

## ÍNDICE

○ Introducción .....	2
○ Materiales estudiados .....	4
○ Procedimientos de soldadura .....	6
○ Estudio de defectos .....	19
○ Valoración de defectos no planares .....	53
✧ Poro aislado .....	55
✧ Porosidad uniformemente distribuída .....	55
○ Valoración mecánica de defectos .....	61
✧ Evaluación de defectos según nivel 1: Evaluación simplificada .....	66
✧ Evaluación de defectos según nivel 2 .....	74
✧ Evaluación de defectos según nivel 3 .....	79
○ Evaluación de defectos solicitados a fatiga .....	81
✧ Evaluación de defectos planares (Análisis mediante mecánica de la fractura) .....	82
✧ Evaluación de defectos no planares (Análisis mediante curvas S-N experimentales) .....	88
○ Aplicación práctica en el tratamiento a emplear para la evaluación de determinados defectos .....	91
○ Conclusiones .....	139
○ Bibliografía básica .....	141
○ Anexo .....	143

**EVALUACIÓN DE DEFECTOS PRODUCIDOS AL SOLDAR  
ALEACIONES DE ALUMINIO PARA TRENES DE ALTA VELOCIDAD**

---

**INTRODUCCIÓN**

---

**FUNDACIÓN DOMINGO MARTÍNEZ:**  
*Ayudas a la Investigación Científica y Técnica. 2002-2003*

El objeto de este trabajo de investigación es la evaluación de defectos producidos en la fase de fabricación y servicio de estructuras portantes en trenes de alta velocidad, construidos en aleaciones de aluminio.

Los defectos aquí considerados se producen en las uniones soldadas, por lo que se concede a su estudio una gran importancia. En este sentido la inspección de uniones realizadas mediante radiografía complementada con estudios metalográficos constituye la parte fundamental de la primera parte del trabajo. En ella se determinan los defectos más frecuentemente encontrados en diferentes tipos de uniones soldadas, estudiándose su morfología y consideraciones sobre la causa de su producción. Estos defectos son valorados en base a la Norma EN 30042 (mayo 1994) “Uniones soldadas por arco de aluminio y sus aleaciones soldables. Guía sobre los niveles de calidad en función de las imperfecciones. (ISO 10042)”.

En la segunda parte de este trabajo se analizan los criterios de evaluación de defectos basados en la consideración de la adecuación al servicio, utilizando los conceptos de la mecánica de la fractura. Para ello, se ha tomado como base de evaluación los criterios establecidos en la Norma BS 7910:1999 “Guía de métodos para evaluar la aceptación de defectos en estructuras metálicas”, considerada actualmente como la de más moderna aplicación, al incluir criterios establecidos anteriormente en el PD6493 e incluir los criterios dúctil-frágil del Código R6 “Assessment of the Integrity of Structures containing Defects”.

Complementariamente se ha tenido en cuenta la publicación del Instituto Internacional de la Soldadura “IIW Guidance on Assessment of The Fitness for Purpose of Welded Structures (SST-1157-1990)” y los documentos elaborados por sus comisiones XV –Diseño de Construcciones Soldadas – y XIII –Fatiga-.

Finalmente en correlación con lo expuesto en las partes primera y segunda del estudio, se obtienen conclusiones prácticas sobre la evaluación de defectos reales, presentes en componentes soldados solicitados estáticamente y a fatiga.

En Anexo se incluyen datos que constituyen la base del cálculo utilizado y que pueden ser aplicados a diferentes morfologías de defectos, lo que permitiría extrapolar resultados a diferentes tipos de defectos y morfologías, pudiendo elaborarse criterios particulares de evaluación utilizables en ingeniería.

**EVALUACIÓN DE DEFECTOS PRODUCIDOS AL SOLDAR  
ALEACIONES DE ALUMINIO PARA TRENES DE ALTA VELOCIDAD**

---

**MATERIALES ESTUDIADOS**

---

**FUNDACIÓN DOMINGO MARTÍNEZ:**  
*Ayudas a la Investigación Científica y Técnica. 2002-2003*

La construcción de vehículos empleando aleaciones de aluminio es conocida desde hace años, en especial en aplicaciones militares y aeronáuticas. Las aplicaciones en el campo de las carrocerías de automóviles y en ferrocarriles de alta velocidad son más recientes y precisamente en la evaluación de defectos originados por los procesos de soldadura en la fabricación de carrocerías para trenes de alta velocidad se ha centrado esta investigación.

En la fabricación actual de estas estructuras rodantes, dos aleaciones de aluminio son utilizadas principalmente y se corresponden a las designaciones AA6005 y AA5083. La 6005 es una baja aleación Si-Mg con composición media 0.8% Si (0.6-0.9) y 0.5% Mg (0.4-0.6) con contenidos máximos de Fe de 0.35%, Cu : 0.10% y Mn: 0.10% y es utilizada por su facilidad de extrusión, lo que posibilita su utilización en diferentes formas de perfiles, tanto huecos como delgados. Su resistencia varía con el tratamiento térmico, siendo, por tanto, una aleación bonificable, donde su resistencia mecánica está muy influenciada por dicho tratamiento. El mecanismo de solución seguido de temple en agua para crear una solución sólida supersaturada, conocida como envejecimiento artificial, terminando el proceso con un tratamiento de precipitación, permite que los elementos de aleación con apreciable solubilidad a elevada temperatura formen solución sólida con el aluminio, pero con su limitada solubilidad a baja temperatura, constituye la base del proceso de bonificado de estas aleaciones.

A modo de ejemplo comparando los tratamientos T1, T5 y T6 puede obtenerse:

<b>Tratamiento Térmico</b>	<b>Límite Elástico (MPa)</b>	<b>Resistencia Tracción (MPa)</b>	<b>Alargamiento Rotura (%)</b>
T1	103	172	16
T5	262	288	8-10
T6	271	296	8-9

La aleación de aluminio 5083 se corresponde con una composición química media de: 4.4% Mg – 0.7% Mn (0.4-1.00)- 0.15% Cr (0.05-0.25) y contenidos máximos de otros elementos: 0.40% Si, 0.40% Fe, 0.10% Cu, 0.25% Zn, 0.15% Ti. Es, por tanto, una aleación no bonificable, empleada generalmente en estado de recocido (0), aunque puede incrementar su resistencia mediante deformación en frío (estado H), producida por reducción del espesor original de las chapas. Para esta aleación el estado H 34, es indicativo de un endurecimiento por deformación y estabilización por calentamiento a baja temperatura para incrementar la ductilidad, manteniendo una resistencia intermedia entre el estado de cuasirecocido (estado H30) y el duro (estado H38). Valores obtenidos en ensayos de tracción nos muestran los valores siguientes:

<b>Tratamiento Térmico</b>	<b>Límite Elástico (MPa)</b>	<b>Resistencia Tracción (MPa)</b>	<b>Alargamiento (%)</b>
0	145	290	22
H 34	283	345	9

**EVALUACIÓN DE DEFECTOS PRODUCIDOS AL SOLDAR  
ALEACIONES DE ALUMINIO PARA TRENES DE ALTA VELOCIDAD**

---

**PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA**

---

**FUNDACIÓN DOMINGO MARTÍNEZ:**  
*Ayudas a la Investigación Científica y Técnica. 2002-2003*

Con respecto a los procedimientos de soldadura empleados en producción, el más utilizado es el MIG (soldadura por arco con hilo fusible operada en forma semiautomática o automática bajo gas protector), siendo argón el gas de protección más empleado, aunque para incremento de la velocidad de soldeo y para espesores a soldar a partir de 12 mm se emplee, en determinadas uniones, mezcla de gas 75% helio y 25% argón. Para espesores inferiores a 3 mm de espesor, el procedimiento TIG (electrodo de tungsteno bajo gas inerte de argón) ha sido utilizado.

Como materiales de aportación para la aleación 5083 se emplea alambre sólido de designación ER 5356 (aportación Al-Mg) y para la aleación 6005 se utilizó alambre sólido de designación ER 4043 (aportación Al-Si); en uniones entre aleaciones 5083 y 6005 el material de aportación fue elegido con designación ER 5356. La elección de estos materiales de aportación supone un compromiso entre resistencia mecánica y ductilidad, así como disminución del riesgo de fisuración en la unión soldada.

El material de aportación ER 5356 presenta una composición química entre 4.5-5.5% Mg y el ER 4043 se caracteriza por un contenido entre 4.5-6% Si.

Con respecto a la soldadura de las aleaciones de aluminio y considerando que el objeto fundamental de esta investigación, se basa en la evaluación de defectos, deben ser tenidas en cuenta las cinco consideraciones generales siguientes:

- ✧ Las aleaciones de aluminio pueden presentar oxidación dada su fuerte afinidad por el  $O_2$ , lo que hace presente la presencia de óxidos (alúmina) con temperatura de fusión de  $2050^{\circ}C$  muy superior a la propia del aluminio, aproximadamente  $600^{\circ}C$ . Este hecho hace necesario una eliminación previa a la soldadura de la capa de óxido existente en el metal base o aprovechar el efecto de decapado del propio arco al utilizar corriente continua con polaridad inversa en el proceso MIG o corriente alterna en TIG para no calentar excesivamente el electrodo no consumible refractario. En ambos procesos el gas inerte protector impide la oxidación del baño fundido sin necesidad de aplicación de flux desoxidante.
- ✧ El hecho que el  $H_2$  se disuelva rápidamente en el aluminio fundido y ser menos soluble en el aluminio sólido, constituye la principal causa de los defectos de porosidad encontrados en las soldaduras de aleaciones de aluminio. Este gas atrapado al solidificar el baño de fusión produce coalescencia y da lugar a pequeñas burbujas interiores, que en caso de estar sometidas a fuertes presiones pueden dar lugar a microgrietas internas. Por otra parte las aleaciones Al-Mg son más sensibles a la formación de óxidos hidratados ocasionando oxidaciones puntuales en las soldaduras.

- ✧ Con respecto a las características térmicas que pueden afectar a los procesos de soldadura, debe considerarse que su conductibilidad eléctrica es aproximadamente 60% IACS y entre 30-50% IACS para las aleaciones Al-Mg (comparación con la conductividad del cobre puro) y que la conductividad térmica del aluminio es aproximadamente 6 veces la del acero, con un alto calor específico (150-200 W/m<sup>o</sup>K), lo que supone una rápida eliminación de calor y necesidad, por tanto, de mayor energía aportada en la soldadura y mayor posibilidad de que puedan quedar los bordes de la unión sin fundir.  
Considerando que la expansión térmica del aluminio es prácticamente el doble que la del acero y que las soldaduras contraen aproximadamente un 6% en volumen durante la solidificación del baño de fusión, el riesgo de aparición de fisuras de contracción es elevado, lo que obliga a un ajuste de los parámetros operatorios en las zonas terminales de las uniones para evitar su formación.
- ✧ Los efectos de la corrosión en las aleaciones no bonificables no se ven alterados significativamente por el calor aportado durante la soldadura, contribuyendo a este hecho que el material de aportación presenta una composición química muy similar a la aleación base.  
En las aleaciones bonificables, la presencia de Cu hace que la zona afectada térmicamente por el proceso de soldadura sea catódica, originando que el cordón de soldadura al ser anódico pueda constituir la zona preferencialmente sacrificada por el proceso de corrosión, es decir, la soldadura protege el material base y, por tanto, se produce ataque preferencial en el metal aportado. Efecto contrario se encuentra en las aleaciones con Zn donde la zona afectada por el calor se convierte en anódica en presencia de agua o electrolitos. A este respecto debe señalarse que tanto las aleaciones Al-Mg como las Al-Mg-Si utilizadas en este estudio presentan una alta resistencia a la corrosión.
- ✧ La solidificación de las aleaciones de aluminio se produce en un importante intervalo de temperaturas, a causa de ello, al iniciarse la solidificación los primeros granos sólidos formados en los bordes de fusión tienden a contraer, lo que produce tensiones de tracción en el material líquido adyacente, con el riesgo de aparición de fisuras longitudinales en la línea central de los cordones de soldadura. Este hecho constituye la necesidad de que los materiales de aportación se elijan con el menor intervalo de temperatura de fusión posible, siendo las óptimas las composiciones eutécticas, como ocurre en aportaciones Al-Si, utilizadas preferencialmente en aleaciones de aluminio con elevado riesgo de fisuración en el centro del cordón.

En nuestro estudio diferentes procesos de soldadura han sido utilizados en la fabricación de carrocerías para trenes de alta velocidad. Algunos de los más representativos se recopilan en la tabla siguiente:

<b>Designación</b>	<b>Aleación</b>	<b>Espesor (mm)</b>	<b>Procedimiento de soldadura</b>	<b>Geometría</b>
PT-10	6005	3	MIG automatizado-Ar-ER4043	BW-PA-mb
PT-11	6005	6	MIG automatizado-Ar-ER4043	BW-PA-mb
PT-12	6005	12	MIG automatizado-Ar-ER4043	BW-PA-mb
PT-21	6005	3	MIG-Ar-ER4043	BW-PF-mb
PT-22	5083	3	MIG-Ar-ER5356	BW-PF-mb
PT-23	5083-6005	3	MIG-Ar-ER5356	BW-PF-mb
PT24A	6005	6	MIG-Ar-ER4043	BW-PA-mb-1 cordón
PT24B	6005	6	MIG-Ar-ER4043	BW-PA-mb-2 cordones
PT25	5083-6005	6	MIG-Ar-ER5356	BW-PA-mb
PT26	5083	6	MIG-Ar-ER5356	FW-PF-1 cordón
PT-27	6005	6	MIG-Ar-ER4043	FW-PF-1 cordón soldadura
PT-30	6005	3	MIG-Ar-ER4043	BW-PF-mb
PT-31	5083-6005	10	MIG-Ar-ER5356	BW-PA-mb-2 cordones
PT-32	6005	10	MIG-Ar-ER4043	BW-PA-mb-2 cordones
PT-33	6005	12	MIG-He+Ar-ER4043	BW-PA-mb-3 cordones
PT-40	6005	2	TIG-Ar-ER4043	BW-PF-nb

Estos procedimientos han sido controlados bajo las directrices establecidas en las Normas Europeas EN 288-4 (1992 y 1993) Parte 4 “Cualificación del procedimiento de soldeo por arco del aluminio y sus aleaciones” y para el control de los soldadores la EN 287-2 (1992) “Cualificación de soldadores para aluminio y aleaciones de aluminio”

En estas normas la aleación Al-Mg-Si 6005 se encuadra internacionalmente (ISO 15608) dentro del grupo 23 y la aleación Al-Mg 5083 en el grupo 22b.

En la tabla de procedimientos expuesta y en el encabezado Procedimiento de Soldadura se incluye el proceso utilizado, el gas protector empleado, y la designación del material de aportación utilizado. En la misma tabla y bajo el encabezado “Geometría” se designa la junta a soldar como BW indicativa de soldadura a tope y FW representativa de la soldadura en ángulo; la designación PA indica que la soldadura ha sido realizada en posición plana horizontal y con la designación PF se representa la soldadura realizada en vertical ascendente. En los casos donde se ha colocado respaldo de cobre en la raíz de la unión para controlar el baño de fusión se representa con la designación mb, indicándose con nb la soldadura a penetración directa sin soporte, muy utilizada en el proceso TIG.

El estudio de los procedimientos de soldadura expuestos permite su agrupamiento en la forma siguiente:

- ★ Los procedimientos designados como PT10, PT11 y PT12 son utilizados para soldar aleación Al-Mg-Si 6005 con MIG automatizado y aporte ER4043 de Al-Si en espesores de 3,6 y 12 mm respectivamente. La posición de soldadura es a tope y la unión es entre chapas en posición horizontal.  
En la fabricación de la carrocería del tren, estos procedimientos permiten soldar la unión entre chapas para formar la envolvente de la carrocería, localizándose los mayores espesores de chapa en la parte inferior de la estructura, lógicamente zona de aplicación de cargas de servicio.
- ★ Donde el sistema de soldadura automatizado no es de aplicación y en caso de reparaciones en soldaduras realizadas por el procedimiento anterior, se utiliza el proceso MIG semiautomático, respaldado por los procedimientos designados como PT24A y PT24B y para soldar en posición plana horizontal en 6 mm de espesor y PT 32 para 10 mm de espesor de chapa.
- ★ El procedimiento designado como PT30 es representativo de las uniones a tope en posición vertical ascendente para soldar los rigidizadores de la envolvente de carrocería de 3 mm de espesor.
- ★ El procedimiento PT-27 permite la realización de soldaduras en ángulo en vertical ascendente en la gama de 6 mm de espesor de chapa.
- ★ El procedimiento designado como PT-22 es empleado en las uniones a tope realizada en posición vertical ascendente de aleación Al-Mg-Si 5083 con espesores de chapa de 3 mm y el PT-26 permite realizar las uniones en ángulo en chapa de 6 mm.
- ★ Los procedimientos PT-25 y PT-31 permiten la soldadura a tope disimilar en posición horizontal entre aleaciones 5083 y 6005 en espesores de chapa de 6 y 10

mm respectivamente y el procedimiento PT-23 permite realizar la unión en posición vertical ascendente para chapas en la gama de 3 mm de espesor.

- ★ Con el procedimiento PT33 se designan las soldaduras realizadas en aleación 6005, de chapa a tope y en posición plana horizontal empleando gas de protección 75% He y 25% Ar.
- ★ El procedimiento PT40 está realizado con el proceso TIG para uniones de chapa a tope de 2 mm de espesor de aleación 6005 en posición vertical ascendente sin respaldo en raíz.

Los materiales de aportación estudiados son del tipo ER 4043 y ER5356, según designación AWS.

➤ Aportación ER4043:

Esta aleación contiene aproximadamente 5% Si, comparada con otras aportaciones puede proporcionar mayor o menor resistencia en la unión por dilución a partir del metal base. Si no existe magnesio, el resultado de la combinación entre aportación y metal base en la soldadura, tiende en el metal de soldadura a conseguir menor resistencia debido a que la dilución produce una pérdida en el contenido de silicio. Si existe magnesio en el metal base, los siluros de magnesio disueltos,  $Mg_2Si$ , incrementan la resistencia, pero se pierde ductilidad en la unión. A causa de esta pérdida de ductilidad este tipo de aportación no es recomendada para soldar aleaciones de aluminio con contenido en magnesio superior al 3%. Esta aleación es tradicionalmente empleado para la soldadura de aleaciones base Al-Mg-Si.

➤ Aportación ER5356:

Las propiedades de las uniones soldadas realizadas con aportación tipo Al-Mg-Mn dependen ampliamente de los contenidos en estos elementos y por tanto, son muy influenciadas por el grado de dilución con el metal base. Puede establecerse un límite elástico aproximado de 15 MPa, una resistencia a la tracción de 28MPa y un alargamiento en rotura de 16.5% como valores representativos de una soldadura con este material de aporte.

La aportación 5356 es utilizada en numerosas combinaciones con diferentes aleaciones base magnesio, pero presenta la desventaja de poder tener pérdida de resistencia en su empleo con aleaciones base tipo 5083, utilizada en este estudio. No obstante y teniendo en cuenta que se prefería incrementar en diseño la ductilidad de la unión a cambio de agotar la máxima resistencia de la aleación base, se considera muy aceptable su utilización para la soldadura de las aleaciones Al-Mg.

Con respecto a los aspectos metalúrgicos inherentes a la soldadura debe considerarse que en la solidificación del baño fundido, los granos solidificados progresan en forma dendrítica desde los bordes de fusión hacia el centro de la unión, lo que produce una apariencia columnar al seccionar el cordón de soldadura de una unión soldada. La distribución de las fases que se forman en el metal de soldadura está influenciada en gran parte, por la velocidad de enfriamiento del aluminio. Aleaciones que contienen elementos de baja solubilidad en el aluminio sólido, precipitan en forma fina dentro de la matriz, por ejemplo, las aportaciones con silicio que es prácticamente insoluble en el

aluminio, solidifica formando dentro de la matriz de aluminio en forma de pequeñas áreas de Al-Si.

Por el contrario materiales de aportación conteniendo elementos aleantes que presentan alta solubilidad en fase sólida y rápidas velocidades de fusión, tienden a producir microestructuras nucleadas, como se presentan con aleantes de Mg o Cu. Las fases en el cordón de soldadura de las aportaciones de magnesio se encuentran finamente dispersas, lo que hace difícil su interpretación por medios microscópicos convencionales, aunque a temperatura ambiente predomina su constitución en forma de  $Mg_2Al_3$ .

Debe destacarse que la mayor parte de las fases secundarias existentes en el metal de soldadura tienen un bajo punto de fusión. La presencia de estas fases en los bordes de grano puede inducir a la fisuración en caliente.

Cuando la soldadura se realiza con varios cordones de soldadura, dado que las subsecuentes pasadas pueden refundir los cordones precedentes, la presencia de aleantes con Zn o Cu puede incrementar este mecanismo de rotura y en aportaciones tipo Al-Mg-Mn, la baja ductilidad de algunas uniones soldadas es justificada por concentración lineal de fases de bajo punto de fusión del tipo AlFeMnSi o  $MnAl_6$ .

Entre los factores que afectan la cantidad de fisuración en caliente que ocurre en la microestructura dendrítica de la soldadura pueden incluirse: el intervalo de temperatura de solidificación de la aleación, su coeficiente de expansión, el tamaño de los cristales columnares, el gradiente térmico de la velocidad de enfriamiento, la relación del volumen de líquido remanente al volumen de material solidificado y la cantidad de embridamiento a que esté sometida la unión.

Para la eliminación de este importante defecto se recurre a modificaciones en el diseño de la unión para permitir que mayor cantidad de material base pueda fundir y diluir el material de aportación y ajustar la composición del baño fundido a niveles de composición menos sensibles a la fisuración. En este mismo sentido, modificaciones en la composición propia de material de aporte seleccionado, pueden conseguir el mismo resultado.

Con respecto al proceso de soldadura, dos variables son ajustadas para eliminar la fisuración en caliente: incrementar la velocidad de soldadura y utilizar precalentamiento. Al incrementar la velocidad de soldadura se disminuye la aportación térmica a la unión. Debido a ello, la tensión creada por las diferencias de temperatura entre las zonas calientes y las zonas frías del material es reducida. Por otra parte, se produce, con el incremento de velocidad, una más fina microestructura dendrítica, que es menos susceptible a la fisuración. En el mismo sentido, el precalentamiento de la unión a soldar, reducirá las diferencias de temperatura entre zonas calientes y frías. No obstante, teniendo en cuenta que un excesivo precalentamiento hace disminuir las propiedades mecánicas de las aleaciones utilizadas fuera de su estado de recocido, no ha sido una técnica utilizada en este estudio.

Los cambios metalúrgicos que pueden presentarse en la zona afectada térmicamente (ZAT) por el proceso de soldadura pueden ser agrupados en:

- ✧ Ablandamiento en las aleaciones con estado deformadas (estado H)
- ✧ Recristalización del metal base en la zona adyacente a la soldadura y que ha sido calentada a temperatura superior a la de recristalización
- ✧ Fusión de las fases con baja temperatura de fusión presentes en la zona afectada, que pueden originar microfisuras.
- ✧ Sobreenviejamiento en las aleaciones bonificables térmicamente en zonas más alejadas del borde de fusión

Lógicamente la relación temperatura - tiempo interviene de forma importante en los cambios producidos en la zona afectada y a modo de ejemplo puede establecerse que a temperaturas inferiores a 100°C es necesario un tiempo considerable para que estos cambios se produzcan y que por encima de los 200°C los cambios que afectan a las propiedades mecánicas se producen muy rápidamente, prácticamente en los primeros 10 segundos de exposición a temperatura en las aleaciones base Al-Mg y Al-Mg-Si, consideradas en este trabajo.

En el estudio metalográfico de las uniones soldadas, se pone de manifiesto que todas las aleaciones de Al contienen una cierta cantidad de partículas insolubles en la matriz de aluminio. En las aleaciones de la serie 5XXX son partículas de  $Mg_2Al_3$ ,  $Mg_2Si$  y fases intermetálicas conteniendo Cr y Mn. En aleaciones de la serie 6XXX la más común fase intermetálica es  $Mg_2Si$  y partículas con exceso de silicio pueden también estar presentes.

En estas aleaciones el calor procedente de la soldadura produce la formación de materiales eutécticos de bajo punto de fusión en los bordes de grano y en forma de redícula. Estos bordes de grano son causa de la disminución de ductilidad y la característica fragilidad que muestran las soldaduras por fusión.

A modo de ejemplo del estudio metalográfico realizado, se muestra la unión entre chapas de 12 mm de espesor de aleación 6005 realizada con proceso MIG con protección He + Ar aporte ER 4043 (Al-Si), fotografía 1 (x3). En las micrografías correspondientes al metal de aportación (baño de soldadura), fotografía 2 (x200) se observa el fino precipitado interdendrítico del eutéctico Al-Si dentro de la matriz de solución sólida. En la micrografía correspondiente a la fotografía 3 (x200) se muestra la zona afectada térmicamente mostrando el grueso tamaño de grano y la presencia de fase eutéctica Al- $Mg_2Si$  entre los bordes de grano, la parte inferior de la fotografía corresponde a la zona de fusión con la formación, ya comentada, del eutéctico Al-Si interdendrítico.

Lógicamente el cambio del material de aportación empleado para soldar aleaciones Al-Mg-Si supone modificaciones microestructurales en el cordón de soldadura que tiene como consecuencia la formación de diferentes tipos de precipitados y no supone alteración en la zona afectada térmicamente, excepto en el borde de fusión. Las fotografías 4 y 5 (x200) corresponden a aportaciones ER 4043 ( Al-Si) y ER 5356 (Al-Mg) respectivamente. En la primera se observa la formación columnar y la fase eutéctica Al-Si entre las dendritas de solidificación del cordón de soldadura; por el contrario en la segunda, se muestra el componente interdendrítico  $Al\ Mg_2Al_3$  muy finamente distribuido dentro del baño de soldadura solidificado.

Con respecto a la zona afectada térmicamente las micrografías correspondientes, fotografías 6 y 7 (x 100), se observa en ambos casos líneas oscuras del eutéctico  $Al-Mg_2Si$  entre los bordes de grano en la zona próxima al borde de fusión y partículas de  $Mg_2Si$  en forma de pequeñas esferas de color oscuro, más acusados en una distribución bandeada en el borde de fusión , cuando la aportación es tipo Al-Mg.

Las microestructuras obtenidas pueden considerarse representativas de las diferentes uniones soldadas realizadas. Las micrografías reproducidas en las fotografías 8, 9 y 10 (x200) corresponden a la soldadura en ángulo entre chapas de Al-Mg-Si con 12 mm de espesor soldadas con dos pasadas MIG con aportación Al-Si y gas de protección argón reproduciéndose el material de aportación y dos zonas de la ZAT, cuyo comentario microscópico es análogo al ya comentado.

➤ Soldadores:

Para una correcta realización de las uniones soldadas en aleaciones de aluminio los soldadores han recibido enseñanza teórico-práctica, según las directrices del documento “Minimum requirements for Practical Training and Examination of International Welders for Welding of Aluminium and its Alloys”, con referencia IIW/IAB-089-2002 complementada en el IAB-150-2003 (publicado en enero de 2004) y preparada por el International Authorisation Board del Instituto Internacional de la Soldadura.

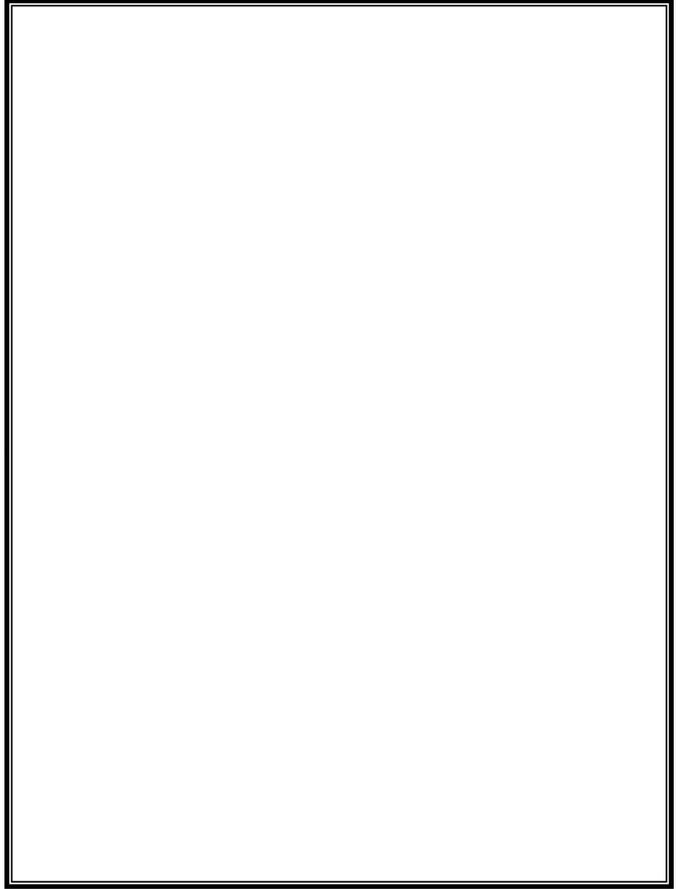
En el mismo sentido, todos los soldadores que intervienen en la construcción soldada de trenes de alta velocidad han sido cualificados en base a la Norma EN 287 “Cualificación de Soldadores. Soldeo por fusión. Parte 2: Aluminio y aleaciones de aluminio”.



Fotografia 1



Fotografia 2



Fotografia 3



Fotografia 4



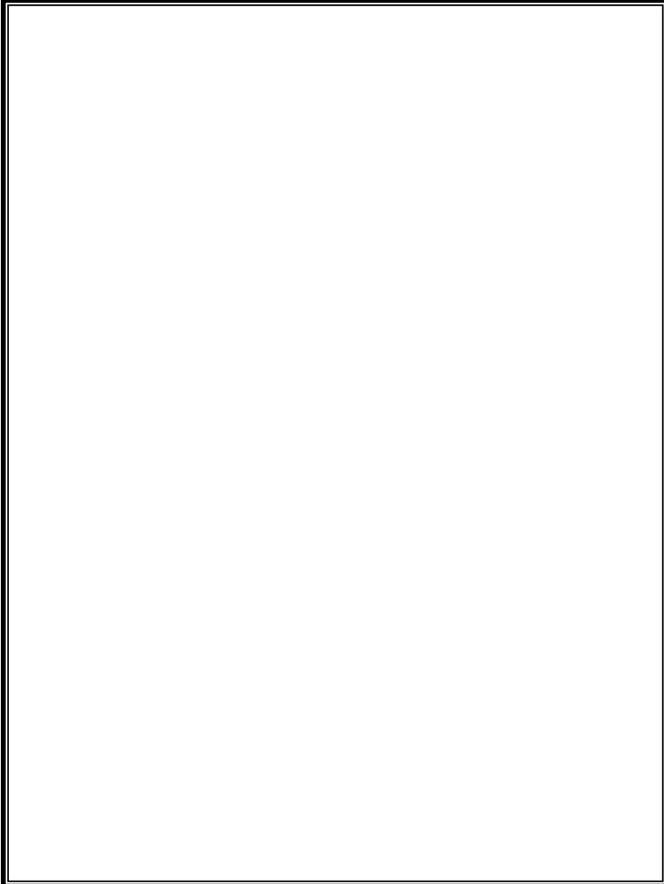
Fotografia 5



Fotografía 6



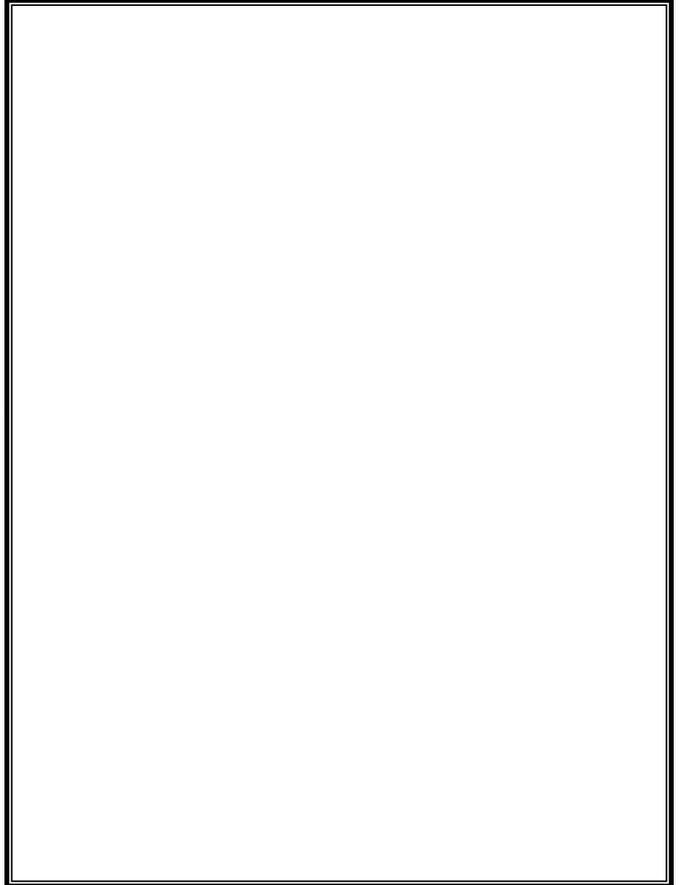
Fotografía 7



Fotografia 9



Fotografia 8



Fotografia 10

**EVALUACIÓN DE DEFECTOS PRODUCIDOS AL SOLDAR  
ALEACIONES DE ALUMINIO PARA TRENES DE ALTA VELOCIDAD**

---

**ESTUDIO DE DEFECTOS**

---

**FUNDACIÓN DOMINGO MARTÍNEZ:**

## *Ayudas a la Investigación Científica y Técnica. 2002-2003*

La función principal del control de calidad es establecer los requerimientos necesarios para que la producción de componentes soldados esté adecuada a las necesidades del proyecto. Para ello, son establecidas en las uniones soldadas protocolos de inspección que se desarrollan en las fases previas a la soldadura (diseño de uniones y preparación de las uniones a soldar) durante la soldadura (proceso de soldadura, parámetros del proceso, secuencia de soldadura) y post-soldadura (inspección no destructiva y ensayos destructivos de las uniones realizadas).

Previamente a la fase de realización de las uniones soldadas resulta imprescindible obtener la certificación de la cualificación, tanto del proceso de soldadura a utilizar, que permitirá obtener resultados de la compatibilidad entre las aleaciones de base y de aportación y las propiedades mecánicas y metalúrgicas de la unión, como de los propios soldadores que han de realizar las soldaduras. En el trabajo, se ha utilizado para este fin la normativa europea EN 288 “Especificación y cualificación de los procedimientos de soldeo para los materiales metálicos. Parte 4: Cualificación del procedimiento de soldeo por arco de aluminio y sus aleaciones”.

En la fase final del control de calidad que podemos denominar Inspección para Aceptación, se recurre a técnicas de inspección no destructivas, y si se precisa destructivas, para la detección de posibles defectos existentes en las uniones soldadas que puedan ser comparados con los criterios de aceptación – rechazo utilizados para la fabricación y posterior comportamiento en servicio.

El primer análisis realizado a toda unión soldada está basado en la INSPECCIÓN VISUAL. Con este examen se tratan de detectar defectos de: mordeduras, grietas superficiales, falta de penetración en uniones a tope, rugosidades en el cordón de soldadura por inadecuado caudal de gas de protección o excesiva intensidad y fisuraciones producidas en el cordón de soldadura o en el cráter de cierre.

La aceptación visual de las uniones soldadas con defectos del tipo indicado anteriormente ha estado basada en la Norma Europea EN 30042 (mayo 1994) sobre “Uniones soldadas por arco de aluminio y sus aleaciones soldables. Guía sobre los niveles de calidad en función de las imperfecciones” que se corresponde con la ISO 10042:1992.

En esta norma se considera básico el nivel de calidad exigido a la construcción soldada, ya que este nivel determina las dimensiones aceptables de los defectos presentes en la soldadura. Los niveles de calidad para las imperfecciones de las soldaduras se clasifican en tres tipos: Moderado (símbolo D), Intermedio (símbolo C) y Elevado (Símbolo B) y lógicamente en una misma construcción y según las exigencias del proyecto, pueden establecerse niveles diferentes para diferentes uniones soldadas, según el grado de sollicitación a que se encuentre sometida.

La Norma mencionada es aplicable al aluminio y aleaciones de aluminio soldada por los procesos de soldadura por arco: con gas inerte MIG (proceso definido internacionalmente con el número 131)- ISO 15608 - y mediante electrodo de wolframio

con protección de gas inerte TIG (proceso número 141) y se utiliza tanto para uniones a tope como en ángulo.

Como se expuso al considerar los parámetros operatorios de los procesos de soldadura, una serie de cordones son realizados sobre una chapa de fuerte espesor para estudio de posibles defectos que puedan presentarse en su aplicación a la fabricación y elección de parámetros óptimos de soldadura. En la fotografía 11 se presenta, como muestra representativa uno de los estudios realizados a tal fin con soldadura MIG.

Elegidos los parámetros de soldadura se procede a la cualificación del propio proceso de soldadura y de los soldadores que han de utilizarlo. Un ejemplo característico se muestra en las fotografías 12,13 y 14 con pruebas designadas 2,3 y 4 empleando el proceso MIG sobre aleación Al-Mg en espesor de 5 mm con unión realizada a tope y que tras superar la aceptación en el examen radiográfico son troceadas para mecanización de probetas para evaluar las características mecánicas obtenidas en la unión, principalmente resistencia (tracción) y ductilidad (doblado).

Se reproduce como ejemplo el estudio del procedimiento de soldadura designado como PT-12, y válido para realizar soldaduras de chapa en posición plana horizontal a tope de aleación Al-Mg-Si 6005, mediante proceso MIG con gas de protección argón y material de aportación Al-Si ER 4043 empleando sistema automatizado de desplazamiento del cabezal de soldadura y manteniendo respaldo de cobre en la raíz; donde las fotografías representativas de los cordones de soldadura se reproducen en las fotografías 15 a 42 y como diferentes pruebas de soldadura han sido llevadas a cabo, hasta seleccionar las condiciones óptimas que aseguren la ausencia significativa de defectos.

Sobre la Prueba 1, fotografía 15, que muestra un acabado de cordón deficiente y en la posición marcada con recuadro, se obtuvo la macrosección reproducida en la fotografía 16 (x 3 aumentos), mostrando mordedura en la cara de soldadura de 1 mm de profundidad y excesiva cantidad de baño fundido en el cordón de soldadura.

De la Prueba 2, cuyo cordón de raíz se muestra en la fotografía 17 se han obtenido los cuatro cortes transversales marcados para estudio metalográfico. Las secciones P 2-2 y P 2-4, fotografías 18 y 19 (x 3), muestran únicamente presencia de fina porosidad, localizada principalmente en el cordón de soldadura de raíz. En la macrosección P2-1, fotografía 20 (x 3), se observa en la raíz, junto a la porosidad mencionada, un rehecho por contracción en la solidificación que origina una zona de previsible inicio de grieta, con una profundidad estimada de 2mm, más acusada en la macrosección P2-3, fotografía 21. Por la posible influencia en el comportamiento mecánico de este defecto, su severidad será evaluada posteriormente, tanto bajo sollicitación estática como a fatiga.

En la Prueba de soldadura 3 cuyo cordón de raíz se muestra en la fotografía 22, han Sido realizados cuatro cortes para examen metalográfico, según la designación indicada.

La macrosección P3-1, fotografía 23 (x 3) muestra un único poro en la parte superficial del segundo cordón de soldadura de 1 mm de diámetro y en las macrosecciones P 3-2 y P3-4, fotografías 24 y 25 (x 3) se observa un gran poro en la zona de raíz de 2mm y 1 mm de diámetro respectivamente. El tamaño aceptable de

porosidad será evaluado posteriormente. Por el contrario la macrosección P3-3, fotografía 26 (x 3), muestra una correcta realización de la soldadura.



Fotografía 11



Fotografía 12



Fotografía 13



Fotografía 14



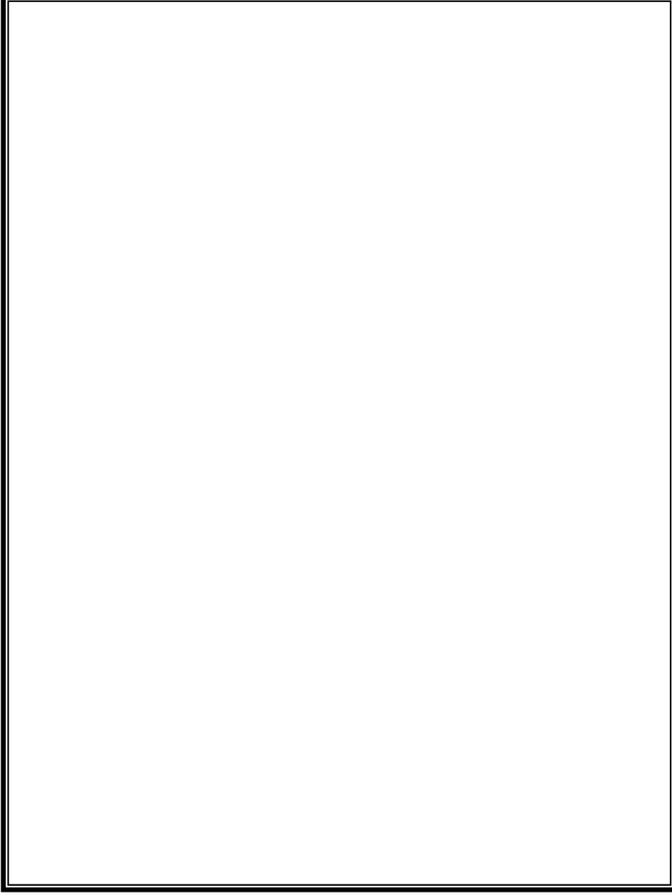
Fotografia 15



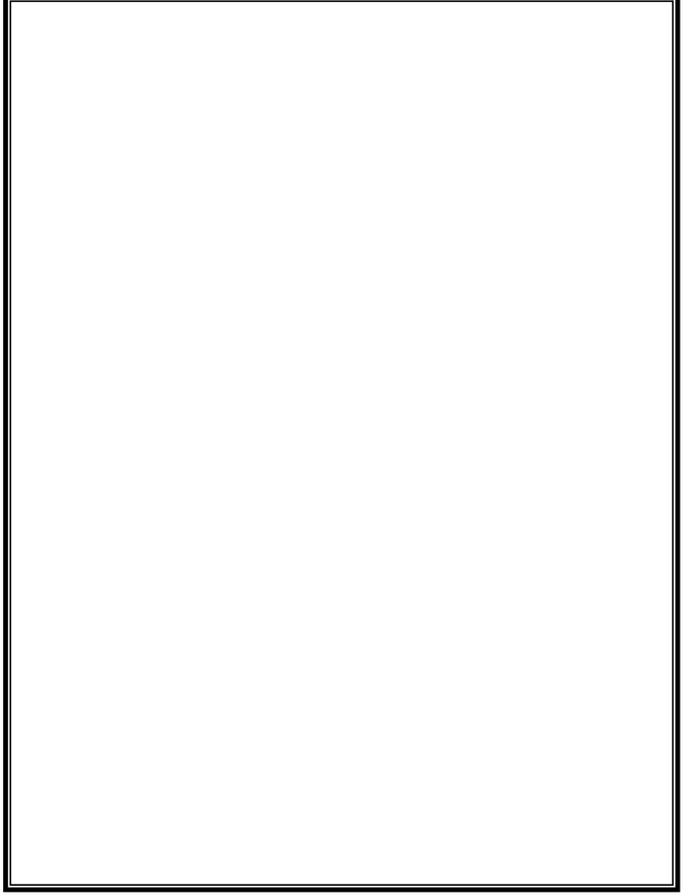
Fotografia 16



Fotografia 17



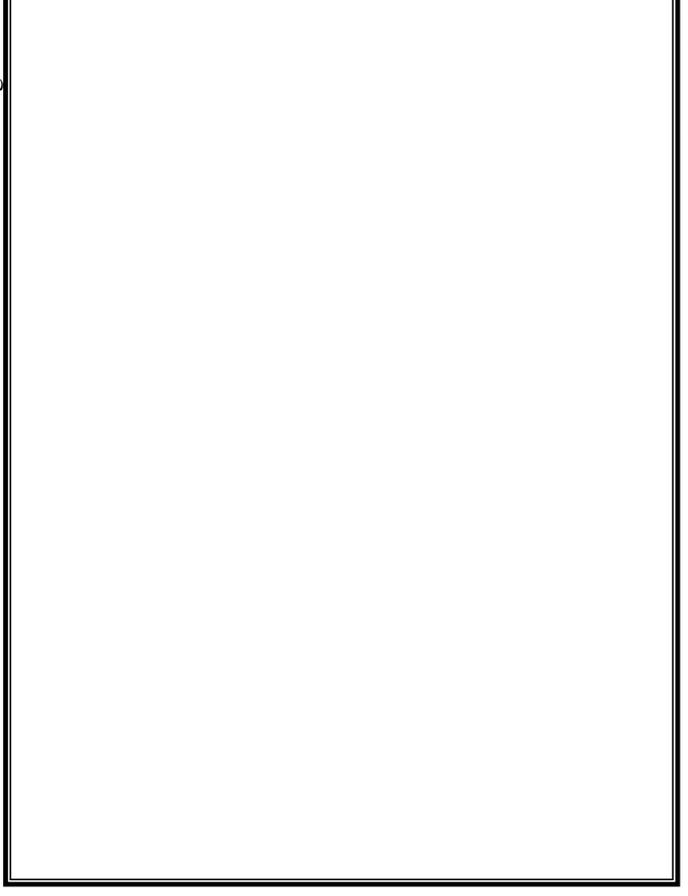
Fotografia 19



Fotografia 21



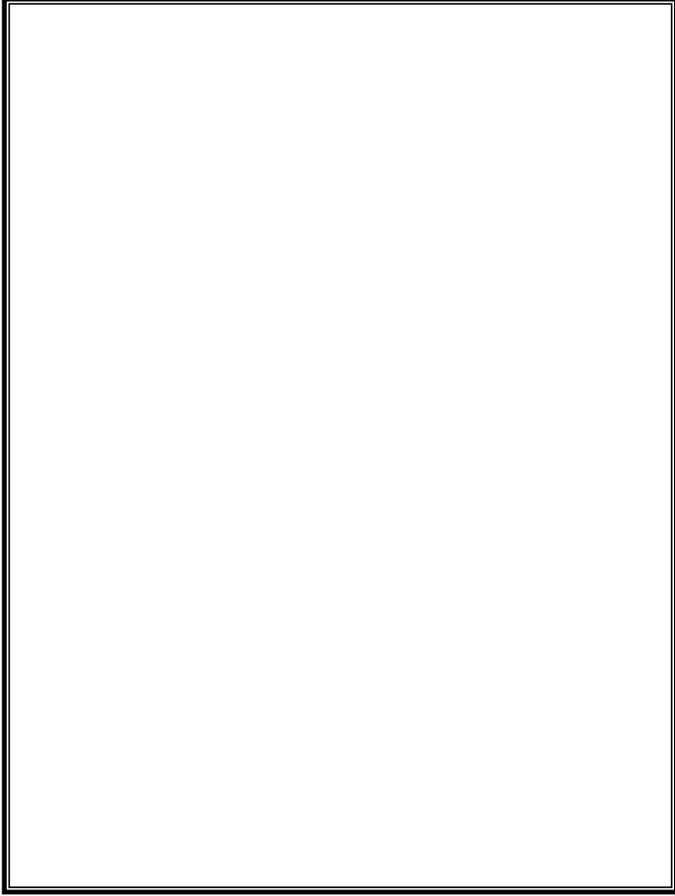
Fotografia 18



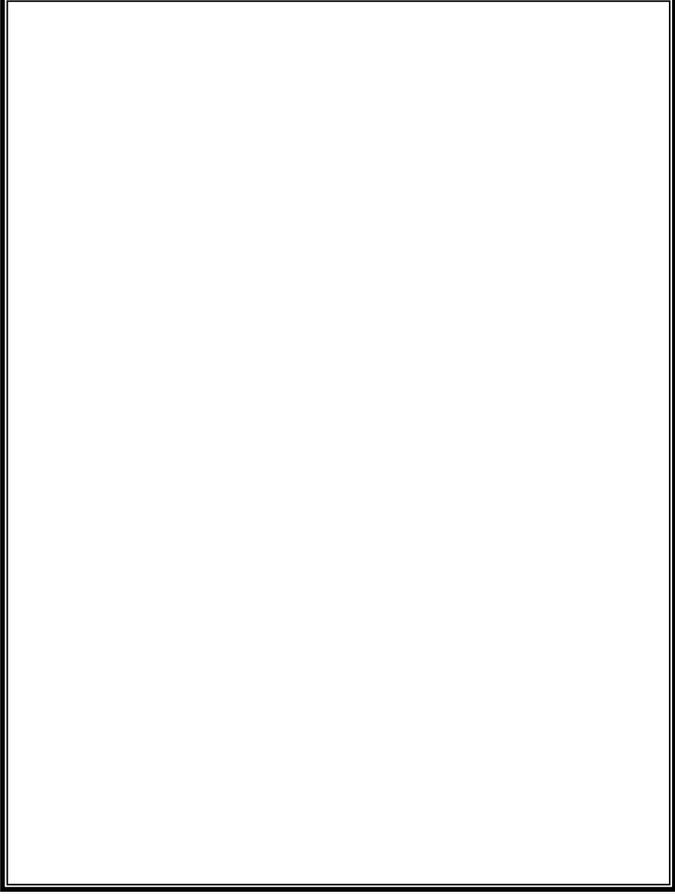
Fotografia 20



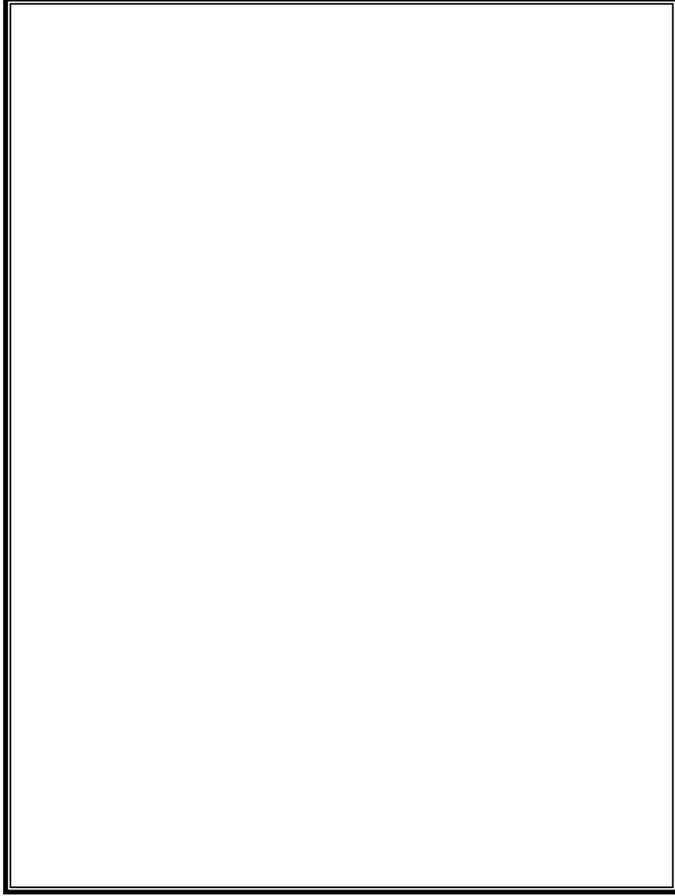
Fotografia 22



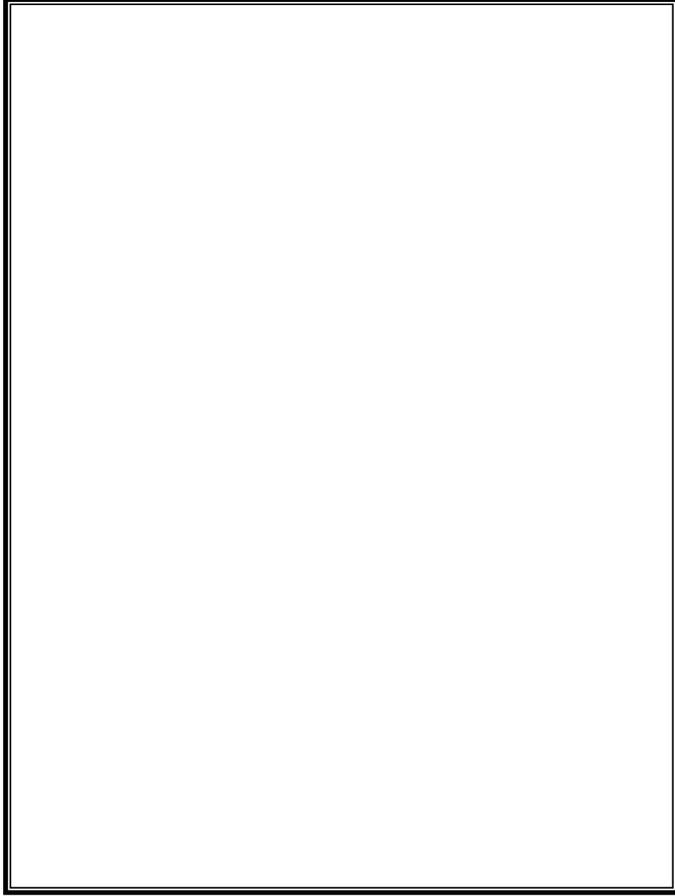
Fotografia 23



Fotografia 24



Fotografia 25



Fotografia 26

En la Prueba de soldadura 4, se ha reproducido el cordón de soldadura por el lado de cara y de raíz , fotografías 27 y 28 , indicándose sobre ellas las zonas donde se han realizado los cortes para obtener macrosecciones del cordón de soldadura. En las macrosecciones, excepto la P4-2, fotografía 29 (x 3), que muestra pequeña microporosidad distribuida a través del cordón superficial, en el resto de las macrosecciones se observan defectos importantes de fusión en la raíz, tanto por penetración incompleta, en la P4-1, fotografía 30 (x 3), de aproximadamente 2 mm de profundidad, como en la P4-3, fotografía 31 (x 3), donde se alcanzan los 5 mm de falta de fusión. Por su importancia desde el cálculo mecánico de las uniones, estos defectos serán valorados posteriormente bajo sollicitación mecánica.

Las macrosecciones P4-4, fotografía 32 (x 3) y P4-5, fotografía 33 (x 3) muestran defectos en la fusión de la raíz, de aproximadamente 1 mm de profundidad y en esta última además se observa la presencia de un grueso poro, entre cordones de soldadura, de aproximadamente 1 mm de diámetro.

Finalmente en la Prueba nº 5, fotografía 34, mostrando el cordón de cara de la soldadura, no se obtuvieron defectos significativos, como se muestra en las macrosecciones P5-A, fotografía 35 (x 3) y P5-B, fotografía 36 (x 3), que muestra ligera microporosidad en el cordón superior de soldadura, pudiendo observarse la diferente forma del cordón en zona de avance de la soldadura y en zona de empalme del cordón.

La modificación del gas protector de argón a mezcla de 75% helio y 25% argón, supuso la certificación de un nuevo procedimiento de soldadura, identificado como PT-33. Pudo observarse que la utilización de helio no elimina la microporosidad del cordón de soldadura, como se muestra en las macrosecciones designadas como HE-1, HE-2, HE-3, HE-4, HE-5 y HE-6, fotografías 37 a 42 (x 3), produciendo un mayor ancho del cordón de soldadura de relleno de la unión.

El helio, por su mayor poder calorífico, asegura una mejor fusión de la raíz de soldadura, con el inconveniente de una mayor extensión del baño fundido. No han sido encontrados defectos importantes con este procedimiento de soldadura y únicamente en pruebas iniciales se obtuvo falta de material de aportación, reproducido en la macrosección HE-2 de 2 mm de profundidad, que será posteriormente evaluado desde el punto de vista del comportamiento mecánico.

Como se expuso anteriormente las uniones soldadas realizadas son sometidas previamente a inspección radiográfica para determinar las zonas de existencia de defectos y servir de guía al posicionado para la extracción de macrosecciones. Se adjuntan, a modo de ejemplo, cinco radiografías correspondientes a estas pruebas de soldadura MIG de la aleación 6005 con 12 mm de espesor, incluidas en las páginas 41, 42 y 43.

En ellas puede observarse la falta de penetración en la radiografía designada como Prueba 1; la existencia de porosidad en el cordón de raíz con soldadura irregular y faltas locales de penetración en la designada como Prueba 2; la existencia de porosidad entre cordones y diferencias muy notables en la penetración en la prueba 3 y defectos importantes de falta de penetración en la raíz de la soldadura y mordeduras en el lado de cara en la Prueba 4. Se incluye una radiografía de la soldadura en la misma aleación y espesor, cambiando el gas de protección de argón a mezcla de argón + helio, mostrando irregularidad entre cordones, existencia de porosidad y falta de fusión en la raíz del cordón.

La importancia de los defectos de falta de penetración en la raíz de los cordones de soldadura, al considerarse defectos planares, con gran posibilidad de crecimiento en las sollicitaciones mecánicas solicitadas estática y dinámicamente, hace necesario un estudio detallado de su evolución, que será desarrollado posteriormente en el capítulo dedicado a la aplicación práctica a la evaluación de defectos.

Otro tipo de soldadura estudiada en aleación Al-Mg-Si 6005 fue realizada mediante soldadura MIG bajo argón uniones en ángulo en 6 mm de espesor, empleando como material de aportación Al-Si ER4043 y en posición vertical ascendente, según se muestra en la fotografía 43.

Se empleó la técnica de realizar la unión, por un solo lado con penetración parcial y un único cordón de soldadura. En las fotografías 44 a 47 (x 3) tomadas de macrosecciones transversales al cordón de soldadura, se observa una forma correcta en la forma del cordón con respecto a su convexidad y únicamente presencia de porosidad, sin deterioro de la capacidad mecánica de la unión.

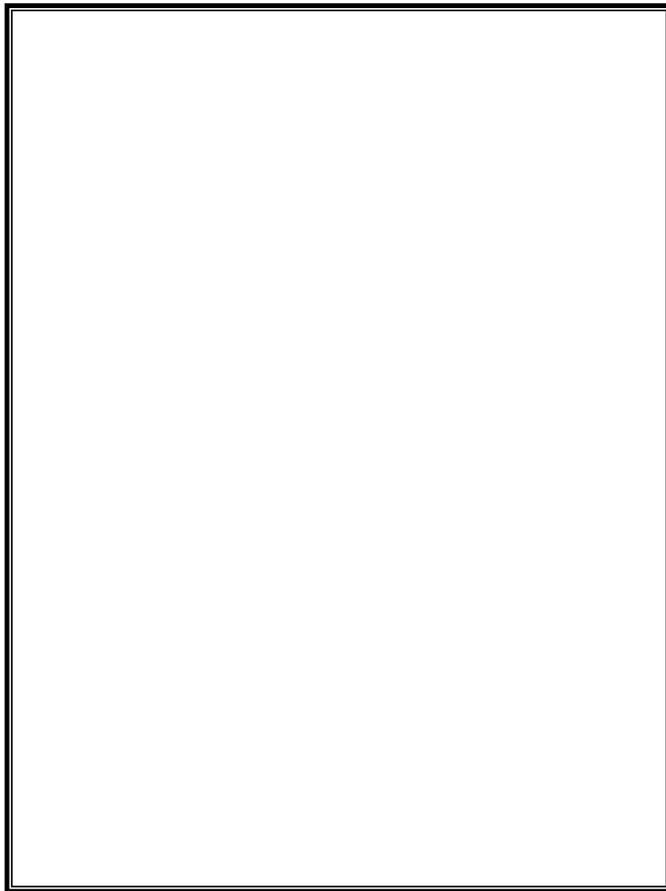
El empleo de dos cordones de soldadura para incrementar la medida de la garganta del cordón, produce defectos de convexidad en la forma del cordón y mordeduras en la unión metal base- metal aportación que pueden estimarse en 2 mm de profundidad, defecto que será evaluado posteriormente a efectos del comportamiento mecánico de la unión. En las fotografías 48 a 51 (x 3) se reproducen algunas macrosecciones representativas de este tipo de uniones, que ponen de manifiesto la dificultad de soldar en posición vertical ascendente con dos cordones de soldadura superpuestos.



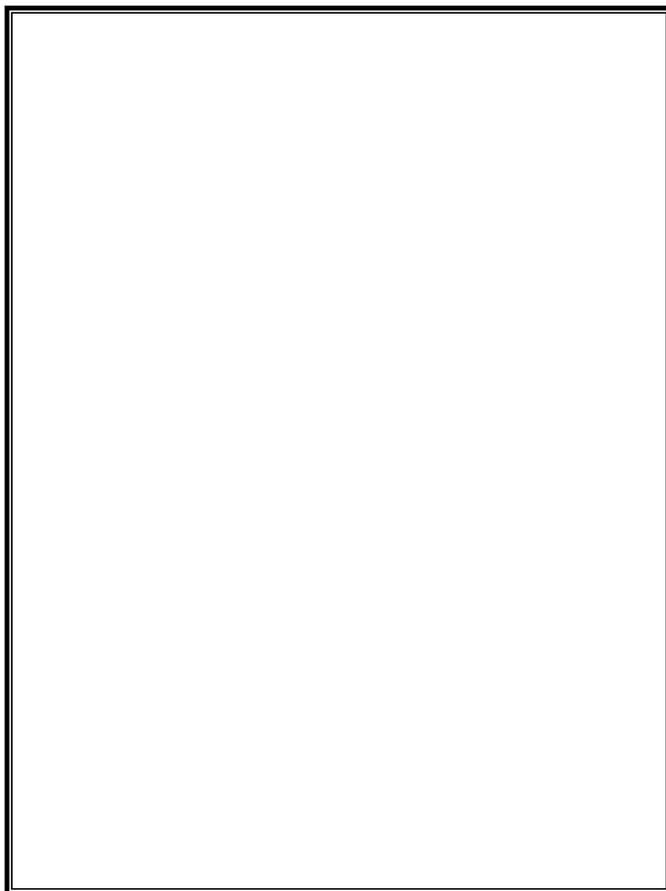
Fotografia 27



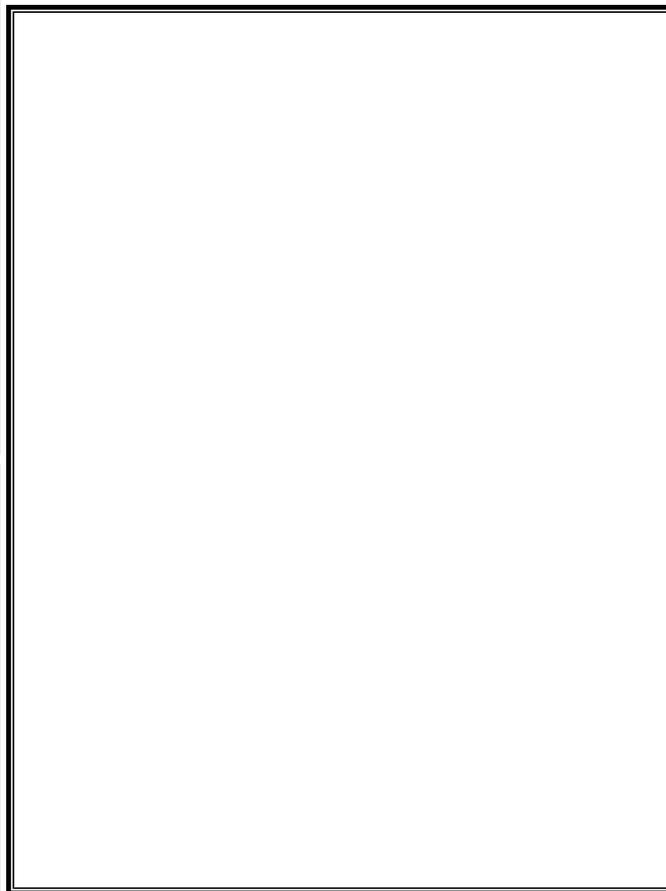
Fotografia 28



Fotografia 30



Fotografia 29



Fotografia 31



Fotografia 32



Fotografia 33



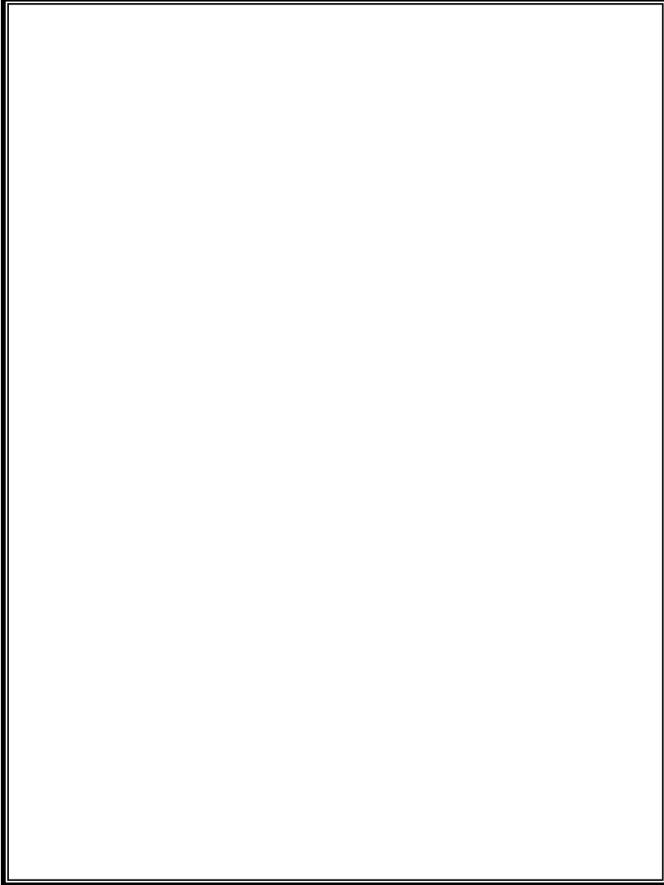
Fotografia 34



Fotografía 35



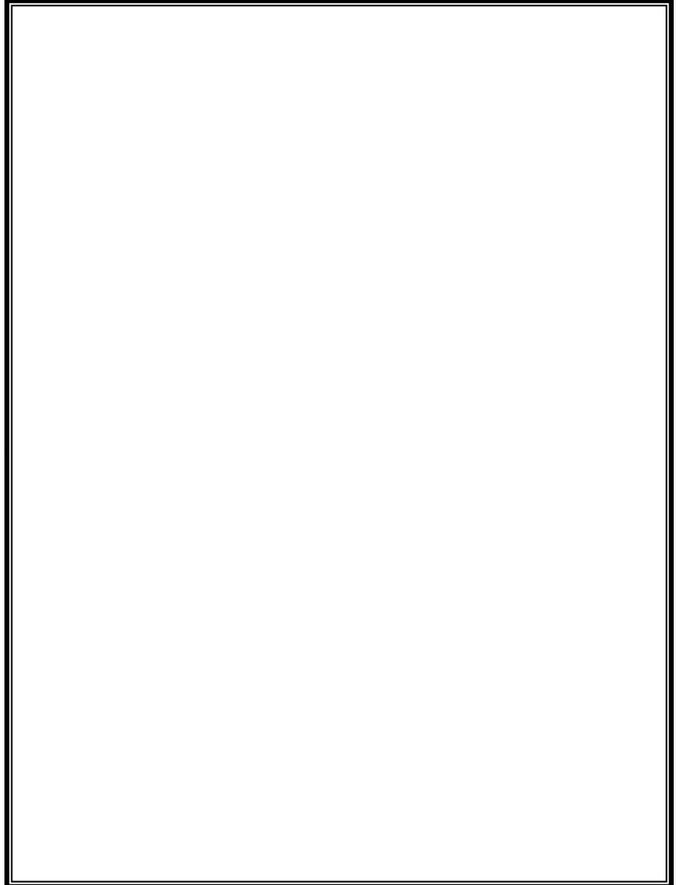
Fotografía 36



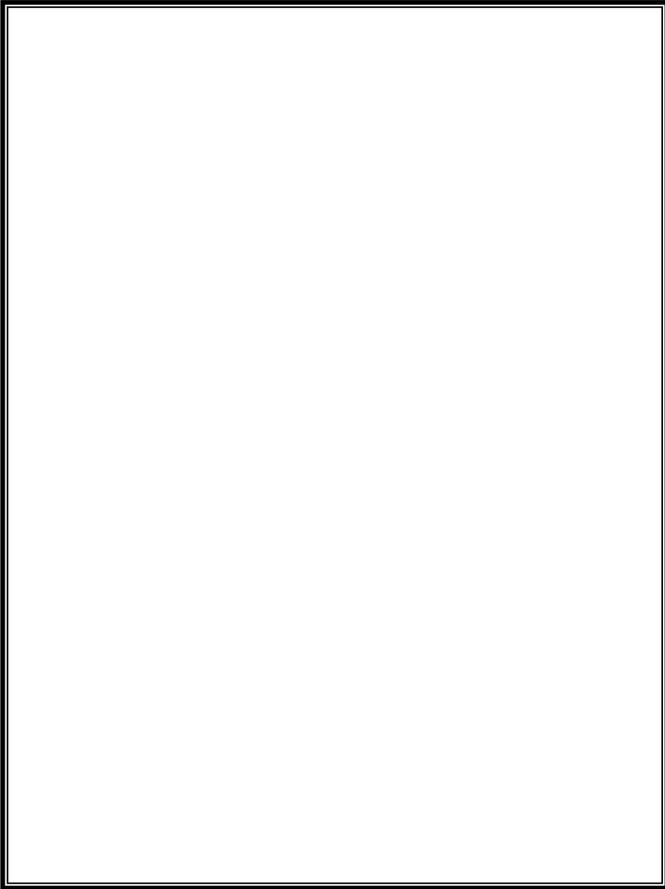
Fotografia 38



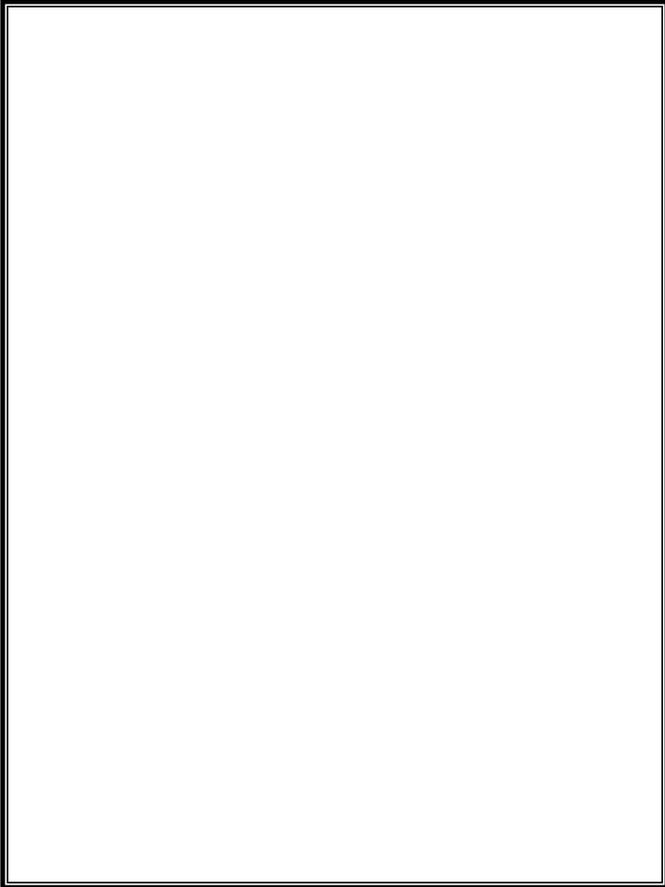
Fotografia 37



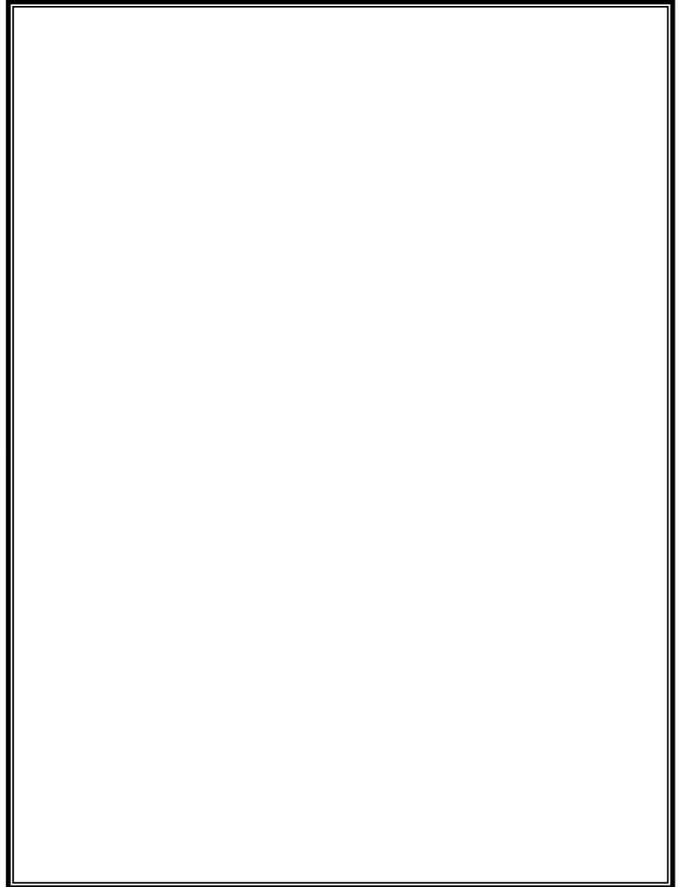
Fotografia 39



Fotografia 41



Fotografia 40



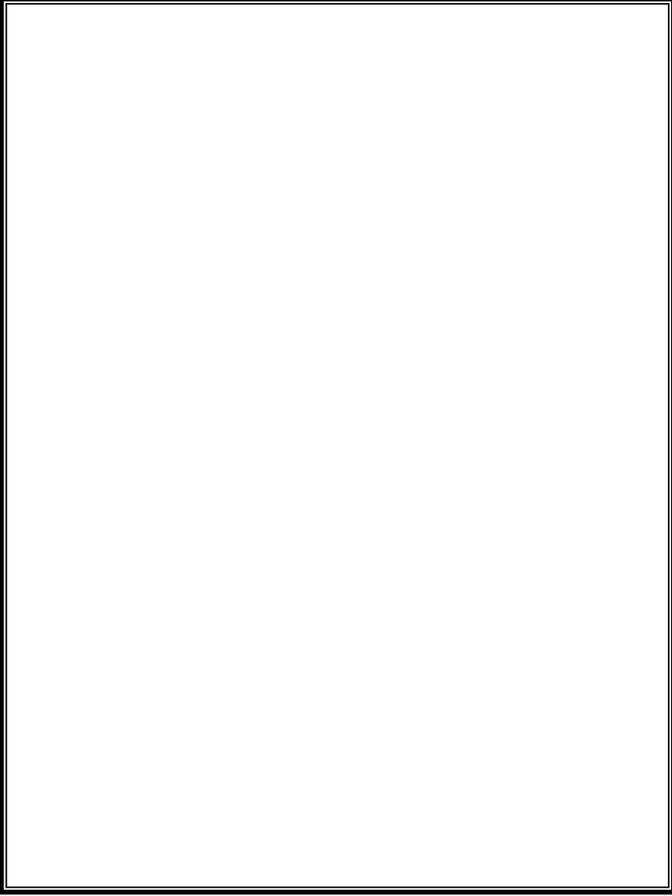
Fotografia 42



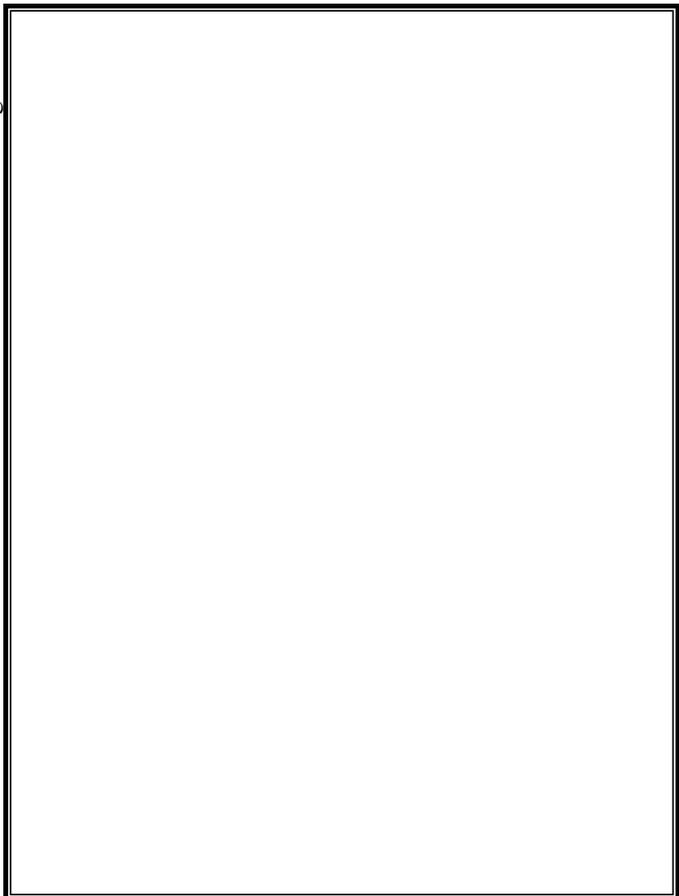
Fotografia 43



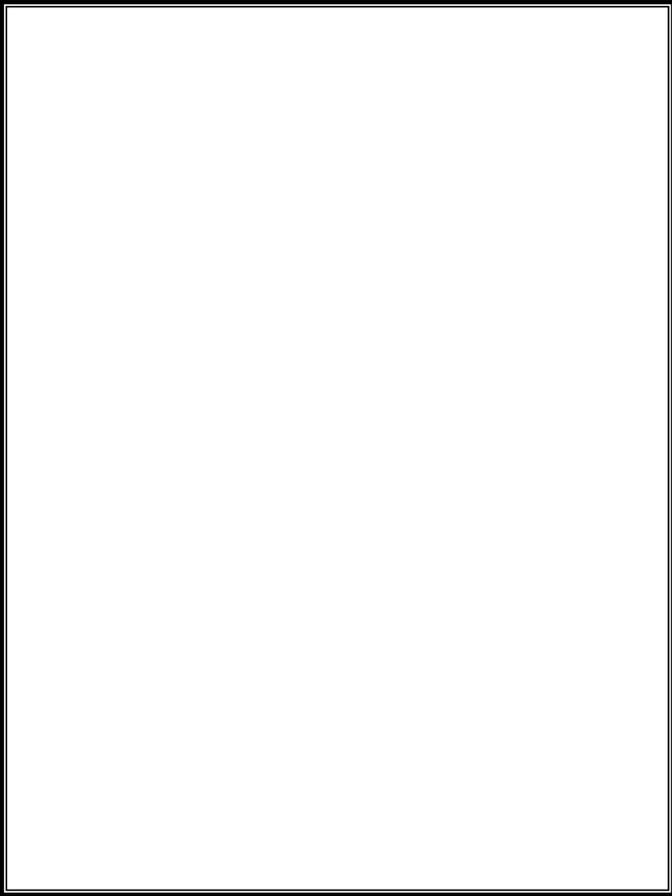
Fotografia 44



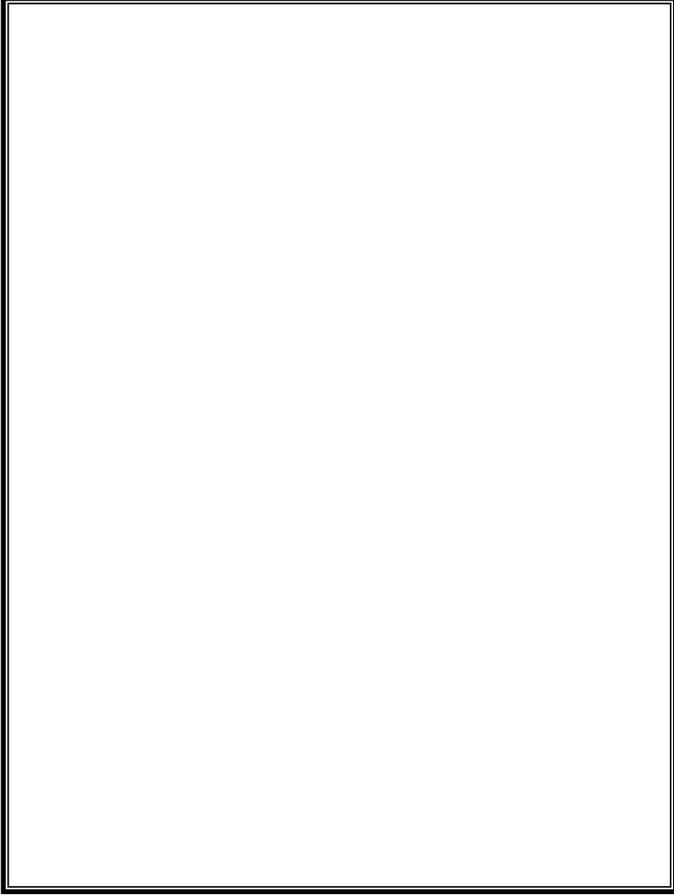
Fotografia 45



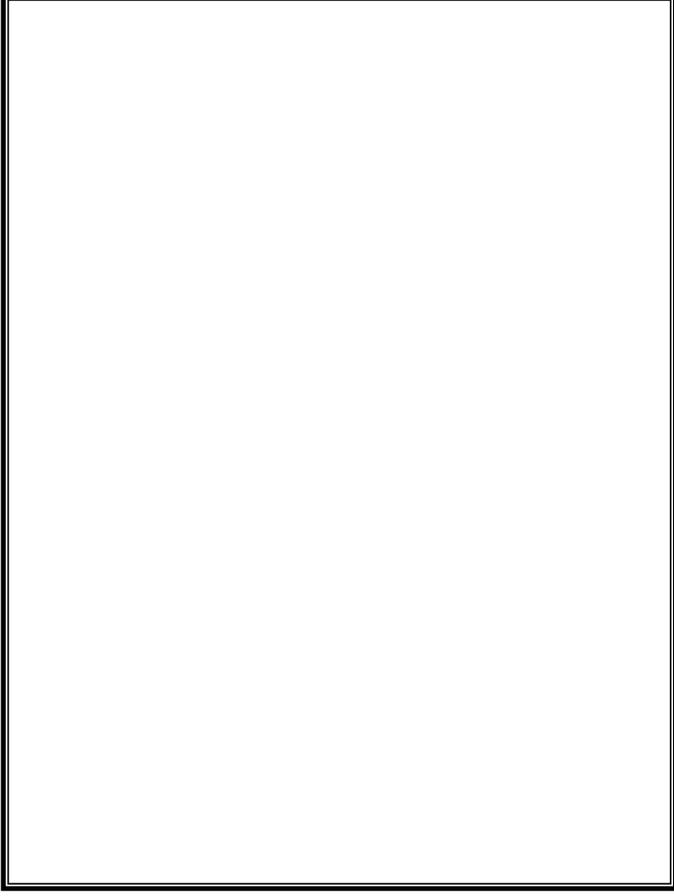
Fotografia 46



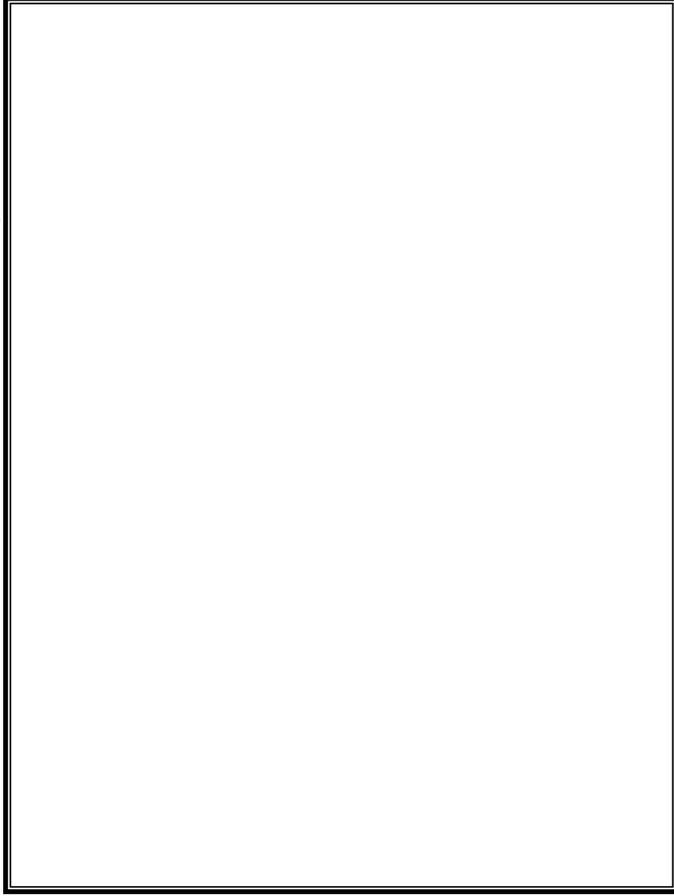
Fotografia 47



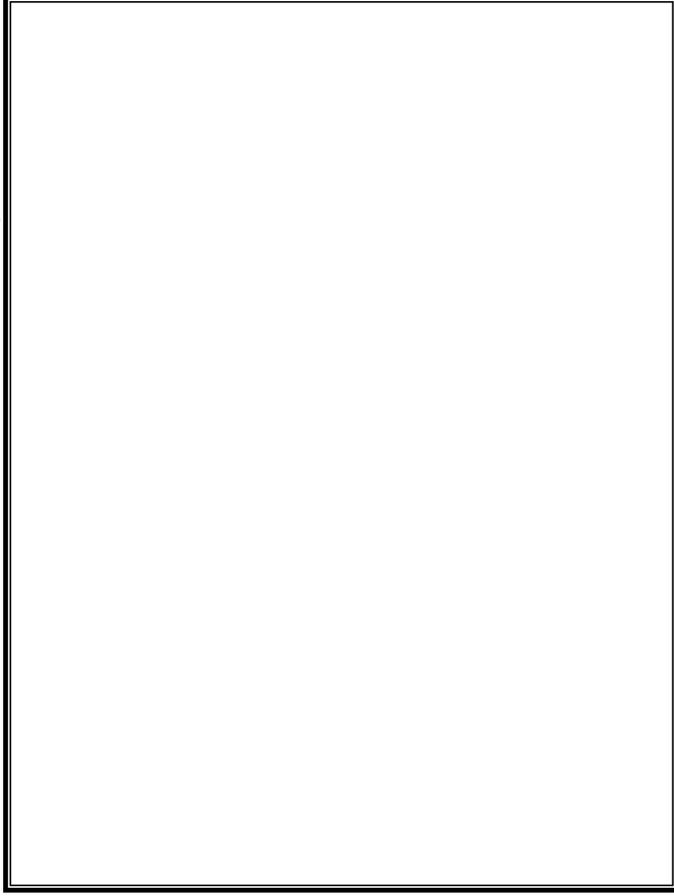
Fotografia 48



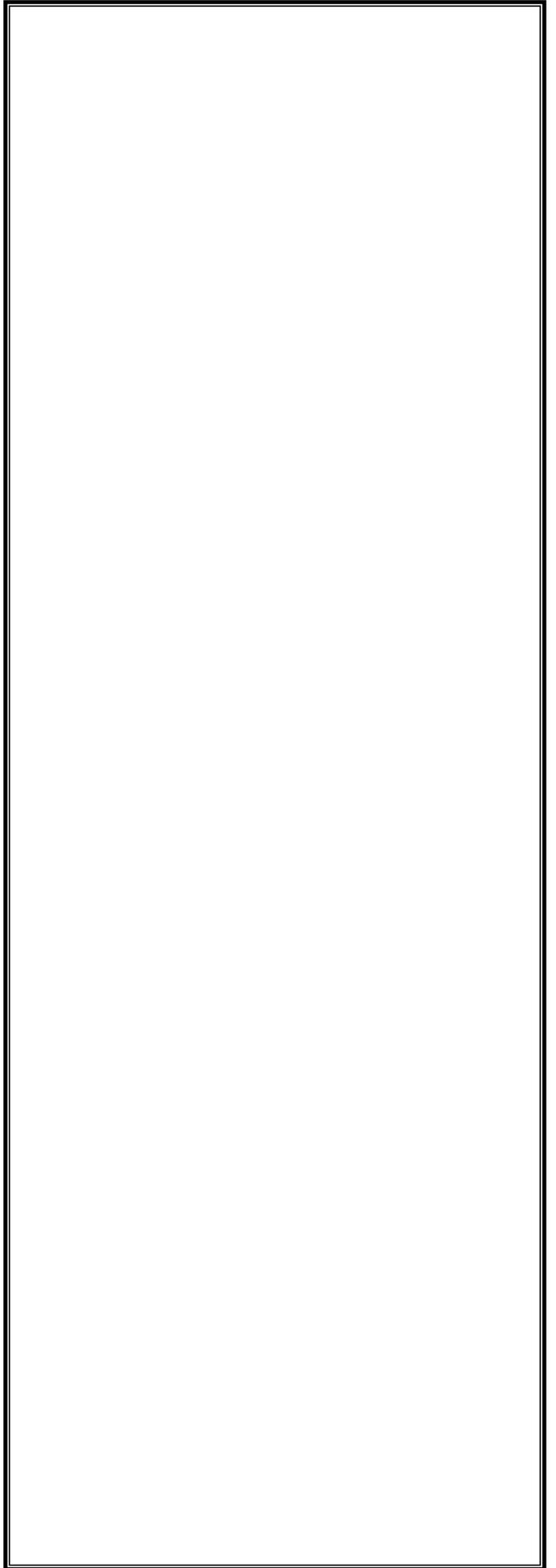
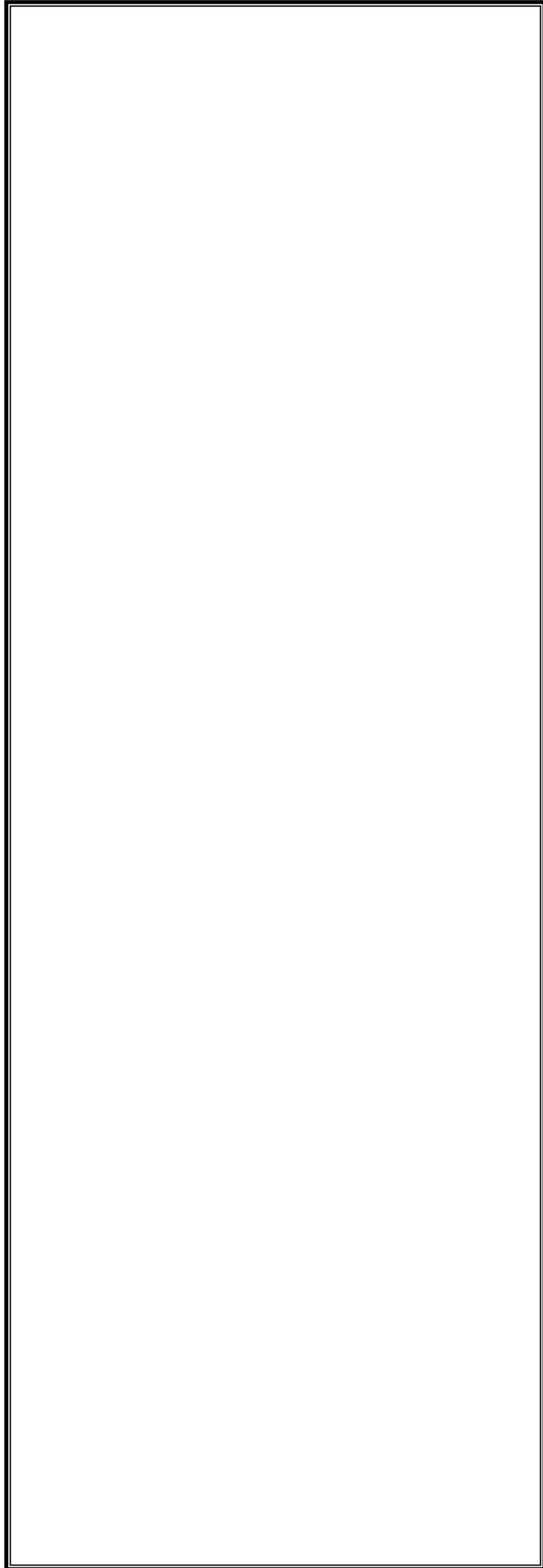
Fotografia 49

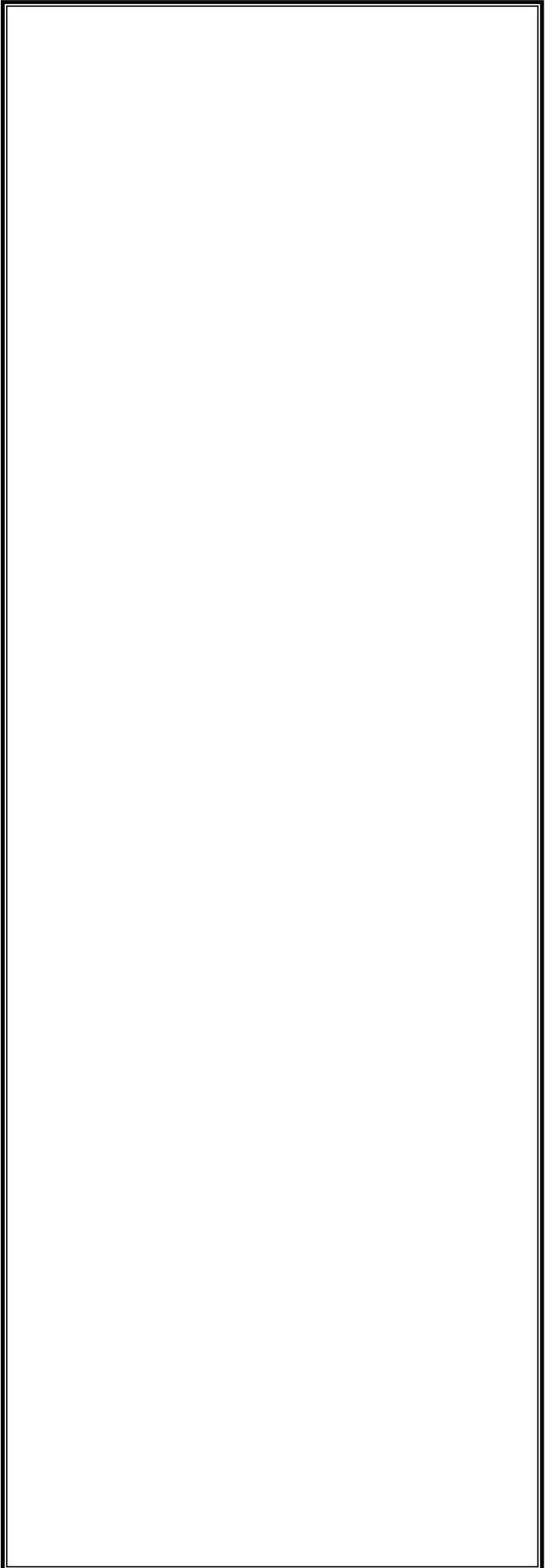
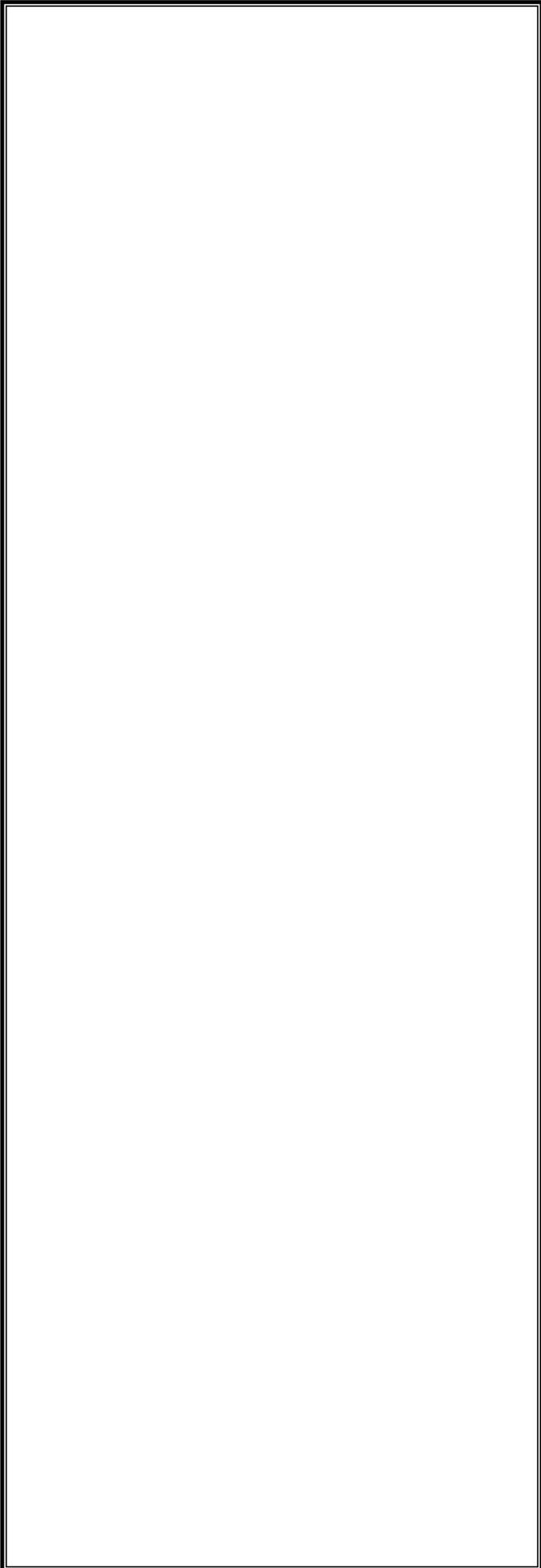


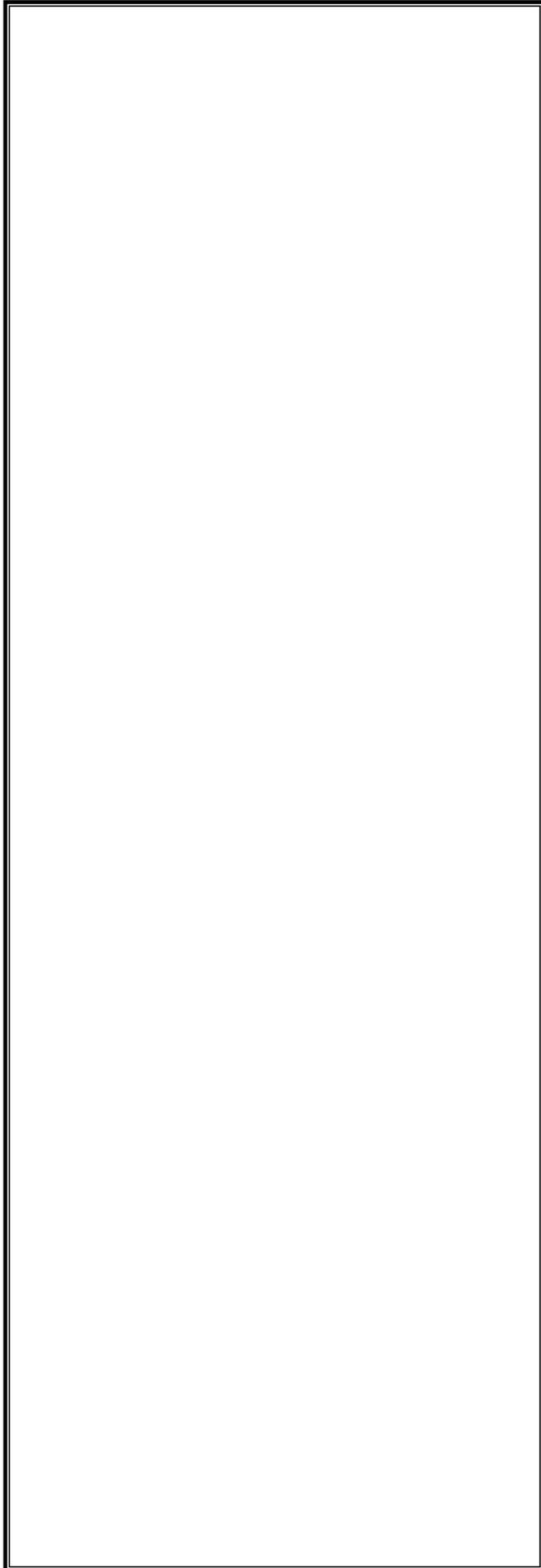
Fotografia 50



Fotografia 51







Se realizaron uniones soldadas en ángulo por ambos lados de aleación Al-Mg-Si 6005 con procedimiento MIG en posición horizontal plana para verificar las posibilidades de obtener penetración completa en la raíz, sin preparación de bordes en la junta. Se emplearon espesores de chapa de 10 y 12 mm. Con un cordón de soldadura por cada lado y espesor de chapa a penetrar de 12 mm, la falta de penetración puede llegar a alcanzar los 10 mm centrales, defecto que será evaluado mecánicamente en capítulo posterior, aunque debe destacarse que la falta de penetración más normal en el material base es de 3mm, fundiendo correctamente los extremos de la raíz, como se pone de manifiesto en la fotografía 52 (x 3).

En el proceso de soldadura para espesor a soldar de 10 mm, en ángulo y posición horizontal plana, fotografía 53 (x 3), pueden obtenerse 4 mm de penetración adicional con un único cordón de soldadura, lado izquierdo de la fotografía y prácticamente 5 mm de fusión en la raíz si se emplean dos cordones, utilizando el primero únicamente para conseguir penetración. Del estudio realizado se deduce que con cordones de soldadura por cada lado de la unión, se puede alcanzar la penetración completa de la raíz, sin preparación de bordes en la junta a soldar.

Análogamente a lo expuesto en este estudio para aleaciones de Al-Mg-Si, diferentes condiciones de soldadura fueron empleadas para la realización de uniones en ángulo entre chapas de aleación Al-Mg con procedimiento MIG y aportación Al-Mg ER 5356, en posición vertical ascendente.

Las macrosecciones de los cordones de soldadura reproducidos en las fotografías 54 a 56 (x 3) ponen de manifiesto los posibles defectos a ser evaluados. Pudo observarse la presencia de microporosidad en el cordón de soldadura, si la soldadura se realiza con un solo cordón, o localizada preferentemente en el segundo cordón, si se ha soldado con dos cordones, eliminándose los poros iniciales del cordón de raíz. El recalentamiento producido por el segundo cordón de soldadura es suficiente para eliminar las inclusiones gaseosas retenidas en el primer cordón.

Como se expuso anteriormente existe dificultad en obtener una geometría correcta en el cordón de soldadura, cuando la unión se realiza con dos cordones en posición vertical ascendente.

Como proceso comparativo a la soldadura en ángulo de aleaciones de aluminio, se efectuó un estudio sobre la presencia de defectos en soldaduras con aluminio comercial sin alear (Al 99.95%) tipo 1100, empleando soldadura MIG con aportación análoga al material base. Se realizaron uniones entre chapas de 12 mm y 6mm de espesor, empleando la posición horizontal plana y un único cordón de soldadura. Los principales defectos observados pueden asociarse a falta de fusión en la raíz, que puede alcanzar hasta 2 mm de profundidad y el mayor o menor grado de porosidad en la unión, como se pone de manifiesto en las macrosecciones reproducidas en las fotografías 57 a 60 (x 3).

Para finalizar el estudio de defectos presentes en soldadura MIG, debe considerarse la unión entre chapas finas a tope en 3 mm de espesor de aleación Al-Mg-Si 6005 con aporte ER4043 y posición vertical ascendente realizada con dos cordones de soldadura. La unión debería obtener completado el espesor a soldar con un solo cordón, no obstante, el empleo de un segundo cordón, para asegurar la no existencia de material de aportación, produce un cordón de excesivo sobreespesor, y elevada microporosidad en el segundo cordón, por causa ya expuesta anteriormente. En la fotografía 61 (x 7) se reproduce una macrosección de la unión.

Para espesores delgados de chapas en la gama 2-3 mm, se realizaron pruebas comparativas entre los procesos MIG, fotografía 62 para 2 mm y fotografía 63 en 3 mm. En estos espesores existe dificultad de obtener regularidad de forma en el cordón de soldadura, por lo que es preferible realizar la soldadura mediante el proceso TIG.

Como estudio de defectos producidos con la utilización del proceso TIG se utilizaron chapas de 2 mm de espesor de aleación Al-Mg-Si 6005, realizándose la soldadura a tope en posición vertical ascendente, empleándose aportación Al-Si ER4043, gas de protección argón y un único cordón de soldadura. En la fotografía 64 se muestran diferencias morfológicas en el material de aportación. Pudo verificarse que la fusión de las chapas es realizada correctamente y como defecto más significativo es de destacar la presencia de porosidad finamente distribuida o concentrada en grandes poros aislados. Las fotografías 65 a 68 (x 7) correspondientes a diferentes macrosecciones de las uniones soldadas, ponen de manifiesto diferentes formas de aparición de esta porosidad.

Como conclusión a este estudio de defectos, puede establecerse que englobados en defectos planares, asimilados a grietas, consideraremos las faltas de penetración en la raíz y las mordeduras, principalmente localizadas en el lado de cara de los cordones de soldadura y sobre ellos se realizará una evaluación de su severidad considerando el estado tensional a que se encuentran solicitados.

Defectos no planares, principalmente porosidad, serán evaluados según su dimensión máxima admisible y porcentaje de área, dentro de la soldadura en que se localizan.

No existe, según el estudio realizado y del cual se han recopilado en este trabajo los aspectos más interesantes, diferencias en cuanto a morfología de defectos, en la soldadura de las aleaciones Al-Mg-Si y Al-Mg.

Se incluyen, como Anexo a este estudio, algunas macrosecciones reales, que pueden considerarse representativas de defectos producidos al soldar aleaciones de aluminio.

Como es lógico pensar, para realizar este estudio se ha buscado premeditadamente la aparición de defectos y, para ello, se han alterado los parámetros correctos a aplicar en los procesos de soldadura. No se debe considerar, por tanto, que estos defectos se produzcan, en especial, los de mayor severidad, durante la fase normal de ejecución de las uniones soldadas con parámetros adecuados de soldadura. La aparición de defectos debe asociarse a utilización no adecuada de estos parámetros.

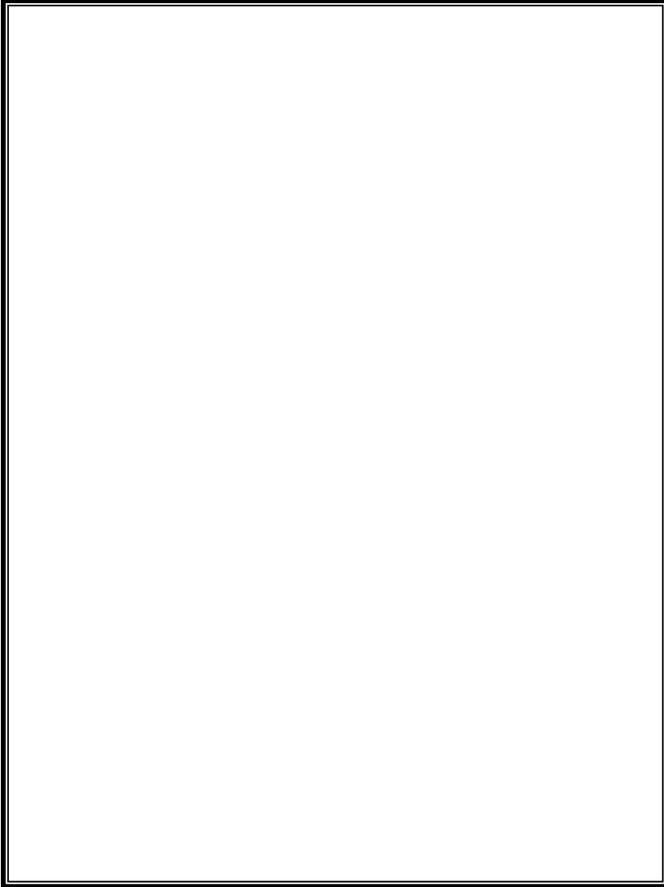
Bajo esta premisa, el objetivo de esta investigación es valorar mecánicamente la severidad del defecto producido, para un mayor conocimiento de su importancia en la seguridad del componente, donde se ubica el defecto.



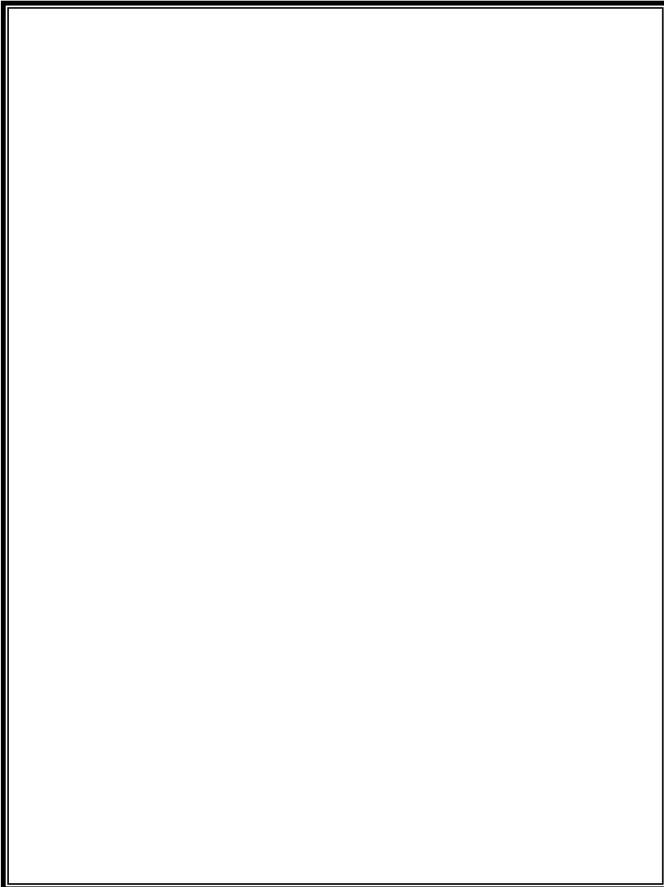
Fotografía 52



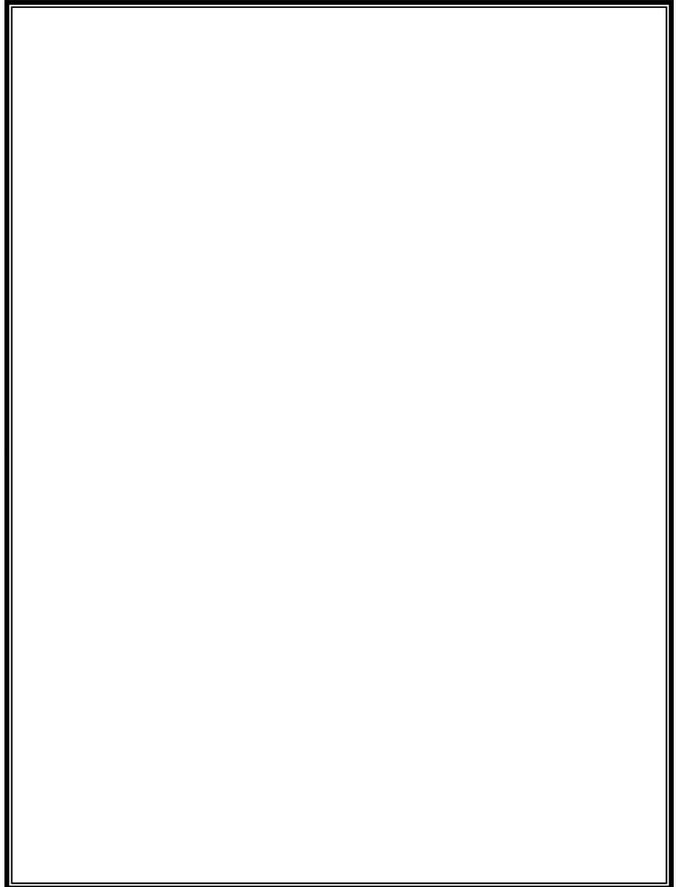
Fotografía 53



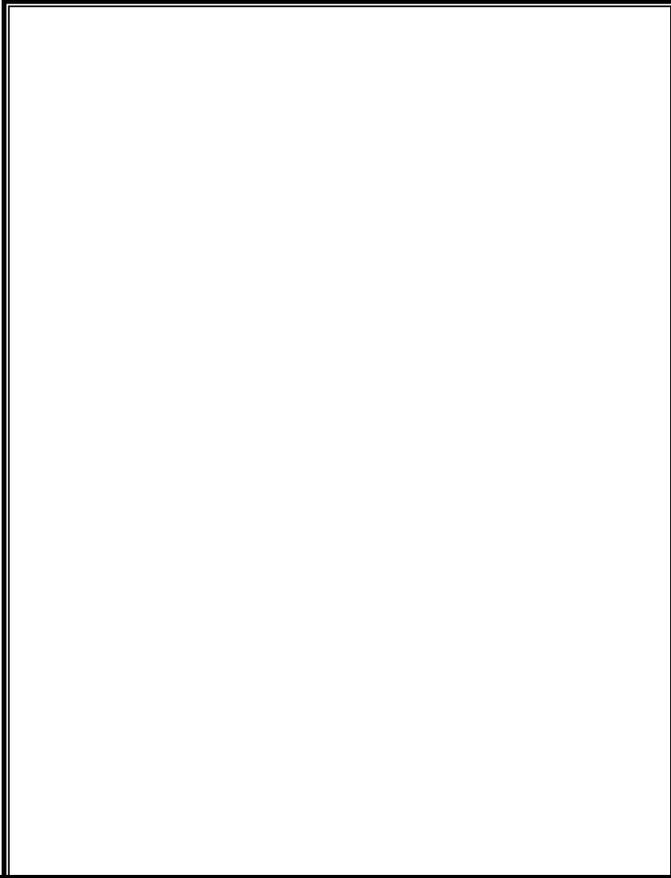
Fotografia 55



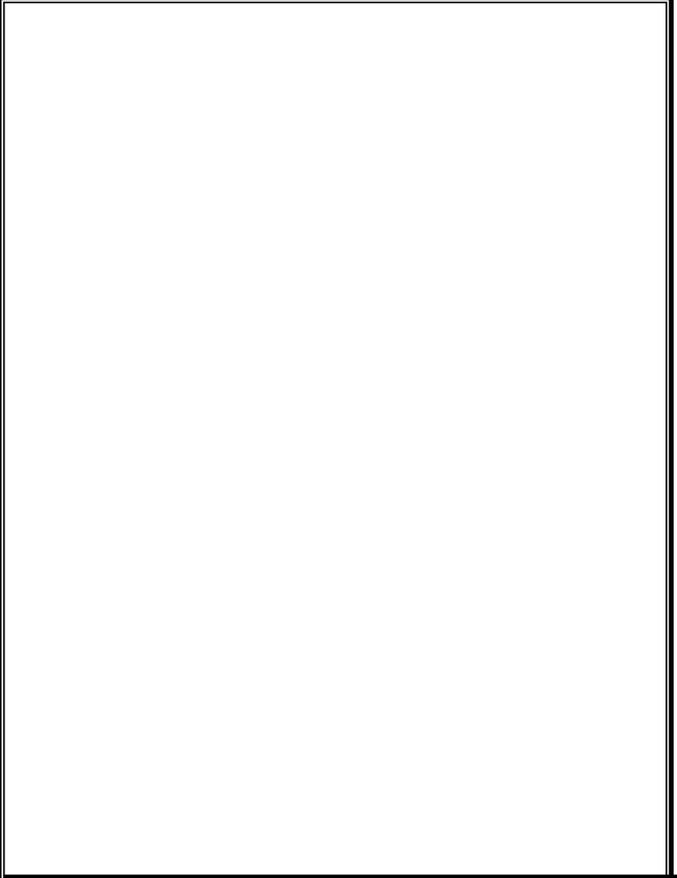
Fotografia 54



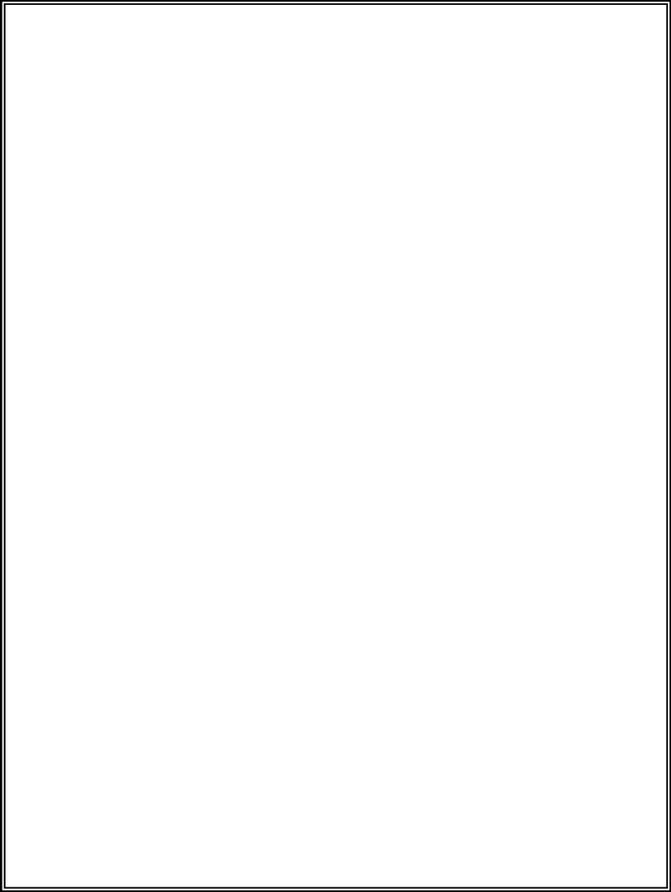
Fotografia 56



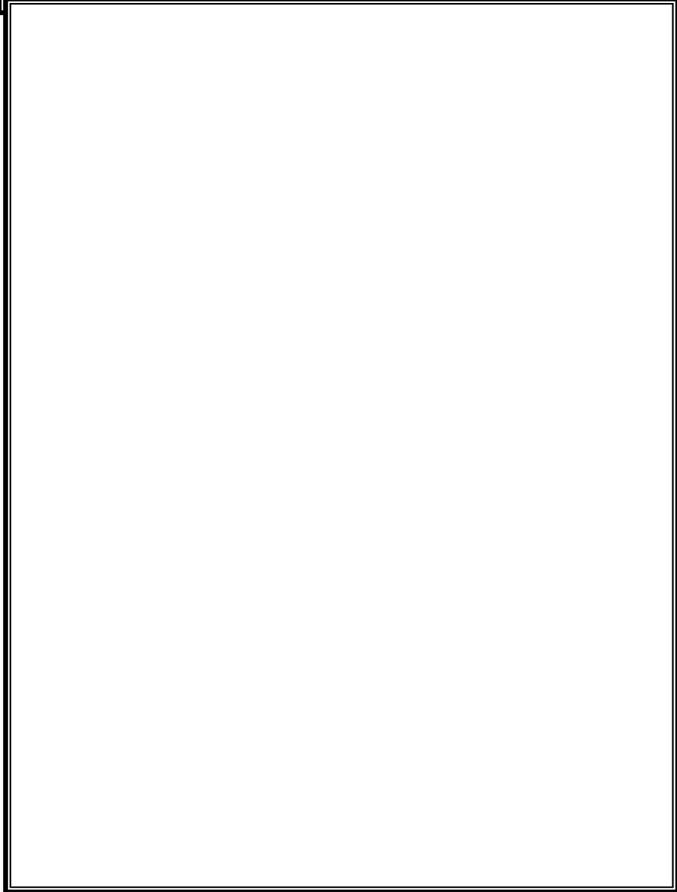
Fotografia 58



Fotografia 60



Fotografia 57



Fotografia 59



Fotografia 61





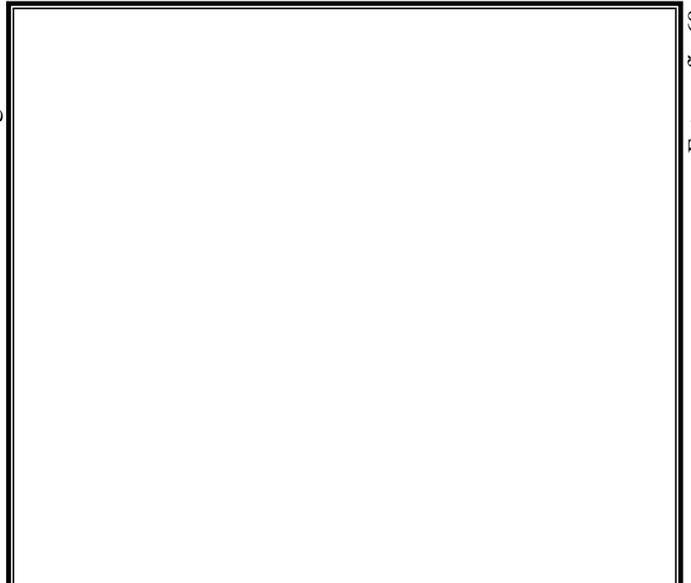
Fotografia 63



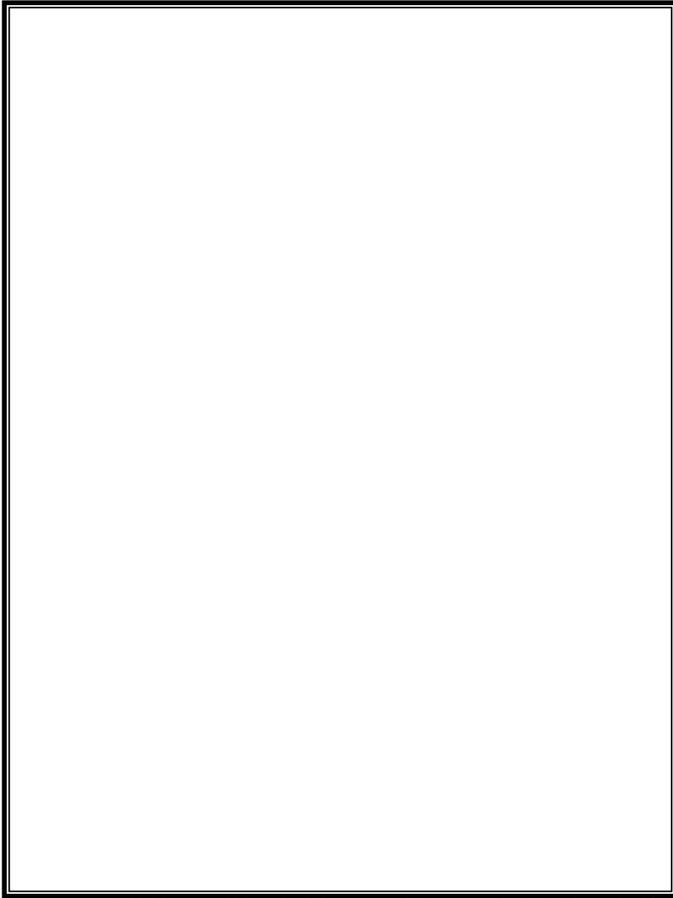
Fotografia 64



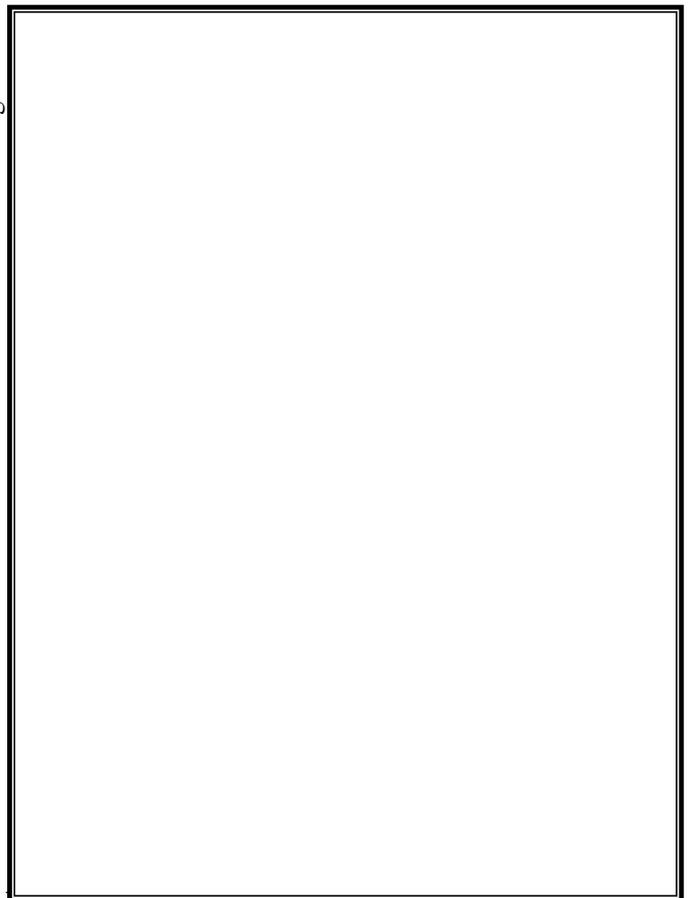
Fotografia 66



Fotografia 68



Fotografía 65



Fotografía 67

**EVALUACION DE DEFECTOS PRODUCIDOS AL SOLDAR  
ALEACIONES DE ALUMINIO PARA TRENES DE ALTA VELOCIDAD**



**VALORACIÓN DE DEFECTOS NO PLANARES**

---

|||

**FUNDACIÓN DOMINGO MARTÍNEZ:**  
***Ayudas a la Investigación Científica y Técnica. 2002-2003***

En la soldadura de las aleaciones de aluminio debe considerarse la porosidad como el defecto planar más importante, dado que con los procesos de soldadura empleados, debe descartarse la presencia de inclusiones de escoria, cuyo efecto de presentarse, por acumulación de alúmina, afectará con mayor severidad a la falta de fusión entre cordones o entre metal de aportación y base.

Se reproduce la valoración de defectos de porosidad establecida según la Norma EN 30042: 1994 comentada anteriormente para los niveles de calidad: Moderado (D), Intermedio (C) y elevado (B).

Límites de las imperfecciones			
3	Cavidad gaseosa	201	Para una longitud de 100 mm

			El termino "cavidad gaseosa" incluye: porosidad distribuida uniformemente, porosidad localizada, porosidad lineal y poro	D	C	B
4	Porosidad localizada	2011	El termino "cavidad gaseosa" incluye: porosidad distribuida uniformemente, porosidad localizada, porosidad lineal y poro	$A \leq 8s \text{ ó } 8a \text{ mm}^2$	$A \leq 4s \text{ ó } 4a \text{ mm}^2$	$A \leq 2s \text{ ó } 2a \text{ mm}^2$
		$d \leq 0.5s \text{ ó } 0.5a$ max.5.5mm		$d \leq 0.3s \text{ ó } 0.3a$ max.4.5mm	$d \leq 0.25s \text{ ó } 0.25a$ max.3.5 mm	
5	Porosidad distribuida uniformemente	2012		El área total de poros en el agrupamiento debe sumarse: una envolvente abarcando todos los poros o el círculo con un diámetro correspondiente al ancho de la soldadura.	$d \leq 0.5\text{mm} + 0.035s$ ó 0.035 a max.2mm	$d \leq 0.5\text{mm} + 0.02s$ ó 0.02 a max.1.5mm
6	Porosidad localizada (agrupada)	2013	El área de poros permitida será local.	$d \leq 0.5 \text{ mm} + 0.05s$ ó 0.05 a max.3 mm	$d \leq 0.5\text{mm} + .035s$ ó 0.035 a max.2mm	$d \leq 0.5\text{mm} + 0.02s$ ó 0.02 a max.1.5mm
7	Porosidad superficial (cavidad de gas visible)	2017	La posibilidad de enmascarar otras imperfecciones será tenida en consideración.	Para una longitud de 100 mm		
				$A \leq 2t \text{ mm}^2$ $d \leq 0.5\text{mm} + 0.035s$ ó 0.035 a max 2mm	$A \leq 1t \text{ mm}^2$ $d \leq 0.5\text{mm} + 0.02s$ ó 0.02 a max.1.5 mm	$A \leq 0.5t \text{ mm}^2$ $d \leq 0.5 \text{ mm} + 0.01s$ ó 0.01 a max.1mm

Estos valores máximos aceptables son considerados en uniones soldadas solicitadas estáticamente, no obstante, dada la escasa influencia de la porosidad en uniones soldadas solicitadas a fatiga, el criterio general de cálculo es considerar las uniones estáticas dentro de nivel de calidad C y para fatiga el nivel B

Con este criterio, el tamaño de la porosidad aceptable para determinaciones realizadas sobre las macrosecciones de las soldaduras, designando con "s" la penetración de las soldaduras a tope y con "a" la garganta real de las soldaduras en ángulo, será el siguiente:

### 1. Poro aislado

Tamaño de porosidad aceptable		
Nivel de calidad	Soldadura a Tope	Soldadura en ángulo
<b>D</b>	$\phi \leq 0.5s$ (máximo 5.5mm)	$\phi \leq 0.5a$
<b>C</b>	$\phi \leq 0.3s$ (máximo 4.5 mm)	$\phi \leq 0.3a$
<b>B</b>	$\phi \leq 0.25s$ (máximo 3.5 mm)	$\phi \leq 0.25a$

<b>Tamaño de la porosidad aceptable</b>			
<b>Espesor de la chapa</b>	<b>Nivel de calidad</b>	<b>Soldadura a tope (mm)</b>	<b>Soldadura en ángulo (*) (mm)</b>
6 mm	D	3	2.1
	C	1.8	1.3
	B	1.5	1.0
10mm	D	5	3.5
	C	3	2.1
	B	2.5	1.7
12 mm	D	5.5	4.1
	C	3.6	2.5
	B	3	2.1

(\*) Se ha considerado una garganta máxima del cordón de soldadura de valor 0.7 veces el espesor de material a soldar.

## 2. Porosidad distribuida uniformemente

<b>Nivel de calidad</b>	<b>Tamaño de porosidad aceptable</b>
<b>D</b>	$\phi \leq 0.5 \text{ mm} + 0.035 s$ (máximo 2 mm)
<b>C</b>	$\phi \leq 0.5 \text{ mm} + 0.02 s$ (máximo 1.5 mm)
<b>B</b>	$\phi \leq 0.5 \text{ mm} + 0.01 s$ (máximo 1 mm)

<b>Tamaño de la porosidad aceptable</b>			
<b>Espesor de la chapa</b>	<b>Nivel de calidad</b>	<b>Soldadura a tope (mm)</b>	<b>Soldadura en ángulo (*) (mm)</b>
6 mm	D	0.71	0.15
	C	0.62	0.08
	B	0.56	0.04
10mm	D	0.85	0.25
	C	0.7	0.14

	B	0.6	0.07
12 mm	D	0.92	0.30
	C	0.74	0.17
	B	0.62	0.08

Puede observarse según los resultados anteriores que en uniones entre chapas de 6 mm de espesor solicitadas estáticamente (nivel C), se aceptan poros aislados hasta 1.8 mm en uniones a tope y 1.3 mm en uniones en ángulo, que se reducen a 1.5 mm y 1.0 mm respectivamente si se solicitan a fatiga (nivel B).

Análogamente para espesores de chapa de 12mm, los valores máximos de porosidad aislada serán de 3.6 mm y 2.5mm para uniones a tope y en ángulo solicitadas estáticamente y 3 mm y 2.1 mm respectivamente en solicitaciones a fatiga de la unión.

El criterio general recogido en diferentes Normas, por ejemplo BS 7910:1999 es limitar la porosidad aislada a 1/4 del espesor a soldar en solicitaciones estáticas, lo que supondría adoptar, para espesores de 6 mm, el criterio de máximo diámetro de poro aceptable de 1.5 mm y para 12 mm de espesor de chapa de 3 mm, valores muy concordantes con los anteriores.

La utilización de PD6493 como criterio de evaluación de defectos no planos internos de porosidad queda establecida mediante el control radiográfico de las uniones, según el límite de porosidad, expresado en tanto por ciento, del área radiografiada. Para las soldaduras de aleaciones de aluminio se establece el valor de 3% para uniones solicitadas a fatiga con límite ( $2 \cdot 10^6$  ciclos) superior a  $20 \text{ N/mm}^2$  de intervalo de tensión operacional y el 5% para solicitaciones inferiores. Para solicitaciones estáticas se mantiene el nivel del 5% como porcentaje del área proyectada en la radiografía.

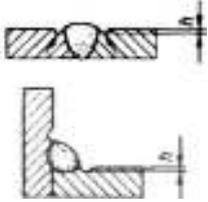
La valoración de otros defectos que pueden considerarse como no planares si son de muy pequeña importancia, tales como : mordeduras, exceso de sobreespesor, exceso de penetración, falta de metal de aportación o rechupes en raiz, se encuentra recopilada en tablas adjuntas. Con criterios modernos de evaluación de defectos, dada su importancia especialmente en el comportamiento a fatiga de la unión soldada, su valoración se establece como defectos planares abiertos a superficie.

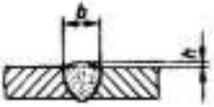
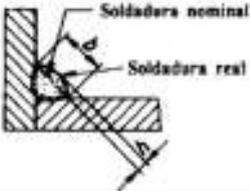
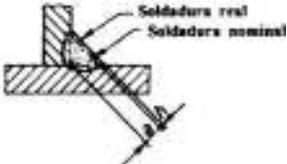
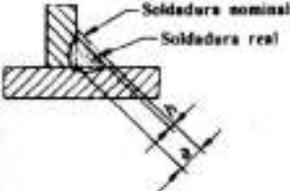
La falta de alineación, considerada como la desviación sobre la coincidencia de los ejes en el centro del espesor de las chapas a unir, al producir componentes tensionales adicionales en la unión, deberá valorarse para establecer la cuantificación del incremento de tensión sobre la tensión nominal de cálculo.

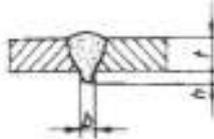
Para espesores de soldadura de 12 mm en el nivel de calidad B más elevado se aceptan desalineaciones de hasta 1.7 mm y en el nivel de calidad normal 2.3 mm, mientras que para 6 mm de espesor de material a soldar, se establece el límite en 1.4 y 1.1 mm respectivamente. La importancia de las desalineaciones de bordes sobre el comportamiento mecánico será considerada posteriormente.

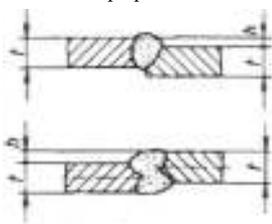
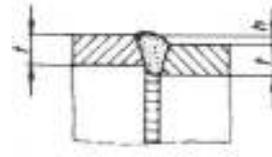
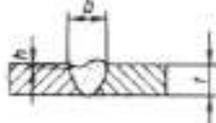
Con respecto a la profundidad aceptable de mordedura se estima, según Norma EA30042, en 1 mm, con carácter general, para espesores superiores a 10 mm en solicitaciones estáticas e imperfecciones cortas de longitud inferior a 25 mm por cada 100 mm de longitud de soldadura y debe ser evaluada en base al comportamiento tensional a que se encuentra solicitada la unión, especialmente en espesores delgados de material.

Se reproducen criterios generales del límite de imperfecciones no planares utilizadas como criterio básico en la inspección de uniones soldadas.

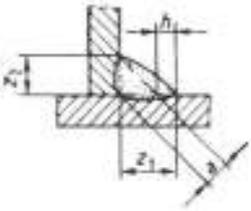
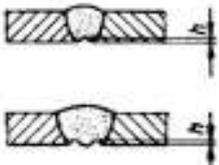
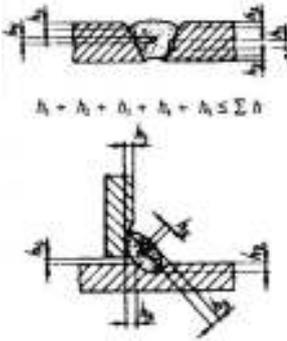
<b>Límites de imperfecciones</b>					
Designación de la imperfección	Referencia ISO 6520	Observaciones	Límites de las imperfecciones para los niveles de calidad		
			Moderado <b>D</b>	Intermedio <b>C</b>	Elevado <b>B</b>
Mordedura	5011 5012	Se requiere una transición gradual 	Imperfecciones largas:		
			$h \leq 0.6 \text{ mm}$	$h \leq 0.4 \text{ mm}$	$h \leq 0.2 \text{ mm}$
			Imperfecciones cortas:		
			$h \leq 1.5 \text{ mm}$	$h \leq 1 \text{ mm}$	$h \leq 0.5 \text{ mm}$
Exceso de	502	Se requiere una transición gradual	$h \leq 1.5 \text{ mm} + 0.2b$	$h \leq 1.5 \text{ mm} + 0.15b$	$h \leq 1.5 \text{ mm} + 0.1b$

sobreespesor <sup>1</sup>			max. 10 mm	max. 7 mm	max. 5 mm
Exceso de convexidad	503		$h \leq 1.5 \text{ mm} + 0.3 b$ max. 5 mm	$h \leq 1.5 \text{ mm} + 0.15 b$ max. 4 mm	$h \leq 1.5 \text{ mm} + 0.1 b$ max. 3 mm
Soldadura en ángulo con espesor real superior al valor nominal	-	Para muchas aplicaciones un espesor real superior al nominal puede no ser causa de rechazo 	$h \leq 1 \text{ mm} + 0.3 a$ max. 7 mm	$h \leq 1 \text{ mm} + 0.2 a$ max. 6 mm	$h \leq 1 \text{ mm} + 0.15 a$ max. 5 mm
Soldadura en ángulo con un espesor real inferior al valor nominal <sup>1</sup>	-	Una soldadura en ángulo con un espesor real aparentemente inferior al indicado, no debe ser considerada imperfección si el espesor real, compensado con una profundidad de penetración superior, cumple con el valor nominal. 	Imperfecciones largas: No admisible		
			Imperfecciones cortas:		
			$h \leq 0.3 a$ max. 2 mm	$h \leq 0.2 a$ max. 1.5 mm	$h \leq 0.1 a$ max. 1 mm

Límites de imperfecciones					
Designación de la imperfección	Referencia ISO 6520	Observaciones	Límites de las imperfecciones para los niveles de calidad		
			Moderado D	Intermedio C	Elevado B
Exceso de penetración	504		$h \leq 0.5 \text{ mm}$	$h \leq 4 \text{ mm}$	$h \leq 3 \text{ mm}$

Falta de alineación	507	<p>Los límites se refieren a desviaciones con respecto a la posición correcta. A menos que se especifique de otro modo. La posición correcta es aquella en que los ejes en el centro del espesor coinciden (véase además el capítulo I); t es el espesor más pequeño.</p>  <p>Fig. A - Chapas y soldaduras longitudinales</p>	$h \leq 0.5 \text{ mm} + 0.25t$ max.4mm	$h \leq 0.5\text{mm} + 0.15t$ max.3mm	$h \leq 0.5\text{mm} + 0.1t$ max.2.5mm			
			 <p>Fig. B - Soldaduras circunferenciales</p>	$h \leq 0.5 t$			max.4mm	max.3mm
Falta de metal de soldadura	511	<p>Se requiere una transición gradual</p> 	Imperfecciones largas: No admisible			Imperfecciones cortas:		
			$h \leq 0.2t$ max.2mm	$h \leq 0.1 t$ max.1.5 mm	$h \leq 0.05 t$ max. 1mm			

Límites de imperfecciones					
Designación de la imperfección	Referencia ISO 6520	Observaciones	Límites de las imperfecciones para los niveles de calidad		
			Moderado D	Intermedio C	Elevado B
Exceso de asimetría de la soldadura en ángulo	512	Se supone que no se ha estipulado expresamente una soldadura en ángulo asimétrica	$h \leq 3\text{mm} + 0.3a$	$h \leq 2\text{mm} + 0.25a$	$h \leq 1.5\text{mm} + 0.2a$

					
Rechupe de raíz	515	Se requiere una transición gradual	Imperfecciones largas: no admisible		
Contracción de la raíz	5013		$h \leq 0.2t$ max. 2mm	$h \leq 0.1t$ max. 1.5 mm	$h \leq 0.05t$ max. 1mm
Imperfecciones múltiples en una misma sección transversal	-	Para espesores $s \leq 10$ mm o $a \leq 10$ mm pueden ser necesarias consideraciones especiales.  $a + a_1 + a_2 + a_3 + a_4 \leq \Sigma a$ $b = b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5 \leq \Sigma b$	Altura máxima total de las imperfecciones cortas: $\Sigma h$		
			$0.3s$ o $0.3a$ max. 10 mm	$0.25s$ o $0.25a$ max. 10 mm	$0.2s$ o $0.2a$ max. 10 mm

**EVALUACIÓN DE DEFECTOS PRODUCIDOS AL SOLDAR ALEACIONES DE ALUMINIO PARA TRENES DE ALTA VELOCIDAD**

---

**FUNDACIÓN DOMINGO MARTÍNEZ:**  
*Ayudas a la Investigación Científica y Técnica. 2002-2003*

Para la valoración mecánica de los defectos presentes en las uniones soldadas de aleaciones de aluminio, se han tenido en cuenta los criterios establecidos en la norma BS 7910: 1999 “Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures” que recopila los criterios del PD 6493 (1980 y 1991) y los criterios R-6 en sus tres niveles de evaluación, considerados como los criterios más modernos en la estimación de la severidad de defectos en uniones soldadas, haciendo uso de los conceptos de la mecánica de la fractura.

El criterio de aceptación adoptado está basado en la consideración de la adecuación al servicio, « fitness for purpose », lo que lo diferencia fundamentalmente de los clásicos criterios aceptación - rechazo utilizados en control de calidad, donde los niveles de aceptación son tomados en forma general y generalmente con criterios conservadores para mantener la calidad en producción. Los criterios modernos evalúan los defectos en combinación con las propiedades mecánicas de los materiales y las solicitaciones a que están solicitadas las zonas donde se ubican y constituyen, por tanto, un verdadero criterio de « engineering critical assessment » (ECA). Resulta imposible, por tanto, evaluar un determinado defecto sin conocer realmente su localización y estado tensional a que se encuentra solicitado en el componente soldado, por lo que tres etapas básicas son seguidas para la toma de decisión de su rechazo/aceptación y, por tanto, la necesidad de su reparación posterior.

Estas etapas pueden resumirse en:

- a) Si el defecto no excede de los niveles establecidos por el control de calidad de producción, el defecto es aceptado y no se requieren acciones futuras.
- b) Si el defecto supera los límites anteriores y se han establecido previamente límites de aceptación en base a criterios ECA, para la combinación del material, proceso y consumibles de soldadura y tensiones de solicitación, el defecto será evaluado con estos criterios.
- c) De no existir los criterios anteriores, es necesario establecer bajo criterios ECA los límites de aceptación-rechazo, individualizados para los tipos de defectos más significativos. Es precisamente este criterio el que será seguido en este estudio y que podrá ser utilizado y ampliado posteriormente en las fases de diseño, fabricación y servicio de la estructura.

En base a lo expuesto anteriormente los defectos pueden clasificarse en tres grupos:

- ◇ Defectos planos:  
Grietas. Falta de fusión o de penetración. Mordeduras en cara o raíz (con dimensiones importantes). Concavidades y solapamientos.
- ◇ Defectos no planos:  
Porosidad. Inclusiones.
- ◇ Imperfecciones de forma.  
Desalineaciones. Imperfecciones en el perfil de soldadura.

La influencia de estos defectos será evaluada mecánicamente para los modos de fallo:

- ★ Por fractura y colapso plástico (estático)
- ★ Por fatiga (dinámico)

Para su análisis y método de evaluación pueden tomarse en consideración las directrices de la norma BS7910:1999 “Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures”, que constituye una versión actualizada del criterio PD 6493:1980 y revisado en 1991, incluyendo las consideraciones del método del doble concepto: dúctil-frágil recogido en el método de valoración de defectos R-6, ampliamente aplicado en la valoración de defectos de recipientes a presión.

No será considerada la propagación de los defectos existentes en las uniones soldadas por mecanismos de fragilización por hidrógeno, corrosión interna o externa, corrosión bajo tensión, creep, erosión o cavitación, aunque se consideran si su origen inicial es debido a estos mecanismos pero la propagación hasta rotura se realiza como consecuencia de su estado tensional. Únicamente la sollicitación mecánica de tipo estático o dinámico de las uniones soldadas será considerada en este estudio, al ser estas sollicitaciones las más importantes en el tipo de estructuras de aleaciones de aluminio consideradas en el campo ferroviario.

El análisis tensional de la zona con ubicación de defectos será evaluado como si se tratase de zona no defectuosa, es decir, el defecto será evaluado por su significación y no por incrementar la tensión a que está sollicitado el componente, con el único efecto de la desalineación de los bordes a soldar, que incrementa el estado tensional de la unión. La distribución de tensión puede ser linealizada a través del espesor y diferenciada entre tensión de membrana y tensión de flexión constituyendo ambas la “tensión primaria (P)” cuyo efecto es contribuir al colapso elástico y plástico del componente, para distinguirla de la “tensión secundaria (Q)” (fundamentalmente tensiones residuales en la soldadura) y que no contribuye al colapso plástico, por su consideración autoequilibrante en el espesor manteniendo la compatibilidad estructural, no obstante, su valor añadido ha sido incluido, como tensión aplicada, en el cálculo de los parámetros de fractura, como se expondrá posteriormente en el estudio práctico de defectos.

En la figura 1 se esquematizan los cuatro tipos de defectos planares más importantes a ser considerados: pasantes, internos, superficiales o localizados en las soldaduras en ángulo siendo caracterizados por su profundidad (a ó 2a) y su extensión (2c), en función del espesor de material (B).

En Anexo se recopilan los criterios utilizados para tener en cuenta la posible interacción entre defectos próximos, a fin de establecer las dimensiones reales del defecto a ser evaluado.

Finalmente en el cómputo de la tensión de sollicitación se incluyen los defectos de desalineaciones o discontinuidades en la soldadura, cuya magnitud se considera como “tensión de pico” (F) y es calculado en base a multiplicar la tensión de membrana por un factor de amplificación  $K_m$  en el caso de desalineaciones o por el factor  $K_t$  en el caso de proximidad del defecto a entallas geométricas o esquinas.

Las tensiones Primaria (P) y Secundaria (Q) pueden considerarse procedentes de tensiones medias de membrana ( $P_m$  y  $Q_m$ ) constantes en todo el espesor del material y tensiones de flexión ( $P_b$  y  $Q_b$ ) con valor variable a través del espesor.

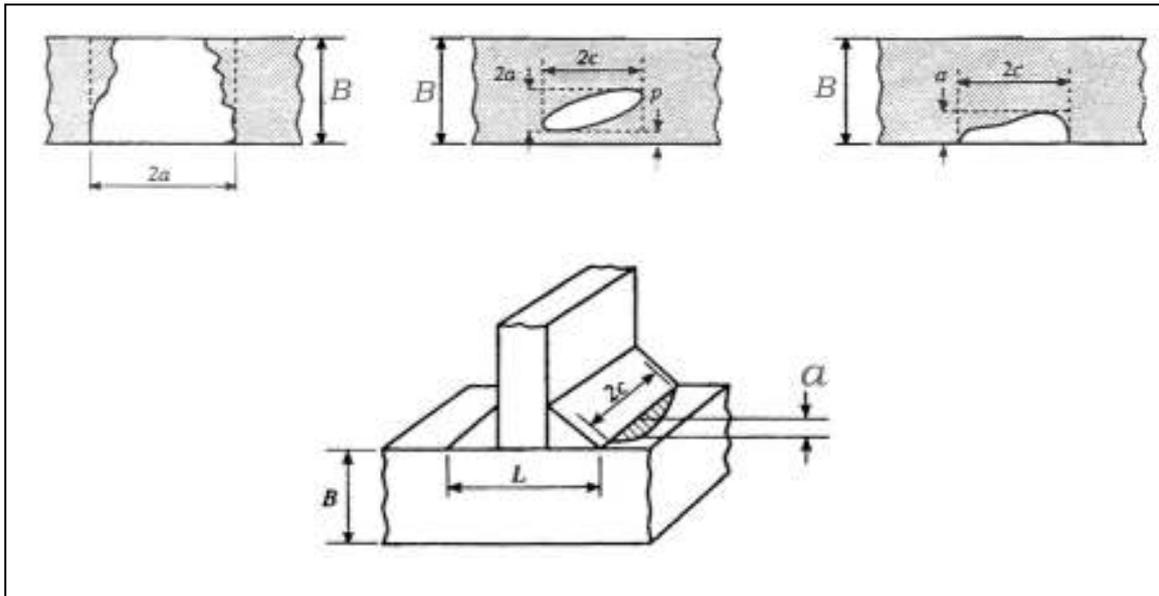


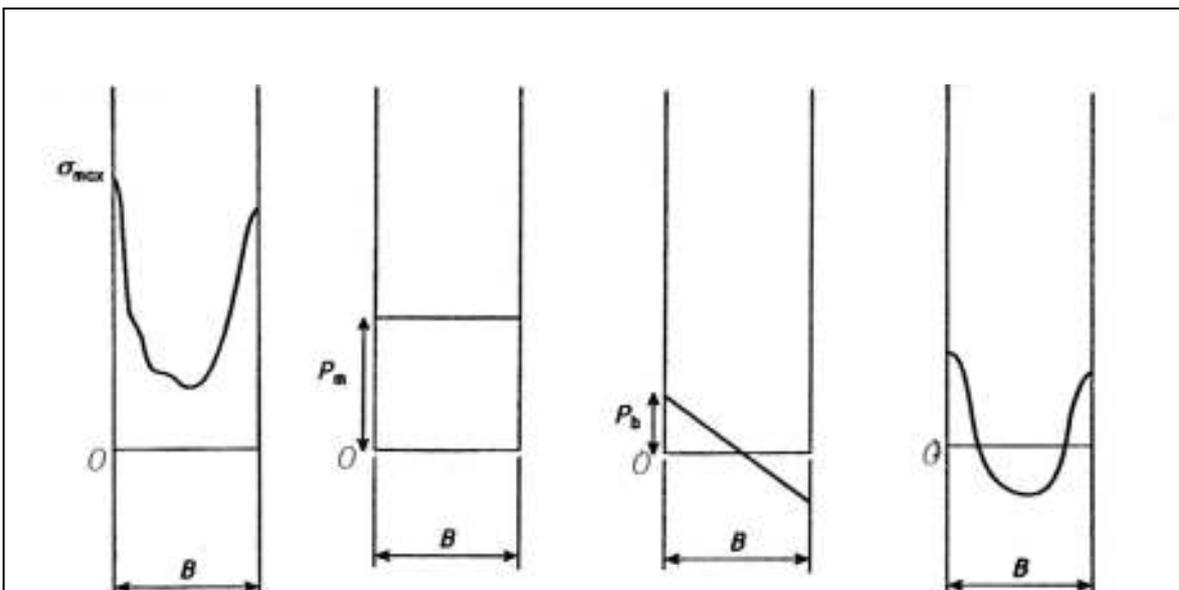
Figura 1

En la figura 2 se representa el esquema de linealización de las tensiones, en la zona del defecto, para obtener los componentes tensionales de membrana  $P_m$ ,  $Q_m$  y de flexión  $P_b$ ,  $Q_b$ .

$$P_m, Q_m = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{2} \quad \text{y} \quad P_b, Q_b = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$$

Las características mecánicas a tracción del material necesarias para el estudio son: Límite elástico 0.2% ( $\sigma_y$ ), resistencia a la tracción ( $\sigma_u$ ), módulo de elasticidad ( $E$ ), y coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) determinadas a la temperatura de servicio. Para la zona afectada térmicamente por la soldadura se asumirá que sus propiedades son las más bajas entre el material base adyacente y las correspondientes al metal de soldadura. Los parámetros a considerar para la aplicación de la mecánica de la fractura serán el factor de intensidad de tensión ( $K$ ) y el desplazamiento en la abertura de grieta (CTOD- $\delta$ ) o la integral  $J$ . La relación entre  $K_{\text{material}}$  y  $J_{\text{material}}$  puede establecerse mediante:

$$K_{\text{material}}^2 = \frac{E \cdot J_{\text{material}}}{1 - \nu^2}$$

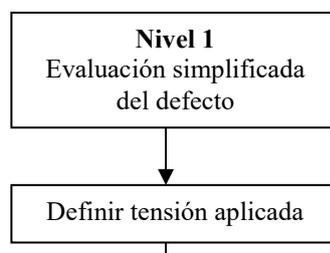


Para la evaluación de los defectos pueden emplearse tres métodos, según el grado de conocimiento de las propiedades del material donde se ubica el defecto: los métodos son denominados Nivel 1, Nivel 2 y Nivel 3 y su esquema de actuación se expresa como diagrama de flujo.

Cada uno de ellos se representa por un diagrama de fallo FAD (Failure Assessment Diagram) basado en los principios de la mecánica de la fractura para su aplicación.

Las características fundamentales para la aplicación de cada uno de ellos pueden resumirse en los siguientes términos:

### **EVALUACIÓN DE DEFECTOS SEGÚN NIVEL 1: EVALUACIÓN SIMPLIFICADA**



En este Nivel 1 se realiza una conservadora utilización de los factores utilizados: tensión aplicada, tensiones residuales presentes y tenacidad a la fractura del material, dado que su empleo es recomendado cuando no se dispone de datos fiables, procedentes de verificación en laboratorio. Puede ser utilizado considerando como curva de valoración FAD, el rectángulo representado en la figura 3. En el eje de abscisas se representa el parámetro  $S_r$  calculado como el cociente entre la tensión de referencia aplicada y existente en la zona del defecto y la resistencia del flujo del material, considerada como el valor medio entre su límite elástico  $\sigma_y$  y su resistencia a la tracción  $\sigma_u$ . Puede observarse que su valor máximo para aceptación de defectos es 0.8 desde el punto de vista de colapso plástico. En el eje de ordenadas del diagrama FAD se representa el valor  $K_r$  ó  $\sqrt{\delta_r}$ , parámetros determinados como la relación entre el factor

de intensidad de tensión aplicado a la zona con defecto  $K_I$  y el valor de tenacidad a la fractura del material  $K_{material}$  o bien la raíz cuadrada del CTOD aplicado al CTOD considerado para el material donde se ubica el defecto.

Su valor no puede superar  $1/\sqrt{2} = 0.707$  para considerar el defecto aceptable desde la consideración de propagación elástica del defecto. Por tanto, según el diagrama de flujo correspondiente al Nivel 1, determinados los parámetros  $S_r$ ,  $K_r$  ó  $\sqrt{\delta_r}$ , correspondientes al defecto, se toman como coordenadas para su representación sobre el diagrama de FAD. Si el punto representativo se sitúa en el interior del diagrama, el defecto se considera aceptable.

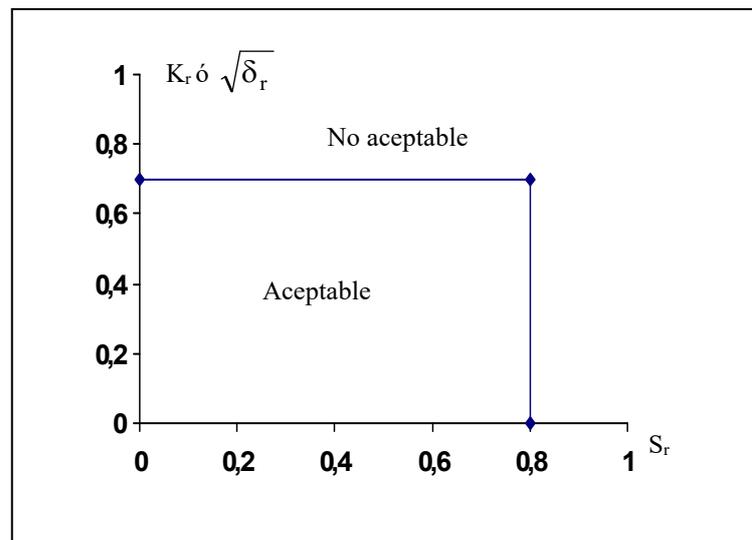


Figura 3. Diagrama FAD. Nivel 1

Para su aplicación debe utilizarse la tensión máxima de tracción existente en la zona del defecto  $\sigma_{max}$ , como suma de los valores de los componentes de la tensión (membrana y flexión). Si sólo se considera la tensión de membrana  $S_{nominal}$ , se estimará:

$$\sigma_{max} = K_t \cdot S_{nominal} + (K_m - 1) \cdot S_{nominal} + Q$$

y si se consideran la tensión de membrana y la de flexión

$$\sigma_{max} = K_{tm} \cdot P_m + K_{tb} [P_b + (K_m - 1) \cdot P_m] + Q$$

Con respecto a las tensiones residuales presentes en una soldadura, debe considerarse que estas tensiones en sentido longitudinal pueden alcanzar el valor del límite elástico del material a temperatura ambiente, lo que permite su consideración como tensión de membrana constante  $Q_m$ . Para defectos situados en planos perpendiculares a la dirección de soldadura, se considera el valor del límite elástico del material donde está situado el defecto, mientras que para defectos paralelos a la dirección de soldadura, sometidos a tensiones residuales perpendiculares al cordón, el valor del límite elástico será el menor

del correspondiente al metal base o al metal de aportación. En uniones sometidas a tratamiento térmico post-soldadura los valores máximos de las tensiones residuales se considerarán generalmente reducidos a cero o como máximo el 30% o 20% de los límites elásticos considerados anteriormente.

El factor de intensidad de tensión aplicado  $K_I$  se determina mediante:

$$K_I = Y \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

donde:

$$(Y \cdot \sigma) = M \cdot f_w \cdot M_m \cdot \sigma_{\text{máxima aplicada}}$$

siendo:

$M$  y  $f_w$  factores de corrección por pandeo y ancho finito de los elementos

$M_m$  : factor de intensificación de tensión.

$a$ : profundidad de grieta en defectos superficiales o semiprofundidad en defectos internos

Esta ecuación es análoga en concepto, aunque diferente en apariencia, de la clásica publicación de Newman y Raju, incluida en la primera versión del PD6493 y soluciones específicas para la determinación del factor de intensidad  $K_I$  en diferentes componentes son incluidas en el Anexo de este estudio.

El valor de la Relación de Fractura  $K_r$ , que constituye el valor en el eje de coordenadas de la curva FAD, se determinará entre el factor de intensidad aplicado  $K_I$ , en función de la sollicitación tensional nominal aplicada al elemento con defecto calculado mediante la formulación anterior y el valor de la tenacidad a la fractura del material  $K_{\text{material}}$ .

$$K_r = \frac{K_I}{K_{\text{material}}}$$

El valor de la relación de fractura, basada en el CTOD ( $\delta_r$ ) puede ser determinado mediante:

$$\sqrt{\delta_r} = \sqrt{\frac{\delta_{\text{aplicado}}}{\delta_{\text{material}}}}$$

Donde  $\delta_{\text{aplicado}}$  se determina a partir del valor  $K_I$ , según las expresiones:

$$\delta_I = \frac{K_I^2}{\sigma_y \cdot E} \text{ para aleaciones de aluminio donde } \frac{\sigma_{\text{máxima}}}{\sigma_y} \leq 0.5$$

$$\delta_I = \frac{K_I^2}{\sigma_y \cdot E} \left( \frac{\sigma_y}{\sigma_{\text{máxima}}} \right)^2 \left( \frac{\sigma_{\text{máxima}}}{\sigma_y} - 0.25 \right) \text{ para aleaciones con } \frac{\sigma_{\text{máxima}}}{\sigma_y} > 0.5$$

Estas expresiones proceden del estudio experimental realizado con diferentes experimentos de componentes con defectos, para obtener la “Curva de Diseño” incluida en la primera versión del PD6493 y reproducida en la figura adjunta 4. En ella puede observarse que la curva determina un parámetro C, que toma los siguientes valores:

1. Para bajos niveles de sollicitación  $\left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \leq 0.5\right)$ :

$$\text{Toma un valor proporcional a: } \frac{1}{\left(\frac{\sigma}{\sigma_y}\right)^2}$$

2. Para valores de tensión elevados  $\left(\frac{\sigma}{\sigma_y}\right) > 0.5$ :

$$\text{Resulta proporcional a: } \frac{1}{\left(\frac{\sigma}{\sigma_y} - 0.25\right)}$$

Mediante esta curva de diseño puede obtenerse el “Parámetro de defecto máximo tolerable  $\bar{a}_m$ ” en base a los criterios  $K_{IC}$  ( $K_{\text{material}}$ ) o  $\delta_{\text{crítico}}$  (CTOD del material), que podrá ser comparado con el correspondiente parámetro equivalente de defecto  $\bar{a}$ , como se expondrá posteriormente.

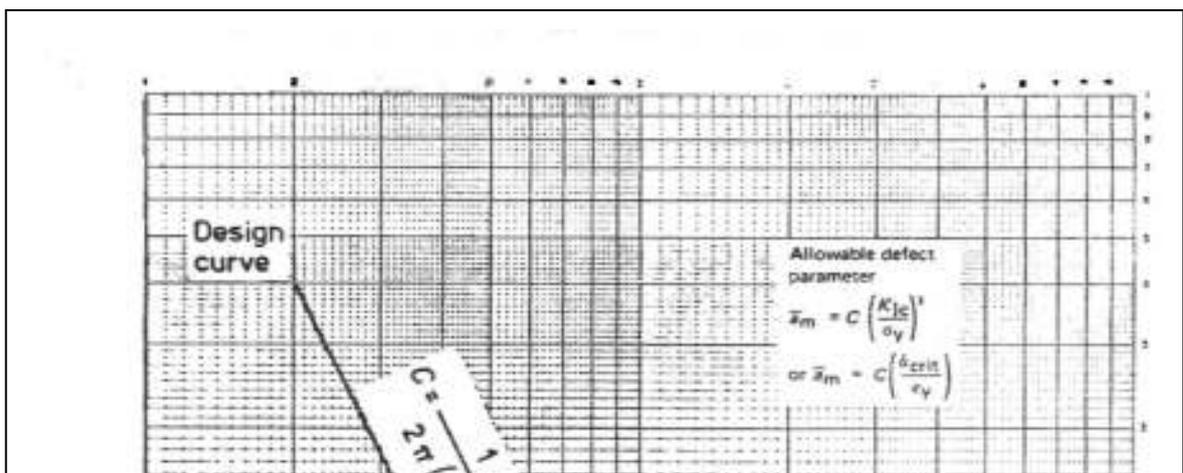
El valor de la Relación de Esfuerzo  $S_r$ , que se corresponde con el valor correspondiente al eje de abscisas en el Diagrama FAD, representativo del defecto se calcula mediante:

$$S_r = \frac{\sigma_{\text{referencia}}}{\sigma_{\text{flujo}}}$$

siendo:

$$\sigma_{\text{flujo}} = \frac{1}{2}(\sigma_y + \sigma_u)$$

con valor máximo de  $1.2 \sigma_y$  y donde  $\sigma_{\text{referencia}}$  corresponde a la tensión aplicada en la sección neta del defecto. En Anexo se incluyen soluciones para su cálculo en determinadas aplicaciones.



Un procedimiento gráfico alternativo para estimación de los tamaños aceptables de defectos, está basado en la determinación del “parámetro equivalente de defecto  $\bar{a}$ ” definido como la semilongitud de un defecto pasante a través del espesor de una placa infinita sometida a una sollicitación de tracción remota.

Este parámetro sirve para comparar la severidad entre diferentes morfologías de defectos, al permitir su normalización a un defecto pasante.

El método gráfico utilizado está basado en comparar el parámetro equivalente del defecto  $\bar{a}$ , con el calculado como máximo defecto tolerable  $\bar{a}_m$ , en función de los parámetros de mecánica de la fractura del material.

$$\bar{a}_m = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{k_{\text{material}}}{\sigma_{\text{máxima}}} \right)^2$$

$$\bar{a}_m = \frac{\delta_{\text{material}} \cdot E}{2\pi \left( \frac{\sigma_{\text{max}}}{\sigma_y} \right)^2 \cdot \sigma_y} \text{ para aleaciones de aluminio con } \sigma_{\text{max}}/\sigma_y \leq 0.5$$

$$\bar{a}_m = \frac{\delta_{\text{material}} \cdot E}{2\pi \left( \frac{\sigma_{\text{max}} - 0.25}{\sigma_y} \right)^2 \cdot \sigma_y} \text{ para aleaciones de aluminio con } \sigma_{\text{max}}/\sigma_y > 0.5$$

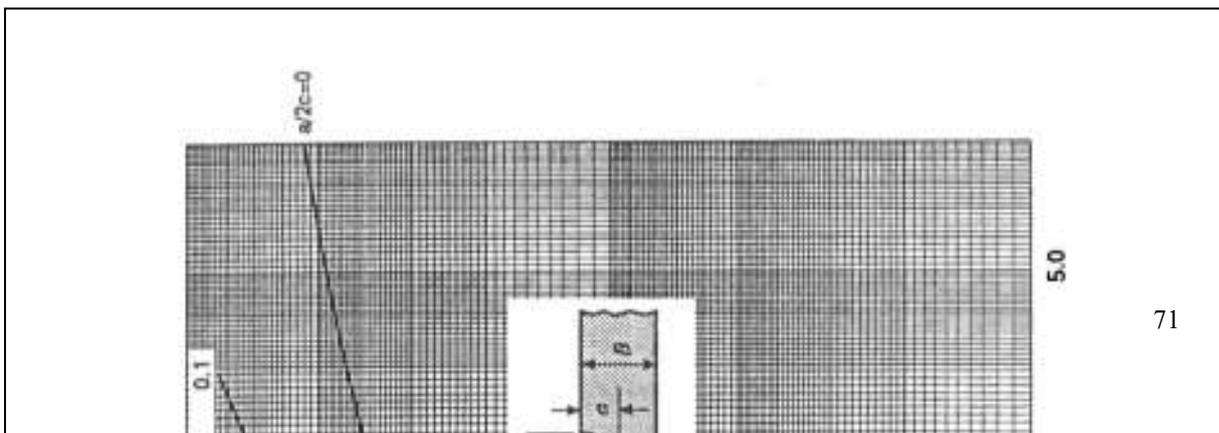
Cuando el componente en cuya soldadura se localiza el defecto tenga un ancho finito W y el valor calculado de  $\bar{a}_m$  exceda 1/20 del ancho total, el valor  $\bar{a}_m$  calculado se multiplicará por el factor de corrección :

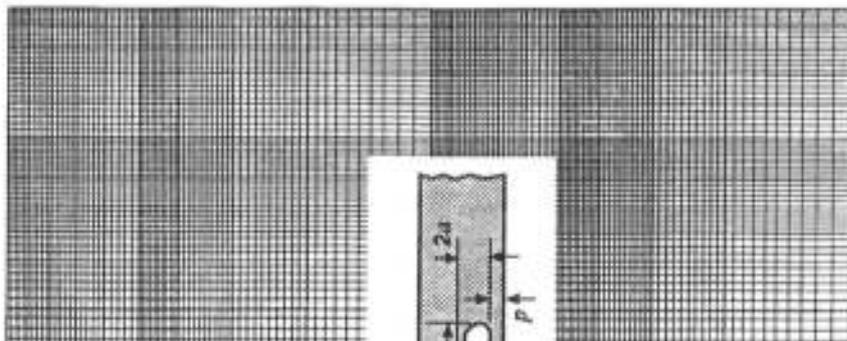
$$\frac{1}{\left( \frac{2\bar{a}_m}{w} \right) + 1}$$

En la figura 5 se muestra el gráfico utilizado para la normalización y evaluación, para defectos superficiales; en función de los parámetros del defecto:  $a/B$  y  $a/2c$ , se determina  $\frac{\bar{a}}{B}$  y, por tanto,  $\bar{a}$ , al ser B el espesor del material.

Análogamente en la figura 6, se reproduce el gráfico para normalización de defectos internos, donde tiene importancia el ligamento residual p, y en función de  $\frac{a}{(p+a)}$  y  $\frac{a}{2c}$ , se determina  $\frac{\bar{a}}{2(p+a)}$  y, por tanto, el parámetro equivalente del defecto  $\bar{a}$ .

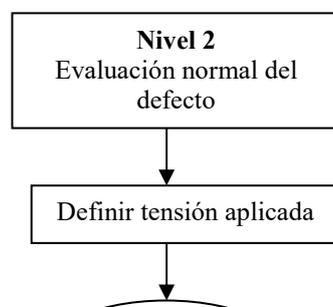
Lógicamente del defecto será aceptable si el parámetro equivalente de defecto  $\bar{a}$  resulta inferior al valor máximo tolerable  $\bar{a}_m$ .





## **EVALUACIÓN DE DEFECTOS SEGÚN NIVEL 2**

Constituye el método más generalizado de valoración y su diagrama de flujo para actuación se representa en el esquema adjunto.



Con respecto a lo expuesto para el Nivel 1, se introducen los cambios siguientes :

- ✧ La curva de valoración FAD es diferente y el corte vertical de abcisas denominado  $L_r$  se produce a un valor:

$$L_r = L_{r\text{maximo}} = \frac{(\sigma_y + \sigma_u)}{(2\sigma_y)}$$

La ecuación FAD se establece mediante :

$$\sqrt{\delta_r} \text{ ó } K_r = (1 - 0.14 L_r^2) [0.3 + 0.7 \exp(-0.65 \cdot L_r^6)]$$

y por tanto, no requiere datos específicos del comportamiento tensión-deformación del material con presencia de defecto, figura 7.

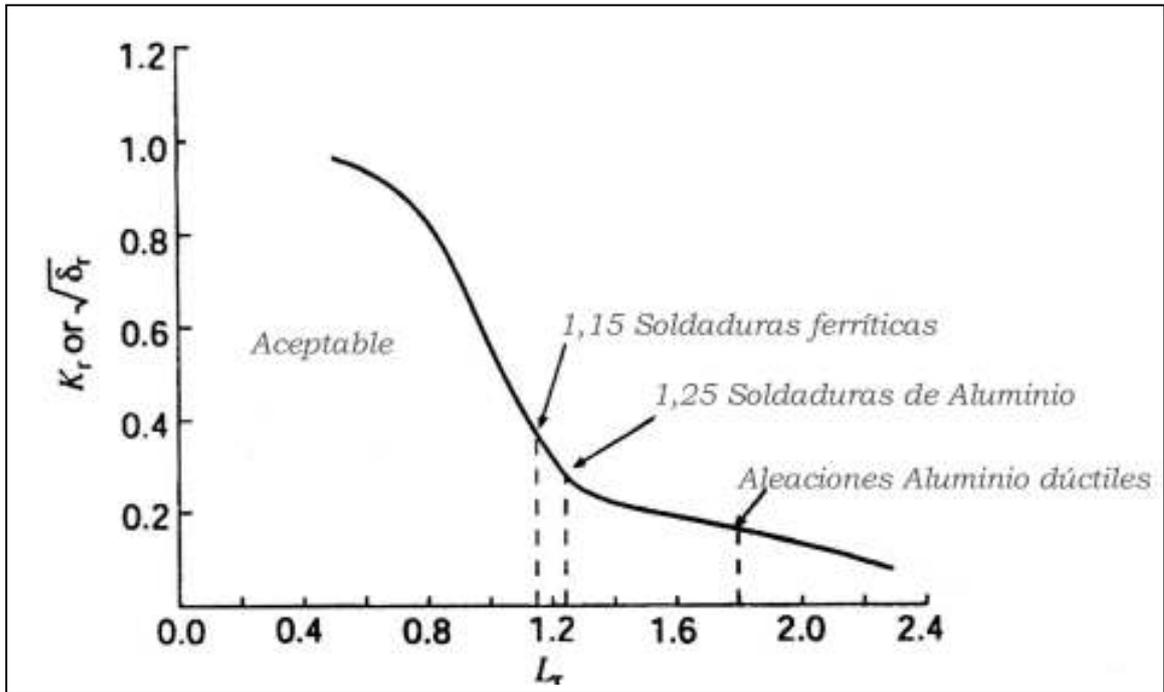


Figura 7

- ✧ El tratamiento de defectos ubicados fundamentalmente dentro de la zona afectada térmicamente por la soldadura es realizado siguiendo el criterio anterior.
  
- ✧ Para defectos en el material base o el material de aportación, donde es posible disponer de la curva tensión deformación del material, puede emplearse una curva FAD específica, figura 8, definida por la ecuación:

$$\sqrt{\delta_r} \text{ ó } K_r = \left( \frac{E \cdot \varepsilon_{\text{referencia}}}{L_r \cdot \sigma_y} + \frac{L_r^3 \cdot \sigma_y}{2 \cdot E \cdot \varepsilon_{\text{referencia}}} \right)^{-0.5}$$

donde  $\epsilon_{\text{referencia}}$  es la deformación verdadera:

$$[\epsilon_{\text{verdadera}} = \ln(1 + \epsilon_{\text{convencional}})]$$

obtenida en el ensayo de tracción uniaxial a la tensión verdadera  $L_r \cdot \sigma_y$ .

La tensión verdadera se obtiene mediante:

$$[\sigma_{\text{verdadera}} = (1 + \epsilon_{\text{convencional}}) \cdot \sigma_{\text{convencional}}]$$

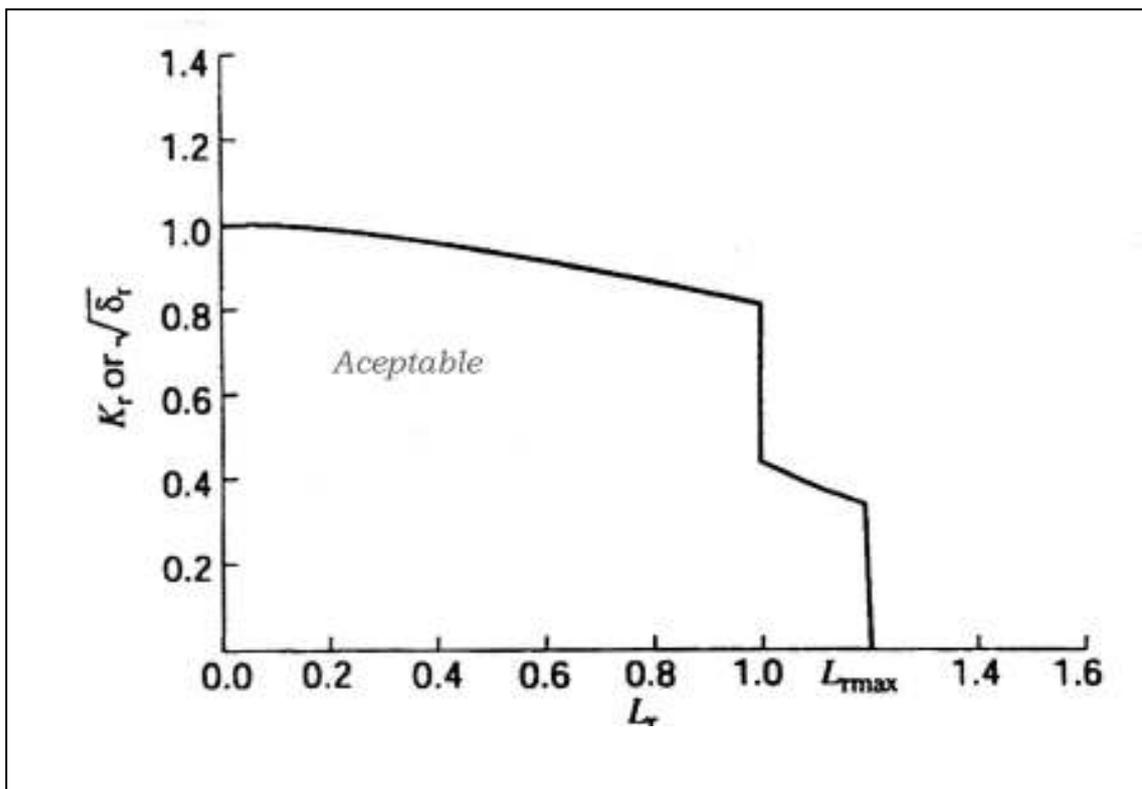


Figura 8

✧ La relación de fractura  $K_r$  es obtenida análogamente al Nivel 1 como:

$$K_r = \frac{K_I}{K_{\text{material}}},$$

donde:

$$K_I = Y \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

y el valor  $(Y \cdot \sigma)$  puede ser descompuesto en sus tensiones primaria y secundaria:

$$Y \cdot \sigma = (Y \cdot \sigma)_p + (Y \cdot \sigma)_s,$$

calculándose mediante :

$$(Y \cdot \sigma)_p = M \cdot f_w \cdot [K_{tm} \cdot M_{Km} \cdot M_m \cdot P_m + K_{tb} \cdot M_{Kb} \cdot M_b [P_b + (K_m - 1)P_m]]$$

$$(Y \cdot \sigma)_s = M_m Q_m + M_b Q_b$$

cuyos parámetros para las diferentes configuraciones de defectos que permiten un cálculo simplificado se incluyen tabulados en Anexo.

- ✧ Si existen tensiones secundarias, un factor de corrección por plasticidad «  $\rho$  » debe introducirse en el cálculo de  $K_r$ , para tener en cuenta la interacción entre las tensiones primarias y secundarias, resultando:

$$K_r = \frac{K_I}{K_{mat}} + \rho$$

El efecto de este factor «  $\rho$  » será estudiado en la resolución de la evaluación de defectos reales.

- ✧ Con respecto a la relación de fractura basada en el CTOD,

$$\sqrt{\delta_r} = \sqrt{\frac{\delta_I}{\delta_{material}}}$$

el CTOD aplicado  $\delta_I$  puede ser calculado a partir de  $K_I$  mediante:

$$\delta_I = \frac{K_I^2}{X \cdot \sigma_y \cdot E'}$$

siendo:

$$E' = \frac{E}{(1 - \nu^2)}$$

y el coeficiente X un valor variable entre 1 y 2 dependiendo de la capacidad de endurecimiento por deformación del material y generalmente tomado como X=1, de no disponer de datos específicos.

- ✧ Análogamente a lo expuesto para  $K_r$ , se establece:

$$\sqrt{\delta_r} = \sqrt{\frac{\delta_I}{\delta_{material}}} + \rho$$

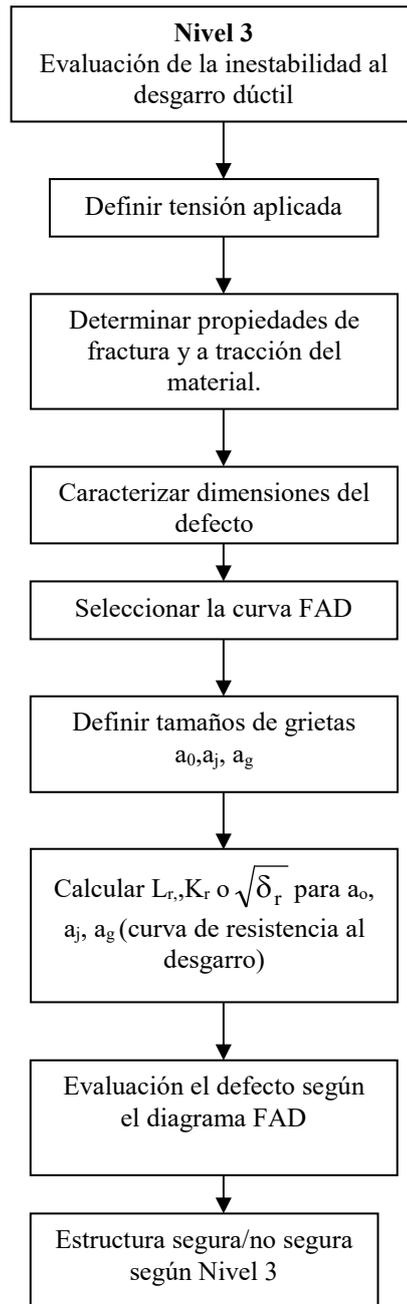
- ✧ El valor  $L_r$  correspondiente al punto del eje de abscisas, que representa el defecto, es determinado mediante :

$$L_r = \frac{\sigma_{\text{referencia}}}{\sigma_y}$$

Indicándose como  $\sigma_{\text{referencia}}$  la tensión en la sección neta del defecto, cuya formulación se recopila en el Anexo para varias geometrías de defectos.

### **EVALUACIÓN DE DEFECTOS SEGÚN NIVEL 3**

El nivel 3 de evaluación de defectos presupone la existencia de desgarro dúctil en su propagación y es utilizado en investigaciones sobre la evolución de defectos en el transcurso del tiempo. Su metodología de trabajo se resume en el diagrama de flujo adjunto.



Se diferencia básicamente del Nivel 2 expuesto en utilizar criterios basados en la curva de resistencia del material a la propagación de grieta y en hacer uso de propiedades del material deducidas de la integral J.

El nivel 3 supone una modificación del Nivel 2 y es utilizado en materiales dúctiles que presentan una estabilidad durante las sucesivas fases de incremento de la grieta hasta alcanzar la rotura, no presupone, por tanto, rotura frágil del material. El análisis más simple es realizado mediante la utilización de las curvas FAD, genéricas

correspondientes Nivel 2, o utilizando las curvas específicas para el material objeto de estudio de este nivel. Pueden utilizarse las curvas determinadas en el ensayo de la integral J en los campos elástico y elasto-plástico para la estructura con defectos bajo diferentes hipótesis de cargas aplicadas, lo que supone diferentes valores de  $L_r$ , obteniéndose una curva FAD de ecuación :

$$K_r = \sqrt{\frac{J_e}{J}} \text{ hasta } L_r \leq L_{r\text{maxima}}$$

Actualmente considerando la dificultad de obtener resultados concretos de  $J_{\text{material}}$  en las diferentes zonas de la unión soldada, sometidas, por otra parte, a tensiones residuales muy variables, lo que dificulta la obtención de curvas FAD específicas de ellas necesarias para aplicar el Nivel 3 de evaluación, su utilización es restringida a aplicaciones académicas y no es utilizado como método práctico de evaluación de defectos, por lo que no profundizaremos más en su desarrollo.