

TABLA DE CONTENIDO

Dedicatoria	I
Agradecimientos	III
Resumen	V
Resum	VII
Abstract	IX
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. ANTECEDENTES	3
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	6
1.3. OBJETIVOS	9
1.3.1. Objetivo General.....	9
1.3.2. Objetivos Específicos.....	10
1.4. APORTACIONES DE LA TESIS	11
1.5. LIMITACIONES	12
2. PANORAMA CIENTÍFICO	16
2.1. ALEACIONES DE ALUMINIO	16
2.1.1. Familias de aleaciones de aluminio de forja.....	17
2.1.2. Mecanismos de endurecimiento de las aleaciones de aluminio.....	19
2.1.2.1. Endurecimiento por precipitación.....	24
2.1.2.2. Endurecimiento por deformación.....	28
2.1.2.3. Endurecimiento por afino de grano o sub-grano.....	29
2.1.2.4. Endurecimiento por constituyentes de segunda fase..	30
2.1.2.5. Endurecimiento por solución sólida.....	32

2.2. ALEACIONES DE ALUMINIO DE FORJA DE LA SERIE 6XXX.....	33
2.2.1. Aleaciones de aluminio de la serie 6XXX de baja resistencia..	35
2.2.2. Aleaciones de aluminio de la serie 6XXX de media/alta resistencia.....	36
2.2.3. Elementos de aleación en las aleaciones de aluminio de la serie 6XXX.....	36
2.3. SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN (FSW).....	38
2.3.1. Descripción del proceso FSW.....	40
2.3.2. Parámetros del proceso FSW.....	47
2.3.2.1. Velocidad de rotación de la herramienta y velocidad de soldeo.....	47
2.3.2.2. Relación de soldeo (WPR, <i>Weld Pitch Ratio</i>).....	50
2.3.2.3. Fuerzas de la FSW.....	55
2.3.2.4. Herramienta de FSW.....	57
2.3.2.5. Ángulo de inclinación de la herramienta.....	64
2.3.3. Zonas de la soldadura por fricción-agitación (FSW).....	69
2.3.3.1. Clasificación de Threadgill.....	69
2.3.3.2. Clasificación de Arbegast.....	71
2.3.4. Defectología o imperfecciones en el proceso FSW y criterios de aceptación.....	72
2.4. SOLDABILIDAD DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO DE LA SERIE 6XXX A TRAVÉS DEL PROCESO FSW.....	86
3. PLANIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	94
3.1. FASE I. SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL METAL BASE....	96
3.2. FASE II. PARÁMETROS DE PROCESADO FSW Y FABRICACIÓN	99

DE LAS SOLDADURAS POR FRICCIÓN-AGITACIÓN (FSW).....	
3.3. FASE III. CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE LAS CUATRO CONFIGURACIONES DE SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN (FSW).....	102
3.4. FASE IV. CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE LAS CUATRO CONFIGURACIONES DE SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN (FSW).....	104
3.5. FASE V. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA Y TECNOLÓGICA DE LAS CUATRO CONFIGURACIONES DE SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN (FSW).....	105
3.5.1. Sub-fase V-1. Evaluación de las propiedades mecánicas de las uniones soldadas.....	106
3.5.2. Sub-fase V-2. Evaluación de las propiedades tecnológicas de las uniones soldadas.....	109
4. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	114
4.1. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL UTILIZADO.....	114
4.1.1. Análisis químico del material base.....	114
4.1.2. Análisis microestructural del material base.....	116
4.1.3. Propiedades mecánicas del material base.....	118
4.1.4. Análisis térmico del material base.....	119
4.2. MÁQUINA DE SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN (FSW)....	121
4.3. ANÁLISIS MACROESTRUCTURAL Y MICROESTRUCTURAL DE LA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN (FSW).....	123
4.3.1. Preparación metalográfica.....	124
4.3.2. Microscopía estereoscópica (MEO).....	128

4.3.3.	Microscopía Óptica (MO).....	129
4.3.4.	Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).....	130
4.3.5.	Difracción de Electrones Retrodispersados (EBSD).....	131
4.3.6.	Microscopía Electrónica de Transmisión (MET).....	134
4.4.	CARACTERIZACIÓN TÉRMICA MEDIANTE CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC).....	135
4.5.	CARACTERIZACIÓN MECÁNICA Y TECNOLÓGICA.....	136
4.5.1.	Propiedades mecánicas estáticas y dinámicas.....	136
4.5.2.	Propiedades de corrosión.....	141
5.	RESULTADOS.....	145
5.1.	PARÁMETROS DE PROCESO Y FABRICACIÓN DE LAS SOLDADURAS POR FRICCIÓN-AGITACIÓN.....	145
5.2.	ANÁLISIS MACRO Y MICROESTRUCTURAL DE LAS UNIONES SOLDADAS.....	149
5.2.1.	Análisis macroestructural de las uniones soldadas.....	149
5.2.2.	Análisis microestructural de las uniones soldadas.....	150
5.2.2.1.	Resultados obtenidos de Microscopía Óptica (MO)....	150
5.2.2.2.	Resultados obtenidos de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).....	156
5.2.2.3.	Resultados obtenidos de Difracción de Electrones Retrodispersados (EBSD).....	157
5.2.2.4.	Resultados obtenidos de Microscopía Electrónica de Transmisión (MET).....	175
5.3.	ANÁLISIS TÉRMICO DE LAS UNIONES SOLDADAS.....	177
5.4.	ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS	180

UNIONES SOLDADAS	
5.4.1. Microdureza.....	180
5.4.2. Propiedades a tracción.....	182
5.4.3. Propiedades a fatiga.....	182
5.4.4. Análisis fractográfico de las soldaduras ensayadas.....	183
5.4.4.1. Fractografías del ensayo de tracción.....	183
5.4.4.2. Fractografías del ensayo de fatiga.....	186
5.5. CARACTERIZACIÓN TECNOLÓGICA	190
5.5.1. Análisis del ensayo de corrosión de las diferentes zonas de la unión soldada.....	190
6. DISCUSIÓN	197
6.1. PARÁMETROS DE PROCESO DE LAS SOLDADURAS POR FRICCIÓN-AGITACIÓN	197
6.2. ANÁLISIS MACRO Y MICROESTRUCTURAL DE LAS UNIONES SOLDADAS	198
6.2.1. Macroestructura de las diferentes zonas de soldadura para las cuatro configuraciones de soldadura estudiadas.....	198
6.2.2. Análisis microestructural con MO y MEB de las zonas de soldadura para las cuatro configuraciones de soldadura estudiadas....	202
6.2.3. Tamaño de grano de la ZA para las cuatro configuraciones de soldadura estudiadas.....	207
6.2.4. Análisis de la subestructura con MET de las zonas de soldadura para las cuatro configuraciones de soldadura estudiadas....	212
6.2.5. Análisis de la textura y orientación cristalográfica con EBSD de las diferentes zonas de soldadura para las cuatro configuraciones	214

de soldadura estudiadas.....	
6.2.5.1. Análisis de los mapas de orientación cristalina, figuras de polos directas e inversas.....	216
6.2.5.2. Análisis del Factor de Taylor.....	218
6.2.5.3. Análisis de la desorientación de los límites de grano (<i>misorientation</i>) y los sitios de coincidencia de la red (CSLs).....	223
6.3. ANÁLISIS TÉRMICO DE LAS UNIONES SOLDADAS.....	224
6.3.1. Transformaciones de fase de las diferentes zonas de soldadura para las cuatro configuraciones de soldadura estudiadas.....	224
6.4. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS UNIONES SOLDADAS.....	226
6.4.1. Influencia de los parámetros de procesado en las propiedades mecánicas estáticas de las uniones soldadas.....	226
6.4.1.1. Perfil de microdureza.....	226
6.4.1.2. Ensayo a tracción.....	228
6.4.2. Influencia de los parámetros de procesado en las propiedades mecánicas dinámicas de las uniones soldadas.....	230
6.4.2.1. Ensayo a fatiga.....	230
6.4.3. Análisis fractográfico para los ensayos de tracción y fatiga....	232
6.5. ANÁLISIS DEL ENSAYO DE CORROSIÓN DE LAS DIFERENTES ZONAS DE LA UNIÓN SOLDADA.....	235
7. CONCLUSIONES.....	241
7.1. PARÁMETROS DE PROCESADO FSW.....	241
7.2. MACROESTRUCTURA Y MICROESTRUCTURA DE LAS UNIONES	241

SOLDADAS.....	
7.3. ANÁLISIS TÉRMICO DE LAS UNIONES SOLDADAS.....	243
7.4. PROPIEDADES MECÁNICAS Y TECNOLÓGICAS.....	243
8. INVESTIGACIONES FUTURAS.....	247
9. DIFUSIÓN DE RESULTADOS DERIVADOS DE LA TESIS.....	251
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	256

