6: Porcentaje de pruebas variando el decalje para piezas del tipo 2 CD

POTENCIA Tipo 1 AB	4900	5000	5100	5200	5300	5400
TRATADA	50%	70%	85%	90%	100%	100%
SIN TRATAR	20%	50%	50%	70%	80%	80%

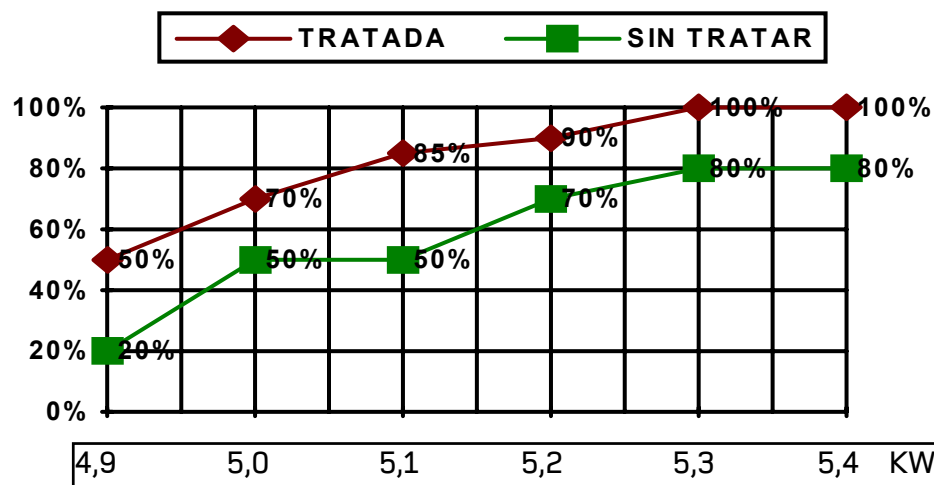


Fig. 6..7: Porcentaje de pruebas variando la potencia para piezas del tipo 1 AB

POTENCIA Tipo 2 CD	4900	5000	5100	5200	5300	5400
TRATADA	70%	100%	100%	90%	90%	80%
SIN TRATAR	50%	100%	90%	70%	75%	70%

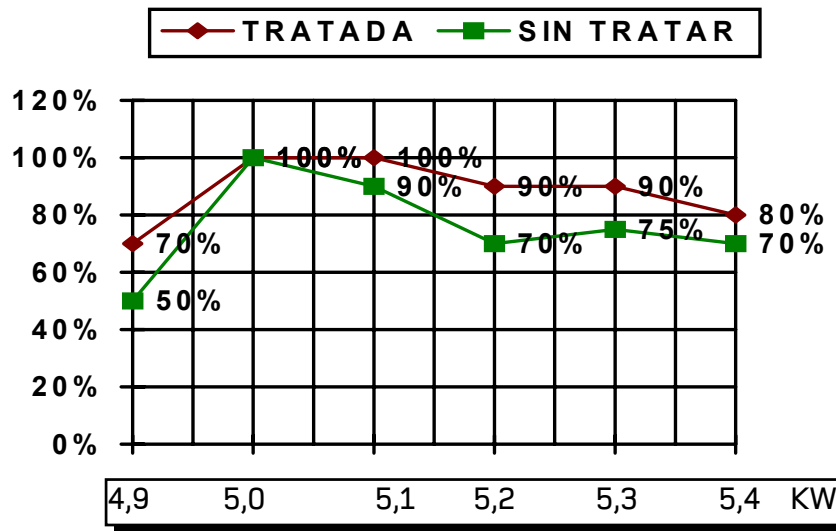


Fig. 6.8: Porcentaje de pruebas variando la potencia para piezas del tipo 2 CD

Se pueden distinguir dos tipos de elementos que se consideran como suciedad:

- Partículas sólidas compuestas de grasa, carbonilla y otros elementos, posiblemente adheridos en la chapa durante el transporte. Estas partículas se han detectado más en las piezas de tipo 1.
- Aceite.

Las primeras son las que afectan de manera más desfavorable al sistema, ya que:

1. Si dichas partículas de suciedad se encuentran en la cara posterior de la plancha, esta no puede asentarse correctamente en el utillaje, provocando un decalaje vertical en el posicionado,
1. Si las partículas de suciedad se encuentran en el borde de unión hace que el contacto entre las dos chapas no sea regular, causando discontinuidades en la soldadura,
2. Por último, si las partículas se encuentran sobre la línea de soldadura al pasar el haz láser por encima de ellas no consigue soldar correctamente, provocando porosidades.

Si por el contrario, lo que se encuentra en la línea de soldadura es aceite el efecto observado es el de una deficiente penetración, aparte de la combustión del mismo.

6.3 ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS

Tras la realización de las soldaduras se ha procedido a la realización de análisis destructivos y no destructivos de una selección de quince muestras por diferentes tipologías:

Piezas visualmente correctas: Estas se han dividido en tratadas y no tratadas. Dentro de este grupo se han escogido piezas con diferentes parámetros, especialmente con variaciones de decalaje en el posicionado del haz.

Piezas visualmente incorrectas con poros, pequeñas discontinuidades y penetraciones irregulares.

Esta clasificación se ha realizado a partir de la visualización aumentada (lupa 20 X)

Los ensayos realizados han sido:

- Observación macroscópica de las muestras
- Observación radiográfica de las muestras
- Observación microscópica de las muestras
- Ensayos de embutición

6.3.1 OBSERVACIÓN MACRÓSCOPICA

La observación se ha llevado a cabo en dos etapas, sobre la totalidad de las muestras. En una primera etapa, se ha procedido al examen visual de las soldaduras por ambas caras, tomándose nota de las particularidades observadas de acuerdo con el sistema de codificación de la norma UNE EN 26520-92.

Posteriormente se ha realizado un segundo examen, también por ambas caras, con ayuda de una lupa binocular de la marca NIKON, modelo 71625, de 20 aumentos.

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente página:

Defecto	Muestras en que se ha observado									
2017. Picadura	SB-004	SB-007	SB-012	SB-021	SB-022	SB-028	SB-029	SB-030	SB-105	
202. Rechupe	SB-030	SB-105	SB-107							
401. Falta de fusión	SB-006	SB-007	SB-010	SB-012	SB-024	SB-101	SB-105	SB-106	SB-107	
	SB-108									
402. Falta de penetración	SB-004	SB-012	SB-013	SB-014	SB-015	SB-016	SB-017	SB-019	SB-020	
	SB-021	SB-022	SB-023	SB-024	SB-025	SB-026	SB-027	SB-029	SB-030	
	SB-101	SB-105	SB-106	SB-108						
500. Forma imperfecta										
5011. Mordedura	SB-001	SB-005	SB-007	SB-012	SB-013	SB-014	SB-016	SB-017	SB-023	
	SB-024	SB-101	SB-102	SB-103	SB-104	SB-105	SB-106	SB-107		
5013. Contracción en la raíz	SB-002									
502. Exceso de sobreespesor	SB-012									
5041. Descolgaduras	SB-008	SB-009	SB-010	SB-011	SB-012	SB-031				
505. Angulo de sobreexp. incorr.	SB-010	SB-105	SB-106	SB-107	SB-108					
506. Solapamiento	SB-108									
507. Falta de alineación	SB-012	SB-024	SB-029	SB-030	SB-101	SB-102	SB-103	SB-104	SB-105	
	SB-106	SB-107								
509. Desfondamiento	SB-003	SB-008	SB-009							
510. Perforación	SB-003	SB-007	SB-008	SB-009	SB-010	SB-011	SB-028	SB-029	SB-031	
	SB-105	SB-106	SB-108							
513. Anchura irregular	SB-024	SB-029								

Tabla 6.5: Resultados de la observación macroscópica

6.3.2 RESULTADOS DE LA OBSERVACIÓN RADIOGRÁFICA DE LAS MUESTRAS

Todas las muestras realizadas han sido sometidas a visualización radiológica con indicadores de calidad (defectos > 0,10 mm) con el fin de detectar los posibles defectos generados por el proceso de soldadura.

El ensayo se ha llevado a cabo de acuerdo con las prescripciones de la norma ASTM E 94-92 mediante la técnica de radiografía, utilizándose para ello un tubo de Rayos-X marca SCANRAY, modelo DOA-200, con los parámetros de funcionamiento que se detallan a continuación:

- Tensión anódica: 110 kV
- Intensidad anódica: 2 mA
- Tiempo de exposición: 1,5 minutos
- Tipo de película y pantalla: STRUCTURIX D5, con pantallas de Plomo.
- Distancia F.F.: 700 mm
- Técnica radiográfica: Pared simple

- Penetrómetro: Tipo hilos, según norma DIN 54109, N° 10/16.

Para asegurar la inspección total de las uniones soldadas, en los casos en que el tamaño de muestra así lo requiere, se ha realizado una exposición con dos placas radiográficas solapadas, las cuales han sido identificadas como sectores 0-1 y 1-2, a fin de obtener imagen proyectada de todo el cordón de soldadura. Las marcas 0, 1 y 2 han sido trazadas tanto en la superficie de la muestras como en las placas radiográficas, que se adjuntan con el presente informe para constancia de los resultados obtenidos, a efectos de identificación.

Las muestras sometidas a examen radiográfico han sido seleccionadas del total de muestras recibidas siguiendo criterios de representatividad de los defectos observados en la inspección macroscópica previa, con la intención de documentar y caracterizar todos los tipos de defecto detectados.

Los resultados obtenidos han sido los siguientes:

Muestra	Radiografías	Defectos	Explicación s/ UNE EN 26520
SB-001	0-1 / 1-2	5011	Mordedura
SB-010	0-1 / 1-2	401 5041 505 510	Falta de fusión Descolgaduras Ángulo de sobreespesor incorrecto Perforación
SB-012	0-1 / 1-2	2011 2017 401 502 5041	Poro Picadura Falta de fusión Exceso de sobreespesor Descolgaduras
SB-013	0-1 / 1-2	402 5011	Falta de penetración Mordedura
SB-016	0-1 / 1-2	401 5011	Falta de fusión Mordedura
SB-024	0-1 / 1-2	402 5011	Falta de penetración Mordedura
SB-030	0-1 / 1-2	2014 401 507	Sopladuras alineadas Falta de fusión Falta de alineación

Muestra	Radiografías	Defectos	Explicación s/ UNE EN 26520
SB-031	0-1 / 1-2	2014 2017 401 5011 5041 510	Sopladuras alineadas Picaduras Falta de fusión Mordedura Descolgaduras Perforación
SB-104	0-1	2011 5011	Poros Mordedura
SB-105	0-1 / 1-2	2011 2017 5011 401 505 510	Poros Picaduras Mordedura Falta de fusión Ángulo de sobreespesor incorrecto Perforación
SB-108	0-1 / 1-2	2011 401 505 506 510	Poros Falta de fusión Ángulo de sobreespesor incorrecto Solapamiento Perforación
SB-028	0-1 / 1-2	2014 2017 510	Sopladuras alineadas Picaduras Perforación

Tabla 6.6: Resultados de la observación radiográfica

6.3.3 RESULTADOS DE LA OBSERVACIÓN MICROSCÓPICA DE LAS MUESTRAS

Las muestras seleccionadas para su examen microscópico se han preparado siguiendo las técnicas clásicas de corte, embutición en resina, desbaste con distintos papeles abrasivos de granulometría progresivamente más fina y pulido final con pasta de diamante de 6 μm hasta 1 μm de tamaño de grano.

Las muestras han sido observadas por medio de un microscopio metalográfico de la marca REICHERT - JUNG, modelo MeF3, provisto de un equipo integrado de microfotografía, tomándose exposiciones de los campos más significativos tanto en estado de pulido como tras un ataque de 45" con reactivo Nital 2%.

Se han preparado un total de dieciséis (16) cortes metalográficos, seleccionados de acuerdo con el criterio anteriormente expuesto. De estos cortes, catorce corresponden a puntos de los cordones de soldadura donde se han detectado defectos en la fase de observación macroscópica, habiéndose corroborado con la observación radiográfica. Los dos cortes restantes corresponden a una soldadura considerada correcta (caso de la muestra de referencia SB-001) y a la zona de rotura producida en la muestra soldada sometida a ensayo de embutición (sin referencia específica en este laboratorio).

DESCRIPCIÓN DE UNA SOLDADURA SIN DEFECTOS APRECIABLES (MUESTRA SB-001)

Material base: matriz ferrítica

Zona de fusión: matriz ferrítica orientada según direcciones preferentes de disipación de calor en la solidificación. Crecimiento de grano ferrítico.

Características geométricas:

- Anchura media del cordón de soldadura: 0.83 mm
- Anchura de cordón en cara de ataque: 0.84 mm
- Anchura de cordón en raíz: 0.81 mm
- Grosor medio de cordón: 0.91 mm
- Diferencia de cota entre bases de chapa soldadas: 0.1 mm
- Zona afectada térmicamente: Grano ferrítico recristalizado de crecimiento columnar. Anchura de 0.24 mm.

La siguiente microfotografía (fig. 6.9) muestra una vista general (x40) de la soldadura, zona afectada térmicamente y parte del material base inalterado una vez atacada la sección correspondiente con reactivo Nital 2%. En la figura 6.10 se muestra un detalle del cordón de soldadura del campo anterior.

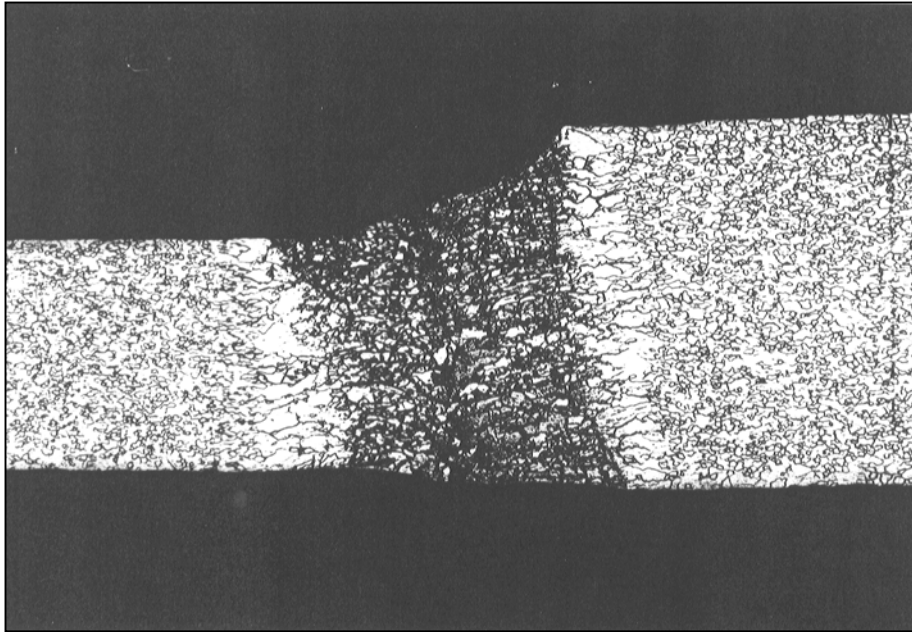


Fig. 6.9: Microfotografía de una soldadura sin defectos apreciables (x40)

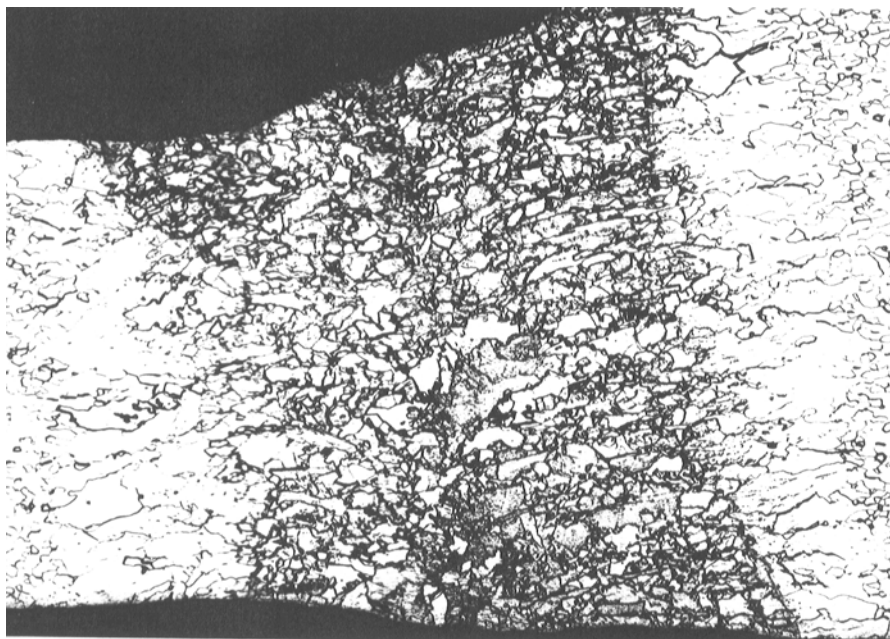


Fig. 6.10: Detalle del cordón de soldadura de la figura 6.9 (x80)

La fig. 6.11 muestra una vista general (x16) de la zona de rotura y sus inmediaciones, atacada con reactivo Nital 2%. En ella se observa que la rotura se ha producido lejos del cordón de soldadura y de su zona afectada térmicamente asociada.

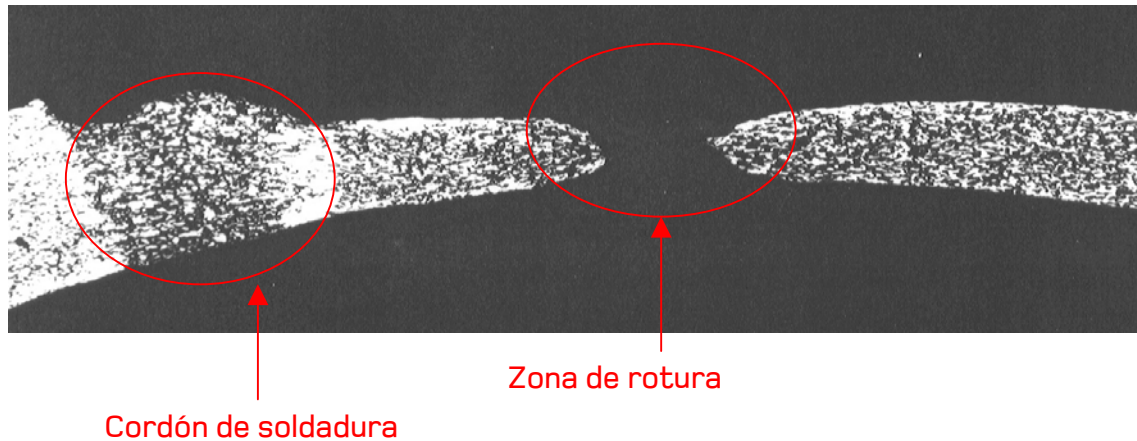


Fig. 6.11: Muestra sometida a ensayo de embutición

La figura 6.12 muestra un detalle (x40) de la zona de rotura en el que se aprecian las alteraciones microestructurales producidas por el flujo plástico localizado del material, previo a la rotura, que se manifiestan en un direccionamiento del grano siguiendo las líneas locales de máxima deformación, y que indican una rotura de tipo dúctil.



Fig. 6.12: Detalle de la zona de rotura de una muestra sometida a ensayo de embutición (x40)

La Fig. 6.13 muestra un detalle (x40) del cordón de soldadura y su zona afectada térmicamente asociada de una muestra sometida a embutición, en la que se aprecia una geometría de cordón con un defecto del tipo 5011- (Mordedura), pese a lo cual la rotura en el ensayo de embutición no se ha producido ni en la zona de fusión ni en la zona afectada térmicamente.

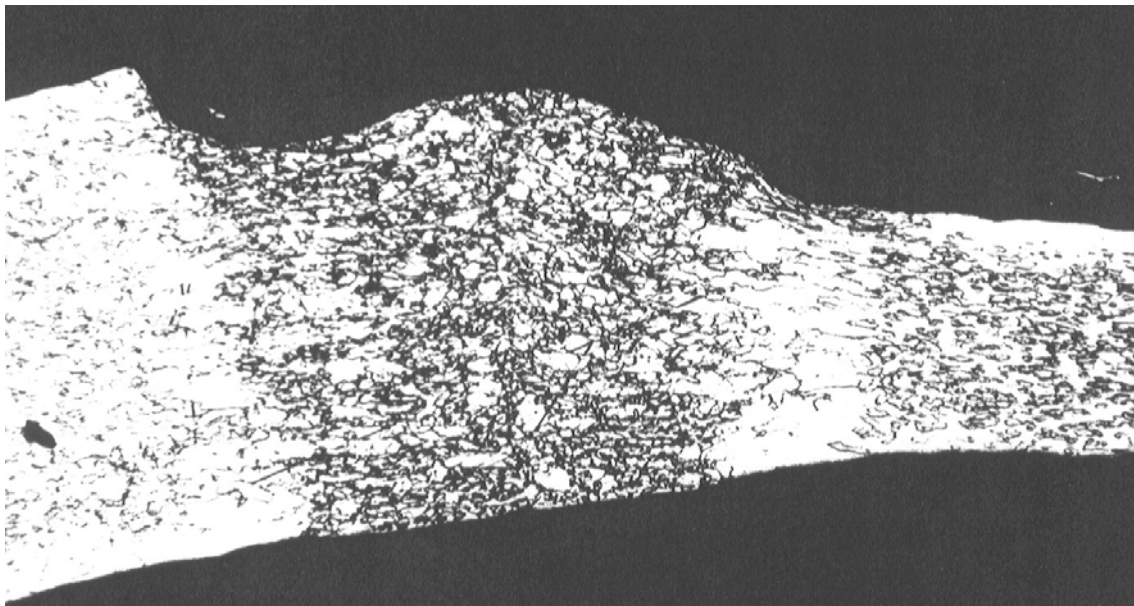


Fig. 6.13 Muestra de un ensayo de embutición sobre una muestra con mordedura

En la tabla siguiente y en las posteriores microfotografías se muestran los diferentes defectos observados en las soldaduras:

Defectos	Explicación s/ UNE EN 26520	Microfotografías	Otros defectos observados
506	Solapamiento	7 y 8	5011 / 402
401	Falta de fusión	9 y 10	506
5011	Mordedura	11 y 12	-
2011	Poro	13 y 14	4011
200	Sopladura	15 y 16	4011
4011	Falta de fusión en bordes	17 y 18	-
402	Falta de penetración	19 y 20	507 / 200
2016	Sopladura vermicular	21 y 22	507 / 5011
507	Falta de alineación	23	-

Tabla 6.7: defectos observados

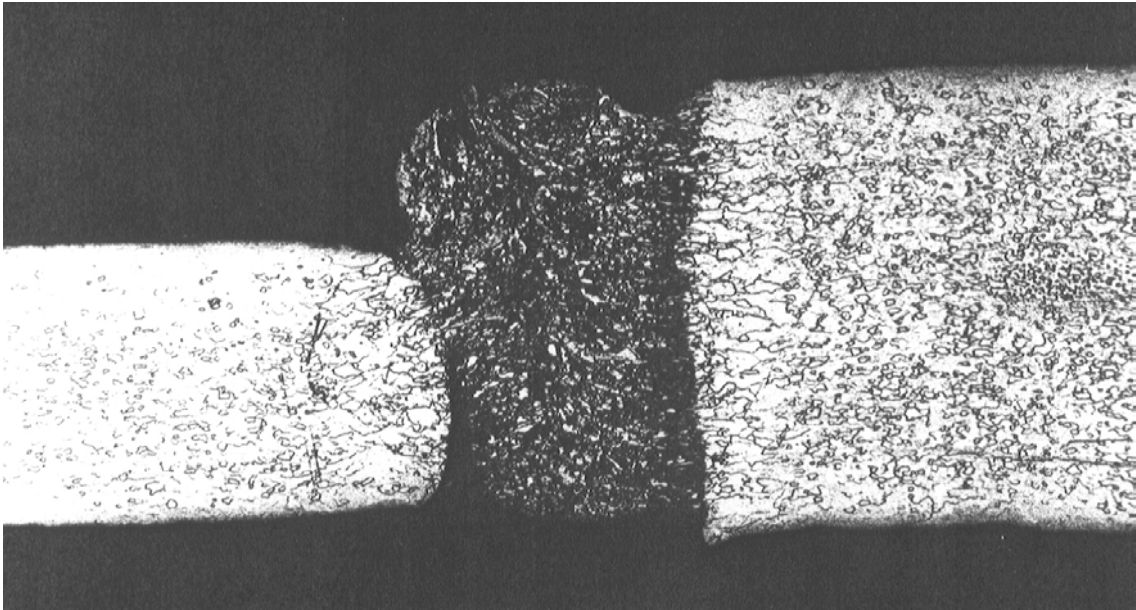


Fig. 6.14: microfotografía de una soldadura con solapamiento (506)

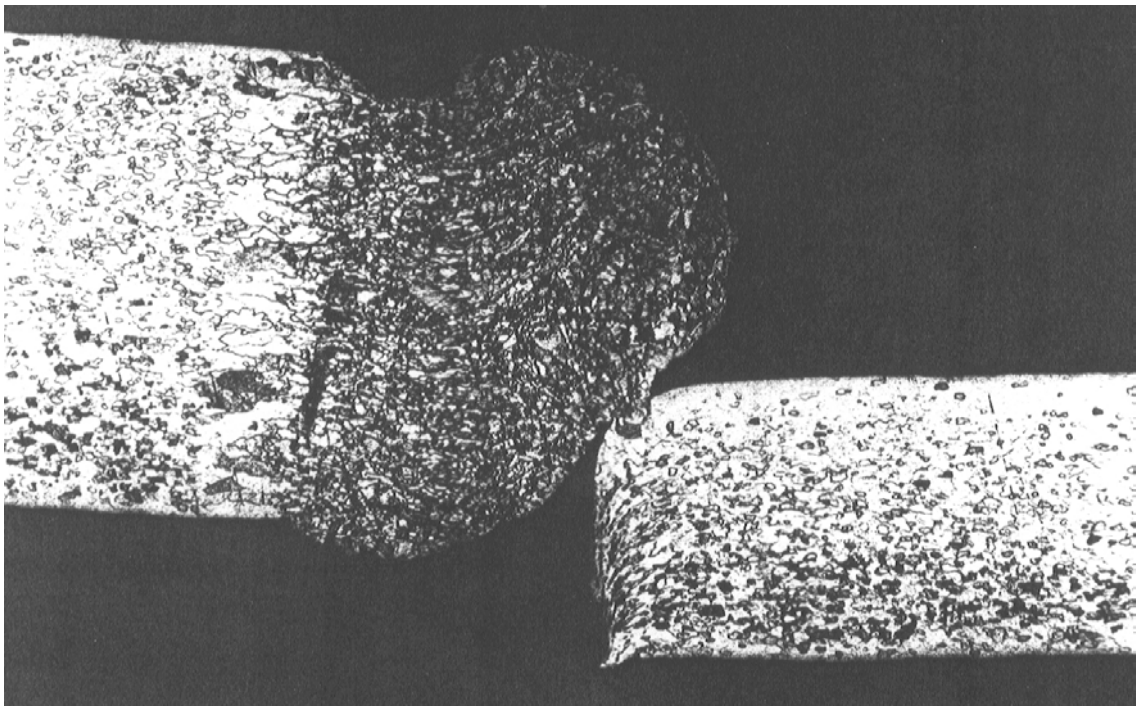


Fig. 6.15: microfotografía de una soldadura con falta de fusión (401)

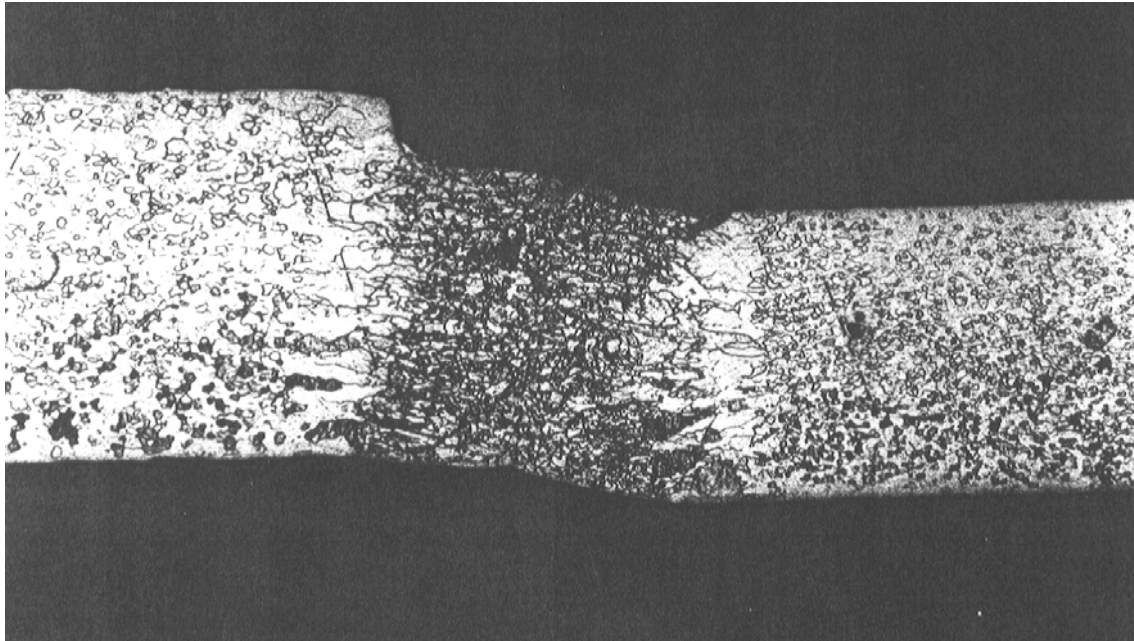


Fig. 6.16: microfotografía de una soldadura con mordedura (5011)

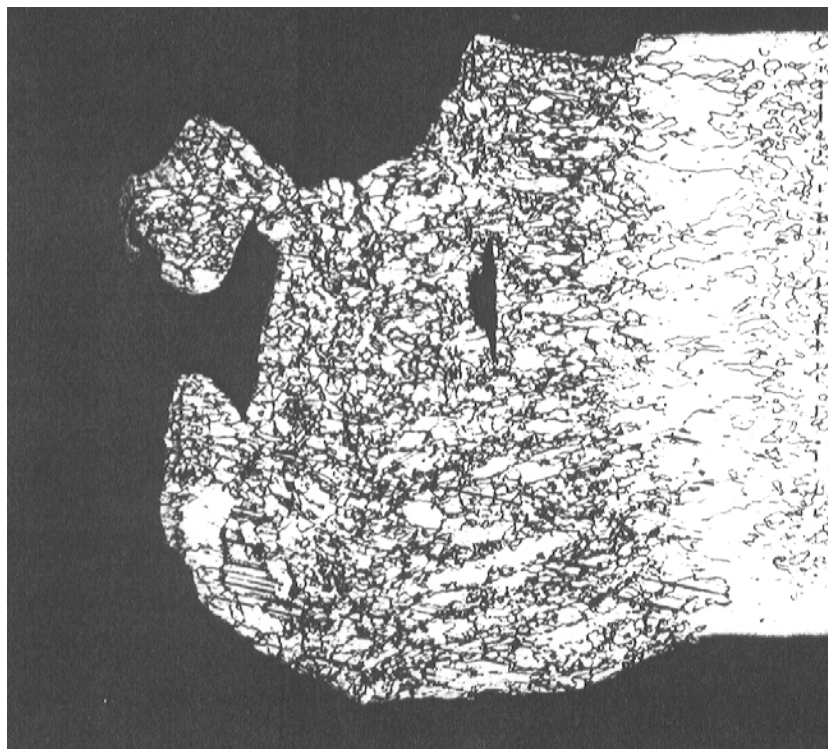


Fig. 6.17: microfotografía de una soldadura con poro (2011)

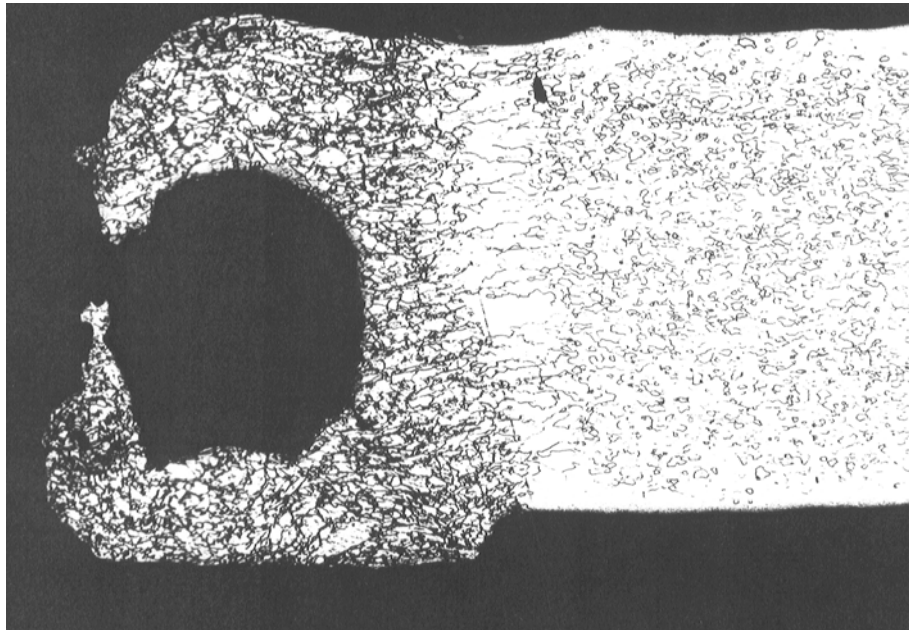


Fig. 6.18: microfotografía de una soldadura con sopladura (200)

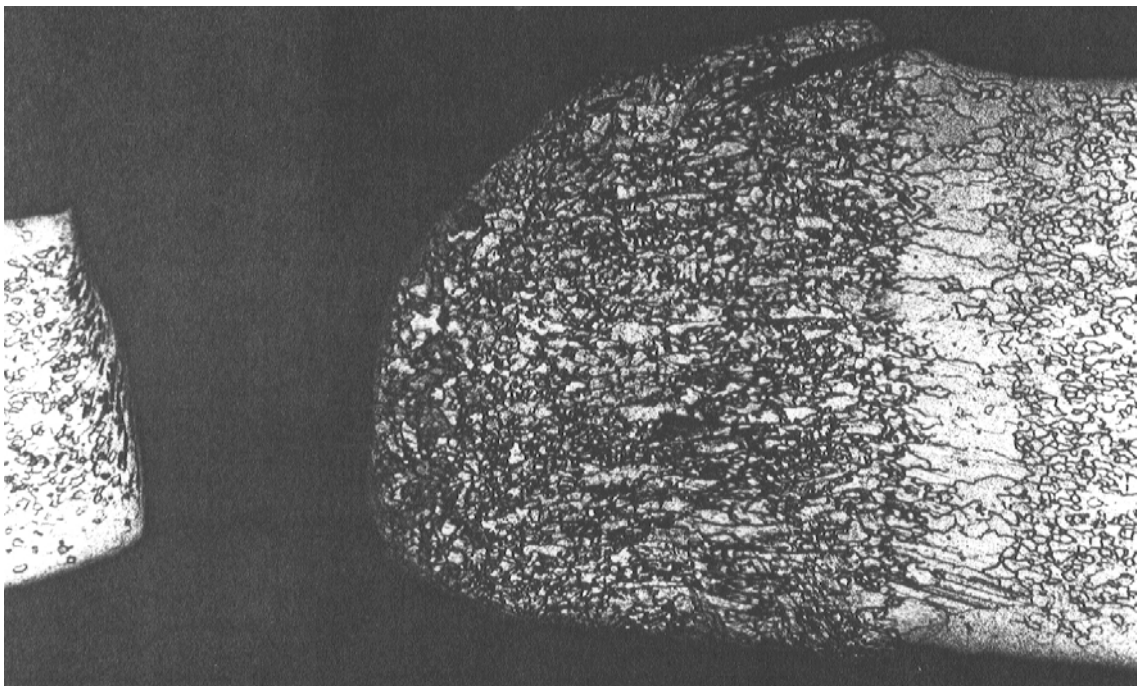


Fig. 6.19: microfotografía de una soldadura con falta de fusión en los bordes (4011)

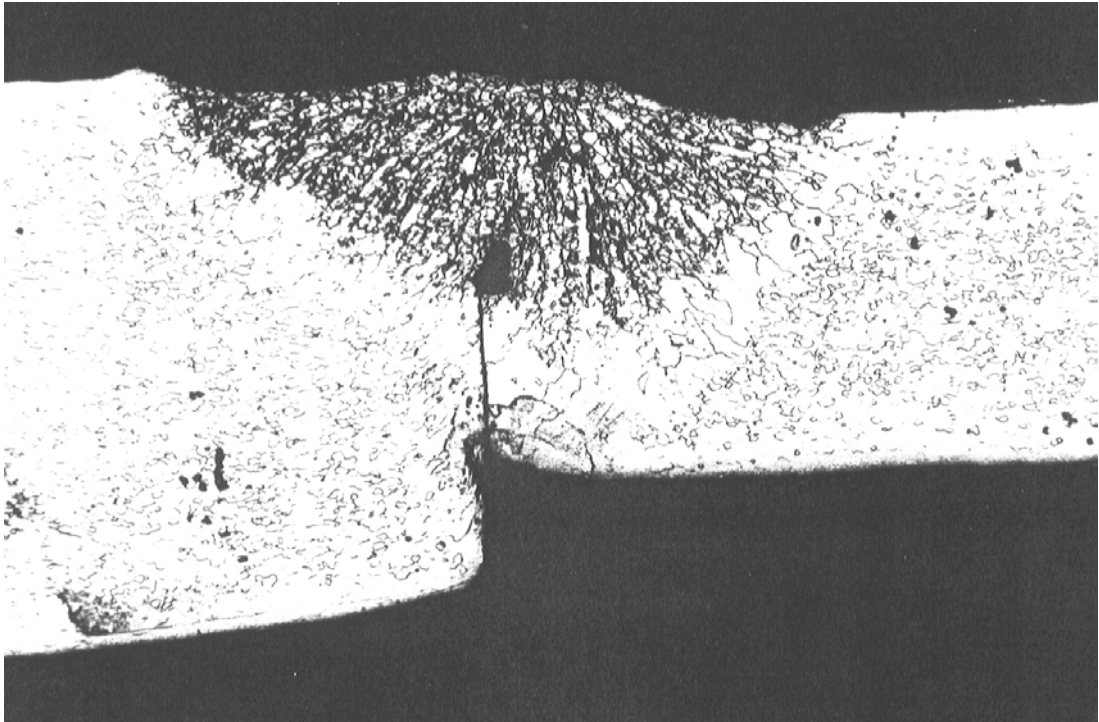


Fig. 6.20: microfotografía de una soldadura con falta de penetración (402)

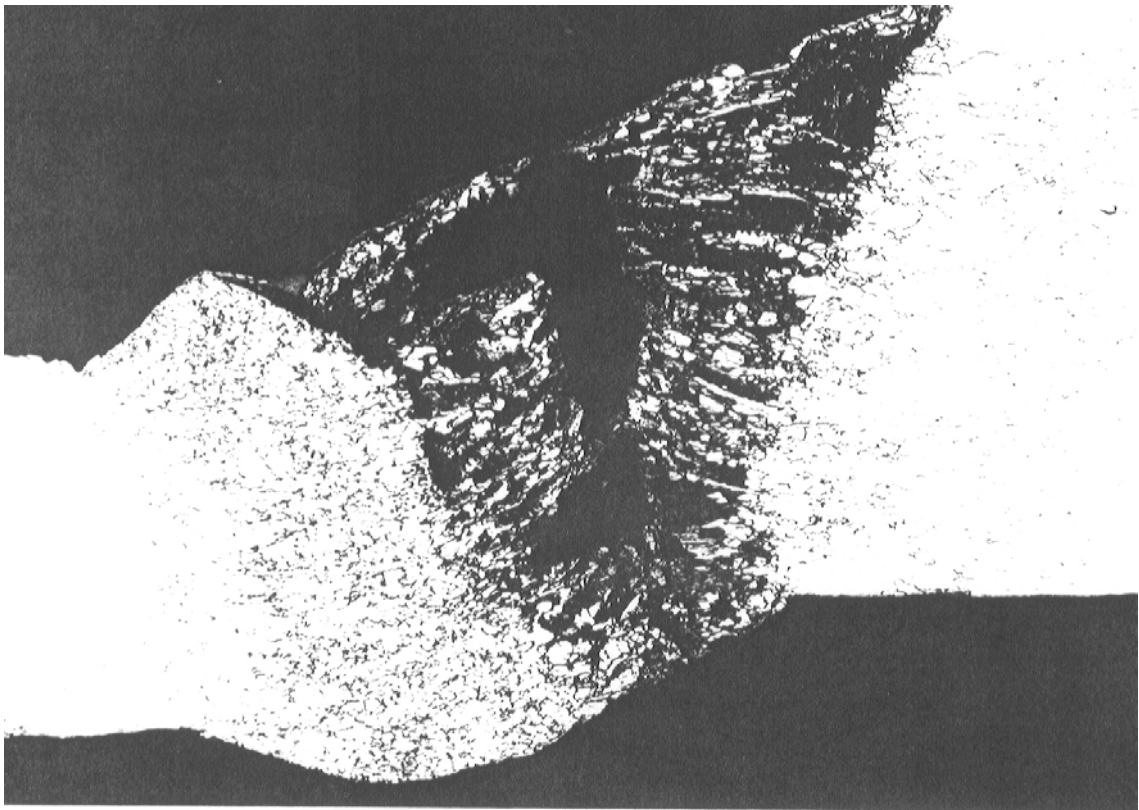


Fig. 6.21: microfotografía de una soldadura con sopladura vermicular (2016)

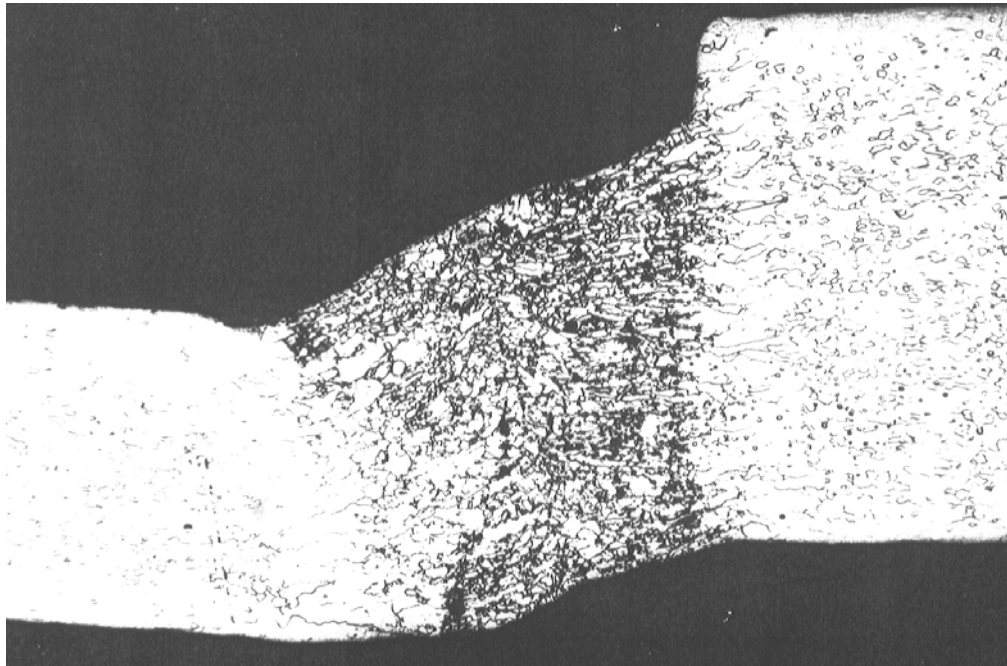


Fig. 6.22: microfotografía de una soldadura con sopladura vermicular (2016)

2.3.4 RESULTADOS DEL ENSAYO DE EMBUTICIÓN (TEST "OLSEN"):

El ensayo de embutición se ha realizado en el laboratorio de control de calidad de SOLBLANK .

La fuerza aplicada en este experimento ha sido de entre 40 y 50 KN, obteniendo penetraciones entre 9,4 y 11,5 mm.

El resultado de las pruebas indica que el 100% de las piezas visualmente consideradas como buenas han superado la prueba de esfuerzo, Mientras que entre las que visualmente se había detectado algún defecto ha habido un 40% que también han superado el test. Dentro de estas se encuentran las que se consideraban con una penetración débil o las que tenían poros inferiores a 0.25 mm.

2.4 CONCLUSIONES DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

Básicamente, los puntos críticos del proceso se encuentran en la línea de unión de las dos chapas. Para evitar irregularidades en la soldadura en forma de porosidades o discontinuidades se deberá garantizar un contacto lo más regular posible. Para ello la superficie de contacto de las dos chapas deberá

estar libre de cualquier partícula sólida, debiéndose aplicar una presión a los pistones de apriete no inferior a los 3 bar.

Otro agente que influye decisivamente en la calidad de la soldadura, tal como indica el estudio metalográfico, es el aceite concentrado en la línea de soldeo. Por consiguiente se recomienda el uso de chapas desengrasadas o por el contrario, añadir en la máquina de soldar algún dispositivo que evite la presencia de aceite o de otras sustancias que pudieran afectar el proceso de fusión del material.

Tal y como ya se ha indicado anteriormente es necesario destacar como otro punto crítico el decalaje del punto de soldadura, el cual puede sufrir variaciones entre $\pm 0,1$ mm..

Finalmente, el estudio comparativo de los resultados obtenidos en la primera fase, en que la evaluación era puramente visual y los resultados obtenidos en la fase de estudio metalográfico, indican que el 90% de piezas consideradas correctas en la primera fase, resultaron igualmente correctas tras los ensayos efectuados en la fase de ensayos posterior.

6.5 IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE SEGUIMIENTO "ON LINE" PARA EL CONTROL DE LA SOLDADURA.

Tras la comprobación de la influencia de los diferentes parámetros con respecto a la soldadura láser se decidió estudiar la implantación de un sistema de control "on line" de la soldadura, realizándose una comparativa entre dos sistemas diferentes:

- Sistema OPM20 de Prometec
- Sistema LWM 900 de Jurca

6.5.1 IMPLEMENTACIÓN DEL EQUIPO DE MONITORIZACIÓN PROMETEC

El principio básico del funcionamiento del monitor consiste en el análisis de la emisión del plasma obtenida por la acción del láser en la materia.

A través de una fibra óptica situada al lado de la boquilla del cabezal de la máquina de soldar, se conduce dicha emisión hasta el detector (Si-fotodiodo).

A partir de la señal del detector se forman dos señales pasabanda de diferentes frecuencias que posteriormente serán preamplificadas con el fin de que lleguen al equipo de monitorización con la suficiente intensidad. Después de calcular los valores absoluto y medio, se genera un ratio.

Existen dos tipos de filtro, uno UV para el plasma y otro IR para la temperatura. El filtro óptico para la señal UV es un filtro pasa-bajos con una longitud de onda de 450 nm. Por el contrario el filtro utilizado para la señal de IR consiste en un filtro pasa-banda con una longitud de onda media de 950 nm. La señal de los detectores es adaptada al rango de medida por medio de unos amplificadores ajustables. La señal IR es digitalizada directamente y monitorizada para los valores límites. La amplitud de la señal de IR aumenta si no existe penetración en la soldadura. La señal UV es conducida a través de dos filtros pasa-banda con diferentes frecuencias medias formando la amplitud de la señal y digitalizando esta. La relación entre estas señales es monitorizado usando los límites ajustables. El ratio de la señal aumenta o disminuye significativamente si el material no es perfectamente penetrado por la soldadura. El espectro de frecuencia del plasma se altera dependiendo si el keyhole es abierto o cerrado. Debido a que la señal resultante está relacionada al cálculo de un ratio, el monitor no es sensible a cambios de los niveles absolutos de la señal del detector. Los efectos a largo plazo como las fluctuaciones en el suministro de gas, contaminación o otras son compensados.

Desde el punto de vista de la monitorización, la señal resultante es comparada con un límite superior y otro inferior. Si durante el proceso de soldadura estos límites son superados el sistema genera una alarma determinada. El usuario puede adaptar los niveles de los límites, así como los tiempos de respuesta y frecuencia de error a las necesidades de calidad de la soldadura. Es decir, dependiendo del rango, tipo y repetición de defecto admitido en una soldadura, el equipo puede ser configurado. Además, se pueden programar diferentes tipos de alarmas que a la vez pueden estar conectadas a las entradas del PLC de la máquina de soldar con el fin de detener el proceso o simplemente generar algún tipo de señal o aviso.

6.5.2. INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE MONITORIZACIÓN PROMETEC (T330)

El procedimiento de instalación del equipo es el siguiente:

- En primer lugar debe conectarse todo el sistema tal como muestra la figura.

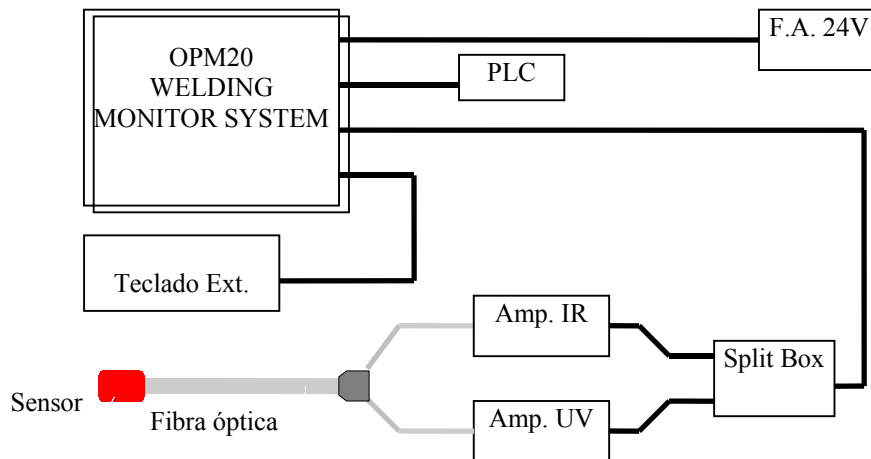


Fig. 6.23: Esquema de instalación del sistema de monitorización Prometec

- Ajustar la ganancia básica de los amplificadores.
- Situar el sensor LWL a una distancia de unos 5-10 cm del punto de soldadura con un ángulo de 45°. A ser posible el sensor debe estar mirando hacia el sentido de la soldadura.
- La amplitud de la señal debe estar entre el 20% y el 100%. Por lo tanto debe adaptarse la amplitud ya sea a través de los switches de ajuste de la ganancia, o simplemente cambiando la distancia entre el sensor y el punto de soldadura.

6.5.3 IMPLEMENTACIÓN DEL EQUIPO DE MONITORIZACIÓN JURCA

El sistema de monitorización de procesos de soldadura LWM 900 de la marca JURCA está básicamente fundamentado en los principios de funcionamiento del equipo PROMETEC, aunque con algunas diferencias substanciales que seguidamente comentamos.

El sistema LWM 900 procesa tres señales total o parcialmente independientes. Para ello utiliza tres detectores. Esto hace que la correlación entre la calidad de la soldadura y su monitorización sea más exacto.

Los detectores utilizados son:

- **Detector de plasma (detector P).** Este detecta la radiación ultravioleta UV emitida por el plasma de la soldadura. El sistema se encarga de analizar la frecuencia y la amplitud de la señal generada por este detector. Además el sistema tiene un control automático de ganancia que actúa durante el proceso de soldadura con el fin de asegurar una evaluación óptima del rastreo de los cambios de la señal del plasma.
- **Detector de chispas (detector S).** Capta la radiación infrarroja IR emitida por las partículas de metal incandescentes despedidas por la soldadura.
- **Sensor de temperatura (detector T).** Este sensor se alinea de manera que esté a pocos milímetros de la soldadura. Cualquier cambio de la capacidad térmica de la pieza influirá decisivamente en la respuesta de la señal de este sensor.

A diferencia del equipo PROMETEC, el LWM 900 posee un sistema de autoaprendizaje para la obtención de la soldadura patrón. Para ello necesita hacer la monitorización de diversas pasadas de soldadura (aprox. en 10 y 15 soldaduras). La media de los resultados de estas soldaduras, será considerada como referencia en las inspecciones sucesivas.

La complejidad de la instalación de este equipo radica en el posicionamiento físico de los detectores.

El siguiente esquema nos indica cuál ha de ser la disposición de los detectores.

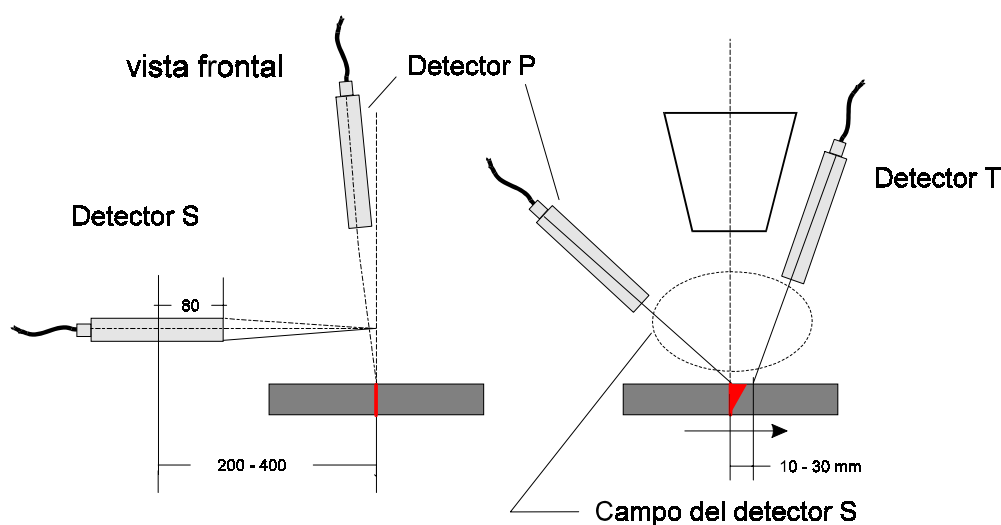


Fig. 6.24: esquema de la disposición de los detectores

Las siguientes fotografías muestran dos vistas de cómo se ha realizado el montaje para la realización de los ensayos

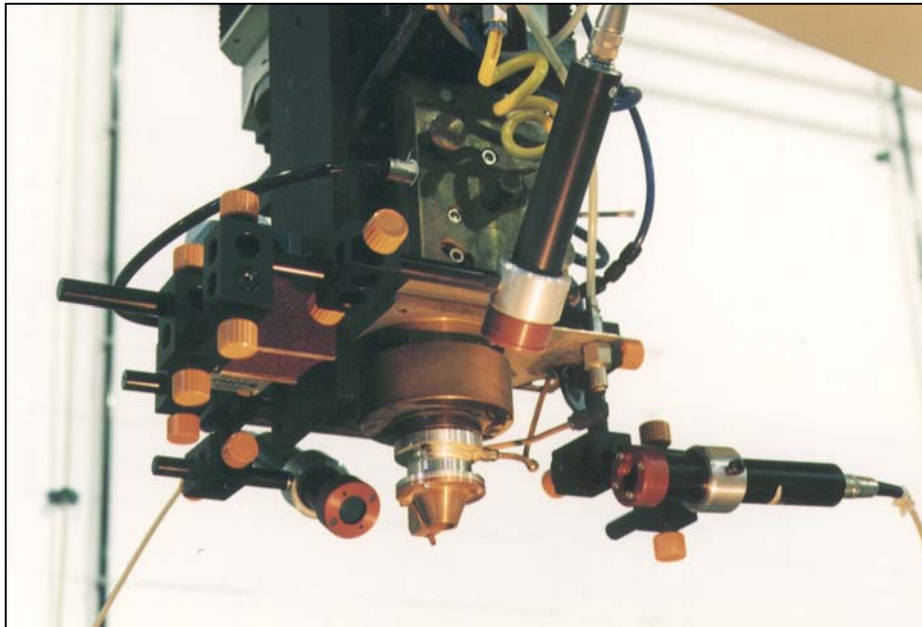


Fig. 6.25: Vista inferior de la disposición de los detectores



Fig. 6.27: Vista frontal de la disposición de los detectores.

Una vez inicializados los equipos y recibido el aprendizaje correspondiente en el manejo de los mismos, se ha procedido a realizar diversas soldaduras provocando los fallos identificados en la primera parte de la presente fase del proyecto y estudiando como los monitores detectan dichos errores en las soldaduras. De este modo podremos relacionar posteriormente y de una manera aproximada cada señal del detector con un fallo determinado como:

- la continuidad de la soldadura,
- la porosidad,
- la geometría del cordón (convexo o cóncavo),

Por lo que hace a los defectos detectables visualmente, o a también a fallos metalúrgicos descritos en el capítulo 3 difícilmente detectables a simple vista.

6.6 CONFRONTACIÓN DE LOS REGISTROS OBTENIDOS CON LA MONITORIZACIÓN:

A tenor de los resultados obtenidos por las diferentes técnicas de inspección utilizadas en el apartado anterior de la presente fase, en el caso que nos ocupa se ha creído oportuno, en una primera instancia, confrontar algunos de los registros obtenidos en los trabajos de monitorización (y previamente seleccionados atendiendo a su tipología característica) con un examen radiológico de aquellas soldaduras a las cuales pertenecían.

Posteriormente y al objeto de poder estimar el alcance de algunas de las indicaciones detectadas, así como su posible relación con la sinuosidad y/o la inestabilidad de los diferentes registros obtenidos, se han llevado a cabo algunas preparaciones metalográficas para su observación pertinente y según se creyera conveniente en cada caso.

Las muestras se han clasificado en dos tipos:

- Muestras tipo A: muestras soldadas de dos chapas electrocincadas de espesores 0.8 y 1.2 mm
- Muestras tipo B: muestras soldadas de dos chapas electrocincadas de espesores 0.8 y 1 mm

6.6.1 EXAMEN RADIOGRÁFICO DE LAS MUESTRAS

En las placas radiográficas, el hilo de menor diámetro que se aprecia en el penetrámetro es el de número 16, lo que indica que el tamaño mínimo de defecto observable sería de 0,1 mm.

Los resultados de la observación de las placas radiográficas, se recogen en las tablas presentadas a continuación.

Los códigos de defecto que se muestran en dichas tablas corresponden a la denominación establecida en la norma UNE EN 26520-92 "Clasificación de las imperfecciones en las soldaduras metálicas por fusión, con explicaciones".

Cabe destacar que, en cada caso, se han descartado las observaciones de indicaciones ubicadas en los primeros y últimos 15 mm del cordón de soldadura.

A efectos de facilitar la descripción, por un lado, y la correlación de los defectos detectados (según sea el tipo de indicación observada) con la forma de los registros de temperatura y del plasma tomados durante la soldadura, por otro lado, se ha considerado que el cordón de soldadura de cada muestra estaría formado por una sucesión de zonas de longitud variable y según fuera el tipo de indicaciones detectadas en cada tramo.

Así, en estas tablas, para cada muestra se describe la longitud y posición relativa al punto de entrada del haz láser (considerándose siempre a este como distancia o punto cero), de cada una de estas zonas mencionadas, junto con los códigos de defecto radiográfico según las recomendaciones de la norma UNE EN 26520-92 para los distintos tipos de indicaciones observadas en ellas.

Defectos	Explicación s/ UNE EN 26520
200	Sopladura
401	Falta de fusión
402	Falta de penetración
503	Exceso de convexidad
510	Perforación
2011	Poros
2014	Sopladuras alineadas

Tabla 6.8: Descripción de la nomenclatura utilizada en las tablas 6.9 y 6.10

Muestra		Zonas de morfología de cordón similar				
II 203 A	Long. Tramo Defectos	150 402+200	230 401+200	Resto 503+510+401+200		
II 204 A	Long. Tramo Defectos	100 200+401	Resto 200+402+401			
II 205 A	Long. Tramo Defectos	150 402+200	Resto 200+402+401			
II 209 A	Long. Tramo Defectos	≈400 200	155 503+510			
II 216 A	Long. Tramo Defectos	65 402+401	135 402+401+200	70 503+402+200	Resto 503+510+402+401+200	
II 217 A	Long. Tramo Defectos	250 401+402+200	70 401+200+402	Resto 401+503+510+200		
II 302 A	Long. Tramo Defectos	350 402+401+200	20 503+510+402	110 401+200	Resto 503+510	
II 306 A	Long. Tramo Defectos	≈450 402+401+200	105 503+510			
II 311 A	Long. Tramo Defectos	320 401+200	30 401+2011	30 402+401+2011	56 503+510	Resto 401
II 312 A	Long. Tramo Defectos	350 2014	Punto 350 503	60 2014	Resto 503+510+2014	
II 315 A	Long. Tramo Defectos	230 402+401+200	115 503+510	70 402+200	55 402+401+200	Resto 503+510

Tabla 6.9: Resultados de la observación radiográfica para muestras del tipo A

Muestra		Zonas de morfología de cordón similar					
II 201 B	Long. Tramo Defectos	63 2014	45 401+503	35 503+510	45 402	Resto 402+401+200	
II 203 B	Long. Tramo Defectos	120 200+503+4 01	70 200+503+4 01	Resto 401+200+4 02			
II 207 B	Long. Tramo Defectos	35 503+510	Resto 402+200				
II 210 B	Long. Tramo Defectos	105 401+200+5 03	35 503+402	180 OK	Resto 2014+503+5 10		
II 211 B	Long. Tramo Defectos	90 401+503	50 510+401	25 2014	135 402	70 200+2014	
II 213 B	Long. Tramo Defectos	105 402+503	175 402+200	90 200+510+5 03			
II 302 B	Long. Tramo Defectos	260 401+503	50 2014+510	Resto 503+510			
II 303 B	Long. Tramo Defectos	210 402	20 401	15 401+510+2 00	35 401+510	Resto 401	
II 304 B	Long. Tramo Defectos	295 OK	75 200+401				
II 307 B	Long. Tramo Defectos	190 401	Resto 200			* Punto 310 510	
II 309 B	Long. Tramo Defectos	55 402	80 402+200	145 402	Resto 200		
II 311 B	Long. Tramo Defectos	125 401	Punto 125 200	85 401	55 401+200	10 503+510	Resto 200

Tabla 6.10: Resultados de la observación radiográfica para muestras del tipo B

6.6.2 EXAMEN METALOGRAFICO DE LAS MUESTRAS

A la vista de las placas radiográficas y comparándolas, estas, con los registros de temperatura y de plasma obtenidos mediante las cámaras utilizadas en los trabajos de monitorización del proceso de soldeo que nos ocupa, se han seleccionado once (11) cordones de soldadura (concretamente los correspondientes a las muestras II 203 A, II 204 A, II 205 A, II 216 A, II 302 A, II 311 A, II 315 A, II 207 B, II 213 B, II 307 B y II 311 B) sobre los cuales, y coincidiendo con zonas donde se observaban determinados tipos de indicaciones, se han preparado para su observación un total de catorce (14) secciones metalográficas de carácter transversal.

Dicha observación, , ha permitido obtener la serie de microfotografías que se presenta a continuación, (tomadas todas ellas a 40 aumentos y sobre las superficies atacadas de las diferentes secciones mencionadas)

En la tabla siguiente se indica la correlación de aquellas zonas concretas de las muestras en cuestión donde han sido tomadas las diferentes secciones (identificadas, además, considerando el tramo de longitud variable en la soldadura que la contiene, según fuera el tipo de indicaciones radiográficas que incluiría y considerando los criterios establecidos anteriormente, así como su distancia respecto a alguno de los dos extremos del cordón) con el tipo de defecto visualizado metalográficamente (del cual también se relaciona aquella microfotografía que así lo pone de manifiesto)

MUESTRA	TRAMO		DISTANCIA A EXTREMO CORDON (mm)	OBSERVACION METALOGRAFICA	FIGURA
	Longitud (mm)	Indicaciones radiográficas			
II 203 A	230	401+200	a 167 desde entrada haz	sin defectos severos	6.28
II 204 A	100	200+401	a 57 desde entrada haz	falta de alineación, falta de penetración y sopladura grande	6.29
II 205 A	Resto	200+402+ 401	a 207 desde entrada haz	poro discreto y ligera falta de fusión lateral	6.29
II 216 A	135	200+402+ 401	a 146 desde entrada haz	poro discreto y falta de alineación	6.30
II 302 A	110	401+200	a 62 desde salida haz	poro, ligera falta de fusión lateral y falta de penetración	6.31
II 311 A	320	401+200	a 246 desde entrada haz	poro y mordedura	6.32
II 315 A	230	200+402+ 401	a 142 desde entrada haz	sin defectos severos	6.33
	55	200+402+ 401	a 61 desde salida haz	falta de penetración y falta de fusión lateral	6.34
II 207 B	Resto	402+200	a 46 desde entrada haz	mordedura	6.35
II 213 B	175	402+200	a 170 desde entrada haz	poro y falta de alineación	6.36
II 307 B	190	401	a 25 desde entrada haz	sin defectos severos	6.37
	Resto	200	a 230 desde entrada haz	sopladura y mordedura	6.38
II 311 B	125	401	a 46 desde entrada haz	falta de fusión lateral	6.39
	Resto	200	a 23 desde salida haz	sopladura y falta de alineación	6.40

Tabla 6.11 Resultados de la observación microscópica

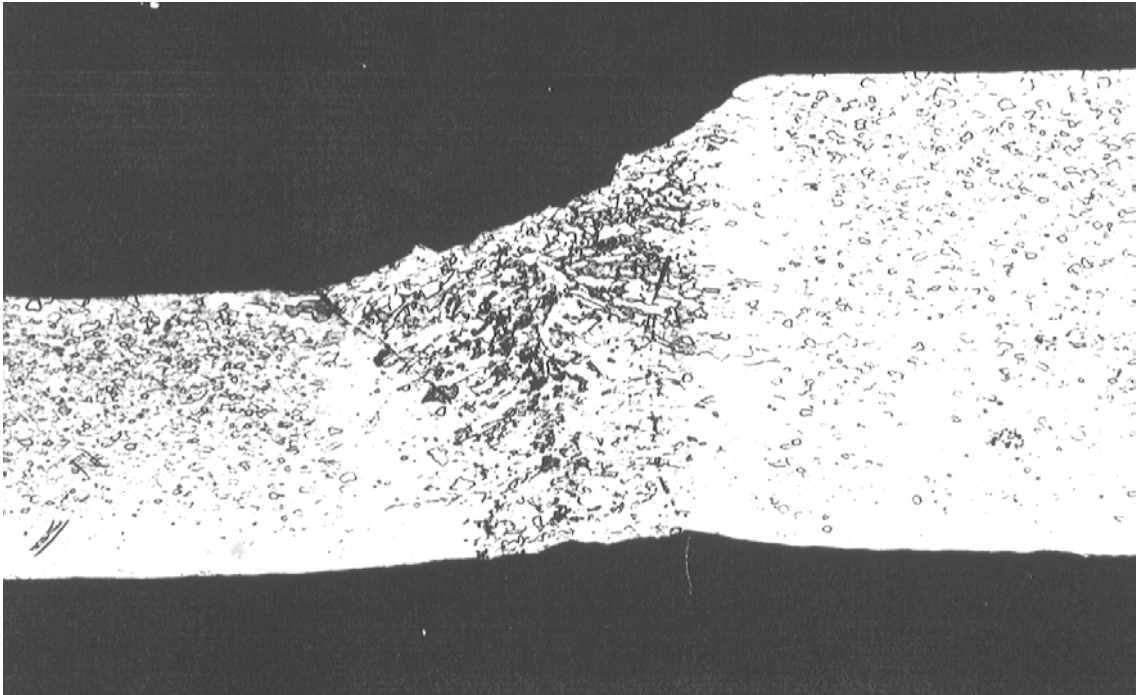


Fig. 6.28: Microfotografía de la muestra II 203 A

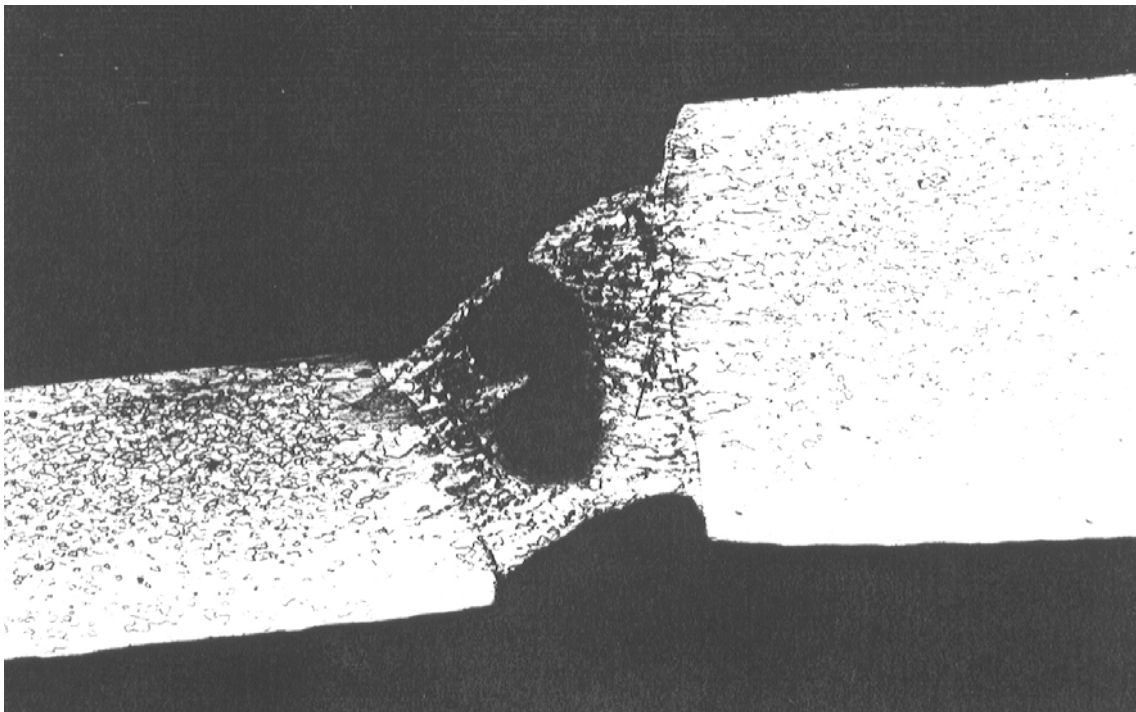


Fig. 6.29: Microfotografía de la muestra II 204 A

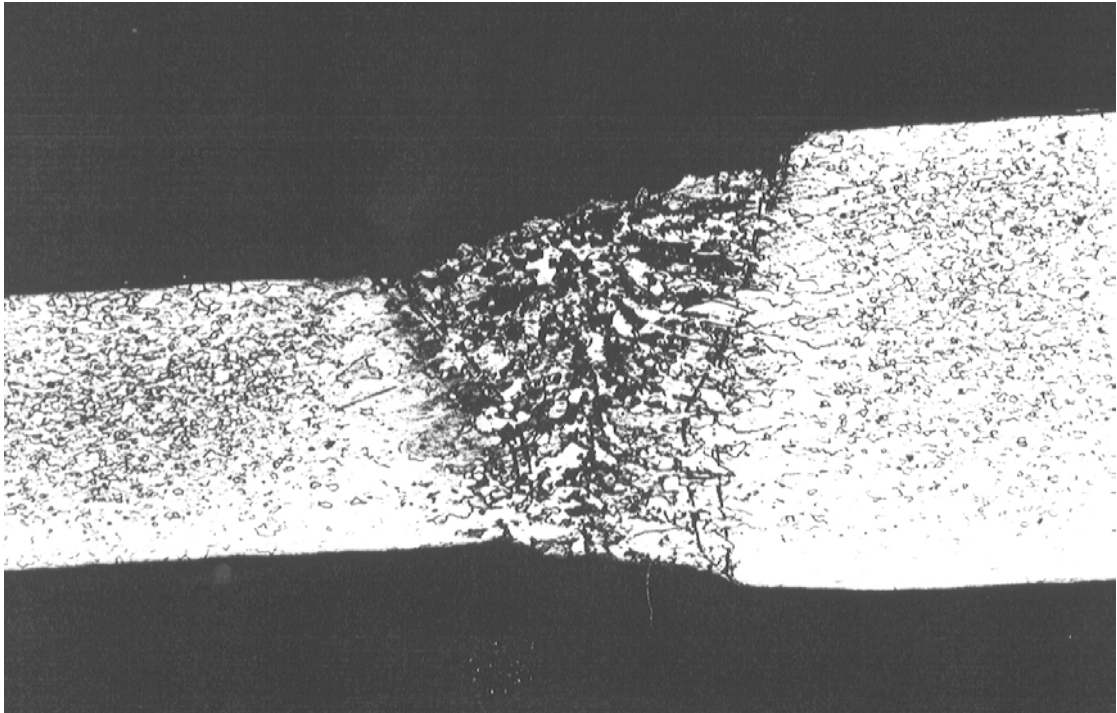


Fig. 6.30: Microfotografía de la muestra II 205 A

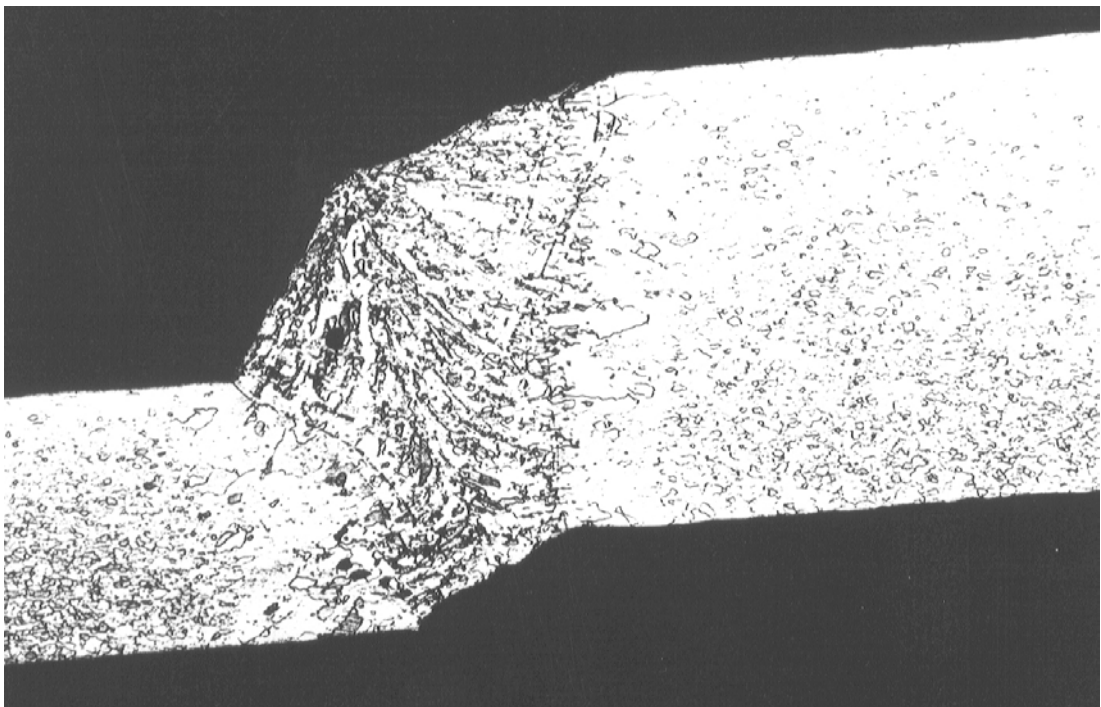


Fig. 6.31: Microfotografía de la muestra II 216 A

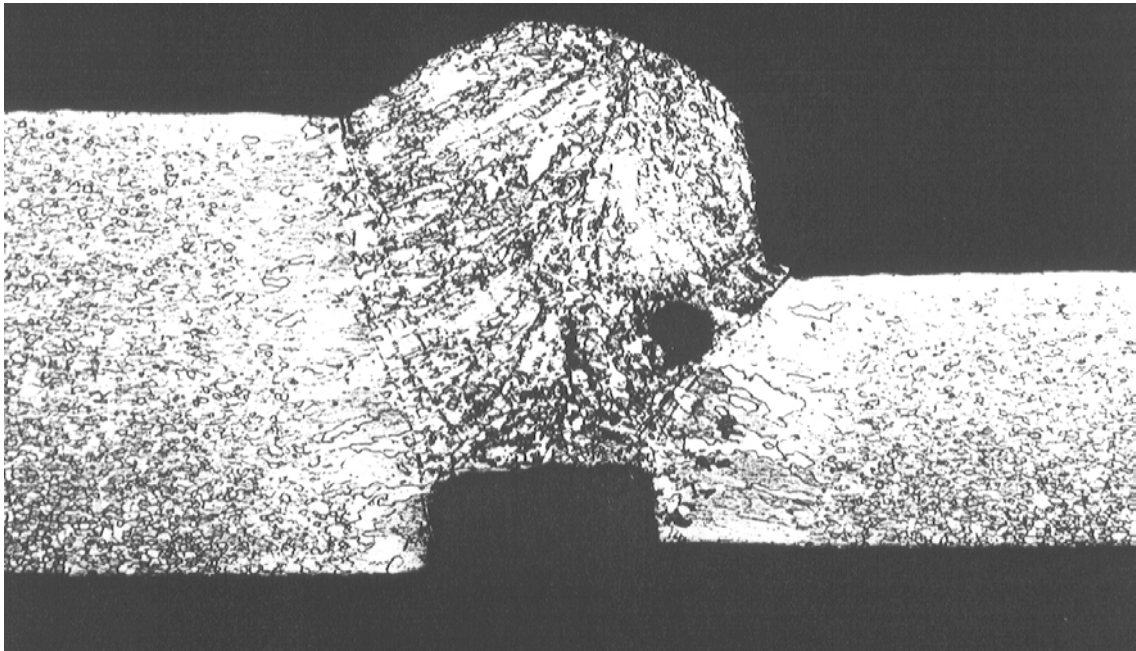


Fig. 6.32: Microfotografía de la muestra II 302 A

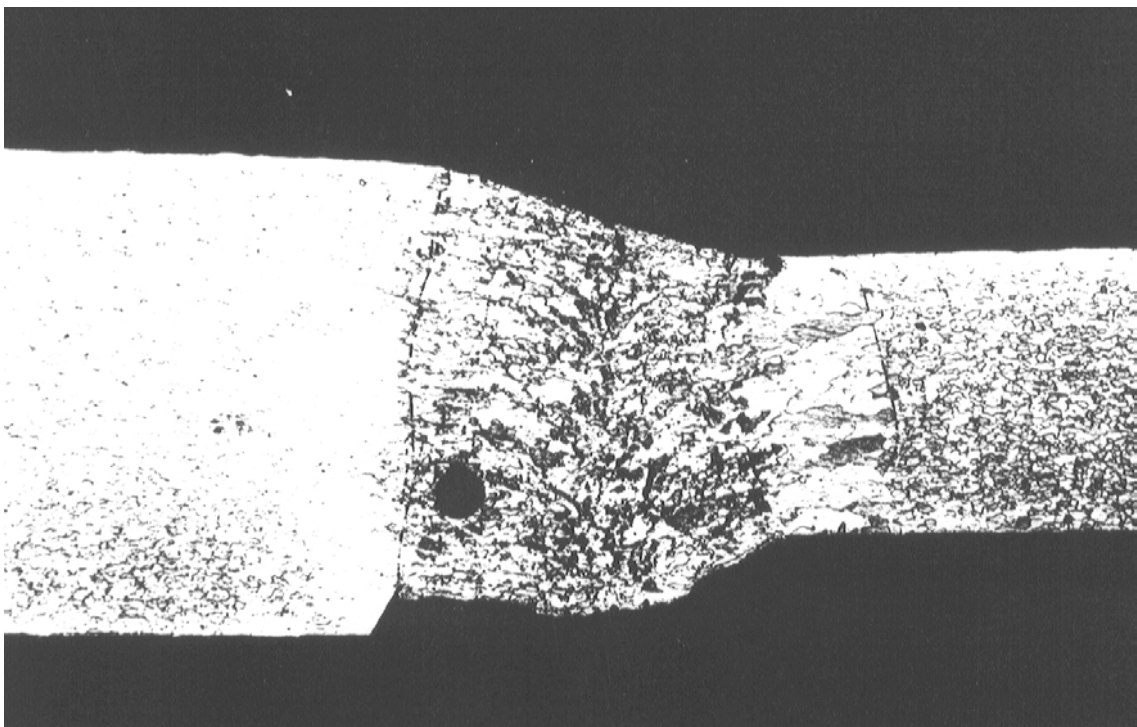


Fig. 6.33: Microfotografía de la muestra II 311 A

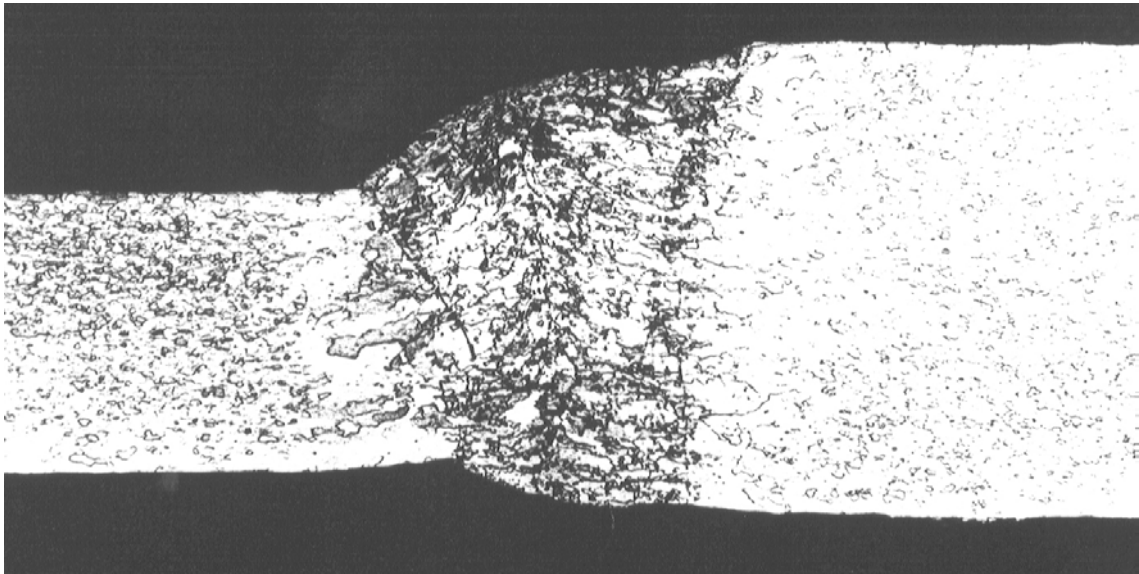


Fig. 6.34: Microfotografía de la muestra II 311 A

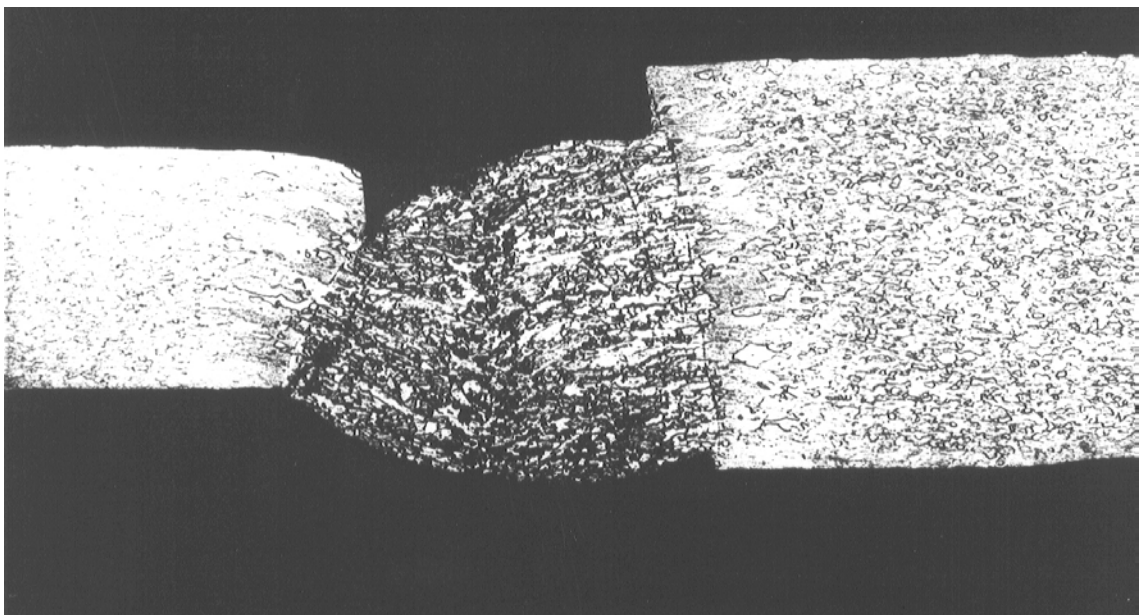


Fig. 6.35: Microfotografía de la muestra II 315 A

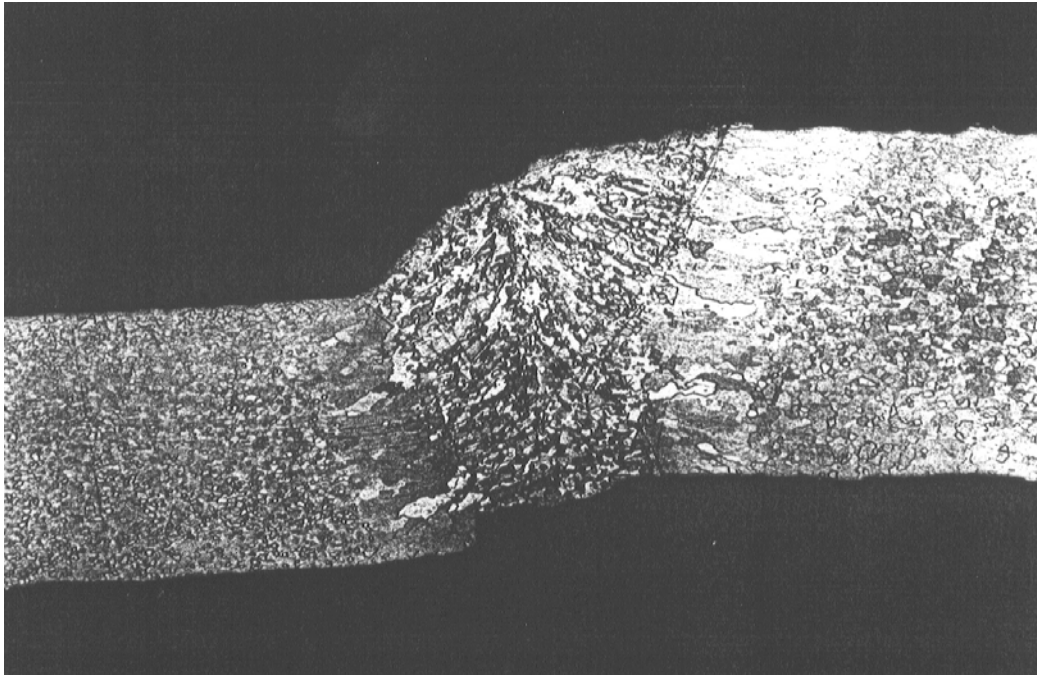


Fig. 6.36: Microfotografía de la muestra II 207 B

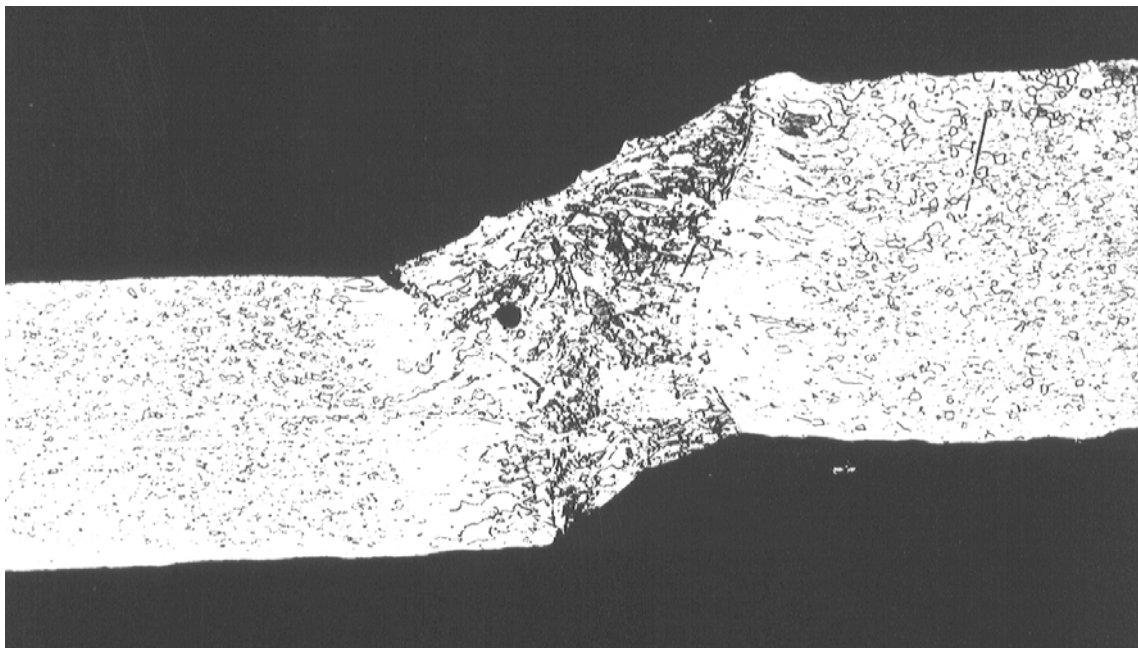


Fig. 6.37: Microfotografía de la muestra II 213 B

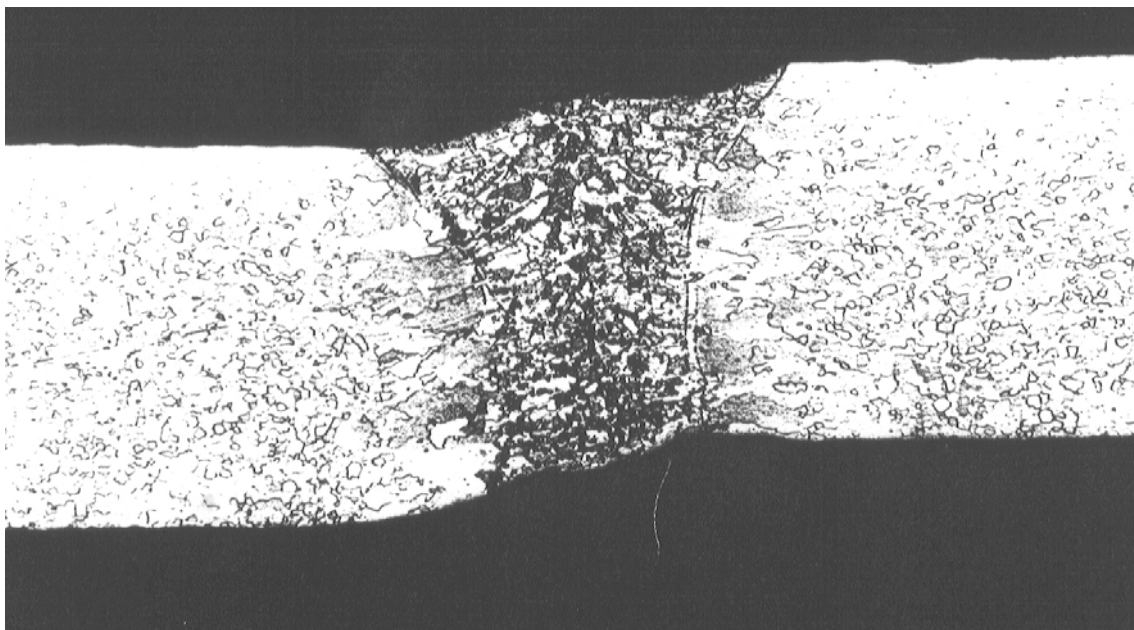


Fig. 6.38: Microfotografía de la muestra II 213 B

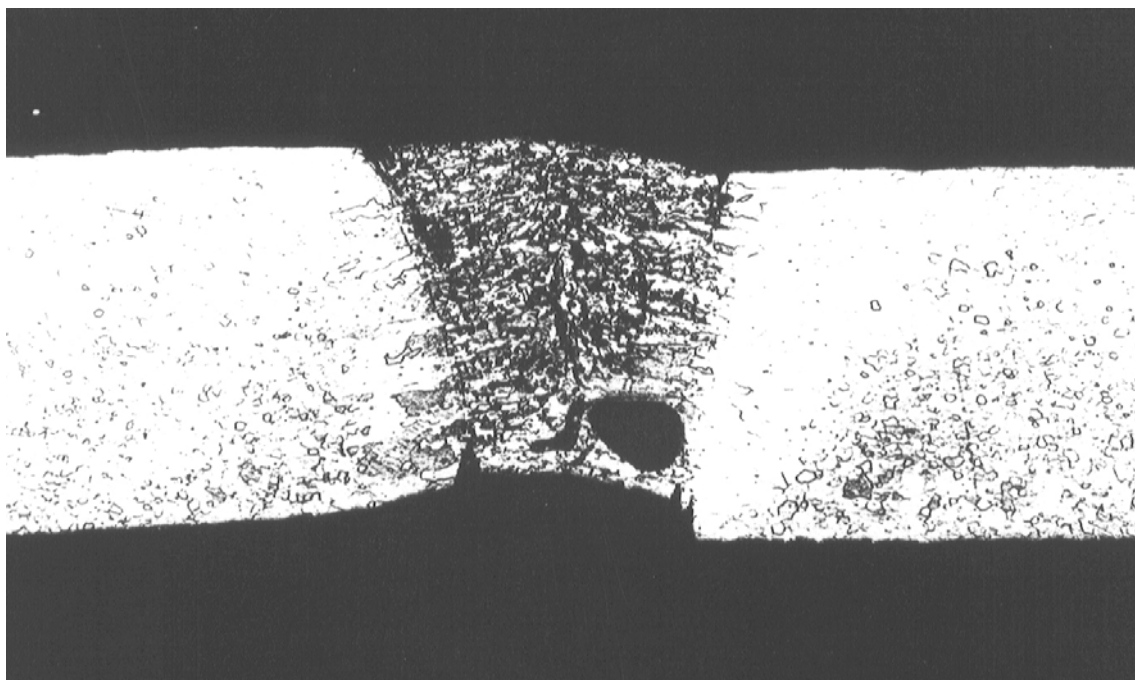


Fig. 6.39: Microfotografía de la muestra II 307 B

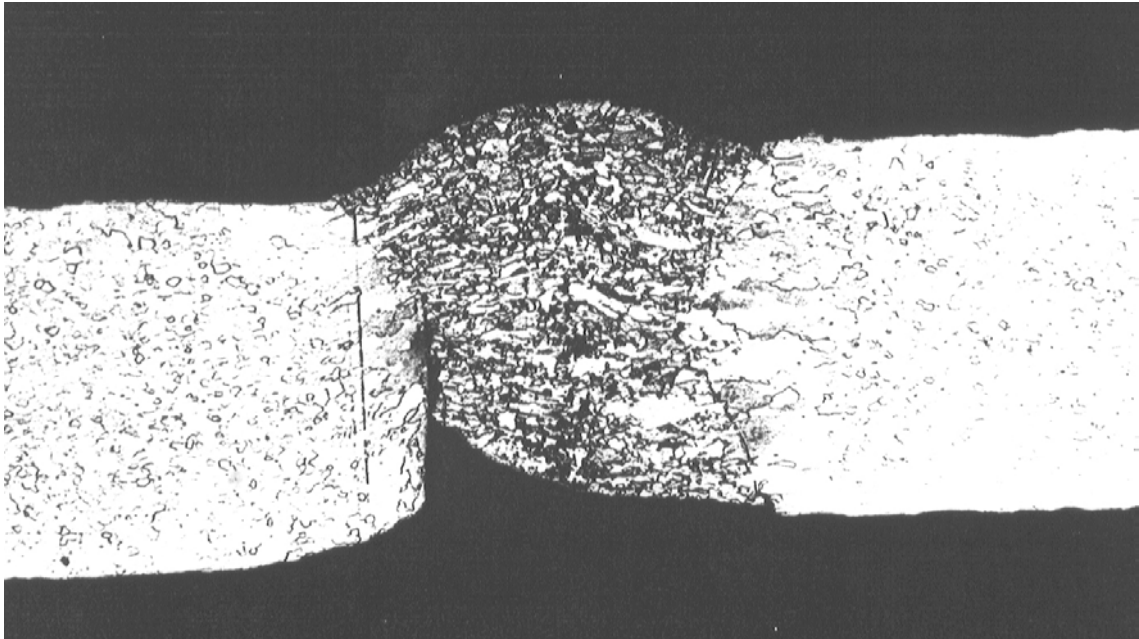


Fig. 6.40: Microfotografía de la muestra II 307 B

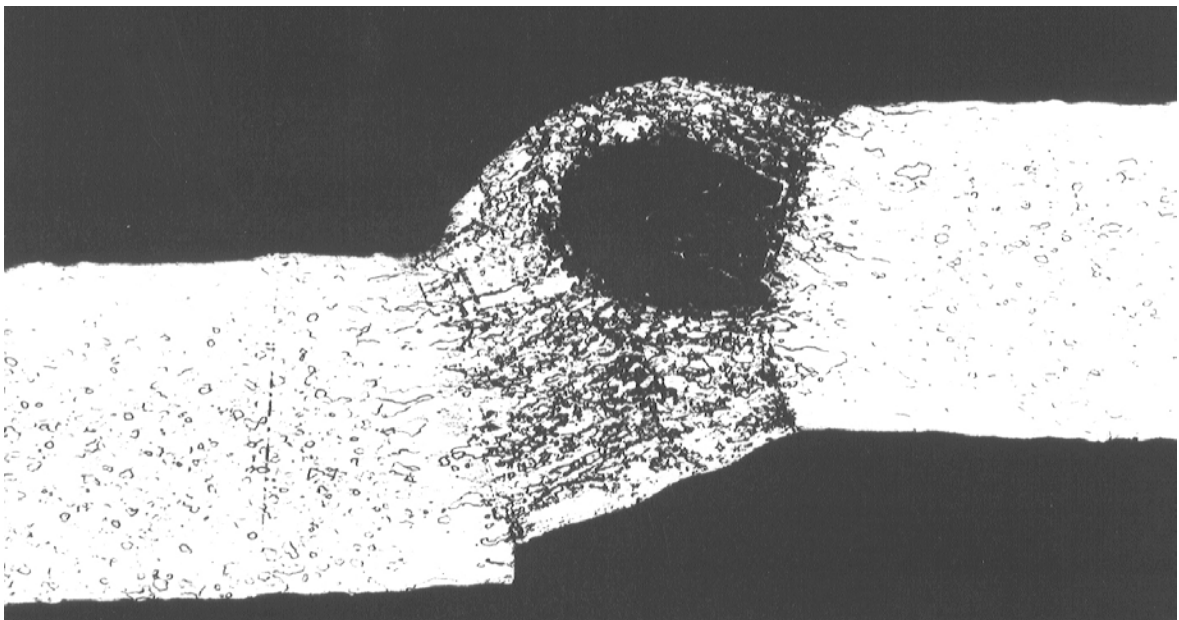


Fig. 6.40: Microfotografía de la muestra II 311 B

6.6.3 RESULTADOS GLOBALES Y COMPARACIÓN ENTRE PROMETEC Y JURCA

Tras el proceso de experimentación con los equipos de monitorización y de analizar el estudio de comparación entre las gráficas y los defectos obtenidos, la conclusión más importante es que estos sistemas, su utilidad principal radica en la detección de defectos importantes y/o continuos, que en la mayoría de los casos son apreciables a simple vista. Los defectos de carácter metalúrgico y de tamaño microscópico o internos son muy difíciles de detectar con estos sistemas.

Gracias a la utilización de un solo sensor y a que este usa fibra óptica para conectarse con el monitor hacen de equipo PROMETEC sea un sistema muy bien adaptable a cualquier máquina. Por el contrario, la aparatosidad de los tres detectores necesarios en el equipo JURCA y la precisión con que deben situarse estos, hacen que el modelo LWM900 de la marca JURCA sea un sistema más difícil de adaptar en el cabezal láser de una máquina.

Por el contrario, el ajuste de la ganancia de los amplificadores es mucho más crítica en el equipo PROMETEC. De hecho, los amplificadores con que se han realizado los ensayos no eran los idóneos ya que el rango de ganancias ajustables era demasiado limitado para la señal emitida por el proceso de soldadura. Es por eso que se aprecia poco contraste en las gráficas de las monitorizaciones. El departamento técnico de PROMETEC aseguró que este problema quedaría subsanado cambiando el modelo de dichos amplificadores.

En el equipo de la marca JURCA el ajuste de la ganancia no requiere tanta precisión. Además dispone de la facilidad del autoaprendizaje comentada en el capítulo 2. El hecho de que este sistema evalúe tres señales (plasma, temperatura y partículas) hace prever que la monitorización resultante sea más precisa.

Se ha observado que PROMETEC tiene una mejor respuesta en la detección y monitorización de la señal de IR, mientras que en el sistema JURCA es la señal del plasma la presenta una mejor respuesta. Esto puede ser debido al ajuste y modelo de los preamplificadores o a la situación de los detectores.

Por lo que respecta al sistema de alarma es muy similar en los dos modelos tanto sus posibilidades de programación como por su conectividad al PLC de la máquina de soldar. (Durante los ensayos realizados no se ha testeado esta prestación).

A nivel de las prestaciones del software, el equipo de JURCA es sin duda más completo ya que es capaz de almacenar, recuperar e inspeccionar además de llevar el control estadístico de varias soldaduras y así realizar las comparaciones oportunas. También es posible ver en detalle (zoom) e imprimir las gráficas. El equipo PROMETEC se limita a monitorizar la señal on-line siendo imposible el conservar en memoria o manipular las gráficas.

RELACIÓN GRÁFICOS DEFECTOS

Indicaciones de carácter “leve” (en cuanto a su frecuencia y alcance en el espesor de metal depositado) relacionadas con discontinuidades internas del tipo porosidad, falta de penetración y/o falta de fusión no dan registros con variaciones bruscas observándose pequeñas oscilaciones en forma de diente de sierra.

Sin embargo, en los casos en que el tipo de indicaciones anteriores se presentan con una frecuencia de distribución y alcance muy importante, así como aquel otro tipo de indicaciones que están relacionadas con defectos de forma severos en el cordón (exceso de convexidad y/o perforaciones entre otros), se observan una inestabilidad clara en los registros y caracterizada por la existencia de saltos bruscos a modo de picos en los mismos.

Estos efectos se hacen más claramente visibles en las gráficas generadas por el equipo PROMETEC, siendo de más difícil observación en el caso de los registros obtenidos mediante la monitorización realizada con el equipo JURCA. Las pendientes registradas en las gráficas pueden estar ocasionado en la mayoría de lo casos, por un mal posicionado de la chapa ya que hace que la distancia entre el sensor o detector y la chapa varíen.

En los análisis de las monitorizaciones se debe descartar el inicio y el final de las gráficas ya que los condicionantes de la propia cinemática de la máquina o la modulación de la potencia pueden alterar el resultado.

7. FASE VI: ACCIONES DE DIFUSIÓN DEL PROYECTO

Los resultados de las distintas fases del proyecto se han divulgado principalmente a través de cursos y jornadas técnicas.

Tal y como se ha visto en la fase II “Estudio de la Aplicación del láser en el mercado español”, la madurez en la aplicación de la tecnología láser difiere mucho dependiendo de la zona geográfica del estado español a la que hagamos referencia.

Esto ha obligado a un esfuerzo adicional, no tanto en cuanto a contenidos, como al nivel de profundidad tratado en cada caso.

Así por ejemplo, en zonas como Cataluña o el País Vasco, la implantación de la tecnología láser, si bien está muy por detrás de otros países europeos, está mucho más desarrollada que en zonas como Andalucía o Aragón.

De esta manera, sobre contenidos standard se ha decidido entrar con más o menos profundidad dependiendo del tipo de público objetivo.

En las líneas siguientes se hace una descripción de los cursos, jornadas, seminarios y congresos en los que se ha participado difundiendo las particularidades de la aplicación del láser en soldadura, tanto en cursos denominados “standard” como en cursos realizados a medida para empresas e instituciones.

Aunque la actividad de difusión es uno de los ejes principales de trabajo de LGAI, se especifican a partir de aquí y por motivos obvios, únicamente aquellas realizadas en los años 2001 y 2002.

7.1 TIPOS DE CURSOS STANDARD

LGAi realiza a lo largo del año varios cursos destinados al mundo empresarial con una estructura básica de contenidos fija. Evidentemente, el hecho de poseer una estructura determinada no implica que no se realice una revisión y actualización de los contenidos a impartir.

Dentro de estos cursos standard y que se repiten año tras año tenemos:

7.1.1 CURSO DE INTRODUCCIÓN A LAS APLICACIONES INDUSTRIALES DEL LÁSER

Este es un curso destinado a ofrecer una visión amplia de los principales procesos industriales láser, con una especial atención a los procesos de corte y soldadura de materiales metálicos. La duración del curso es de 2 días (16 horas)

El objetivo del curso se centra en adquirir los conocimientos necesarios sobre las particularidades de la tecnología láser, posibilitando la optimización de los procesos en aquellas empresas que posean instalaciones láser o que prevean poseerlas a corto o medio plazo. Adicionalmente se posibilita el conocimiento del estado actual de la tecnología con la consiguiente facilitación de la implantación de nuevas aplicaciones.

Dentro de este curso y en cuanto a la difusión de los resultados se ofrece una visión general sobre los parámetros que influyen en la soldadura de chapa zincada, cual es el efecto de cada uno de ellos y como optimizar los procesos

La estructura principal de contenidos es la siguiente:

1. FUNDAMENTOS DEL LÁSER
2. TIPOS DE LÁSER INDUSTRIALES
3. PROCESOS DE CORTE
 - 3.1 Variedades de corte mediante láser
 - 3.2 Utilización de gases auxiliares
 - 3.3 Defectos: tipos y soluciones
 - 3.4 Parametrizaciones
4. LA SOLDADURA LÁSER
 - 4.1 Soldadura por conductividad térmica y por key-hole
 - 4.2 Utilización de gases de aporte
 - 4.3 Geometrías de soldadura
 - 4.4 Tolerancias geométricas
 - 4.5 Defectos: tipos y soluciones
 - 4.6 Ensayos destructivos y no destructivos
 - 4.7 Parametrizaciones

5. MARCAJE
6. OTROS PROCESOS INDUSTRIALES
7. SEGURIDAD EN INSTALACIONES LÁSER
8. ASPECTOS ECONÓMICOS
9. DEMOSTRACIONES PRÁCTICAS

7.1.2 OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS DE CORTE Y SOLDADURA

Este curso complementa al anterior, ya que ofrece una visión práctica de los procesos de corte y soldadura por láser, con una especial atención a los centrados en los materiales metálicos utilizados en el sector de la automoción.

La duración de este curso es de 5 días (40 horas) con 16 horas prácticas y los objetivos son:

- Adquirir un conocimiento práctico avanzado sobre los principios técnicos que intervienen en los procesos de corte y soldadura láser, así como los principales factores que afectan al proceso
- Posibilitar la mejora de la calidad y la productividad en las empresas mediante la identificación de los fallos más comunes y sus soluciones.
- Conocer en profundidad el estado actual de la tecnología y los últimos avances en el corte y soldadura por láser.

La estructura básica del curso es:

1. PRINCIPIOS BÁSICOS DEL PROCESADO DE MATERIALES POR LÁSER
2. CORTE POR LÁSER
 - 2.1 Principios técnicos del corte por láser
 - 2.2 Comportamiento de los materiales
 - 2.3 Uso de gases de aporte
 - 2.4 Defectos y soluciones
 - 2.5 Prácticas de parametrización con diferentes materiales metálicos y no metálicos
 - 2.6 Tecnologías alternativas al corte por láser
 - 2.7 Instalaciones industriales de corte
 - 2.8 Costes de instalación y proceso

3. LA SOLDADURA LÁSER

- 3.1 Principios físicos y técnicos de la soldadura láser
- 3.2 Soldadura por conductividad térmica
- 3.3 Soldadura por key-hole
- 3.4 Configuraciones de soldadura
- 3.5 Uso de gases de protección y aporte
- 3.6 Soldadura de acero y acero inoxidable
- 3.7 Soldadura de aluminio
- 3.8 Soldadura de aceros TRIP
- 3.9 Soldadura de materiales plásticos
- 3.10 Soldadura de Tailored Blanks
- 3.11 Ensayos destructivos
- 3.12 Ensayos no destructivos
- 3.13 Introducción a las instalaciones de soldadura
- 3.14 Diseño de utillajes
- 3.15 Soldadura por Remote Welding
- 3.16 Prácticas de parametrización de soldadura
- 3.17 Tecnologías alternativas a la soldadura láser
- 3.18 Instalaciones industriales de soldadura
- 3.19 Costes de instalación y proceso

4. OTROS PROCESOS INDUSTRIALES

7.2 CURSOS REALIZADOS DURANTE 2001

- Curso de Introducción a las Aplicaciones Industriales del Láser
 - 23 y 24 de mayo
 - 08 y 09 de octubre
- Curso de Optimización de procesos de corte y soldadura por láser
 - Del 05 al 09 de noviembre

- Curso: procesado de materiales y seguridad en instalaciones láser para la empresa Solblank
 - 31 de enero y 1 de febrero
- Curso: Introducción a la tecnología láser para la empresa SEAT (dos cursos)
 - 11 y 12 de junio
 - 14 y 15 de mayo
- Curso: *Aspectos básicos sobre soldadura láser* para la empresa Tailor Metal. 17 de noviembre

7.3 CURSOS , JORNADAS Y CONGRESOS REALIZADOS DURANTE 2002

- Curso de Introducción a las Aplicaciones Industriales del Láser (3 cursos)
 - 21 y 22 de febrero de 2002
 - 15 y 16 de mayo de 2002
 - 12 y 13 de noviembre de 2002
- Participación en el Transnacional de Soldadura organizado por el Instituto Politécnico de Formación Profesional Mare de Déu de la Mercè de Barcelona. (40 horas), 4 de marzo al 10 de abril de 2002.

Curso destinado a la inserción laboral de soldadores. La participación en el curso proporciona un valor añadido a los conocimientos teóricos y prácticos que debe tener cualquier soldador, en una técnica con un gran auge como es la soldadura por láser

- Congreso Internacional LGAI: El láser y su uso estratégico en la industria, 25 i 26 de junio 2002.

El congreso se centró en la presentación de los últimos avances técnicos (nuevos procesos y materiales) y comerciales (nuevos equipamientos y nuevas prestaciones), en los sectores de la automoción y la aeronáutica. Se dirigió a los cuadros directivos de las principales empresas europeas de estos sectores, contando finalmente con 80 asistentes. El congreso contó con la presencia de ponentes de gran prestigio a nivel mundial, como David Belforte

(USA), editor de la revista Industrial Láser Solutions, así como representantes del Ministerio de Ciencia y Tecnología y del gobierno Catalán (entre ellos Artur Mas, Vicepresidente de la Generalitat de Catalunya)

- Curso de Introducción a la soldadura láser para la Dirección General de Formación Profesional de la Generalitat de Cataluña.
 - Del 3 al 5 de julio de 2002
- Curso: Optimización de procesos de corte y soldadura por láser
 - Del 30 de septiembre al 4 de octubre de 2002.
- Participación I Symposium sobre ingeniería de la soldadura, dentro del Forum Maquitech 2002 y organizado por: Metalunivers.
 - 13 de septiembre de 2002
- Curso: Fundamentos básicos y seguridad en instalaciones láser para Mercedes Benz España
 - 6 y 7 de noviembre de 2002
- Curso práctico de soldadura incluido dentro del título de Ingeniero Europeo en Soldadura organizado por CESOL
 - 25 de noviembre