

INDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Espumas, esponjas y materiales celulares.....	1
1.2.	Estructura celular de las espumas.....	6
1.2.1.	Geometría de las celdas.....	6
1.2.2.	Densidad relativa de las espumas.....	9
1.2.3.	Anisotropía estructural.....	9
1.2.4.	Relaciones dimensionales estructura-densidad.....	10
1.3.	Formación y estabilización de las espumas metálicas.....	11
1.3.1.	Formación de poros.....	11
1.3.2.	Drenaje y rotura de paredes en la espuma líquida.....	12
1.3.3.	Estabilización mediante partículas.....	14
1.3.4.	Efectos de la viscosidad.....	15
1.3.5.	Estabilización de las espumas de aluminio.....	15
1.4.	Técnicas de fabricación.....	19
1.4.1.	Producción de espumas de primera generación: 1925-1970.....	20
1.4.2.	Espumas metálicas de segunda generación: 1990-2015.....	22
1.5.	Comportamiento mecánico y absorción de energía.....	27
1.5.1.	Respuesta tensión-deformación de espumas bajo cargas de compresión.....	27
1.5.2.	Efectos de escala.....	32
1.5.3.	Efectos de la velocidad de deformación.....	32
1.5.4.	Modelización del comportamiento mecánico.....	36
1.5.5.	Limitaciones de los modelos dimensionales.....	40
1.5.6.	Limitaciones de las técnicas de caracterización.....	42
1.6.	Aplicaciones de las espumas de aluminio.....	43
1.6.1.	Aplicaciones estructurales.....	43
1.6.2.	Ventajas de las espumas frente a estructuras huecas cargadas axialmente.....	45
1.6.3.	Estructuras colapsables mixtas.....	46
2.	OBJETIVOS DE LA TESIS.....	48
2.1.	Objetivo general.....	48
2.2.	Aspectos de interés en relación con la estructura.....	48
2.3.	Alcance de las tareas de caracterización.....	49
2.3.1.	Macroestructura.....	49
2.3.2.	Estructura celular.....	49
2.3.3.	Microestructura.....	50

2.3.4.	Comportamiento a alta temperatura.....	50
2.4.	Espumas analizadas.....	51
2.5.	Objetivos específicos	52
3.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	54
3.1.	Análisis estructural y morfológico.....	54
3.2.	Microscopía (MO, SEM).	59
3.3.	Microanálisis EDX.....	60
3.4.	Medidas de microdureza.	60
3.5.	Medidas de nanoindentación.....	60
3.6.	Ensayo de tracción en el material sólido.....	61
3.7.	Ensayos de compresión de las espumas.	61
3.7.1.	Tamaño de las muestras	61
3.7.2.	Obtención de las muestras para ensayo	63
3.7.3.	Ensayos de compresión uniaxial	65
4.	ESTRUCTURA DE LAS ESPUMAS.....	67
4.1.	Densidad.	67
4.2.	Morfología de la espuma.....	71
4.3.	Relación estructura celular - densidad	101
5.	CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL Al-Ca-Ti.....	104
5.1.	Caracterización microestructural.	104
5.2.	Microdureza	112
5.3.	Nanoindentación	114
5.4.	Ensayos de tracción del material sólido.	116
5.5.	Fractura	117
6.	COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN	122
6.1.	Ensayos preliminares	123
6.2.	Efecto de la densidad en la tensión de plateau.....	124
6.3.	Efectos de la macroestructura	126
6.4.	Efecto de la densidad en la pendiente del plateau.....	131
6.5.	Efecto de la temperatura de ensayo en la tensión de plateau	138
6.6.	Modelización de la tensión de plateau	141
7.	ABSORCIÓN DE ENERGÍA	150
7.1.	Metodología de caracterización de la absorción de energía.....	153
7.2.	Diagramas de densificación óptima	155
7.3.	Efectos de la macroestructura.	159
7.4.	Efecto de la densidad en la deformación de densificación.....	161
7.5.	Efecto de la densidad en la energía absorbida	164
7.6.	Efecto de la densidad en la eficiencia	166
7.7.	Efecto de la temperatura en la absorción de energía.....	169

7.8.	Efectos de la homogeneidad en la absorción de energía.....	171
8.	SIMULACIÓN MEF	176
8.1.	Introducción	176
8.2.	Generación de modelos estructurales.....	178
8.3.	Modelado y condiciones de contorno	181
8.4.	Análisis del efecto de la anisotropía estructural en la resistencia a compresión	184
8.4.1.	Metodología.....	184
8.4.2.	Resultados.....	185
8.5.	Análisis del efecto de la heterogeneidad en los espesores de pared sobre la resistencia a compresión.....	189
8.5.1.	Metodología.....	189
8.5.2.	Resultados.....	190
9	CONCLUSIONES.....	193
9.1	Estructura de las espumas	193
9.2	Composición y microestructura del material Al-Ca-Ti.....	194
9.3	Propiedades mecánicas de la aleación.....	195
9.4	Comportamiento de la espuma en ensayos de compresión.....	196
9.5	Modelización del comportamiento a compresión	196
9.6	Caracterización de la absorción de energía. Diagramas.....	197
9.7	Caracterización de la absorción de energía. Resultados	198
9.8	Simulación MEF: Influencia de los defectos	199
9.9	Tareas adicionales	200
	REFERENCIAS	202
	LISTADO DE FIGURAS	213
	DIFUSION DE RESULTADOS	221