

Máster interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Título de trabajo:

Alternativas al aluminio para la construcción de peldaños de las escaleras mecánicas.

Entidad colaboradora: ThyssenKrupp

Tutor industrial o externo: Elena González Ruibal

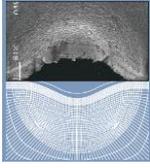
Departamento: ThyssenKrupp Elevator Innovation Center

Tutor académico: Javier Belzunce Varela

Departamento: Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica

Universidad de Oviedo

Julio de 2015



Máster interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Título de trabajo:

Alternativas al aluminio para la construcción de peldaños de las escaleras mecánicas.

<i>Nombre tutor industrial</i>	<i>Nombre tutor académico</i>	<i>Nombre alumno</i>
<i>Elena González Ruibal</i>	<i>Javier Belzunce Varela</i>	<i>Maite García Gueembe</i>

Universidad de Oviedo

Julio de 2015



CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	10
1.1. Problemática objeto de estudio	10
1.2. Objetivos	10
1.3. Estructuración de la memoria	11
2. ANTECEDENTES	12
2.1. Estructura de la escalera	12
2.1.1. Introducción	12
2.1.2. Normas EN 115-1 julio 2008 y ASME A17.1-2010/CSA B44-10.....	13
2.1.3. Plan de Control de Peldaños	14
2.1.4. Especificaciones de la escalera Velino	15
2.1.5. Material	15
2.1.6. Simplificaciones	17
2.2. Análisis de placas.....	18
2.2.1. Hipótesis.....	18
2.2.2. Desarrollo	18
2.2.3. Solución de Navier:	19
2.2.4. Carga puntual:	21
2.2.5. Solución de Levy:.....	21
2.2.6. Índice de diseño de placas	24
3. CÁLCULOS	25
3.1. Análisis de una placa cuadrada	25
3.2. Análisis de la huella del peldaño	27
3.3. Análisis límite de la especificación	27
4. MATERIALES ALTERNATIVOS	30
4.1. CES EduPack	30
4.1.1. Primera selección	31
4.1.2. Segunda selección	37
4.2. Plásticos reforzados	38
4.2.1. Sheet Molding Compound (SMC).....	38
4.2.2. Bulk Molding Compounds (BMC)	39
4.3. Espumas metálicas (Foams)	41
4.3.1. Propiedades de la espuma de aluminio	41



Máster interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

4.4. Aerogeles.....	46
4.4.1. Aerogeles especiales: Airloys	46
4.5. Metales.....	48
5. PROCESOS DE FABRICACIÓN	49
5.1. SMC/BMC	49
5.1.1. Variaciones del SMC.....	50
5.2. Foams (Espumas metálicas)	50
5.2.1. Espumas fabricadas a partir de coladas de metal líquido (LM foams):	51
5.2.2. Espumas metálicas generadas a partir de la compresión de polvo metálico con el precursor, (pulvimetalurgia, PM foams)	52
5.3. Aerogeles.....	54
5.3.1. Proceso Sol-gel	54
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	56
7. CONCLUSIONES.....	74
8. BIBLIOGRAFÍA	76
9. PRESUPUESTO.....	78
10. ANEXOS.....	79



LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquema de la escalera mecánica Velino.....	12
Figura 2.2: Esquema del peldaño (norma EN115-1).	13
Figura 2.3: Esquema de los nervios de la huella (norma EN115-1).....	13
Figura 2.4: Modelo 3D del peldaño Velino.....	17
Figura 2.5: Huella del peldaño Velino y dimensiones.	17
Figura 2.6: Desplazamiento (flecha) del plano medio de la placa.	18
Figura 2.7: Esquema de los apoyos en los bordes de la placa.	19
Figura 2.8: Dimensiones de la placa.....	19
Figura 2.9: Esquema placa bajo una carga puntual.....	21
Figura 2.10: Esquema de la placa Solución de Levy.	22
Figura 3.1: Flecha en una placa cuadrada [10].....	25
Figura 3.2: Modelización Abaqus placa cuadrada [10].	26
Figura 3.3: Modelización Abaqus placa cuadrada, espesor nominal.	26
Figura 3.4: Modelización Abaqus espesor 6mm y fuerza puntual de 3000N.....	27
Figura 3.5: Modelización Matlab: espesor 6mm y fuerza puntual 3000N. A la izquierda se observa la deformación real, mientras que a la de la derecha se observa la misma flecha ampliada.....	28
Figura 3.6: Flechas máximas obtenidas con Matlab en la mitad de la placa (bajo una fuerza de 3000 N). A la izquierda se muestra la flecha a través del ancho, mientras que a la derecha se muestra a través del largo.....	28
Figura 3.7: Modelización Abaqus: espesor de 6mm y carga de 15000 N/m ²	28
Figura 3.8: Modelización Matlab: espesor de 6mm y carga de 15000 N/m ² . A la izquierda se observa la deformación real, mientras que a la derecha se observa la misma flecha ampliada.	29
Figura 3.9: Flechas máximas obtenidas con Matlab en la mitad de la placa (carga 15000 N/m ²). A la izquierda muestra la flecha a través del ancho, mientras que a la derecha se muestra a través del largo.....	29
Figura 4.1: Gráfico E ^{1/3} -ρ para todos los materiales del software.	30
Figura 4.2: Gráfico E ^{1/3} -ρ tras aplicar la primera restricción: densidad y comportamiento frente al fuego.....	31
Figura 4.3: Gráfico E ^{1/3} -ρ tras tener en cuenta la segunda restricción: comportamiento direccional.....	31
Figura 4.4: Gráfico E ^{1/3} -ρ después de aplicar la tercera restricción: densidad, tenacidad a la fractura y tipo de material.	32
Figura 4.5: Gráfico E ^{1/3} -ρ tras aplicar la cuarta restricción: comportamiento frente a las llamas.	32
Figura 4.6: Gráfico E ^{1/3} -ρ, con materiales concretos identificados dentro de la familia de las espumas metálicas.....	32
Figura 4.7: Gráfico E ^{1/3} -ρ, con materiales concretos identificados en la familia de los composites.	33
Figura 4.8: Gráfico modulo a flexión ^{1/3} -ρ con materiales identificados en la familia de las espumas metálicas.....	33
Figura 4.9: Gráfico Módulo a Flexión ^{1/3} -ρ, con materiales concretos de la familia de los composites.	33



Figura 4.10: Gráfico Módulo a Flexión^{1/3}- ρ , con materiales concretos de la familia de los composites. 34

Figura 4.11: Comparación de los gráficos: $E^{1/3}$ - ρ y $E_f^{1/3}$ - ρ . Primera selección 34

Figura 4.12: Comparación de los gráficos: $E^{1/3}$ - ρ y $E_f^{1/3}$ - ρ . Segunda selección. 35

Figura 4.13: Nuevos materiales incluidos en la segunda selección. 35

Figura 4.14: Segunda selección de materiales, incluidos los que arden lentamente. 36

Figura 4.15: Selección de materiales. Materiales incombustibles. 36

Figura 4.16: Gráficos correspondientes únicamente a espumas. 37

Figura 4.17: Espumas incombustibles y self-extinguishing. 37

Figura 4.18: Ejemplos de SMC. 39

Figura 4.19: Ejemplos de BMC. 39

Figura 4.20: Ejemplo de pieza fabricada con espuma de aluminio. 41

Figura 4.21: Gráfico Módulo elástico- densidad para las espumas de aluminio. 43

Figura 4.22: Variación del módulo elástico con la densidad de las espumas de aluminio 43

Figura 4.23: Resultados del ensayo de compresión típico de las espumas de aluminio. 44

Figura 4.24: Resultados del ensayo de compresión para diferentes espumas de aluminio, que muestran variaciones de densidad, composición y método de fabricación. 44

Figura 4.25: Comparación de la resistencia específica de diferentes materiales para diferentes condiciones de carga. 45

Figura 4.26: Comparación de la rigidez específica de diferentes materiales. 45

Figura 4.27: Influencia de la aplicación de refuerzos en el comportamiento de una viga a flexión de espuma de aluminio. 45

Figura 4.28: Tabla 4.4.1.a: Ensayo a flexión en tres puntos de un Airloy. 47

Figura 4.29: Demostración de la alta tenacidad de los Airloys. 47

Figura 4.30: Selección de aleaciones de berilio y composites metálicos con CES EduPack. 48

Figura 5.1: Proceso fabricación del SMC. 49

Figura 5.2: Moldeo SMC. 49

Figura 5.3: Proceso fabricación D-SMC. 50

Figura 5.4: Esquema de los diferentes procesos de fabricación de las espumas metálicas. 51

Figura 5.5: Proceso de fabricación de espuma por inyección de gas en el metal fundido. 51

Figura 5.6: Proceso de fabricación de espuma por mezcla con un agente espumante, hidruro de titanio, TiH_2 52

Figura 5.7: Proceso de fabricación de la espuma por disolución del agente espumante en el polvo. IFAM. 53

Figura 5.8: Proceso de fabricación de la espuma por disolución del agente espumante en el polvo. MEPURA. 53

Figura 5.9: Ejemplos de tubos rellenos de espuma de aluminio. 53

Figura 5.10: Esquema del proceso Sol-Gel para la fabricación de aerogeles. 54

Figura 5.11: Obtención de diferentes productos durante el proceso de fabricación del aerogel. 55



LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1: Especificaciones del peldaño (norma EN115-1).	13
Tabla 2.2: Especificaciones ranuras norma EN115-1.	13
Tabla 2.3: Dimensiones del peldaño Velino.	15
Tabla 2.4: Propiedades físicas de la aleación AISi12.	16
Tabla 2.5: Composición química de la aleación AISi12.....	16
Tabla 3.1: Resultados modelizaciones con Abaqus y con Matlab.....	29
Tabla 4.1: Posibles materiales primera selección, materiales non-flammable y self-extinguishing.	34
Tabla 4.2: Nuevos materiales con bajas propiedades frente a la resistencia a la llama.	35
Tabla 4.3: Nuevos materiales seleccionados que arden lentamente.	36
Tabla 4.4: Selección de materiales. Materiales incombustibles.	36
Tabla 4.5: Espumas no inflamables y espumas que se autoextinguen.	38
Tabla 4.6: SMS analizados gracias a datos obtenidos del software CES EduPack.....	40
Tabla 4.7: Propiedades de espumas de aluminio fabricadas mediante el proceso IFAM y MEPURA	42
Tabla 4.8: Propiedades mecánicas de algunas espumas comerciales.	42
Tabla 4.9: Expresiones teóricas para calcular las propiedades mecánicas de las espumas metálicas a partir de las propiedades del metal denso y la densidad relativa.	43
Tabla 4.10: Ejemplos de las aleaciones de Berilio y composites de aluminio.....	48
Tabla 6.1: Propiedades, índice y resultados con AISi12.	56
Tabla 6.2: Tabla primeros materiales del análisis con CES.....	57
Tabla 6.3: Propiedades de la primera selección de materiales.....	58
Tabla 6.4: Resultados obtenidos de la primera selección de materiales.	59
Tabla 6.5: Tenacidad a la fractura de la primera selección de materiales.....	60
Tabla 6.6: Materiales de la segunda selección.....	61
Tabla 6.7: Propiedades de los materiales de la segunda selección.	62
Tabla 6.8: Resultados del análisis realizado con la segunda selección de materiales.	63
Tabla 6.9: Tenacidad a la fractura de los materiales de la segunda selección.....	64
Tabla 6.10: Plásticos reforzados: SMC.	65
Tabla 6.11: Propiedades de los SMCs.....	66
Tabla 6.12: Resultados obtenidos con los SMCs.	67
Tabla 6.13: Tenacidad a la fractura de los SMCs.....	68
Tabla 6.14: Propiedades e índices obtenidos con aleaciones de berilio y los composites de aluminio.....	69
Tabla 6.15: Tenacidad a la fractura de las aleaciones de berilio y composites de aluminio.	70
Tabla 6.16: Materiales alternativos resultantes al AISi12.....	71
Tabla 9.1: Presupuesto total.	78
Tabla 10.1: Tabla espumas non-flammable.	6
Tabla 10.2: Propiedades de las espumas non flammable.....	7
Tabla 10.3: Resultados de las espumas non flammable.	7
Tabla 10.4: Tenacidad a la fractura de las espumas non flammable.	8
Tabla 10.5: Espumas self-extinguishing.	9
Tabla 10.6: Propiedades de las espumas self-extinguishing.	10
Tabla 10.7: Resultados del análisis de las espumas self-extinguishing.	11
Tabla 10.8: Tenacidad a la fractura de las espumas self-extinguishing.	12



Máster interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

Tabla 10.9: Materiales alternativos seleccionados con MatWeb.	13
Tabla 10.10: Propiedades de los materiales de MatWeb.	14
Tabla 10.11: Análisis de los materiales de MatWeb.	15
Tabla 10.12: Diversos Aerogeles.	16
Tabla 10.13: Propiedades de los Aerogeles.	17
Tabla 10.14: Resultado de los análisis realizado con los Aerogeles.	18



MEMORIA



1. INTRODUCCIÓN

1.1. Problemática objeto de estudio

Los nuevos materiales o materiales avanzados son producto de nuevas tecnologías fruto del desarrollo de la química y la física aplicada, de la ingeniería y de la ciencia de los materiales. Se diseñan para responder a nuevas necesidades o a nuevas aplicaciones tecnológicas.

La investigación en nuevos materiales, más ligeros y resistentes, junto a los nuevos procesos de fabricación, juegan un papel relevante en la mejora de las aplicaciones tecnológicas y desarrollo de productos, en términos tanto de calidad, seguridad, reducción de costes, como respeto por el medio ambiente.

La disponibilidad de materiales avanzados hace posible no solo la mejora sustancial de productos tradicionales, sino el desarrollo de productos que son viables gracias precisamente al desarrollo de estos materiales.

Además hoy en día, gracias a los avances en las herramientas informáticas para el cálculo y el diseño de componentes, es posible optimizar el uso de los materiales y diseñar formas que antes no se podían concebir. Esto ha permitido fabricar estructuras y productos más complejos y eficientes.

Hay que tener en cuenta que estos materiales pueden ser competitivos en costes, pero como ocurre normalmente, el precio que cuesta desarrollarlos es un inconveniente comparado con lo que cuesta introducir mejoras en los materiales convencionales.

1.2. Objetivos

El contenido del presente documento surge con el fin de ser reconocido como Trabajo Fin de Máster de Integridad y Durabilidad de Materiales, Componentes y Estructuras.

Se trata del último paso necesario para el logro del citado título. El objetivo del desarrollo de este trabajo es implementar las aptitudes adquiridas durante la impartición del máster. Así pues, lo que se pretende es poner en práctica varios de los aspectos analizados durante el curso, a la vez que emplear herramientas y procedimientos estudiados en el mismo.

El presente proyecto surge dentro de la empresa ThyssenKrupp, en el área de investigación; para futuros desarrollos y aplicaciones más eficientes. El trabajo ha sido tutorado por Elena González Ruibal; la supervisión bajo la figura de tutor académico asociada al Máster, corrió a cargo del profesor Javier Belzunce Varela.

Los propósitos fijados al inicio del presente proyecto se listan a continuación:

- Búsqueda de materiales alternativos más ligeros que la aleación AlSi12 para la fabricación de peldaños de escaleras mecánicas.
- Cumplimiento de la norma EN 115-1 julio 2008 y ASME A17.1-2010/CSA B44-10 relativa los peldaños fabricados con dichos materiales.
- Descripción de los métodos de fabricación de los peldaños con los materiales alternativos.



1.3. Estructuración de la memoria

Una vez expuesta la problemática objeto de estudio y los objetivos que se pretenden con este trabajo; en el capítulo 2 se muestran los conceptos básicos a la hora de llevar a cabo este proyecto. Contiene dos sub-apartados, por un lado se expone la estructura de la escalera, con su correspondiente definición, normas y plan de control del peldaño a tener en cuenta, especificaciones del peldaño objeto de estudio, el material utilizado en la fabricación y las correspondientes simplificaciones adoptadas a la hora de realizar el estudio, ya que de otra manera hubiera sido demasiado complejo. Por otro lado se exponen los diversos métodos a la hora de analizar placas a flexión, las hipótesis de partida, su desarrollo, la solución de Navier, la solución con cargas puntuales y la solución de Levy.

El capítulo 3 se centra en los cálculos y modelizaciones llevadas a cabo para verificar que las simulaciones creadas son correctas y representan la realidad. Para ello se ha analizado una placa cuadrada a modo de aproximación, (por simplicidad); a la que le sigue el análisis de la huella con el espesor nominal; por último se optó por analizar una placa con un espesor al límite de las especificaciones dadas por la norma.

En el siguiente capítulo, (capítulo 4) se procede a la búsqueda de materiales alternativos, con la ayuda del software CES EduPack, centrándose esta búsqueda en plásticos reforzados del tipo SMC y BMC, en espumas metálicas, en aerogeles y en metales alternativos a la aleación AISi12.

El capítulo 5 se centra en los métodos de fabricación disponibles con los materiales alternativos, en donde se expone los procesos existentes hoy en día en la fabricación de componentes.

El capítulo 6 está dedicado al análisis de resultados, mientras que en el capítulo 7 se muestran las conclusiones más relevantes del trabajo realizado a la vez que se incluyen posibles líneas de ampliación del trabajo.

Por último, en los capítulos 8 y 9, se incluyen respectivamente la bibliografía utilizada en el desarrollo del presente trabajo y el presupuesto.

Al final del documento se añaden los anexo A y B, en donde se introduce el código utilizado en Matlab para analizar la placa y materiales adicionales a los expuestos en la memoria.



2. ANTECEDENTES

2.1. Estructura de la escalera

2.1.1. Introducción

Una escalera mecánica es una escalera inclinada, que se mueve de modo continuo y que transporta personas hacia arriba y hacia abajo. Las escaleras mecánicas se utilizan en edificios comerciales, grandes almacenes y en estaciones de metro y ferrocarril, para conducir un torrente de gente por un camino limitado de uno a otro nivel. En la figura 2.1 se puede ver el esquema de las partes de la escalera mecánica objeto de estudio, la escalera Velino.

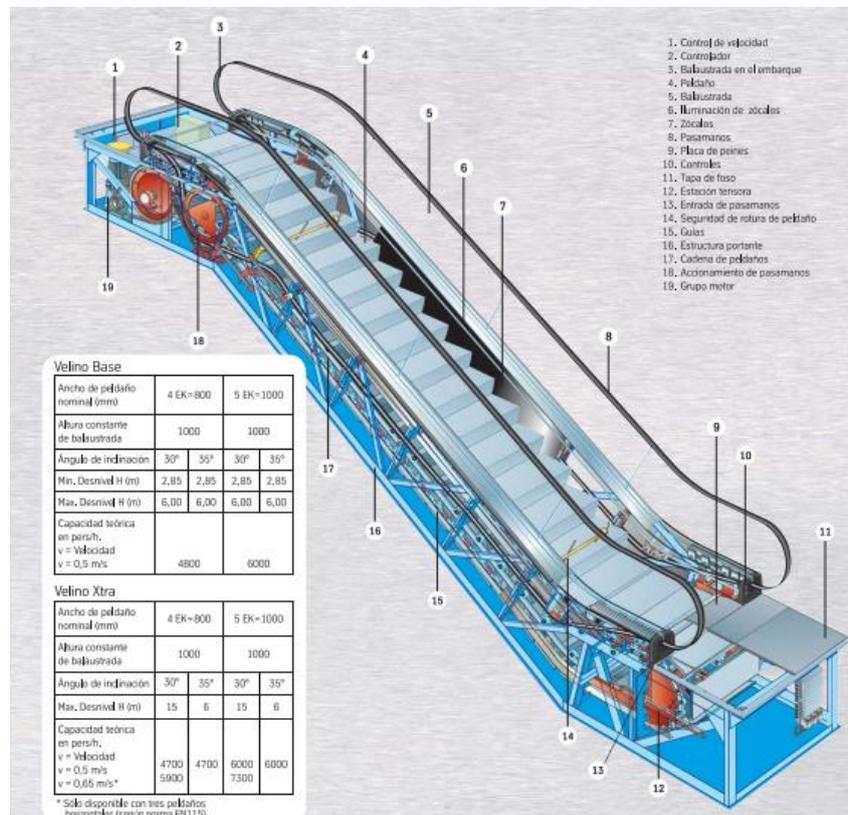


Figura 2.1: Esquema de la escalera mecánica Velino.

Las escaleras mecánicas consisten en una cadena continua de escalones arrastrados por un mecanismo con motor eléctrico por medio de dos cadenas de rodillos, una a cada lado. Los escalones van guiados por rodillos que corren por unas guías, que mantienen las huellas de los escalones en posición horizontal en la zona útil (a ambos extremos de la escalera, las guías garantizan que según la velocidad y la contrahuella de la escalera, algunos escalones formen una superficie horizontal, cuando alcanzan el nivel requerido). La construcción y dimensiones de los peldaños se muestran en la figura 2.2.

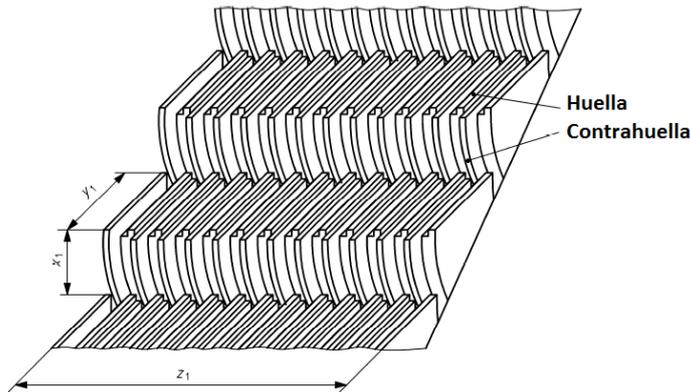


Tabla 2.1: Especificaciones del peldaño (norma EN115-1).

Principal dimensions	Clause
$x_1 \leq 0,24$ m	5.3.2.2.1
$y_1 \geq 0,38$ m	5.3.2.2.2
z_1 0,58 m to 1,10 m	5.3.2

Figura 2.2: Esquema del peldaño (norma EN115-1).

2.1.2. Normas EN 115-1 julio 2008 y ASME A17.1-2010/CSA B44-10

Según la norma EN 115-1 de julio de 2008 [1]; en el apartado 5 dedicado a los “Requisitos de Seguridad y/o Medidas de Protección” se pueden comprobar los requerimientos que toda escalera mecánica debe cumplir. En esta norma la superficie de pisada se denomina huella y la superficie perpendicular a ella se denomina contrahuella como se puede apreciar en la figura 2.2.

La huella debe proporcionar un punto de apoyo seguro y horizontal, cuyas dimensiones nominales deben cumplir, tal y como se ve en las figura 2.2 y 2.3 y tablas 2.1y 2.2:

- El ancho, z_1 , no debe ser inferior a 0,58 m, ni superar 1,10 m.
- La altura de los escalones, x_1 , no será superior a 0,24 m.
- La profundidad, y_1 , deberá ser inferior a 0,38 m.
- La superficie de las huellas tendrá ranuras en la dirección de movimiento, con las cuales deben encajar los dientes de los peines.
- Las contrahuellas también deben tener ranuras y estas deben tener una superficie lisa.
- El ancho de las ranuras, b_7 , debe ser de al menos 5 mm y no superior a 7 mm.
- La profundidad de las ranuras, h_7 , no debe ser inferior a 10 mm.
- En ancho de los nervios, b_8 , debe ser de al menos 2.5 mm y no exceder de 5 mm.

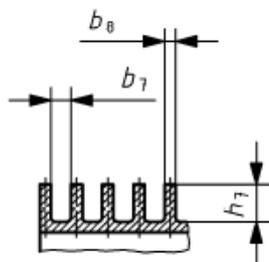


Tabla 2.2: Especificaciones ranuras norma EN115-1.

Principal dimensions	Clause
b_7 5 mm to 7 mm	5.3.2.2.5
$h_7 \geq 10$ mm	5.3.2.2.6
b_8 2,5 mm to 5 mm	5.3.2.2.7

Figura 2.3: Esquema de los nervios de la huella (norma EN115-1).

Además los materiales deben conservar sus características de resistencia durante su ciclo de vida completo, teniendo en cuenta las condiciones ambientales, como son, la temperatura, radiación ultravioleta, humedad, corrosión. Deben estar diseñados para soportar todos los posibles efectos de carga y distorsión impuestos por el sistema de arrastre, guiado o tracción



Máster interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

durante el funcionamiento normal. Además, los peldaños deben ser capaces de soportar una carga uniformemente distribuida correspondiente a $6\,000\text{ N/m}^2$. (NOTA: $6\,000\text{ N/m}^2$ se deriva de una carga estática de $5\,000\text{ N/m}^2$, con un factor de impacto de 1,2.) y todas las partes que lo componen, ya sean insertos o fijaciones, deben estar sujetos de forma segura y no se deben aflojar durante su ciclo de vida.

En el sub-apartado dedicado a los ensayos estáticos, se describe la correcta realización de estos últimos, en donde el peldaño debe ser ensayado a flexión, aplicando una fuerza única de $3\,000\text{ N}$ (incluyendo el peso de la plaquita sobre la que se aplica dicha fuerza, superpuesta a la huella) perpendicular a la superficie de pisada; la plaquita, de acero, con unas dimensiones $0,20\text{ m} \times 0,30\text{ m}$ y de al menos 25 mm de espesor, se debe situar en el centro de la superficie de la huella. El borde de la plaquita, que mide $0,20\text{ m}$, se debe situar paralelo al borde frontal del peldaño, mientras que el borde de la plaquita que mide $0,30\text{ m}$ se debe posicionar formando un ángulo recto con el citado borde frontal. Durante esta prueba, la flecha medida en la superficie de la huella no puede superar 4 mm (no se permiten deformaciones permanentes). El peldaño se debe ensayar en su conjunto, junto con rodillos ejes o varillas de articulación, en una posición horizontal y en la inclinación máxima en la que el peldaño deba funcionar.

Los ensayos que se realizan en la contrahuella no deben producir una flecha de más de 4 mm tras ser sometida a una carga única de $15\,000\text{ N}$ aplicada perpendicularmente a la superficie, a través de una plaquita de acero cuadrada o redonda de 25 cm^2 y un espesor de 25 mm que se adapte a la curvatura que presenta dicha contrahuella. Esta carga se aplicará en tres posiciones a lo largo del ancho de la pieza, en la línea media del centro y en ambos extremos.

El peldaño también tiene que ser sometido a ensayos dinámicos y de torsión. En los dinámicos, la huella se debe someter junto con los rodillos, ejes o varillas de articulación, (manteniendo su inclinación máxima) a una carga pulsante entre 500 N y $3\,000\text{ N}$ y una frecuencia entre 5 Hz y 20 Hz durante por lo menos 5×10^6 ciclos. (La carga se aplicará exactamente igual que en el ensayo estático.) Después del ensayo, no se debe haber indicios de inicio de grietas.

Según la norma ASME A17.1-2010/CSA B44-10 [2] en la parte 6 dedicada a “Escaleras mecánicas y Pasillos Rodantes” se especifica que las aleaciones de magnesio no deben ser usadas a la hora de fabricar los peldaños. Estos deben ser metálicos o en su defecto el índice de propagación de la llama debe situarse entre 0 y 50 de acuerdo con los requerimientos especificados por ASTM E 84, UL 723, NFPA 255 o CAN/ULC-S102.2. En cuanto a las dimensiones de los peldaños marcados por la norma, son prácticamente los mismos que los indicados en la norma EN 115-1.

2.1.3. Plan de Control de Peldaños

En el “Plan de Control de Peldaños” [3] suministrado por Thyssen Krupp que se lleva a cabo dentro del Control de Calidad, se pueden comprobar los procedimientos de los diferentes ensayos dentro de las especificaciones contractuales y de normativa internacional (EN 115-1).

Se realizan inspecciones tanto de la materia prima, como de los insertos (tanto cilíndricos como cónicos, a los que se les controla las dimensiones) y también del aluminio: control de su composición química, la porosidad e inclusiones de las piezas, ensayos tanto estáticos como dinámicos, control dimensional y de planitud de la huella y de la contrahuella.



En el análisis estático del peldaño se debe superar una serie de ensayos en los que tras ser sometidos a una carga de 6 kN/m^2 , la flecha medida durante el ensayo debe ser inferior a 4 mm ; bajo una carga de 15 kN/m^2 , esta flecha debe ser inferior a 15 mm y la carga de rotura mínima admisible debe ser 15 kN .

2.1.4. Especificaciones de la escalera Velino

Según los planos recibidos, el peldaño objeto de estudio de la escalera Velino, tiene las siguientes dimensiones, tal y como se puede ver en la siguiente tabla 2.3:

Tabla 2.3: Dimensiones del peldaño Velino.

Designación	Dimensión (mm)
X_1	230
Y_1	410
Z_1	992
b_7	6.92
b_8	2.5
h_7	10.75
Espesor huella	13.6
Espesor nominal (espesor huella- h_7)	2.85

Los datos del espesor de la huella y el dato del espesor nominal serán usados posteriormente en el análisis.

2.1.5. Material

Los peldaños se fabrican mediante moldeo. El material con el que están fabricados es una aleación de aluminio y silicio, en concreto la aleación AlSi12.

Las aleaciones de aluminio se utilizan en este tipo de aplicaciones debido a que presentan una buena colabilidad (aptitud para llenar la cavidad del molde correctamente), una contracción relativamente pequeña y unas temperaturas de fusión relativamente bajas.

Además la adición de silicio al aluminio da lugar a un incremento de la fluidez del material fundido y a una disminución tanto de la fisuración como de la contracción en el enfriamiento. De este modo resulta posible fabricar piezas con formas complejas, con cambios de sección, con paredes que van desde muy delgadas a muy gruesas. Estas aleaciones también poseen una buena soldabilidad, alta ductilidad y buena estanqueidad. Así mismo presentan una buena resistencia a la corrosión. [4]

En las tablas 2.4 y 2.5 se pueden ver tanto las propiedades como la composición química de la aleación AlSi12.



Tabla 2.4: Propiedades físicas de la aleación AlSi12.

Physical Properties	Metric
Density	2.66 g/cc
Mechanical Properties	Metric
Hardness, Brinnell	80
Tensile Strength, Ultimate	296 MPa
Tensile Strength, Yield	145 MPa @Strain 0.200 %
Elongation at Break	2.5 %
Modulus of Elasticity	71.0 GPa
Poissons Ratio	0.33
Fatigue Strength	130 MPa @# of Cycles 5.00e+8
Machinability	30 %
Shear Modulus	26.7 GPa
Shear Strength	170 MPa
Electrical Properties	Metric
Electrical Resistivity	0.0000440 ohm-cm
Thermal Properties	Metric
Heat of Fusion	389 J/g
CTE, linear 	20.4 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ @Temperature 20.0 - 100 $^\circ\text{C}$
	22.4 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ @Temperature 20.0 - 300 $^\circ\text{C}$
Specific Heat Capacity	0.963 J/g $^\circ\text{C}$
Thermal Conductivity	121 W/m-K
Melting Point	574 - 582 $^\circ\text{C}$
Solidus	574 $^\circ\text{C}$
Liquidus	582 $^\circ\text{C}$

Tabla 2.5: Composición química de la aleación AlSi12.

Processing Properties	Metric
Melt Temperature	649 - 760 $^\circ\text{C}$
Casting Temperature	635.0 - 704 $^\circ\text{C}$
Component Elements Properties	Metric
Aluminum, Al	82.2 - 89 %
Copper, Cu	≤ 1.0 %
Iron, Fe	≤ 2.0 %
Magnesium, Mg	≤ 0.10 %
Manganese, Mn	≤ 0.35 %
Nickel, Ni	≤ 0.50 %
Other, total	≤ 0.25 %
Silicon, Si	11 - 13 %
Tin, Sn	≤ 0.15 %
Zinc, Zn	≤ 0.50 %



2.1.6. Simplificaciones

Dada la complejidad de la forma del peldaño, como se puede ver en la figura 2.4, y el tiempo limitado para realizar el estudio, se ha decidido implementar una serie de simplificaciones:



Figura 2.4: Modelo 3D del peldaño Velino.

La primera de ellas, geométrica, es que únicamente se va a estudiar la huella, es decir, el análisis se va a realizar sobre una placa con las dimensiones de la huella. Esta se puede ver en la figura 2.5.

La siguiente simplificación geométrica aplicada, es la eliminación de las ranuras de la propia huella. Principalmente debido a la dificultad a la hora de mallar la geometría, en los posteriores procesos de cálculo, ya que podría interferir en las soluciones adoptadas de manera significativa. Con lo cual, la huella sobre la que se han realizado los ensayos fue una placa plana y lisa, que tenía las dimensiones de la huella original.

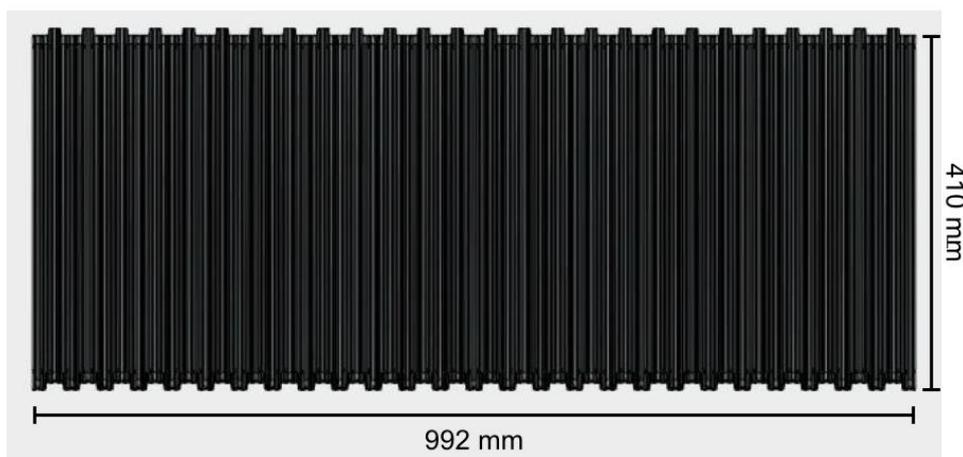


Figura 2.5: Huella del peldaño Velino y dimensiones.

La última simplificación recae en el tipo de ensayo, ya que únicamente se han tenido en cuenta los ensayos estáticos, sin tener en cuenta los dinámicos, los de torsión ni los de rotura.



2.2. Análisis de placas

2.2.1. Hipótesis

A la hora de simplificar el desarrollo de la ecuación general de placas sometidas a esfuerzos de flexión puros, se consideran las siguientes hipótesis [5], [6], [7], [8], [9]:

- Se limita al caso en que el material que compone las placas es homogéneo, isótropo y completamente elástico.
- La placa no experimenta variaciones de espesor debido a las deformaciones.
- Se considera válida la hipótesis de deformaciones planas de Bernoulli, donde las normales a la superficie media se conservan normales a la superficie deformada.
- La flecha, en cualquier punto de la placa, es muy pequeña comparada con el espesor. Se limita la teoría a pequeñas deformaciones, lo cual permite suponer que la superficie media de la placa no experimenta variaciones en sus dimensiones.

2.2.2. Desarrollo

Colocada una placa en el *plano de coordenadas XY*, se considera que x e y son las coordenadas del plano medio de la placa en condiciones normales, es decir, antes de que actúe ninguna fuerza y se produzca la flexión. De esta manera, el *eje z*, perpendicular a dicho plano, mostrará la flecha, (w) que será el desplazamiento vertical sufrido por cada punto de la placa, tal y como se puede ver en la figura 2.6.

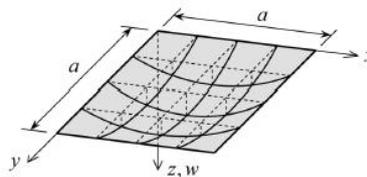


Figura 2.6: Desplazamiento (flecha) del plano medio de la placa.

La ecuación diferencial, en derivadas parciales, que describe el comportamiento de una placa se clasifica entre las de cuarto orden y tiene coeficientes constantes. Si el término independiente es nulo, la ecuación diferencial homogénea, se denomina Ecuación Biarmónica y presenta la siguiente forma:

$$\nabla^2 \nabla^2 w(x, y) = \frac{q(x, y)}{D} \quad (2.1)$$

$$\nabla^2 \nabla^2 w(x, y) = 0 \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{q(x, y)}{D} \quad (2.3)$$

$$D = \frac{Et^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (2.4)$$

En donde q es la carga aplicada (en este caso general varía en cada punto, x, y), D es la rigidez a flexión de la placa, E es el módulo de Young del material, t es el espesor de la placa, ν es el coeficiente de Poisson del material del que está fabricada la placa y $w(x, y)$ es el campo de desplazamiento vertical, positivo en sentido z positivo.



La solución de la ecuación diferencial de la placa debe satisfacer las condiciones de contorno a las que está sometida, lo que dificulta el proceso y hace que sólo sea posible encontrar una solución satisfactoria en contadas ocasiones. En numerosas situaciones se tiene que recurrir a la linealidad de la ecuación diferencial, lo que permite obtener una solución como superposición de las soluciones de la ecuación diferencial homogénea (término independiente igual a 0) y de la solución particular de la ecuación no homogénea (término independiente distinto de 0).

$$w(x, y) = w(x, y)_H + w(x, y)_P \tag{2.5}$$

Donde w_H representa la solución de la ecuación diferencial homogénea, mientras que w_P es la solución particular de la ecuación no homogénea.

$$\frac{\partial^4 w_H}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w_H}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w_H}{\partial y^4} = 0 \tag{2.6}$$

$$\frac{\partial^4 w_P}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w_P}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w_P}{\partial y^4} = \frac{q(x, y)}{D} \tag{2.7}$$

La ecuación homogénea, término independiente nulo, puede físicamente interpretarse como la asociada a una placa sobre la que sólo actúan acciones exteriores en los bordes. Esta solución describe plenamente las condiciones de borde de la placa y mantiene el equilibrio con las fuerzas externas en los bordes, pero no considera el equilibrio de fuerzas $q(x, y)$. La solución particular, cumple la ecuación diferencial completa de la placa pero no satisface completamente las condiciones de contorno (es más sencilla de determinar).

Algunas condiciones de borde permiten el uso de soluciones particulares, como sucede con la solución desarrollada por Navier, en donde $w_H=0$ de modo que:

$$w(x, y) = w(x, y)_P \tag{2.8}$$

Las primeras soluciones básicas en la estática de placas fueron desarrolladas por Navier (siglo XIX) gracias a la deducción de la ecuación diferencial por Lagrange y a las series de Fourier.

2.2.3. Solución de Navier:

Placa rectangular simplemente apoyada en los cuatro bordes con una carga uniformemente distribuida.

Navier obtuvo la solución de una placa simplemente apoyada en sus cuatro bordes, (como se puede ver en la figura 2.7) bajo una carga uniformemente distribuida aplicando series de Fourier dobles. Esta solución se denomina forzada debido a que implica unas determinadas condiciones en los bordes.

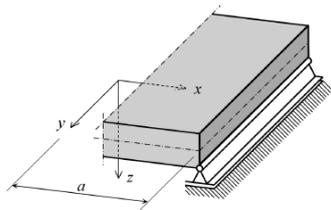


Figura 2.7: Esquema de los apoyos en los bordes de la placa.

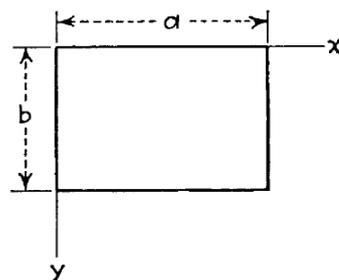


Figura 2.8: Dimensiones de la placa.



Dada una placa de longitudes a y b , como muestra el esquema de la figura 2.8; la flecha $w(x, y)$ generada en cualquier punto de la placa se puede expresar mediante una serie doble, tal y como se muestra a continuación, donde w_{mn} es un coeficiente que depende de m y de n :

$$w(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} w_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad (2.9)$$

Ya que satisface la condición de que los 4 bordes se encuentran simplemente apoyados (son nulas tanto la función flecha, como sus segundas derivadas en los bordes $x=0$, $x=a$, $y=0$ y $y=b$).

La carga $q(x, y)$ se desarrolla de la misma forma que $w(x, y)$, donde q_{mn} es un coeficiente que depende de m y de n .

$$q(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} q_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} q_{mn} &= \frac{4}{ab} \int_0^a \int_0^b q(x, y) dx dy = \frac{4}{ab} \int_0^a \int_0^b q_0 \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) dx dy \\ &= \frac{4q_0}{mn\pi^2} (1 - \cos(m\pi))(1 - \cos(n\pi)) \end{aligned} \quad (2.11)$$

La fórmula anterior es aplicable a una placa sobre la que actúa una carga uniforme de valor q_0 . Si m y n son números enteros pares, $q_{mn}=0$, mientras que si m y n son números enteros impares:

$$q_{mn} = \frac{16q_0}{\pi^2 mn} \quad (2.12)$$

Sabiendo que:

$$w_{mn} = \frac{q_{mn}}{D\pi^4 \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}\right)^2} \quad (2.13)$$

Al ser sustituido en la ecuación (2.9), se obtiene:

$$\begin{aligned} w(x, y) &= \frac{1}{D\pi^4} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{q_{mn}}{\left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}\right)^2} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \\ &= \frac{16q_0}{D\pi^6} \sum_{m=1,3,5}^{\infty} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{\sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right)}{mn \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}\right)^2} \end{aligned} \quad (2.14)$$

La flecha máxima corresponde al centro de la placa, y su valor se expresa por:

$$w_{max} = \frac{16q_0}{\pi^6 D} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1}}{mn \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}\right)^2} \quad (2.15)$$

Si se tiene una placa cuadrada de lado a , el resultado de la flecha máxima será:

$$w_{max} = \frac{4q_0 a^4}{D\pi^6} \quad (2.16)$$

$$w_{max}(v = 0.3) = 0.0454 \frac{q_0 a^4}{Et^3} \quad (2.17)$$



2.2.4. Carga puntual:

Placa rectangular simplemente apoyada en los cuatro bordes bajo una carga puntual.

La amplitud del desarrollo armónico asociado a una carga puntual aplicada en el centro de la placa se determina como límite de una carga uniforme parcial que actúa sobre un elemento superficial (u, v) cuando u y v tienden a cero, como se representa en la figura 2.9.

$$q = \frac{P}{uv} \quad (2.18)$$

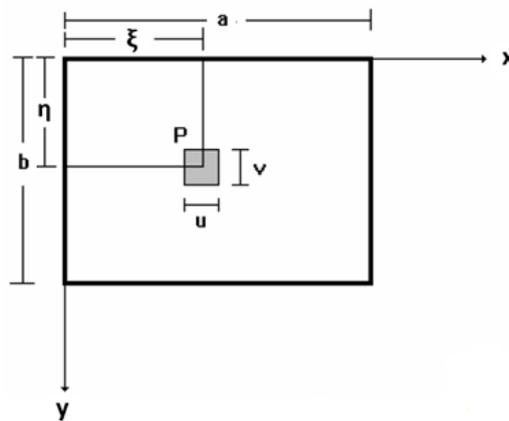


Figura 2.9: Esquema placa bajo una carga puntual.

La amplitud para una carga uniforme q_0 parcial en (u, v) viene dada por:

$$q_{mn} = \frac{16q_0}{\pi^2 mn uv} \sin\left(\frac{m\pi\xi}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi\eta}{b}\right) \sin\left(\frac{m\pi u}{2a}\right) \sin\left(\frac{n\pi v}{2b}\right) \quad (2.19)$$

Donde q_{mn} , como en el caso anterior, es un coeficiente que depende de m y n .

En este caso la flecha resultante se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$w(x, y) = \frac{16q_0}{D\pi^6 uv} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{mn \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}\right)^2} \sin\frac{m\pi\xi}{a} \sin\frac{n\pi\eta}{b} \sin\frac{m\pi u}{2a} \sin\frac{n\pi v}{2b} \sin\frac{m\pi x}{a} \sin\frac{n\pi y}{b} \quad (2.20)$$

2.2.5. Solución de Levy:

Placa rectangular simplemente apoyada en los 4 bordes con bajo carga uniformemente distribuida.

Para placas rectangulares con dos bordes opuestos simplemente apoyados como se muestra en la figura 2.10, Levy propuso como solución una ecuación homogénea con una única serie simple:



$$w(x, y)_H = \sum_{m=1}^{\infty} Y_m(y) \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \quad (2.21)$$

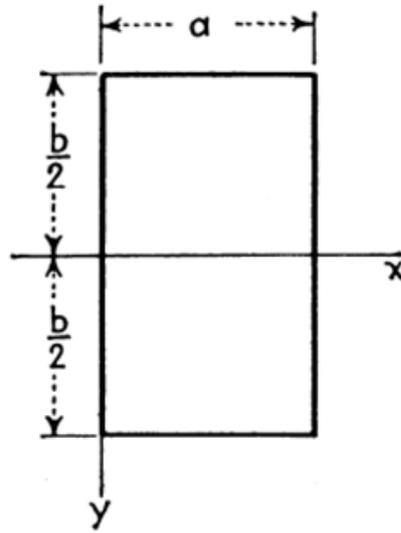


Figura 2.10: Esquema de la placa Solución de Levy.

Donde los bordes $x=0$ y $x=a$ se encuentran, de forma forzada, simplemente apoyados. Cada término de la serie adoptada, satisface automáticamente las condiciones de los bordes.

$$[w(x, y)]_{x=0} = [w(x, y)]_{x=a} = 0 \quad (2.22)$$

$$\left[\frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial x^2}\right]_{x=0} = \left[\frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial x^2}\right]_{x=a} = 0 \quad (2.23)$$

En este caso, la amplitud del desarrollo depende de y ; determinándose de modo que satisfaga las condiciones de borde en $y=\pm b/2$ y la ecuación diferencial de la placa.

La solución $w(x, y)$ se puede obtener como suma de la correspondiente ecuación diferencial homogénea w_H mas la solución particular w_P .

Como solución particular, w_P , se elige la flecha de una franja paralela al *eje* x , de longitud a , con la carga que actúa sobre la placa. Si la carga es uniforme $q(x, y)=q_0$.

$$w(x, y)_P = \frac{q_0}{24D} (x^2 - 2ax^3 + a^3x) = \frac{4q_0a^4}{\pi^5D} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m^5} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \quad (2.24)$$

Esta solución particular, sólo es función de x , satisface la ecuación diferencial de la placa y las condiciones de borde en $x=0$ y $x=a$ y puede desarrollarse utilizando una serie de senos (Fourier), para uniformizarla con la solución homogénea elegida.

La solución de $w(x, y)_H$ debe satisfacer la ecuación diferencial homogénea, $q(x,y)=0$, y para ello las amplitudes $Y_m(y)$ deben cumplir una serie de requisitos, que hacen que la solución general de esa ecuación diferencial, para una carga uniforme q_0 , quede de la siguiente forma:

$$Y_m(y) = \frac{q_0a^4}{D} \left(A_m \cosh\left(\frac{m\pi y}{a}\right) + B_m \frac{m\pi y}{a} \sinh\left(\frac{m\pi y}{a}\right) + C_m \sinh\left(\frac{m\pi y}{a}\right) + D_m \frac{m\pi y}{a} \cosh\left(\frac{m\pi y}{a}\right) \right) \quad (2.25)$$



Máster interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

Considerando la simetría de la solución respecto al *eje x*, sólo quedan los términos impares del desarrollo de $w(x, y)_p$; además los términos C_m y D_m de $w(x, y)_H$ deben ser nulos, con lo que la flecha total resulta:

$$w(x, y) = \frac{q_0 a^4}{D} \sum_{m=1}^{\infty} \left[\frac{4}{\pi^5 m^5} + A_m \cosh\left(\frac{m\pi y}{a}\right) + B_m \frac{m\pi y}{a} \sinh\left(\frac{m\pi y}{a}\right) \right] \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \quad (2.26)$$

Esta solución satisface la ecuación diferencial completa $\nabla^2 \nabla^2 w(x, y) = q(x, y)/D$ y las condiciones de contorno en los bordes $x=0$ y $x=a$.

Las condiciones de contorno en los bordes paralelos al *eje x* permiten determinar las constantes de integración A_m y B_m . Si dichos bordes también están simplemente apoyados deben satisfacer las dos condiciones siguientes:

$$[w(x, y)]_{y=\pm \frac{b}{2}} = 0 \quad (2.27)$$

$$\left[\frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial y^2} \right]_{y=\pm \frac{b}{2}} = 0 \quad (2.28)$$

De donde se obtienen las siguientes expresiones para A_m y B_m

$$A_m = - \frac{2 \left[\frac{m\pi b}{2a} \tanh\left(\frac{m\pi b}{2a}\right) + 2 \right]}{\pi^5 m^5 \cosh\left(\frac{m\pi b}{2a}\right)} \quad (2.29)$$

$$B_m = \frac{2}{\pi^5 m^5 \cosh\left(\frac{m\pi b}{2a}\right)} \quad (2.30)$$

Una vez obtenidas estas expresiones, la flecha de la placa queda finalmente representada por una serie de Fourier simple en la dirección x y por unas funciones hiperbólicas en la dirección y , que para una placa apoyada en los 4 lados queda de la siguiente forma:

$$w(x, y) = \frac{4q_0 a^4}{\pi^5 D} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m^5} \left[1 - \frac{\alpha_m \tanh \alpha_m + 2}{2 \cosh \alpha_m} \cosh \frac{2\alpha_m y}{b} + \frac{\alpha_m}{2 \cosh \alpha_m} \frac{2y}{b} \sinh \frac{2\alpha_m y}{b} \right] \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \quad (2.31)$$

$$\alpha_m = \frac{m\pi b}{2a} \quad (2.32)$$

Donde la flecha máxima ocurre en el centro de la placa ($x=a/2, y=0$) y se corresponde con:

$$w_{max} = \frac{4q_0 a^4}{\pi^5 D} \sum_{m=1,3,5}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{m-1}{2}}}{m^5} \left[1 - \frac{(\alpha_m \tanh(\alpha_m) + 2)}{2 \cosh(\alpha_m)} \right] \quad (2.33)$$

Si se obtiene la solución en el punto medio de una placa cuadrada de lado a y coeficiente de Poisson $\nu=0.3$, es fácil comprobar que la solución de Navier y la de Levy coinciden.

Flecha en el punto medio:

$$w\left(\frac{a}{2}, \frac{b}{2}\right)_{NAVIER} = w\left(\frac{a}{2}, 0\right)_{LEVY} = 0.00406 \frac{q_0 a^4}{D} \quad (2.34)$$



2.2.6. Índice de diseño de placas

Para placas cuadradas de lado a , apoyadas en sus 4 bordes y bajo una carga uniformemente distribuida q_0 , (ecuación (2.16) en donde se ha sustituido D , ecuación (2.4)), se tiene que la flecha máxima es:

$$w_{max} = \frac{4q_0a^4}{D\pi^6} = \frac{48(1-\nu^2)q_0a^4}{\pi^6Et^3} \quad (2.35)$$

El peso de la placa se calcula mediante:

$$m = a^2t\rho \quad (2.36)$$

Despejando t de (2.35) e introduciéndolo en (2.36) resulta:

$$t = \left[\frac{48q_0a^4(1-\nu^2)}{\pi^6Ew_{max}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.37)$$

$$m = a^2 \left[\frac{48q_0a^4(1-\nu^2)}{\pi^6Ew_{max}} \right]^{\frac{1}{3}} \rho = a^2 \left[\frac{48q_0a^4}{\pi^6w_{max}} \right]^{\frac{1}{3}} \left[\left(\frac{(1-\nu^2)}{E} \right)^{\frac{1}{3}} \rho \right] \quad (2.38)$$

El primer término de la ecuación (2.38) depende de la geometría de la placa, de sus condiciones de contorno, de la carga y de la flecha máxima, mientras que el segundo sólo depende de las propiedades del material, (E , ρ y ν).

Para unas condiciones dadas, si se quiere minimizar el peso de la placa para una flecha dada bajo la carga impuesta, se debe minimizar el segundo término de la expresión, o lo que es lo mismo, maximizar el índice inverso. De este modo, debe maximizarse el siguiente índice:

$$\frac{\left[\frac{E}{(1-\nu^2)} \right]^{\frac{1}{3}}}{\rho} \quad (2.39)$$

Si se asume que el coeficiente de Poisson, ν , toma un valor aproximadamente constante de $\nu=0.3$ (varía muy poco entre los diferentes materiales), el índice a maximizar para que la placa tenga un peso mínimo, cumpliendo las condiciones impuestas, será:

$$\frac{E^{1/3}}{\rho} \quad (2.40)$$

Como se puede comprobar a lo largo del documento equivale a maximizar el índice (figura 4.26).

$$\frac{E}{\rho^3} \quad (2.41)$$

Si lo que se quisiese minimizar fuese el coste de la placa:

$$c = a^2t\rho c_u \quad (2.42)$$

Siendo C_u es el coste unitario o coste de la unidad de peso de material (€/kg), el correspondiente índice a maximizar es:

$$\frac{E^{1/3}}{\rho c_u} \quad (2.43)$$



3. CÁLCULOS

3.1. Análisis de una placa cuadrada

Se ha decidido aplicar un modelo de cálculo utilizando elementos finitos, en concreto utilizando el software Abaqus, y comprobar si se obtienen los mismos resultados, que cuando se utilizan las fórmulas teóricas desarrolladas en el capítulo anterior, para un caso sencillo, en concreto el de una placa cuadrada sometida a una carga uniformemente distribuida. Se ha determinado la flecha máxima en el centro de la placa. Si los resultados son positivos, se podrían extrapolar a la geometría requerida para el análisis del peldaño.

Para poder analizar cualquiera de las placas, hay que tener en cuenta las condiciones de contorno, que podrían ser, apoyada en las cuatro esquinas, apoyada en los 4 bordes o empotradas en los 4 bordes, (también existirá la combinación de cualquiera de ellos). Por simplicidad y para no obtener resultados demasiado conservadores, se ha optado por la combinación en la que la placa se encuentra apoyada en los 4 bordes o, en su defecto, apoyada en dos lados opuestos (si se utilizase la fórmula de Levy).

Para ello se ha realizado el modelo en Abaqus basado en los criterios establecidos [10], y se ha analizado la flecha máxima en una placa que permanece apoyada sobre los bordes, que tiene un espesor 25 veces menor que la separación entre los apoyos de la placa; es decir, que el lado de la placa es al menos 25 veces su espesor, como se muestra en la figura 3.1.

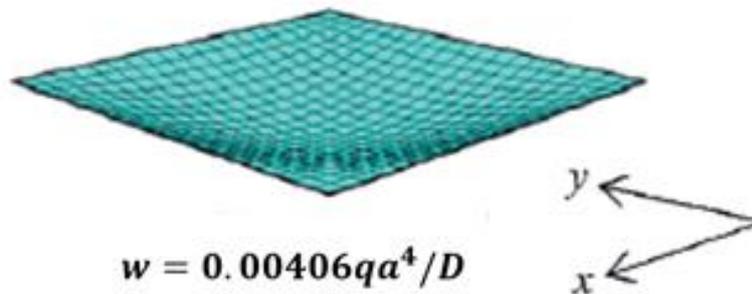


Figura 3.1: Flecha en una placa cuadrada [10].

De este modo, en el modelo de Abaqus se ha creado una placa cuadrada de 200 mm de lado y 8 mm de espesor, que se ha sometido a la misma carga uniforme que debe soportar la huella del peldaño real, que es 0.006 N/mm². Se han introducido los datos de la aleación de aluminio con la que está fabricado el peldaño, la aleación AlSi12, cuyo coeficiente de Poisson es 0.33 y módulo de Young es 71000 MPa, tal y como se especificaron en el capítulo 2.1.5. La solución del problema que nos ha proporcionado el software de cálculo Abaqus coincide con los resultados que se han obtenido también utilizando las expresiones de Navier y de Levy, que se habían deducido en el capítulo anterior, con las que se han obtenido los valores de la rigidez a flexión, ecuación (2.4) y de la flecha en el centro de la placa (ecuación 2.34) que se muestran a continuación, en la figura 3.2:

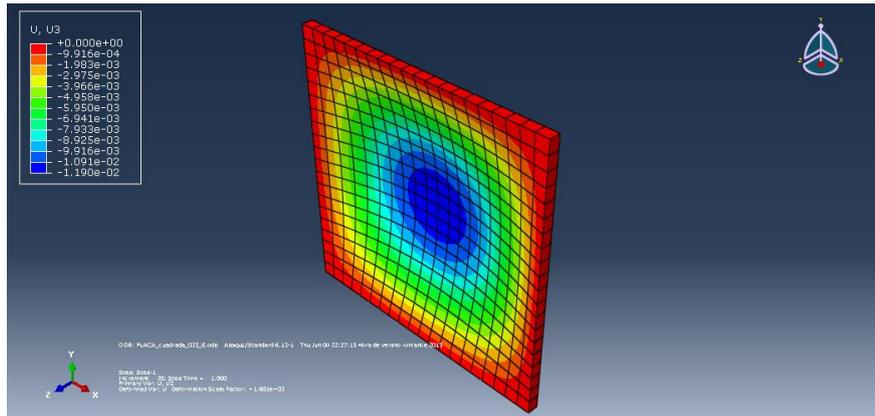


Figura 3.2: Modelización Abaqus placa cuadrada [10].

$$D = \frac{71000 * 8^3}{12(1 - 0.33^2)} = 3399543.635 Nmm \quad (3.1)$$

$$w_{max} = 0.00406 \frac{0.006 * 200^4}{3399543.635} = 0.011465 mm \quad (3.2)$$

El resultado obtenido con Abaqus se corresponde con el de la fórmula teórica y, como es de esperar, la flecha máxima se produce en el centro de la placa.

A continuación, se ha reducido el espesor de la placa hasta el correspondiente al caso de estudio, es decir 2.85 mm, (espesor nominal que tiene la placa si no se tienen en cuenta la altura de los nervios que sobresalen por encima de ella) tal como se pueden ver en la tabla 2.3, manteniendo la misma geometría de placa cuadrada, obteniéndose los resultados que se pueden comprobar en la figura 3.3 y ecuaciones siguientes:

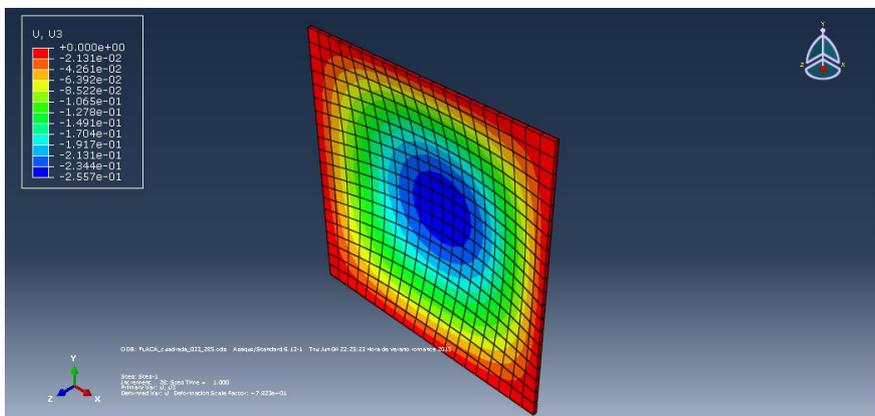


Figura 3.3: Modelización Abaqus placa cuadrada, espesor nominal.

$$D = \frac{71000 * 2.85^3}{12(1 - 0.33^2)} = 153704.0245 Nmm \quad (3.3)$$

$$w_{max} = 0.00406 \frac{0.006 * 200^4}{153704.0245} = 0.25358 mm \quad (3.4)$$

De nuevo los resultados obtenidos analíticamente y con Abaqus coinciden. Una vez que se ha comprobado que los resultados son satisfactorios, se puede cambiar la geometría de la placa y realizar la simulación con la geometría correspondiente al caso de la huella del peldaño de la



escalera mecánica. Para ello se han utilizado tanto Excel como Matlab ya que la obtención de los resultados de las fórmulas teóricas no es inmediata.

3.2. Análisis de la huella del peldaño

Una vez comprobado que para un caso sencillo, como era una placa cuadrada, los resultados obtenidos con la simulación por elementos finitos y los obtenidos mediante las diferentes teorías de placas coinciden, se ha procedido a evaluar la placa con las dimensiones reales de la huella del peldaño, que tal como se pueden ver en la tabla 2.3 y figura 2.5, es 992 mm x 410 mm x 2.85 mm (espesor nominal que tiene la placa si no se tienen en cuenta la altura de los nervios o protuberancias que sobresalen por encima de ella).

Aplicando las especificaciones descritas por la norma expuestas en el capítulo 2.1.2 se ha desarrollado un modelo en Abaqus en donde, por simplicidad, para la correcta aplicación de la fuerza hay que crear una partición en el lugar sobre el que estaría colocada la plaquita, y se ha calculado la carga o presión homogénea que actuaría en ese área, que es 0.05 N/mm^2 ($3000 \text{ N}/(200*300 \text{ mm}^2)$).

Se ha podido comprobar que los resultados obtenidos con Abaqus, los resultados de Matlab y los derivados de las diversas fórmulas coinciden y, en este caso, la flecha máxima ha resultado ser de 35.35 mm. Este valor supera con creces la especificación de la norma, hecho que es debido a que el peldaño tiene unos salientes a modo de nervios que le aportan una rigidez adicional, por lo cual para analizar la placa correctamente se tendrá que utilizar un espesor equivalente.

3.3. Análisis límite de la especificación

La manera en la que se ha realizado el análisis fue utilizando el espesor mínimo que cumple las especificaciones de la norma.

En el presente caso, para una huella fabricada con la aleación de aluminio AlSi12, el espesor mínimo es 6 mm, tal y como se puede ver al analizar los resultados obtenidos mediante Abaqus, en los que se ha aplicado una presión sobre la paqueta de 0.05 N/mm^2 o mediante la aplicación de una fuerza puntual de 3000 N, utilizando la teoría de las placas rectangulares simplemente apoyadas en los cuatro bordes con una carga puntual, que ha sido analizada con el software Matlab.

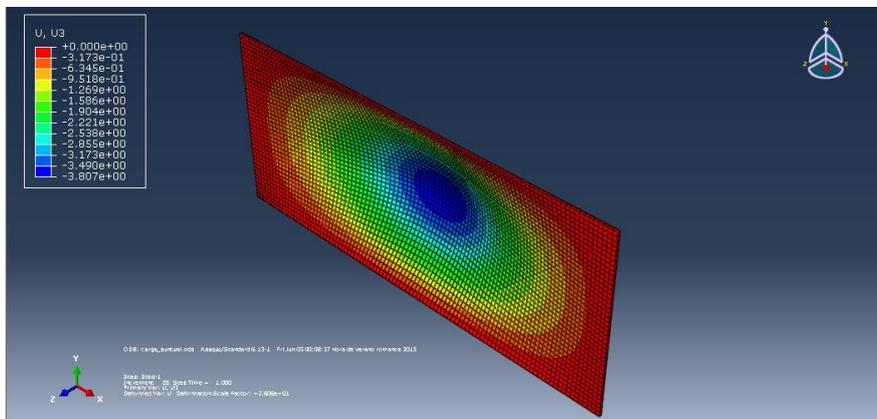


Figura 3.4: Modelización Abaqus espesor 6mm y fuerza puntual de 3000N

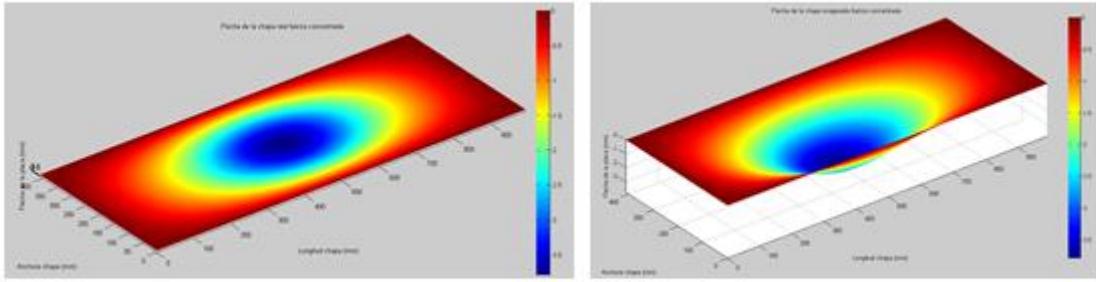


Figura 3.5: Modelización Matlab: espesor 6mm y fuerza puntual 3000N. A la izquierda se observa la deformación real, mientras que a la de la derecha se observa la misma flecha ampliada.

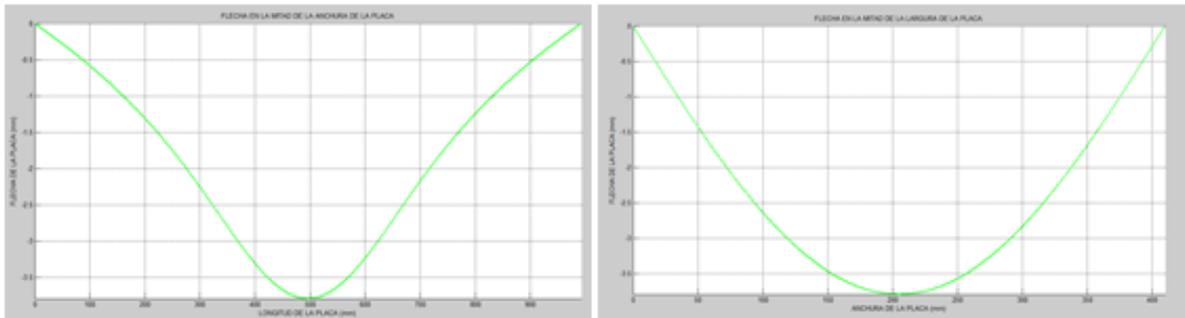


Figura 3.6: Flechas máximas obtenidas con Matlab en la mitad de la placa (bajo una fuerza de 3000 N). A la izquierda se muestra la flecha a través del ancho, mientras que a la derecha se muestra a través del largo.

De este modo se ha obtenido una flecha máxima de 3.81 mm y 3.79 mm respectivamente al utilizar los dos procedimientos, y tal y como se puede comprobar en las respectivas figuras 3.4, 3.5 y 3.6, esta flecha máxima se da justo en el centro de la placa, como cabe esperar.

Para una fuerza puntual de 6200 N, que proviene de la equivalente a una carga puntual de 15000 N/m² para el área de la huella, (15000 N/m²*0.992m*0.41m) y a su vez equivale a una carga de 0.10333 N/mm² (6200 N/(300*200 mm²)) a la hora de operar con Abaqus y la distribución de cargas mediante la plaquita adicional, los resultados obtenidos han sido los siguientes, representados en las figuras 3.7, 3.8 y 3.9:

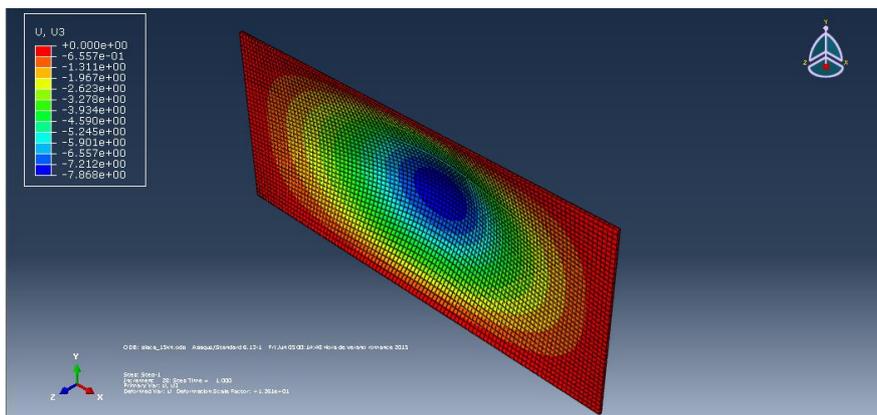


Figura 3.7: Modelización Abaqus: espesor de 6mm y carga de 15000 N/m².

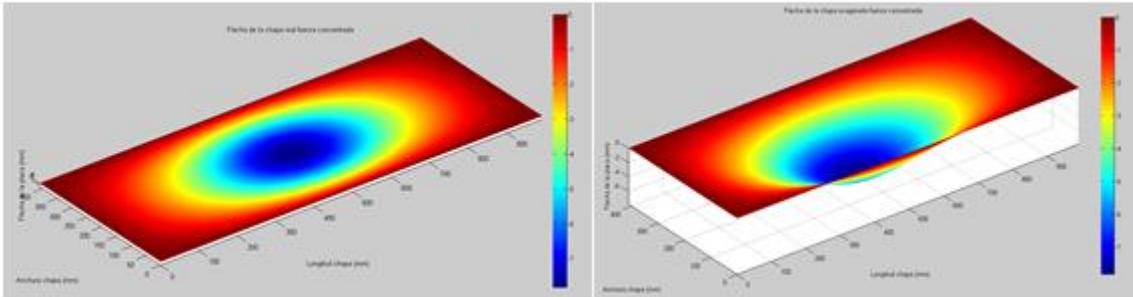


Figura 3.8: Modelización Matlab: espesor de 6mm y carga de 15000 N/m². A la izquierda se observa la deformación real, mientras que a la derecha se observa la misma flecha ampliada.

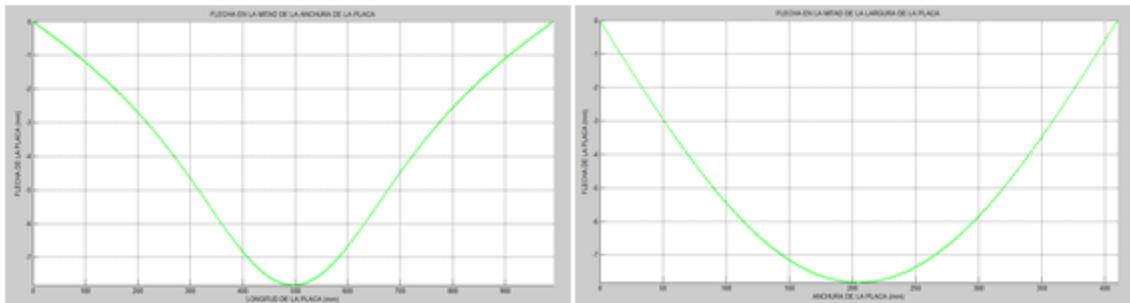


Figura 3.9: Flechas máximas obtenidas con Matlab en la mitad de la placa (carga 15000 N/m²). A la izquierda muestra la flecha a través del ancho, mientras que a la derecha se muestra a través del largo.

Se ha obtenido ahora una flecha de 7.87 mm y 7.83 mm respectivamente con los dos procedimientos, cumpliendo ambos las especificaciones expuestas en el capítulo 2.1.3, ya que el límite marcado por la norma para este caso es una flecha máxima de 15 mm; y al igual que en el caso anterior, la flecha máxima se produce en el centro de la placa. La tabla 3.1 resume los resultados obtenidos utilizando Abaqus y Matlab.

Tabla 3.1: Resultados modelizaciones con Abaqus y con Matlab.

CARGA	MATLAB	ABAQUS
3000 N≈0.05 N/mm ²	3.79 mm	3.81 mm
6200 N≈0.10333 N/mm ²	7.83 mm	7.87 mm

Si se calcula el peso de esta placa de aluminio (992 x 410 x 6 mm), sabiendo que la aleación AlSi12 tiene una densidad de 2.66 g/cm³, se obtiene que el peso de la placa de la huella sería 6.49 kg.



4. MATERIALES ALTERNATIVOS

4.1. CES EduPack

A la hora de analizar diferentes materiales para la posible sustitución del AISi12, se ha utilizado tanto MatWeb, que es una base de datos de materiales online, como el software CES EduPack de Granta, que proporciona una amplia base de datos con información sobre materiales y sus procesos de transformación. Esta base de datos cubre todos los materiales utilizados en ingeniería (cerámicas, metales y aleaciones, composites, polímeros y elastómeros) y sus procesos de transformación (conformado, uniones, tratamientos superficiales, entre otros) e incluye más de 3900 materiales y más de 200 procesos. En concreto, se ha utilizado el tercer nivel de los disponibles en el software, ya que es el nivel que mayor número de materiales utiliza.

Este software permite realizar gráficos con las propiedades de interés en cada caso. En este caso el gráfico necesario se corresponde con el del índice de diseño de las placas, expuesto en el capítulo 2.2.6; $\text{Modulo Young}^{1/3}/\text{Densidad}$. De este modo se ha representado el módulo elástico elevado a $(1/3)$ frente a la densidad de todos los materiales disponibles en este nivel, tal y como se puede ver en la figura 4.1, (las unidades del módulo de Young son GPa, mientras que las de la densidad son kg/m^3):

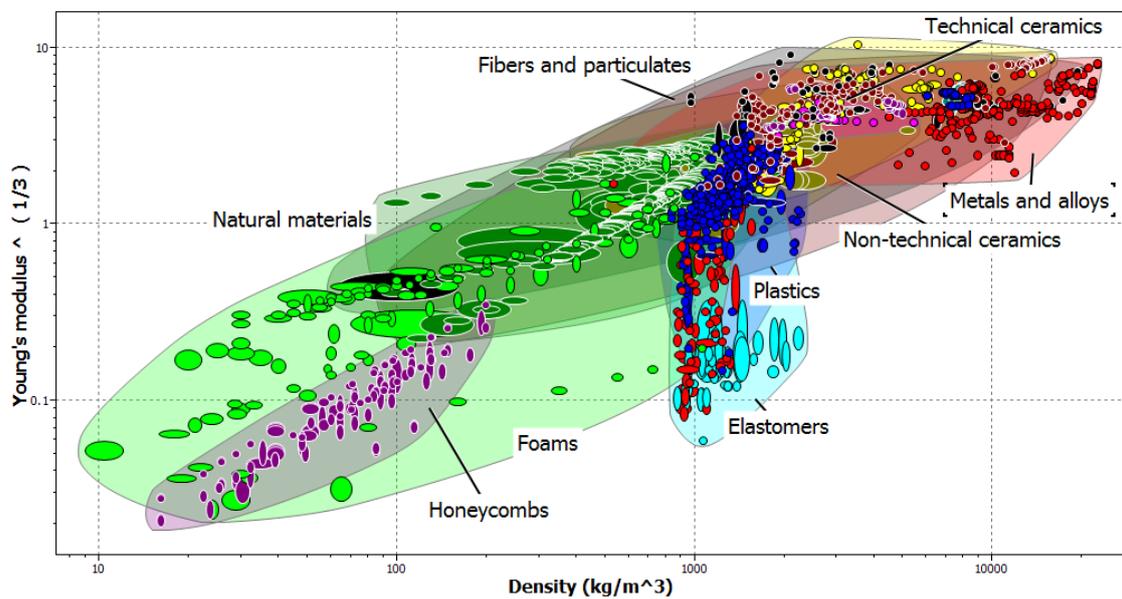


Figura 4.1: Gráfico $E^{1/3}-\rho$ para todos los materiales del software.

Como se puede ver, este software clasifica los materiales por familias, a cada una de ellas le asigna un color y la situación de cada material en la gráfica se realiza con un pequeño círculo (se admite que las propiedades varíen en un pequeño rango).

Lo que interesa en este caso concreto, es maximizar el índice de diseño, es decir, la zona de interés del gráfico es la superior izquierda (alto módulo elástico y baja densidad), pero como se puede ver en la figura 4.1, no hay ningún material situado en esa región.



4.1.1. Primera selección

Una vez vista la zona de interés, se ha procedido a la búsqueda de materiales adecuados, y para ello, mediante una serie de restricciones, hay que ir eliminando materiales. Dichas restricciones pueden ser de densidad, como se ha hecho en el primer paso, en concreto se han buscado materiales con una densidad menor que el AlSi12 (2660 kg/m^3), que no se inflamen con facilidad (es decir, que solo se tengan en cuenta los indicados como slow-burning, self-extinguishing y non-flammable, dejando fuera del análisis los highly flammable, aunque posteriormente también serán tenidos en cuenta):

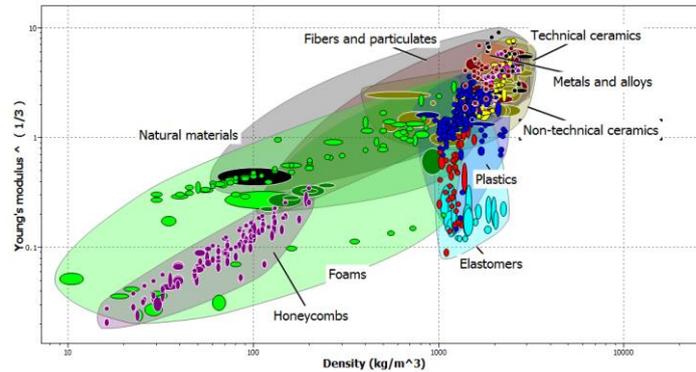


Figura 4.2: Gráfico $E^{1/3}$ - ρ tras aplicar la primera restricción: densidad y comportamiento frente al fuego.

Como se puede apreciar en la figura 4.2, debido a las restricciones impuestas, se ha reducido el número de materiales, aunque son necesarias aún más restricciones, ya que la cantidad de materiales para el análisis sigue siendo demasiado elevada.

Al aplicar criterios adicionales como es que no presente anisotropía direccional en sus propiedades, ya que se busca es un material isótropo, que se comporte de igual manera en todas las direcciones, debido a que la placa va a trabajar a flexión. Esto se traduce en mantener seleccionadas las opciones: composite quasi-isotropic fiber, composite short fiber, composite-particulate, foam y other dentro del menú Material form). De este modo se han seguido reduciendo los materiales posibles.

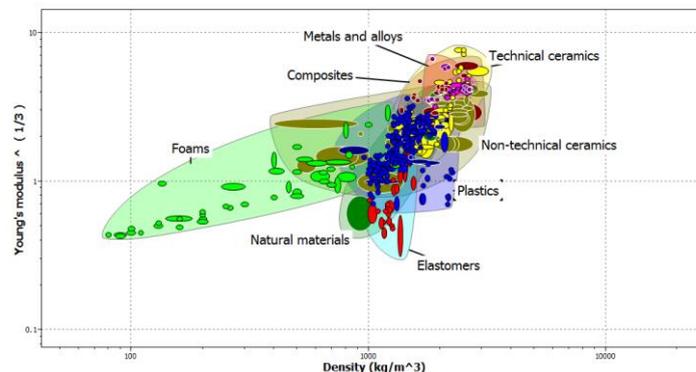


Figura 4.3: Gráfico $E^{1/3}$ - ρ tras tener en cuenta la segunda restricción: comportamiento direccional.

Como se puede ver en la figura 4.3, todavía sigue habiendo muchas familias diferentes de materiales. Para intentar reducirlos se han añadido otros requisitos como: máxima densidad 1900 kg/m^3 ; tenacidad a la fractura mínima $0.2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ y se quitó de la selección others dentro de la menú Material form, dando como resultado el que se expone en la figura 4.4:

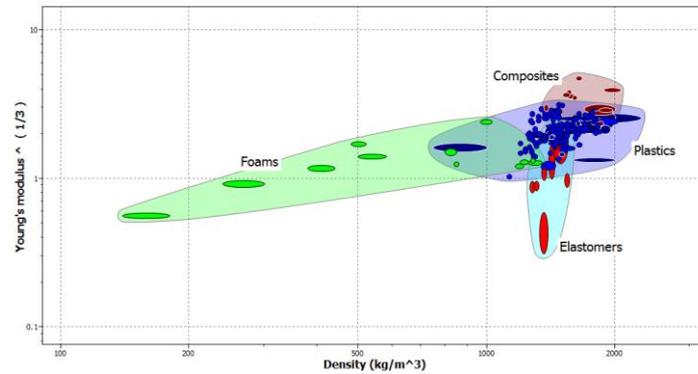


Figura 4.4: Gráfico $E^{1/3}-\rho$ después de aplicar la tercera restricción: densidad, tenacidad a la fractura y tipo de material.

Las familias que han quedado son solo 4, los composites, las espumas, los plásticos y los elastómeros. Los elastómeros no tienen interés ya que se sitúan justo en la esquina opuesta a la que maximiza el índice, y se eliminan.

Al añadir restricciones de resistencia a la llama, dentro del apartado de Flammability, es decir, eliminando los slow-burning (únicamente se mantienen seleccionadas las opciones: self-extinguising y non-flammable), quedan los materiales que se recogen en la figura 4.5:

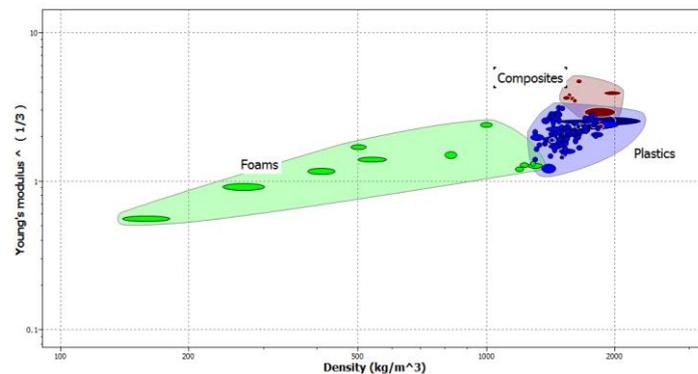


Figura 4.5: Gráfico $E^{1/3}-\rho$ tras aplicar la cuarta restricción: comportamiento frente a las llamas.

Han quedado así tres familias, y además en el caso de la familia de las espumas hay pocos materiales diferentes, que ya aparecen identificados en la figura 4.6.

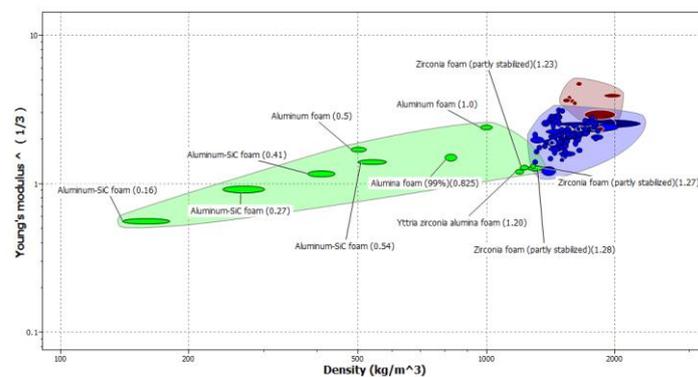


Figura 4.6: Gráfico $E^{1/3}-\rho$, con materiales concretos identificados dentro de la familia de las espumas metálicas.



Al igual que se ha hecho con las espumas, se han identificado en la figura 4.7 materiales concretos dentro de la familia de los composites.

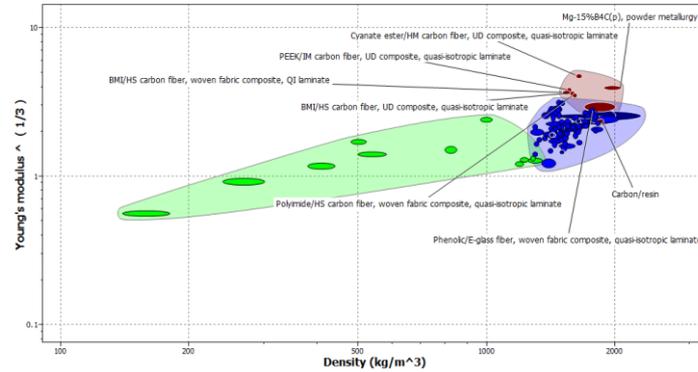


Figura 4.7: Gráfico $E^{1/3}-\rho$, con materiales concretos identificados en la familia de los composites.

Al realizar un gráfico en el que se tiene en cuenta el módulo a flexión^{1/3} frente a la densidad, en vez del módulo elástico a tracción, manteniendo los mismos requisitos, la situación de algunos materiales varía ligeramente, tal y como se puede ver en las figuras 4.8 y 4.9:

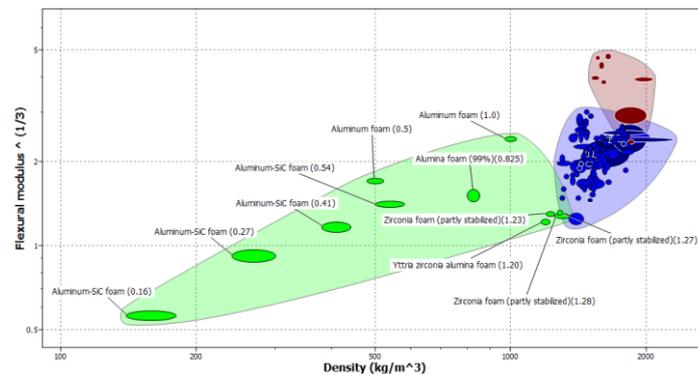


Figura 4.8: Gráfico modulo a flexión^{1/3}- ρ con materiales identificados en la familia de las espumas metálicas.

En la figura 4.8 se aprecia que la disposición de las espumas es practicamente la misma que en el gráfico anterior. Esto es debido a que este tipo de materiales son isotropos. Sin embargo, dentro de los composites, la situación de los materiales ha cambiado.

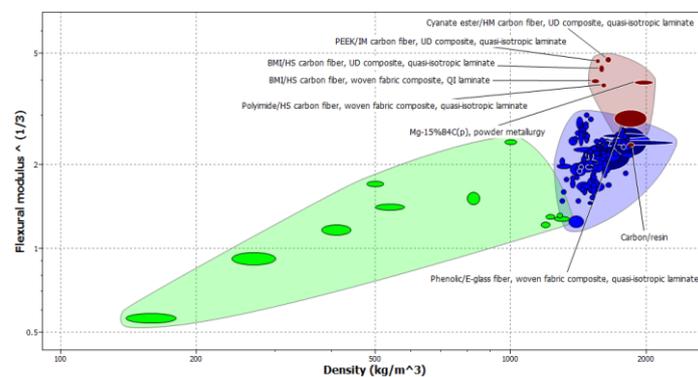


Figura 4.9: Gráfico Módulo a Flexión^{1/3}- ρ , con materiales concretos de la familia de los composites.



Máster interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

Se puede comprobar también que la cantidad de matrices de plástico existentes es innumerable, con lo que es necesario aplicar una línea de tendencia para eliminar parte de ellas, dando como resultado los gráficos mostrados en las figuras 4.10 y 4.11:

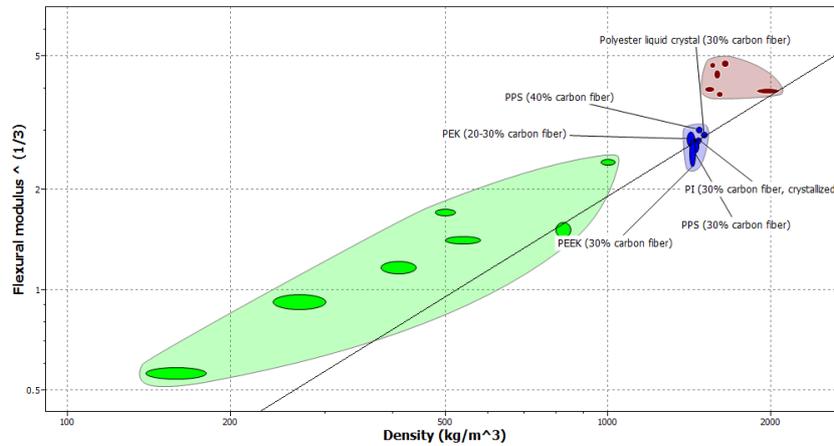


Figura 4.10: Gráfico Módulo a Flexión^{1/3}-ρ, con materiales concretos de la familia de los composites.

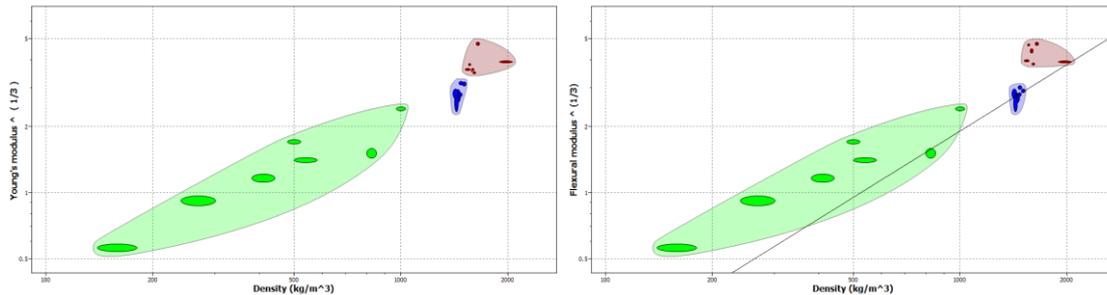


Figura 4.11: Comparación de los gráficos: $E^{1/3}$ -ρ y $E_f^{1/3}$ -ρ. Primera selección

Los 19 materiales que han quedado al final de todo el proceso se recogen en la tabla 4.1:

Tabla 4.1: Posibles materiales primera selección, materiales non-flammable y self-extinguishing.

FOAMS	COMPOSITES		REINFORCED PLASTICS	
	NON-FLAMMABLE	SELF-EXTINGUISHING	NON-FLAMMABLE	SELF-EXTINGUISHING
Alumina foam (99%)(0.825)	BMI/HS carbon fiber, UD composite, quasi-isotropic laminate	PEEK/IM carbon fiber, UD composite, quasi-isotropic laminate	PPS (30% carbon fiber)	PEEK (30% carbon fiber)
Aluminum foam (0.5)				PEK (20-30% carbon fiber)
Aluminum foam (1.0)	Cyanate ester/HM carbon fiber, UD composite, quasi-isotropic laminate		PI (30% carbon fiber, crystallized)	
Aluminum-SiC foam (0.16)				
Aluminum-SiC foam (0.27)	Mg-15%B4C(p), powder metallurgy		PPS (40% carbon fiber)	Polyester liquid crystal (30% carbon fiber)
Aluminum-SiC foam (0.41)	Polyimide/HS carbon fiber, woven fabric composite, quasi-isotropic laminate			
Aluminum-SiC foam (0.54)				



Máster interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

Si se hubiesen tenido en cuenta los materiales altamente inflamables o los que arden lentamente, el resultado sería el mostrado en la figura 4.12:

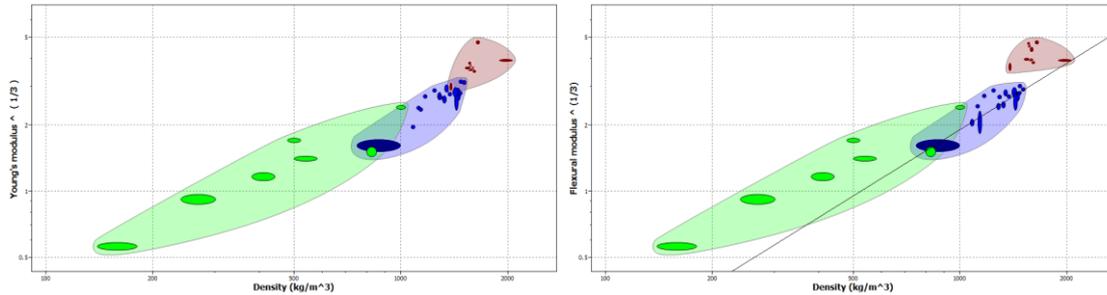


Figura 4.12: Comparación de los gráficos: $E^{1/3}-\rho$ y $E_f^{1/3}-\rho$. Segunda selección.

Los nuevos materiales que se han incluido en la selección se muestran en la figura 4.13:

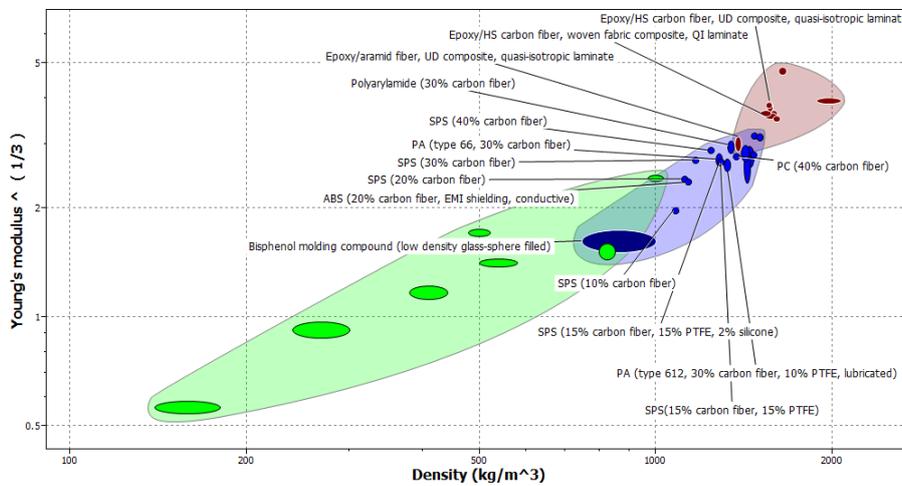


Figura 4.13: Nuevos materiales incluidos en la segunda selección.

Se destaca que la mayor parte de estos materiales pertenecen a la familia de los plásticos reforzados con fibras. Estos nuevos materiales se han recogido en la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Nuevos materiales con bajas propiedades frente a la resistencia a la llama.

REINFORCED PLASTICS		COMPOSITES
SLOW-BURNING	HIGHLY-FLAMMABLE	SLOW-BURNING
Bisphenol molding compound (low density glass-sphere filled)	ABS (20% carbon fiber, EMI shielding, conductive)	Epoxy/aramid fiber, UD composite, quasi-isotropic laminate
PA (type 612, 30% carbon fiber, 10% PTFE, lubricated)	SPS (10% carbon fiber)	
PA (type 66, 30% carbon fiber)	SPS (15% carbon fiber, 15% PTFE, 2% silicone)	Epoxy/HS carbon fiber, UD composite, quasi-isotropic laminate
	SPS (20% carbon fiber)	
PC (40% carbon fiber)	SPS (30% carbon fiber)	Epoxy/HS carbon fiber, woven fabric composite, QI laminate
Polyarylamide (30% carbon fiber)	SPS (40% carbon fiber)	
		SPS(15% carbon fiber, 15% PTFE)

De todos ellos, los que arden lentamente se muestran en la figura 4.14 y en la correspondiente tabla 4.3, mientras que el resto son altamente inflamables.

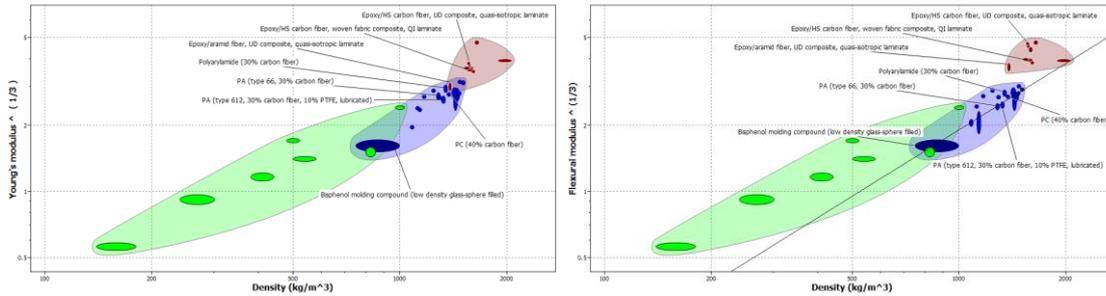


Figura 4.14: Segunda selección de materiales, incluidos los que arden lentamente.

Tabla 4.3: Nuevos materiales seleccionados que arden lentamente.

REINFORCED PLASTICS	COMPOSITES
Bisphenol molding compound (low density glass-sphere filled)	Epoxy/aramid fiber, UD composite, quasi-isotropic laminate
PA (type 612, 30% carbon fiber, 10% PTFE, lubricated)	Epoxy/HS carbon fiber, UD composite, quasi-isotropic laminate
PA (type 66, 30% carbon fiber)	
PC (40% carbon fiber)	
Polyarylamide (30% carbon fiber)	Epoxy/HS carbon fiber, woven fabric composite, QI laminate

Por último, los gráficos de la figura 4.15 y la tabla 4.4 recogen los materiales que se han considerado más relevantes, que son los incombustibles, ya vistos anteriormente.

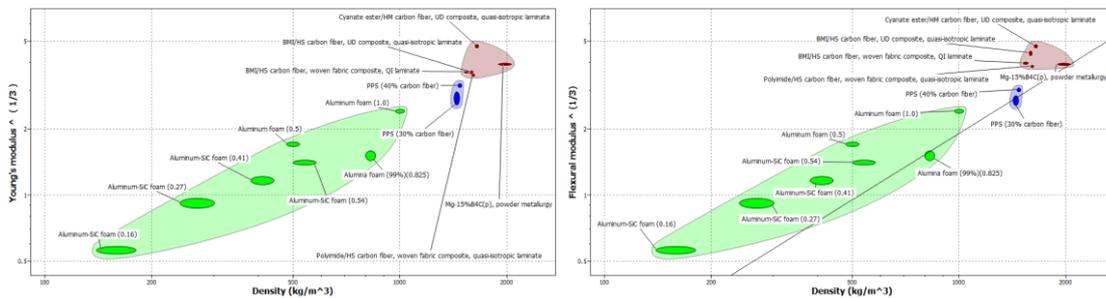


Figura 4.15: Selección de materiales. Materiales incombustibles.

Tabla 4.4: Selección de materiales. Materiales incombustibles.

FOAMS	COMPOSITES	PLASTICS
Alumina foam (99%)(0.825)	BMI/HS carbon fiber, UD composite, quasi-isotropic laminate	PPS (30% carbon fiber)
Aluminum foam (0.5)	BMI/HS carbon fiber, woven fabric composite, QI laminate	
Aluminum foam (1.0)	Cyanate ester/HM carbon fiber, UD composite, quasi-isotropic laminate	
Aluminum-SiC foam (0.16)	Mg-15%B4C(p), powder metallurgy	PPS (40% carbon fiber)
Aluminum-SiC foam (0.27)		
Aluminum-SiC foam (0.41)		
Aluminum-SiC foam (0.54)		



4.1.2. Segunda selección

Realizado otro análisis únicamente teniendo en cuenta la familia de las espumas, materiales muy ligeros, con densidad máxima de 300 kg/m^3 , se ha obtenido la figura 4.16:

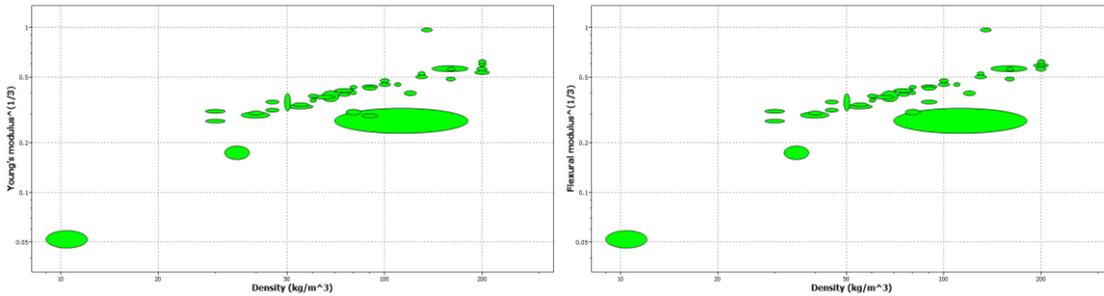


Figura 4.16: Gráficos correspondientes únicamente a espumas.

Como se puede ver, se han obtenido los mismos resultados al utilizar el módulo de Young y el modulo a flexión, debido a que estos materiales son isótropos, como ya se había comentado con anterioridad. Por otro lado, las espumas incombustibles, como las self-extinguishing se muestran en la figura 4.17:

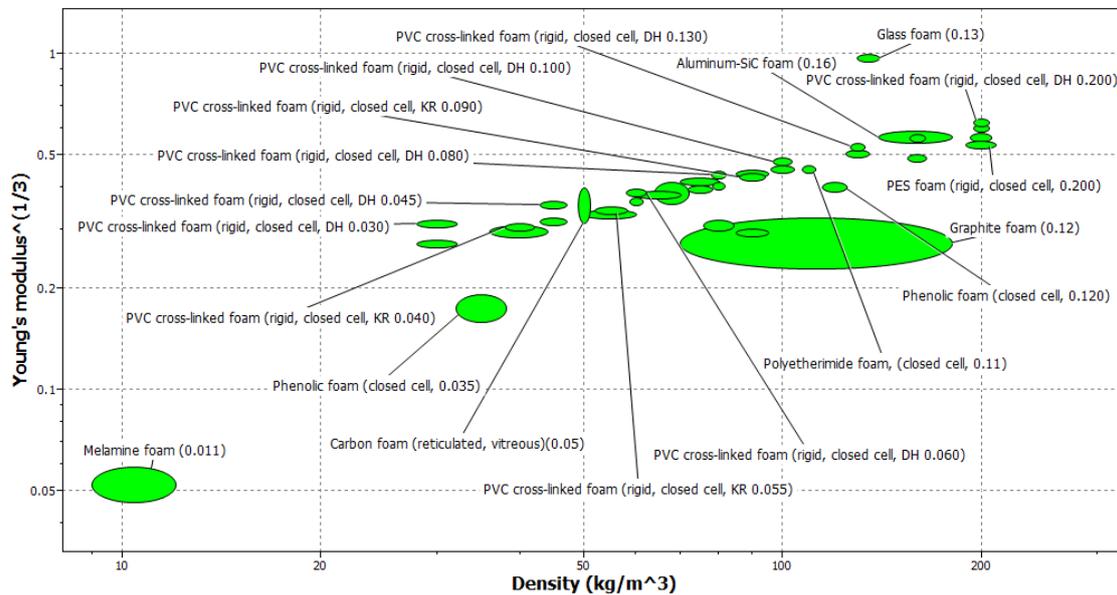


Figura 4.17: Espumas incombustibles y self-extinguishing.

Y, por último, todas ellas se han recogido en la tabla 4.5:



Tabla 4.5: Espumas no inflamables y espumas que se autoextinguen.

NON-FLAMMABLE	SELF-EXTINGUISHING
Aluminum-SiC foam (0.07)	Melamine foam (0.011)
	Polyetherimide foam, (closed cell, 0.06)
Carbon foam (reticulated, vitreous)(0.05)	Polyetherimide foam, (closed cell, 0.08)
	PVC cross-linked foam (rigid, closed cell, AC 0.040)
Glass foam (0.13)	PVC cross-linked foam (rigid, closed cell, AC 0.055)
	PVC cross-linked foam (rigid, closed cell, AC 0.065)
Graphite foam (0.12)	PVC cross-linked foam (rigid, closed cell, AC 0.075)
	PVC cross-linked foam (rigid, closed cell, AC 0.090)
Phenolic foam (closed cell, 0.035)	PVC cross-linked foam (rigid, closed cell, DH 0.030)
	PVC cross-linked foam (rigid, closed cell, DH 0.045)
Phenolic foam (closed cell, 0.080)	PVC cross-linked foam (rigid, closed cell, DH 0.060)
	PVC cross-linked foam (rigid, closed cell, DH 0.080)
Phenolic foam (closed cell, 0.120)	PVC cross-linked foam (rigid, closed cell, KR 0.030)
	PVC cross-linked foam (rigid, closed cell, KR 0.040)
Phenolic foam (closed cell, 0.160)	PVC cross-linked foam (rigid, closed cell, KR 0.045)
	PVC cross-linked foam (rigid, closed cell, KR 0.055)
Phenolic foam (closed cell, 0.200)	PVC cross-linked foam (rigid, closed cell, KR 0.075)

4.2. Plásticos reforzados

4.2.1. Sheet Molding Compound (SMC)

Los SMCs [11], [12], [13], [14], son plásticos reforzados que se obtienen mediante moldeo por compresión, que a menudo se utilizan en la fabricación de piezas grandes donde se necesita una alta resistencia mecánica.

El SMC es un tipo de material compuesto preimpregnado (“prepreg”), que se comercializa en rollos, que está formado por una resina termoestable, un refuerzo de fibra con una distribución aleatoria, catalizadores, rellenos inertes y aditivos (pigmentos, estabilizadores, agentes de liberación y espesantes) para mejorar o proporcionar determinadas propiedades finales a la pieza, que posteriormente será fabricada utilizando este material. La cantidad de refuerzo de vidrio se sitúa entre 10% y 60%, y la longitud habitual de las fibras se sitúa entre 12



Máster interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

y 25 mm. Los SMCs pueden llevar también fibras continuas unidireccionales orientadas en la dirección apropiada. Su espesor habitual suele ser inferior a 6 mm, figura 4.18



Figura 4.18: Ejemplos de SMC.

4.2.2. Bulk Molding Compounds (BMC)

Los BMCs son resinas de plástico termoestable mezcladas con rellenos inertes, refuerzos de fibra, catalizadores, estabilizadores y pigmentos que forman un compuesto viscoso moldeable. El refuerzo de vidrio representa entre el 10% y el 30%, con una longitud de vidrio típica entre 0,8 y 12,5 mm. Dependiendo de la aplicación de la pieza final, los BMCs se formulan para lograr un ajustado control dimensional, resistencia a la llama, aislamiento eléctrico, resistencia a la corrosión, altas propiedades mecánicas, baja contracción y estabilidad de color. Sus excelentes características hacen que este material termoestable se adapte a una amplia variedad de aplicaciones que requieren precisión en detalle y dimensiones, así como un alto rendimiento. Se pueden ver ejemplos de este material en la figura 4.19 (antes del curado de la resina).



Figura 4.19: Ejemplos de BMC.

Los composites elaborados con resinas termoestables son ligeros y muy resistentes, exhibiendo mejores ratios de resistencia -peso que la mayoría de los metales. Estos materiales compuestos son también resistentes a la corrosión, resistentes a la fluencia y exhiben excelentes propiedades térmicas en comparación con los productos termoplásticos de ingeniería.

La tecnología SMC avanzada es capaz de utilizar la calidad de la materia prima sin reducir sus características durante la transformación; es una tecnología de alto rendimiento en términos mecánicos del producto resultante (longitud de fibra de vidrio, homogeneidad del material e integridad de las fibras). Por el contrario, la tecnología BMC es una tecnología para el moldeo de materiales compuestos que utiliza una materia prima disponible en "bloques", que se somete a un alto esfuerzo termomecánico durante el proceso de transformación, en consecuencia, se produce una disminución de las propiedades mecánicas de los detalles, reduciendo así la resistencia al impacto y la resistencia a la flexión. Teniendo esto en cuenta, el estudio se va a centrar en los materiales SMC.



Máster interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

Las principales ventajas de estos procesos frente a otros conocidos son:

- Resistencia térmica: los materiales fabricados por SMC y BMC son adecuados en aplicaciones donde se requieren elevadas temperaturas relativas de servicio. Esto es debido a la combinación de resina termoestable entrecruzada con alto contenido en relleno inorgánico.
- Retardante de llama: Se pueden añadir una gran variedad de aditivos y puede conseguirse incluso con bajos espesores. Los productos SMC y BMC no contienen halógenos ni otros aditivos tóxicos.
- Precisión: SMC y BMC son la primera opción cuando se requiere sustituir con gran precisión partes metálicas de piezas de altas prestaciones. Se consiguen tolerancias muy pequeñas sin post-operaciones, disminuyendo costes e incrementando la rentabilidad.
- Son aislante eléctrico.
- Bajas emisiones: debido a que el moldeo es cerrado.
- Otras propiedades del composite final: buena estabilidad dimensional, excelente acabado superficial por ambas caras y posibilidad de obtener geometrías complejas.
- Automatización: ideal para grandes series.

También tienen algunas limitaciones como:

- Necesidad de una alta inversión.
- Mayor coste del material en comparación con un plástico sin reforzar
- Necesidad de instalaciones para manipulación y almacenamiento del material.
- El espesor máximo de la pieza obtenida por SMC es menor de 5 mm.

Los materiales SMC analizados con el software CES se muestran en la tabla 4.6

Tabla 4.6: SMS analizados gracias a datos obtenidos del software CES EduPack.

SMC	
SELF-EXTINGUISHING	SLOW-BURNING
Epoxy SMC (carbon fiber)	Epoxy SMC (glass fiber)
Polyester SMC (30% glass fiber, self-extinguishing, low resistivity)	Polyester SMC (20% glass fiber, slow-burning)
Polyester SMC (15% glass fiber, self-extinguishing)	Polyester SMC (30% glass fibre, slow-burning, low density)
Polyester SMC (25% glass fiber, self-extinguishing)	Polyester SMC (50% glass fiber, slow-burning)
Polyester SMC (35% glass fibre, self-extinguishing)	Polyester SMC (25% glass fiber, slow-burning)
Polyester SMC (40% glass fibre, self-extinguishing)	Polyester SMC (30% glass fibre, slow-burning)
Polyester SMC (50% glass fiber, self-extinguishing)	
Polyester SMC (20% glass fiber, self-extinguishing)	
Polyester SMC (30% glass fiber, self-extinguishing)	



4.3. Espumas metálicas (Foams)

Las espumas metálicas [15], [16] representan una nueva forma de materiales con estructura porosas. Su porosidad se sitúa normalmente entre el 40% y el 90%. Con esta nueva estructura, que se puede ver en la figura 4.20, se pretende imitar la de los materiales naturales como la madera, el hueso, corcho, coral, etc.



Figura 4.20: Ejemplo de pieza fabricada con espuma de aluminio.

Las estructuras porosas permiten una optimización de la resistencia y rigidez, absorción de energía, aislamiento térmico y acústico, utilizando un material cuya característica más sobresaliente es su baja densidad.

Normalmente, poseen una estructura altamente desordenada, con una gran dispersión tanto del tamaño como de la forma de cada uno de los poros. Estos pueden ser de naturaleza abierta o cerrada. Hoy en día resulta ya posible obtener la estructura deseada ajustando los parámetros durante su producción. Por otro lado, la densidad de la espuma se puede controlar con el contenido de agente espumante, la temperatura y la velocidad de calentamiento.

Las espumas metálicas más frecuentes son las de base de aluminio y níquel, pero también existen espumas de titanio, magnesio, plomo, cobre, cinc, bronce y acero.

4.3.1. Propiedades de la espuma de aluminio

Las propiedades de las espumas metálicas vienen dadas básicamente por la estructura que presentan, la composición química, por el método de fabricación y por el posible tratamiento térmico que se hubiera aplicado.

Los parámetros que más influyen la estructura de las espumas son:

- Las propiedades de las paredes de la espuma (propiedades del material denso).
- La densidad relativa, relación entre la densidad de la espuma y la densidad del material denso.
- El tipo de estructura porosa, si es de poro abierto o cerrado.
- El tamaño y distribución de los poros.
- La forma de los poros y su anisotropía.
- La conectividad entre los bordes de los poros
- Defectos, entre los que destaca la existencia de poros colapsados o rotos.



Máster interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

Casi todas las propiedades tanto mecánicas como físicas dependen básicamente de la densidad relativa ρ/ρ_s o porosidad

$$\frac{P}{P_s} = k \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^a \quad (4.1)$$

En donde k y a son constantes, P es una propiedad cualquiera de la espuma, P_s es la propiedad del material denso, ρ es la densidad de la espuma y ρ_s es la densidad del material denso.

Las propiedades básicas de las espumas y sus ventajas comparadas con otros materiales son:

- Muy baja densidad, en el rango de 250 a 900 kg/m³ (flotan en el agua).
- Muy buena capacidad de absorción de energía.
- Buena capacidad para la amortiguación de vibraciones.
- Muy buena capacidad de absorción de ruidos.
- Muy baja conductividad térmica (poros cerrados), aislantes térmicos.
- Alta conductividad térmica (poros abiertos), conductores térmicos.
- Muy buena rigidez específica (ratio entre el módulo elástico y la densidad) en estructuras sándwich.

Algunos ejemplos de las propiedades que se obtienen se facilitan en las tablas 4.7, 4.8 y 4.9

Tabla 4.7: Propiedades de espumas de aluminio fabricadas mediante el proceso IFAM y MEPURA

alloy	Al 99,5 dense	Al99,5	AlSi12	
foaming agent	-	TiH ₂	TiH ₂	
density g/cm ³	2,7	0,4	0,54	0,84
compression strength MPa	-	3	7	15
energy absorption at 30% compression MJ/m ³	-	0,72	2	4
kJ/kg	-	1,8	3,7	4,8
modulus of elasticity GPa	67	2,4	5	14
electrical conductivity m/(Ω mm ²)	34	2,1	n.a.	n.a.
thermal conductivity W/(mK)	235	12	13	24

Tabla 4.8: Propiedades mecánicas de algunas espumas comerciales.

Mechanical properties	Commercial type of foam and material				
	CYMAT Al-SiC	ALULIGHT Al	ALPORAS Al	ERG Al	INCO Ni
Relative density, ρ/ρ_s	0.02-0.2	0.1-0.35	0.08-0.1	0.05-0.1	0.03-0.04
Structure	closed cells			open cells	
Density, ρ , Mg/m ³	0.07-0.56	0.3-1.0	0.2-0.25	0.16-0.25	0.26-0.37
Modulus of elasticity, E, GPa	0.02-2.0	1.7-12	0.4-1.0	0.06-0.3	0.4-1.0
Shear modulus, G, GPa	0.001-1.0	0.6-5.2	0.3-0.35	0.02-0.1	0.17-0.37
Flexural modulus, E _f , GPa	0.03-3,3	1.7-12	0.9-1.2	0.06-0.3	0.4-1.0
Poisson ratio, ν	0.31-0.34	0.31-0.34	0.31-0.34	0.31-0.34	0.31-0.34
Compression strength, R _{mt} , MPa	0.04-7.0	1.9-14	1.3-1.7	0.9-3.0	0.6-1.1
Yield strength, R _e , MPa	0.04-7.0	2.0-20	1.6-1.8	0.9-2.7	0.6-1.1
Tensile strength, R _m , MPa	0.05-8.5	2.2-30	1.6-1.9	1.9-3.5	1.0-2.4
Endurance limit, R _d , MPa	0.02-3.6	0.95-13	0.9-1.0	0.45-1.5	0.3-0.6
Densification strain, ϵ_D	0.6-0.9	0.4-0.8	0.7-0.82	0.8-0.9	0.9-0.94
Tensile ductility, ϵ_t	0.01-0.02	0.002-0.04	0.01-0.06	0.1-0.2	0.03-0.1
Loss coefficient, η , %	0.4-1.2	0.3-0.5	0.9-1.0	0.3-0.5	1.0-2.0
Hardness, H, MPa	0.05-10	2.4-35	2.0-22	2.0-3.5	0.6-1.0
Fracture toughness, K _{IC} ^c , MPam ^{1/2}	0.03-0.5	0.3-1.6	0.1-0.9	0.1-0.28	0.6-1.0



Tabla 4.9: Expresiones teóricas para calcular las propiedades mecánicas de las espumas metálicas a partir de las propiedades del metal denso y la densidad relativa.

Mechanical properties	open cells	closed cells
Modulus of elasticity, E , GPa	$E = (0.1-4)E_s(\rho/\rho_s)^2$	$E = (0.1-1)E_s \cdot (0.5(\rho/\rho_s)^2+0.3(\rho/\rho_s))$
Shear modulus, G , GPa		$G \approx 3/8E$
Volume modulus, K , GPa		$K \approx 1.1E$
Flexural modulus, E_f , GPa		$E_f \approx E$
Poisson ratio, ν		0.32-0.34
Compression strength, R_{mt} , MPa	$R_{mt} = (0.1-1)R_{mts}(\rho/\rho_s)^{3/2}$	$R_{mt} = (0.1-1)R_{mts} \times (0.5(\rho/\rho_s)^{2/3}+0.3(\rho/\rho_s))$
Tensile strength, R_m , MPa		$R_m \approx (1.1-1.4)R_{mt}$
Endurance limit, R_d , MPa		$R_d \approx (0.5-0.75)R_{mt}$
Densification strain, ϵ_D	$\epsilon_D = (0.91) \cdot (1.4\rho/\rho_s + 0.4(\rho/\rho_s)^3)$	$e_D = (0.9-1) \cdot (1-1.4\rho/\rho_s + 0.4(\rho/\rho_s)^3)$
Loss coefficient, η		$\eta \approx (0.95-1.05) \cdot \eta_s/(\rho/\rho_s)$
Hardness, H , MPa		$H = R_{mt}(1+2\rho/\rho_s)$

El módulo de elasticidad de la espuma depende fuertemente de su densidad, tal y como se ve en las figuras 4.21 y 4.22 y responde a una ley exponencial (con un exponente en torno a 1.6) como se puede ver en la ecuación (4.2).

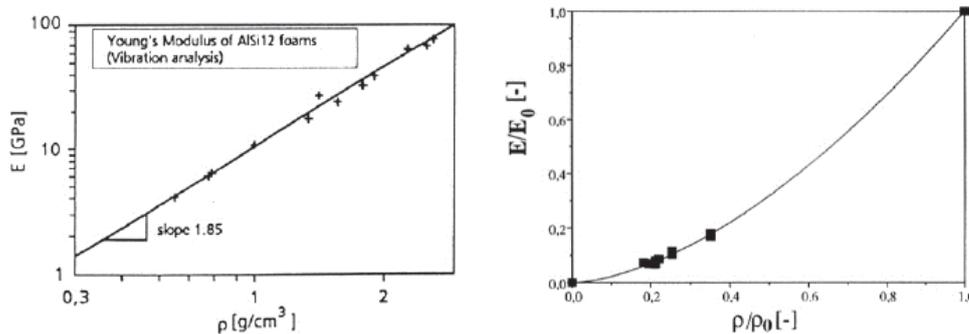


Figura 4.21: Grafico Módulo elástico- densidad para las espumas de aluminio.

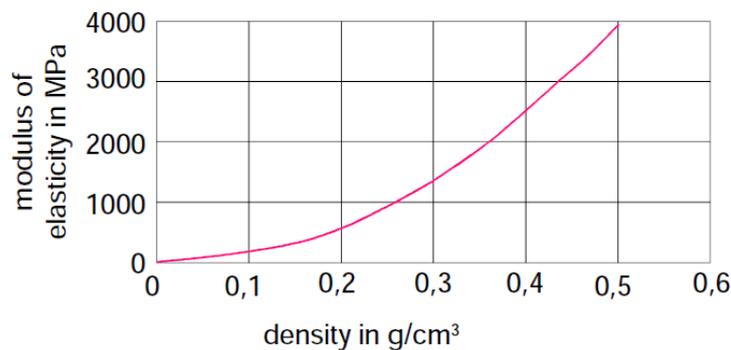


Figura 4.22: Variación del módulo elástico con la densidad de las espumas de aluminio

$$E_f = E_s \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^{1.6} \quad (4.2)$$

Debido a su estructura porosa, las espumas se comportan mecánicamente de manera diferente a los metales convencionales. El ensayo que resulta de mayor utilidad es el de compresión, que da como resultado un diagrama típico tensión de compresión-deformación



dividido en tres regiones, tal y como se aprecia en las figuras 4.23 y 4.24. Este comportamiento es típico de las espumas, tanto con poros abiertos como cerrados.

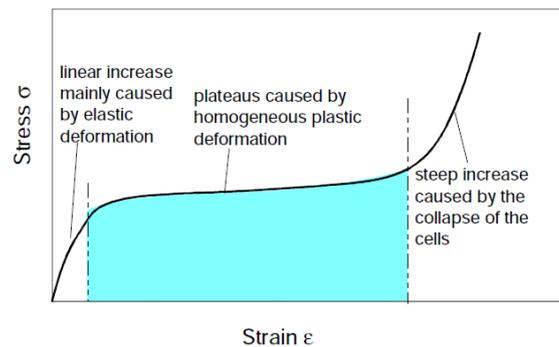
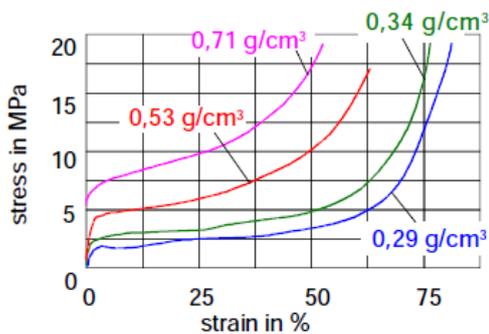


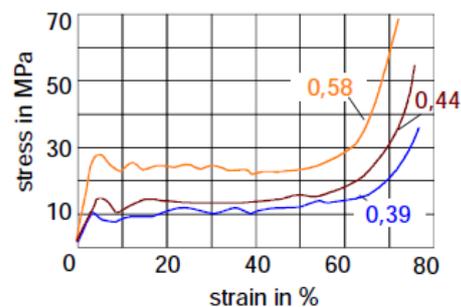
Figura 4.23: Resultados del ensayo de compresión típico de las espumas de aluminio.

Se observa un incremento lineal de la tensión al principio de la deformación, primera parte del diagrama, a la que le sigue una etapa de tensión aproximadamente constante, para terminar con un aumento elevado de la tensión al final del ensayo de compresión. La razón de este comportamiento típico, se debe a lo siguiente:

- La primera etapa corresponde a una deformación elástica, seguida inmediatamente por una deformación plástica, irreversible, que ya tiene lugar a tensiones bajas
- La zona de tensión más o menos constante se debe a la deformación plástica homogénea asociada al colapso de las celdas de la espuma.
- El aumento de la tensión final ocurre cuando las paredes opuestas de los poros comienzan a tocarse entre ellas.



Al99,5-foam (MEPURA; TU Wien)



AlSi6Cu-foam (IFAM, Germany)

Figura 4.24: Resultados del ensayo de compresión para diferentes espumas de aluminio, que muestran variaciones de densidad, composición y método de fabricación.

La resistencia específica (ratio resistencia-densidad o límite elástico-densidad) de las espumas de aluminio es especialmente favorable, si se compara con el del acero, aluminio y magnesio en paneles sometidos a flexión, como se puede ver en la figura 4.25. R es la resistencia a tracción y R_e es el límite elástico y se han considerado los ratios correspondientes a cargas de tracción/compresión, flexión de vigas y flexión de placas.

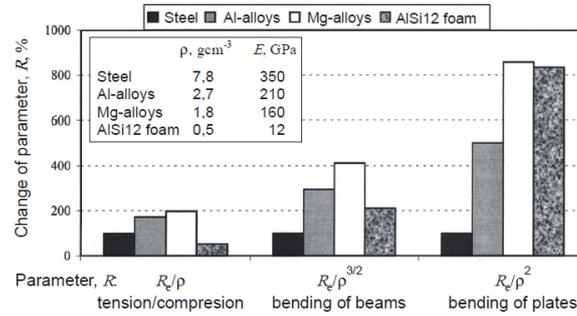


Figura 4.25: Comparación de la resistencia específica de diferentes materiales para diferentes condiciones de carga.

Se puede comprobar que tanto para flexión de vigas, como de paneles, el ratio de resistencia de la espuma de aleación AlSi12 presenta valores mucho mayores que el del acero, siendo también mejor que los correspondientes a las aleaciones de aluminio densas en el caso de flexión de placas. Por otro lado, en la figura 4.26, se comprueba que el ratio relativo a la rigidez a flexión de placas es también muy superior en el caso de la espuma de la aleación AlSi12 a los que se obtienen con los otros materiales con los que se ha comparado.

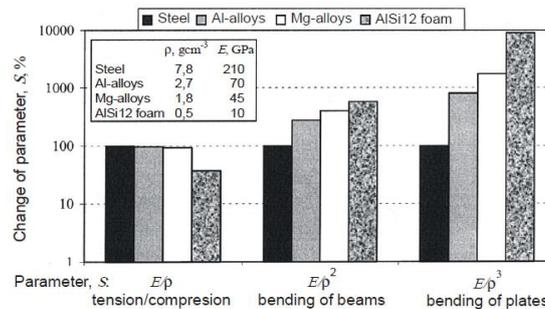


Figura 4.26: Comparación de la rigidez específica de diferentes materiales.

De este modo, se pone en evidencia que el principal uso de estos materiales porosos en aplicaciones donde la rigidez y ligereza de los elementos sea importante. Las estructuras tipo sándwich, constituidas con un núcleo de espuma limitado por dos chapas poseen excelentes propiedades bajo cargas de flexión estáticas o dinámicas.

Por otro lado, la respuesta de las espumas metálicas ante cargas de tracción no es buena y deben reforzarse. La siguiente figura 4.27 muestra un ejemplo de como la aplicación de refuerzos puede mejorar el comportamiento bajo cargas de flexión de una viga fabricada con una espuma AlSi12 con un 81% de porosidad.

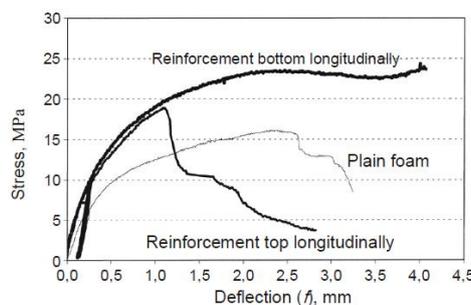


Figura 4.27: Influencia de la aplicación de refuerzos en el comportamiento de una viga a flexión de espuma de aluminio.



Los principales efectos de los refuerzos son:

- Previene el colapso de la espuma (efecto estabilizador).
- Incrementa el espesor de la capa superficial.
- Significativo incremento de la tenacidad a la fractura.
- Significativo incremento de la resistencia a flexión (especialmente cuando se refuerza la zona sometida a tracción).
- Significativo incremento de la capacidad de absorción de energía.

4.4. Aerogeles

El término aerogel [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [29], no se refiere a una sustancia en particular, sino que se refiere a la geometría que presenta dicha sustancia. Un aerogel es una estructura de poro abierto, mesoporosa (material que contiene poros en un rango entre 2 y 50 nm de diámetro, aunque normalmente se encuentran por debajo de 20nm); es una espuma sólida con una nanoestructura interconectada formando una red, altamente porosa (presenta una porosidad de al menos el 50%) y que por lo tanto, tiene una densidad extremadamente baja (que varía desde los 0.0011 a los 0.5 g/cm³).

Entre las características principales de los aerogeles, cabe destacar:

- Ultra livianos, ya que en un 90% - 99% (en volumen) son aire u otro gas.
- Muy resistentes, al ser capaces de soportar mil veces su propio peso, aunque también son muy frágiles.
- Ultra aislantes, debido a su alta porosidad. Presenta características que le permiten cumplir esta función tanto a bajas como a altas temperaturas
- Apariencia parecida a la del vidrio

Los aerogeles se pueden fabricar con materiales como:

- Sílice
- La mayoría de los óxidos metálicos de transición, como por ejemplo el óxido de hierro
- Numerosos óxidos, como el óxido de estaño.
- Polímeros orgánicos, como resorcinol-formaldehído, fenol-formaldehído, poliacrilatos, poliestirenos, poliuretanos y epoxis.
- Polímeros biológicos, como la gelatina, pectina y agar agar.
- Carbono
- Nanotubos de carbono
- Metales como son el cobre y el oro

También se pueden fabricar composites de aerogeles como los aerogeles reforzados con capas poliméricas o los aerogeles con nanopartículas magnéticas.

4.4.1. Aerogeles especiales: Airloys

Los airloys [24], son una clase de materiales ingenieriles avanzados, que combinan la resistencia de los plásticos convencionales con la baja densidad y las propiedades superaislantes de los aerogeles. Estos materiales son resistentes, rígidos y duros. Como los



Máster interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

aerogeles clásicos, los airloys tienen una superficie específica extremadamente alta y pueden ser eléctricamente aislantes o conductores.

Se diseñan a niveles microscópicos para ofrecer un rendimiento sin precedentes tanto en estructuras ligeras, superaislamientos multifuncionales, recuperación de vertidos (como los del petróleo), baterías, supercondensadores y ultracondensadores, sensores, soportes de catalizadores, células de combustible, etc.

Las diferentes líneas de producción de los airloys están diseñadas para combinar las propiedades de materiales dispares, que de otra manera sería difícil o imposible de reunir en materiales convencionales. Se pueden obtener las características siguientes:

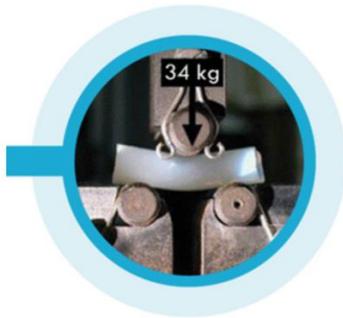


Figura 4.28: Tabla 4.4.1.a: Ensayo a flexión en tres puntos de un Airloy.



Figura 4.29: Demostración de la alta tenacidad de los Airloys.

- Resistencia, rigidez y flexibilidad: pueden ser optimizados para conseguir muy altas resistencias específicas (resistencia por unidad de peso) y sus propiedades pueden diseñarse desde materiales fuertes y rígidos a dúctiles y flexibles, como se puede apreciar en las figuras 4.28 y 4.29.
- Composición y densidad: normalmente este tipo de materiales son entre tres y diez veces más ligeros que los plásticos convencionales ya que tienen unas densidades que van desde 0.01 a 0.9 g/cm³. Así mismo, no presentan restricciones de composición y pueden ser fabricados con cualquier sustancia particular, entre las que se encuentran las cerámicas, los polímeros, el carbono y los metales.
- Translucidos, transparentes y coloreados: se pueden fabricar translucidos, con un alto grado de transparencia óptica, incluso están disponibles en un amplio abanico de colores: rosa, azul, blanco y negro.
- Resistentes tanto al agua como a la humedad: este tipo de materiales son normalmente hidrófugos, repelen el agua, y son estables frente a la humedad. Pueden incluso prepararse para mantener un carácter hidrófobo que les permita no ser afectados incluso tras ser sumergidos bajo el agua durante largos periodos de tiempo.
- Estos materiales pueden ser cortados, taladrados, doblados, fresados y roscados como cualquier otro material ingenieril (los aerogeles clásicos no presentan estas características). También se puede introducir en moldes específicos en 3D cuando se necesita realizar piezas voluminosas. Los airloys pueden ser pegados, laminados entre sí y con otros materiales, como pueden ser plásticos reforzados con fibra de carbono o fibras de vidrio.



- Conductividad eléctrica: los airloys pueden ser utilizados como aislantes, tanto térmicos como acústicos; pueden ser aislantes eléctricos y también conductores eléctricos.

Los airloys se pueden optimizar para aplicaciones que demanden una alta resistencia a compresión, una excelente amortiguación al impacto y absorción de energía mecánica.

4.5. Metales

Al analizar metales alternativos, tal y como se ve en la figura 4.30, las aleaciones que tienen simultáneamente un alto módulo elástico y baja densidad son las aleaciones de berilio. Se han analizado algunas a modo representativo, tal y como se puede ver en la tabla 4.10, porque hay que mencionar que estas aleaciones son extremadamente caras. El precio por kilo se sitúa entre los 500 y 1000 €. En el gráfico de la Figura 4.30 se han incluido también algunas aleaciones de aluminio reforzadas por partículas cerámicas de SiC.

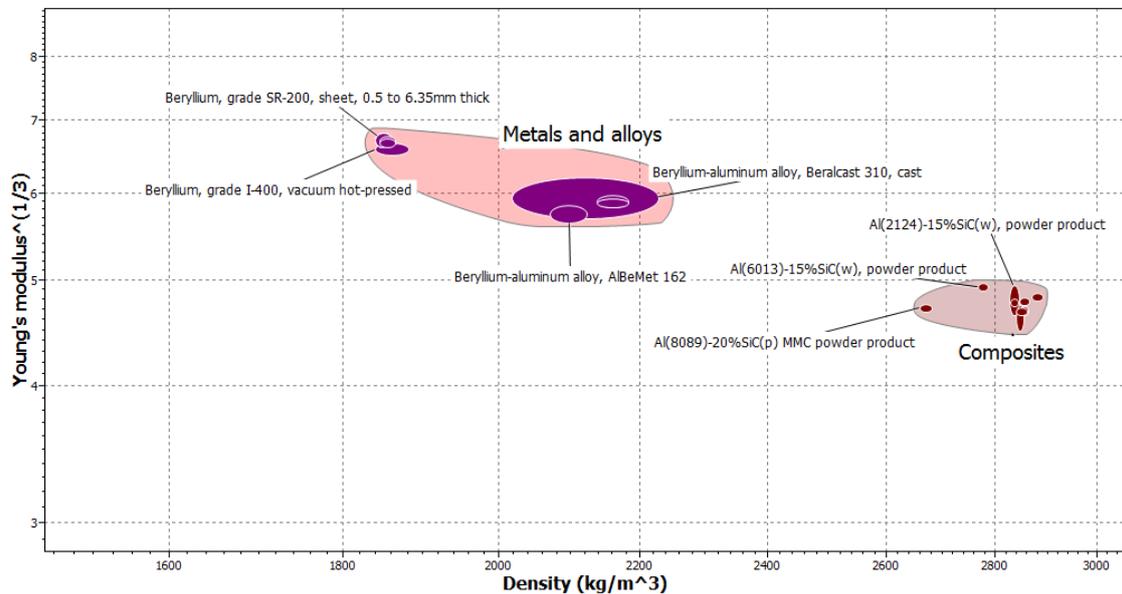


Figura 4.30: Selección de aleaciones de berilio y composites metálicos con CES EduPack.

Tabla 4.10: Ejemplos de las aleaciones de Berilio y composites de aluminio.

Número	Nombre
90	Beryllium-aluminum alloy, ALBeMet 162
91	Beryllium-aluminum alloy, Beralcast 310, cast
92	Beryllium, grade I-400, vacuum hoy-pressed
93	Beryllium, grade SR-200, sheet, 0.5 to 6.35mm thick
94	Al(6013)-15%SiC(w), powder product
95	Al(8089)-20%SiC(p) MMC powder product
96	Al(2124)-15%SiC(w), powder product



5. PROCESOS DE FABRICACIÓN

5.1. SMC/BMC

En ambos casos se parte de un preimpregnado, que se obtiene mediante la combinación en continuo de una resina termoestable con fibra cortada "in situ", dando como resultado una lámina. Mediante rodillos de presión se compacta la pasta, lo que asegura la completa impregnación y mezclado de los componentes. La mezcla se desplaza con la ayuda de una cinta transportadora envuelta en films, tanto la parte superior como la inferior, que pueden ser de polietileno o de nylon, para evitar la adherencia a los rodillos de compactación.

Finalmente la lámina se enrolla sobre sí misma, normalmente formando una bobina, para su almacenamiento antes del proceso de moldeo.

En la figura 5.1 puede verse el esquema del proceso de fabricación del preimpregnado o pre-preg de SMC.

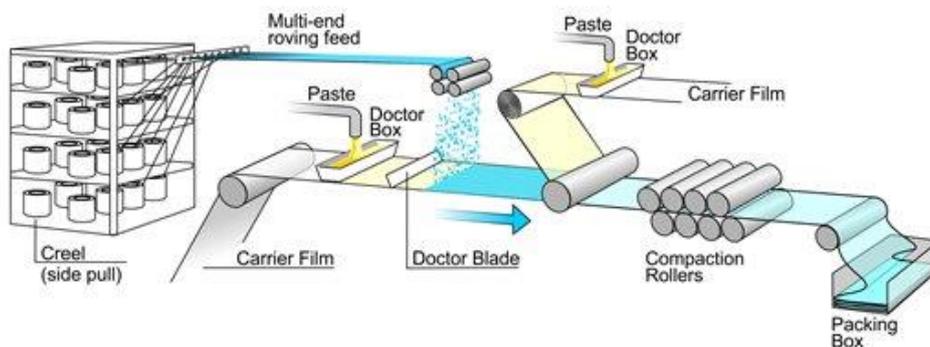


Figura 5.1: Proceso fabricación del SMC.

El SMC normalmente se moldea por compresión, figura 5.2, pudiéndose conseguir de este modo formas tan complejas como lo sean las matrices de conformado. Para ello es necesario cortar la cantidad de material del rollo necesaria, retirar las películas protectoras de polietileno, y rellenar la cavidad del molde, apilando varias capas superpuestas. Se pueden ver piezas del rollo cortadas en la figura 4.18. Posteriormente se cierra la prensa y se aplica la correspondiente presión (normalmente oscila entre 50 y 100 bares) para que la resina y la fibra de vidrio fluyan y adquieran la forma requerida. Finalmente hay que mantener el molde sobre unos 130-170 °C durante 1 a 5 minutos (según el espesor de la pieza) para que se complete el curado del polímero termoestable. Una vez de que el curado se ha producido, se abre el molde y se procede al desmoldeo de la pieza.

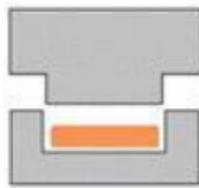


Figura 5.2: Moldeo SMC



Máster interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

Las altas propiedades mecánicas (resistencia y rigidez) que se consiguen junto al aspecto superficial, hacen que este material termoestable sea ideal para la fabricación de paneles de carrocerías en automoción, partes donde se requiera aislamiento eléctrico, motos acuáticas y otros muy variados componentes estructurales.

5.1.1. Variaciones del SMC.

D-SMC (Direct-Sheet Molding Compound)

Se ha desarrollado un proceso de producción en continuo de materiales SMC, figura 5.3, que consiste en el uso en continuo de los procesos siguientes: extrusión de todos los componentes (resina, fibra, rellenos y aditivos), inicio de curado en un horno microondas y moldeo por compresión para obtener la forma final en un solo paso. De este modo se logra reducir el tiempo de procesado, desde la mezcla de las materias primas hasta el producto terminado a sólo varios minutos.

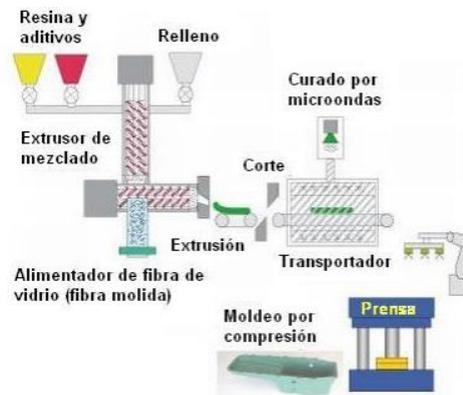


Figura 5.3: Proceso fabricación D-SMC.

ASMC (Carbon Fiber Reinforced SMC).

Las fibras de carbono son ideales para disminuir el peso de los materiales debido a su baja densidad y sus excelentes propiedades mecánicas (rigidez y resistencia).

La fabricación de ASMC se lleva a cabo con un equipo de SMC convencional, con solo realizar algunas modificaciones. Se pueden usar diferentes combinaciones de fibras (fibras de carbono y de vidrio con diferentes porcentajes y orientaciones).

5.2. Foams (Espumas metálicas)

Una estructura metálica porosa puede obtenerse de maneras muy diferentes, tal y como se aprecia en la figura 5.4:

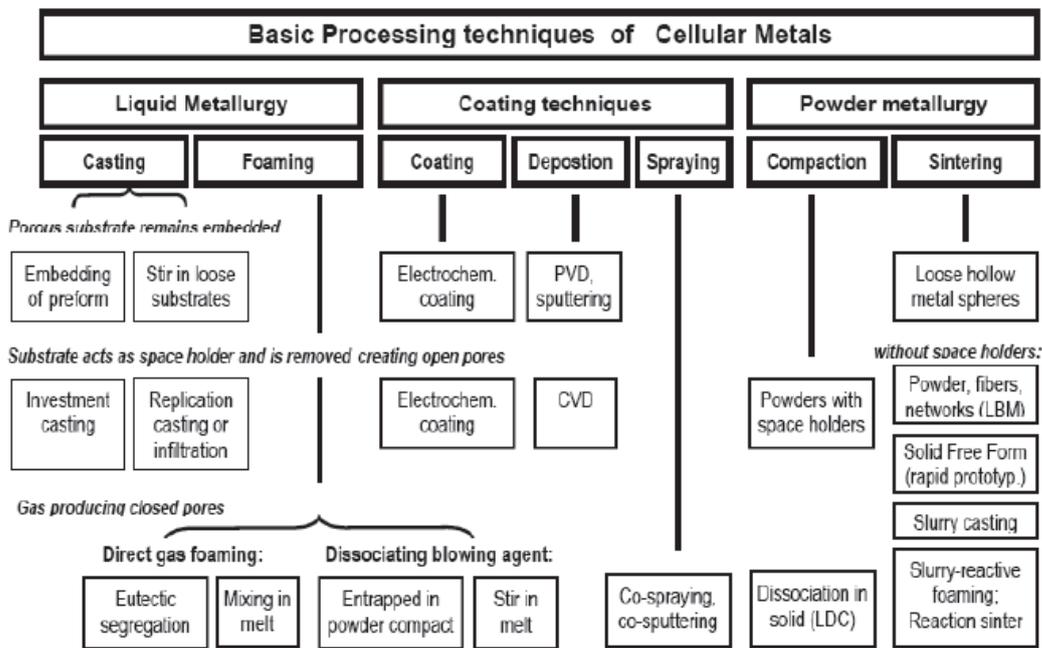


Figura 5.4: Esquema de los diferentes procesos de fabricación de las espumas metálicas.

Existen muchas posibilidades de producir espumas metálicas, en particular de aluminio, aunque solo unos pocos están en uso comercial. Estos métodos se pueden clasificar en dos categorías, los que parten del metal líquido o los que parten del metal en polvo. Comentaremos a continuación algunos de ellos.

5.2.1. Espumas fabricadas a partir de coladas de metal líquido (LM foams):

- **Por inyección de gas en el metal fundido** (nombre comercial CYMAT, proceso HKB, Alcan/Norsk Hydro)

Este método se basa en la inyección de un gas en el metal líquido. El proceso Alcan/Norsk Hydro se muestra en la figura 5.5. En este caso resulta necesario realizar una adición de SiC o Al₂O₃, entre un 10% -15%, a la colada, para incrementar su viscosidad. Posteriormente se inyecta un gas, nitrógeno o argón, mediante un agitador. La espuma flotante se retira continuamente de la superficie de la colada dando lugar al material poroso. Utilizando este método se pueden fabricar placas de espuma de tamaño considerable con una porosidad media situada entre el 80% y el 97%.

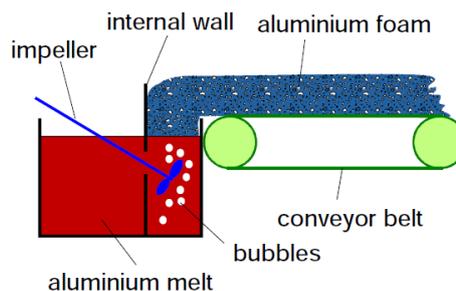


Figura 5.5: Proceso de fabricación de espuma por inyección de gas en el metal fundido.



- **Por disolución del agente espumante, hidruro de titanio, TiH_2** (ALPORAS, COMBAL)

Este método incluye la adición de 1.5% de calcio a la colada de aluminio para ajustar su viscosidad. La adición se produce cuando el aluminio está fundido a $680^\circ C$ y se mezcla durante 6 minutos en atmósfera normal. La densa colada resultante se introduce en un molde de fundición y se mezcla con el agente espumante en polvo, TiH_2 , con la ayuda de un agitador. Si se añade una cantidad suficiente de hidruro, normalmente un 1,6%, dicho agente espumante se descompone bajo la influencia de la temperatura y libera gas hidrógeno. De este modo, la espuma se expande y rellena el molde aproximadamente en 15 minutos. Para enfriarlo, es necesario el uso de ventiladores. Se obtienen de este modo bloques con una porosidad entre el 89% y 93%, que posteriormente se cortan en láminas (figura 5.6).

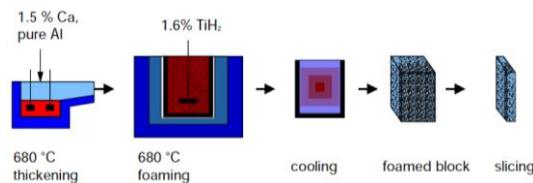


Figura 5.6: Proceso de fabricación de espuma por mezcla con un agente espumante, hidruro de titanio, TiH_2

- **Por regeneración de la estructura típica de una espuma PU.**(DUOCEL, CELLMET)

Este proceso parte de una espuma de poliuretano reticular (PU), que se moldea con la forma que se desea obtener. La pieza de espuma PU se sumerge en una suspensión de material refractario. Después de dejarlo secar, el polímero se elimina aplicando calor, obteniéndose de este modo el molde (cáscara refractaria) en el que se vierte el metal fundido. Posteriormente el material del molde se elimina con agua presurizada. El resultado es una espuma metálica que reproduce exactamente la estructura original de la espuma PU. La porosidad típica que se puede conseguir se encuentra entre el 80% y el 97%. Este proceso da lugar a poros abiertos, mientras que la porosidad de los procesos descritos con anterioridad era cerrada.

5.2.2. Espumas metálicas generadas a partir de la compresión de polvo metálico con el precursor, (pulvimetalurgia, PM foams)

- **Disolución del agente espumante en el polvo comprimido** (IFAM, MEPURA (ALULIGHT), FOAMINAL, AFS)

Estas tecnologías comienzan con la mezcla del metal en polvo con el agente espumante, que para el aluminio y sus aleaciones normalmente consiste en la adición de un 0.4-0.6% en peso de TiH_2 . Las aleaciones que se utilizan en estos procesos son aleaciones de forja de las series 1xxx (aluminio puro), 2xxx (Al-Cu) y 6xxx (Al-Mg-Si), así como aleaciones de moldeo como AlSi7 y AlSi12. Esta última presenta unas excelentes propiedades de espumabilidad debido a su bajo punto de fusión y a sus buenas propiedades de formación de espuma.

Esta mezcla de polvos se compacta obteniéndose un producto denso, semi-acabado, el precursor, en forma de viga o panel, tal y como se puede ver en la figura 5.7.

En el proceso IFAM (Fraunhofer-Institute en Bremen, Alemania), el material se compacta, mediante compresión uniaxial o extrusión, mientras que el proceso MEPURA, (ALULIGHT, Ranshofen, Austria) usa la compactación por extrusión continua, como se puede ver en las figuras 5.7 y 5.8.

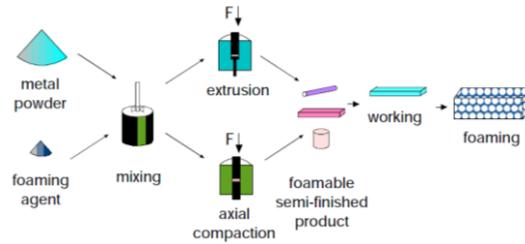


Figura 5.7: Proceso de fabricación de la espuma por disolución del agente espumante en el polvo. IFAM.

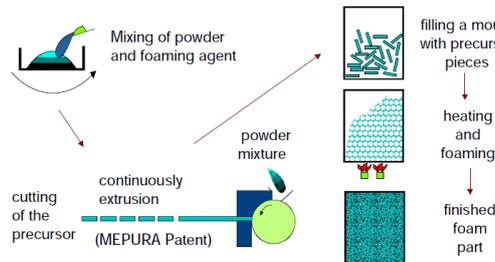


Figura 5.8: Proceso de fabricación de la espuma por disolución del agente espumante en el polvo. MEPURA.

El siguiente paso en los dos procesos detallados es el tratamiento térmico hasta el punto de fusión de la matriz metálica, justo por encima de la línea solidus y por encima de la temperatura de descomposición del agente espumante. A esta temperatura, el agente se descompone y libera gas hidrógeno, que causa la expansión del material, dando como resultado una estructura altamente porosa con poros cerrados. Después el producto se enfría rápidamente para evitar el colapso de la estructura porosa. Las porosidades que se consiguen con estos procesos varían entre el 60% y el 85%.

- **Generación del gas durante la sinterización del polvo reactivo.**

Los procesos de pulvimetalurgia son los más desarrollados en la actualidad. Para el aluminio en concreto, el proceso más utilizado consiste en disolver el agente espumante en el polvo y comprimir la mezcla. La principal ventaja de esta técnica es la posibilidad de utilizar un precursor preparado por compactación del metal en polvo que contiene a su vez el agente espumante y extruirlo a continuación para formar alambre, varilla, etc.

Mediante la espumación en moldes cerrados se puede conseguir casi cualquier forma: paneles, perfiles o complicadas formas en 3D, como también partes estructurales integrales (sándwiches o perfiles huecos rellenos con espuma). En el proceso de espumación se pueden rellenar tubos huecos con espuma de aluminio; algunos ejemplos se pueden observar en la figura 5.9.



Figura 5.9: Ejemplos de tubos rellenos de espuma de aluminio.



También se pueden producir de este modo estructuras sándwich, que consisten en un núcleo de espuma metálica y unas láminas superior e inferior a modo de caras. Esto se puede conseguir pegando las caras al núcleo o aplicando las láminas de aluminio por encima y por debajo del material precursor espumante. El resultado de este “sándwich precursor” es que puede deformarse antes de la formación de la espuma, por ejemplo por embutición. Las piezas fabricadas utilizando este método, normalmente tienen una densa capa superficial, que mejora significativamente la resistencia a flexión y un núcleo de baja densidad en el interior.

5.3. Aerogeles

5.3.1. Proceso Sol-gel

Los aerogeles se producen con una técnica de preparación química conocida como el proceso sol-gel, en el que precursores moleculares simples se convierten en partículas de tamaño nanométrico para formar una suspensión coloidal, o sol. Posteriormente las nanopartículas coloidales se unen entre sí en una red 3D y se aplica bien un secado supercrítico u otro método de secado adecuado, para dar como resultado una estructura a modo de esqueleto, al eliminar el componente líquido del gel, manteniéndose la estructura porosa (si el gel se seca lentamente mediante un proceso en el que el fluido se evapora, la red estructural del gel se colapsa, dando lugar a un material de alta densidad conocido como Xerogel. El proceso de fabricación de un aerogel se puede ver en la figura 5.10, que muestra el proceso de formación del aerogel de sílice, que es el más común. Como se puede ver, a partir de un alcóxido de silicio polimerizado, agua, alcohol y un catalizador se produce una condensación, seguida de un secado supercrítico donde se forma la matriz sólida de sílice, que se expande en el recipiente que la contiene.

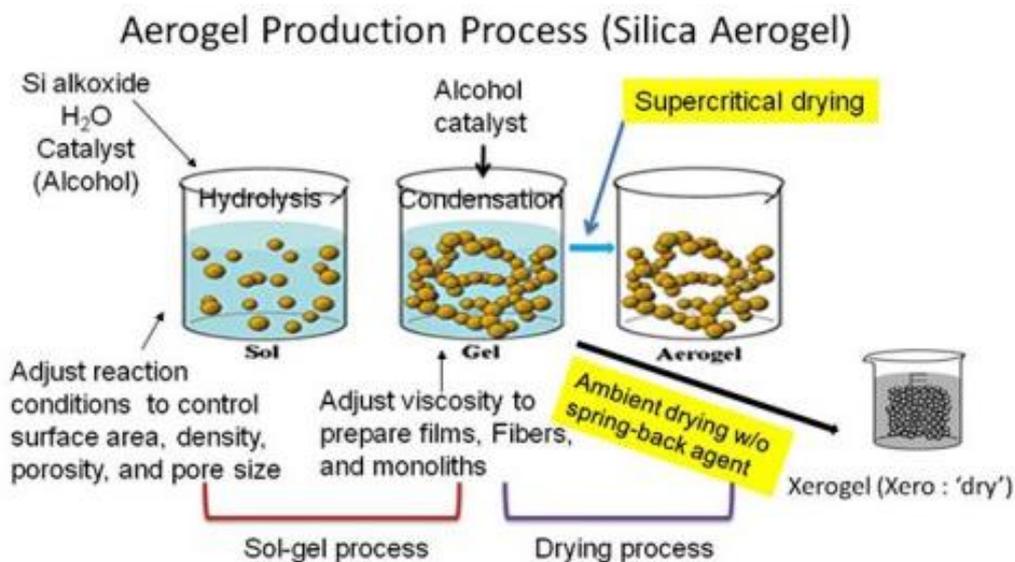


Figura 5.10: Esquema del proceso Sol-Gel para la fabricación de aerogeles.

El proceso de producción sol-gel ofrece la posibilidad de adaptar las propiedades del material a las aplicaciones específicas. Ajustando las condiciones de la reacción, como son la presión, temperatura, estequiometría, se pueden ajustar y optimizar las propiedades resultantes del aerogel, como la densidad, superficie específica, porosidad y tamaño del poro. Durante el proceso de gelificación se pueden añadir aleantes al sol, que se integran en la cadena principal



Máster interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

de sílice, o en el respectivo componente del aerogel. Ajustando la viscosidad del sol se pueden preparar películas delgadas, fibras, microsferas, recubrimientos, polvos o piezas, independientes de material, llamadas monolitos, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura 5.11.

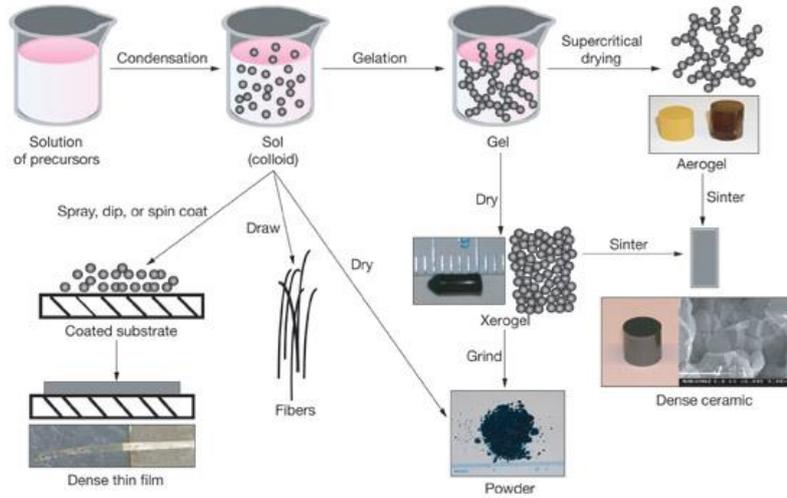


Figura 5.11: Obtención de diferentes productos durante el proceso de fabricación del aerogel.



6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se van a analizar, utilizando el modelo de software desarrollada en el capítulo 3.3, los materiales seleccionados en el capítulo 4, comenzando por los que se recogen en la tabla 6.2, que se habían reducido a 19. Antes, en la tabla 6.1 se recogen las mismas propiedades y datos de la aleación AlSi12, que es el material con el que se hacen actualmente los peldaños de la escalera. En la tabla 6.2 se han clasificado los materiales de acuerdo a la resistencia frente a la llama y se le ha asignado un número a cada uno de ellos, ya que en las tablas posteriores se hará referencia a ese número en vez de al nombre. Se ha decidido mantener el nombre en inglés, ya que es más fácil y eficaz a la hora de buscar información sobre dichos materiales, tanto en bases de datos, revistas científicas...

Tabla 6.1: Propiedades, índice y resultados con AlSi12.

Nombre	Densidad (g/cm ³)	Modulo Young (GPa)	Coef. Poisson	Espesor (mm)	Peso (g)	$(E/(1-\nu^2))^{(1/3)}$ /Densidad	Tenacidad a fractura (MPa m ^{1/2})
AlSi12	2.66	71	0.33	6	6491.3	1.62	22.5



Tabla 6.2: Tabla primeros materiales del análisis con CES.

Flammability	Número	Nombre
Non-flammable	1	Alumina foam (99%)(0.825)
	2	Aluminum foam (0.5)
	3	Aluminum foam (1.0)
	4	Aluminum-SiC foam (0.16)
	5	Aluminum-SiC foam (0.27)
	6	Aluminum-SiC foam (0.41)
	7	Aluminum-SiC foam (0.54)
	8	BMI/HS carbon fiber, UD composite, quasi-isotropic laminate
	9	BMI/HS carbon fiber, woven fabric composite, QI laminate
	10	Cyanate ester/HM carbon fiber, UD composite, quasi-isotropic laminate
	11	Mg-15%B4C(p), powder metallurgy
	17	Polyimide/HS carbon fiber, woven fabric composite, quasi-isotropic laminate
	18	PPS (30% carbon fiber)
	19	PPS (40% carbon fiber)
Self-extinguishing	12	PEEK (30% carbon fiber)
	13	PEEK/IM carbon fiber, UD composite, quasi-isotropic laminate
	14	PEK (20-30% carbon fiber)
	15	PI (30% carbon fiber, crystallized)
	16	Polyester liquid crystal (30% carbon fiber)

Se han obtenidos las propiedades necesarias para analizar cada uno de los materiales, y éstas se exponen en la tabla 6.3. Como muchas de las propiedades se facilitan en un rango, el análisis se ha llevado a cabo utilizando el valor medio del rango citado.



Tabla 6.3: Propiedades de la primera selección de materiales

Número	Densidad (kg/m ³)	Densidad media (kg/m ³)	Densidad (g/cm ³)	Modulo Young (GPa)	E medio (GPa)	Modulo flexión (GPa)	E flex. medio (GPa)	Coef. Poisson	Coef. Poisson medio
AlSi12	2660	2660	2.66	71	71	71	71	0.33	0.33
1	800-850	825	0,825	3-4	3.5	3-4	3.5	0,26-0,27	0.265
2	480-520	500	0,5	4,7-5,3	5	4,7-5,3	5	0,28-0,3	0.29
3	970-1030	1000	1	13,2-14,8	14	13,2-14,8	14	0,28-0,3	0.29
4	140-180	160	0,16	0,16-0,2	0.18	0,16-0,2	0.18	0,28-0,3	0.29
5	240-300	270	0,27	0,67-0,9	0.785	0,67-0,9	0.785	0,28-0,3	0.29
6	380-440	410	0,41	1,4-1,8	1.6	1,4-1,8	1.6	0,28-0,3	0.29
7	500-580	540	0,54	2,6-3	2.8	2,6-3	2.8	0,28-0,3	0.29
8	1570-1610	1590	1,59	43,7-50,7	47.2	79-93	86	0,295-0,303	0.299
9	1510-1530	1520	1,52	18,2-48,3	48.25	63-64	63.5	0,315-0,324	0.3195
10	1620-1670	1645	1,645	101-115	108	101-115	108	0,31-0,33	0.32
11	1880-2060	1970	1,97	61-62	61.5	61-62	61.5	0,27-0,29	0.28
17	1590-1630	1610	1,61	42,2-45,7	43.95	55,3-29,5	57.4	0,31-0,311	0.3105
18	1420-1470	1445	1,445	17,2-25,5	21.35	16,8-22,7	19.75	0,316-0,333	0.3245
19	1460-1490	1475	1,475	30,3-33,1	31.7	26,8-28,2	27.5	0,3-0,312	0.306
12	1420-1440	1430	1,43	12,8-24,1	18.45	12,8-22,2	17.5	0,43-0,45	0.44
13	1550-1570	1560	1,56	56,1-57,1	56.6	104-106	105	0,31	0.31
14	1400-1440	1420	1,42	19,5-26	22.75	19,5-26	22.75	0,315-0,328	0.3215
15	1460-1480	1470	1,47	21,5-22,6	22.05	21,5-22,6	22.05	0,316-0,329	0.3225
16	1490-1510	1500	1,5	29-32,5	30.75	23,5-25,8	24.65	0,4-0,43	0.415

Los resultados obtenidos en los diferentes cálculos realizados se muestran en la tabla 6.4. Esta tabla recoge el espesor mínimo necesario para cumplir la norma especificada en el capítulo 2.1.2, según la cual, tras aplicar una fuerza puntual de 3000 N, la flecha tiene que ser menor que 4 mm; y con este valor se ha calculado el peso que tendría la placa, que tal y como se indica en el capítulo 2.1.4 y en la figura 2.5, tiene unas dimensiones de 992 mm x 410 mm; y



estos cálculos se han realizado utilizando tanto el módulo de Young como el módulo elástico a flexión, ya que no en todos los materiales seleccionados coinciden; y finalmente se ha determinado el índice de interés ecuación (2.39), $((E/(1-\nu^2))^{1/3}/\rho)$, expresado en GPa cm³/g (se recuerda que se desea maximizar este índice de diseño con objeto de minimizar el peso de la placa).

Tabla 6.4: Resultados obtenidos de la primera selección de materiales.

Número	Espesor (E) (mm)	Peso (E) (g)	Espesor (E _{Flex}) (mm)	Peso (E _{Flex}) (g)	$(E/(1-\nu^2))^{(1/3)}$ /Densidad	$(E_{Flex}/(1-\nu^2))^{(1/3)}$ /Densidad
AlSi12	6	6491.3	6	6491.3	1.62	1.62
1	16,4	5502,9	16,4	5502,9	1.89	1.89
2	14,5	2948,7	14,5	2948,7	3.52	3.52
3	10,3	4189,2	10,3	4189,2	2.48	2.48
4	43,7	2843,8	43,7	2843,8	3.63	3.63
5	26,7	2932	26,7	2932	3.52	3.52
6	21,1	3518,5	21,1	3518,5	2.94	2.94
7	17,5	3843,5	17,5	3843,5	2.69	2.69
8	6,9	4462,1	5,6	3621,4	2.34	2.86
9	6,8	4403,9	6,2	3832,9	2.48	2.72
10	5,2	3479,1	5,2	3479,1	3.00	3.00
11	6,3	5047,8	6,3	5047,8	2.06	2.06
17	7	4583,7	6,4	4190,8	2.27	2.48
18	8,9	5230,6	9,1	5348,2	1.99	1.94
19	7,8	4679,3	8,2	4919,3	2.22	2.11
12	9	5234,5	9,1	5292,6	1.99	1.95
13	6,4	4060,7	5,2	3299,3	2.55	3.12
14	8,7	5024,6	8,7	5024,6	2.07	2.07
15	8,8	5261,3	8,8	5261,3	1.98	1.98
16	7,6	4636,6	8,2	5002,7	2.22	2.07



A continuación se ha valorado la tenacidad a la fractura que tienen todos estos materiales, tabla 6.5, debido a que aunque muchos de estos materiales que parecen a primera vista idóneos para la fabricación del peldaño, son muy frágiles, y este es un factor que apenas se ha tenido en cuenta hasta ahora, pero que sin duda debe ser tenido en cuenta a la hora de tomar la decisión final.

Tabla 6.5: Tenacidad a la fractura de la primera selección de materiales.

Número	Tenacidad a fractura (MPa m^{1/2})	Tenacidad a Fractura media (MPa m^{1/2})
AlSi12	20-25	22.5
1	0,18-0,2	0.19
2	1,8-2,3	2.05
3	5,0-6,0	5.5
4	0,35-0,4	0.37
5	0,65-0,9	0.77
6	1,3-1,6	1.45
7	2-2,5	2.25
8	5-7,3	6.15
9	22-26,9	24.45
10	27,7-33,8	30.75
11	10,0-12,0	11
17	32,6-39,9	36.25
18	4,48-5,38	4.93
19	4,93-7,19	6.06
12	6,34-7,89	7.11
13	26,5-32,3	29.4
14	6,72-8,81	7.76
15	7-8,39	7.69
16	3,64-3,79	3.71



Como se ha comentado en el capítulo 4, si no se tiene en cuenta la resistencia a la llama, los materiales adicionales que entrarían a formar parte del análisis, sus propiedades e índices de diseño se han representado en las tablas 6.6, 6.7, 6.8 y 6.9. El método de análisis ha sido exactamente el mismo que se explicó con la primera serie de materiales.

Tabla 6.6: Materiales de la segunda selección.

Flammability	Número	Nombre
Slow-burning	20	Bisphenol molding compound (low density glass-sphere filled)
	21	Epoxy/aramid fiber, UD composite, quasi-isotropic laminate
	22	Epoxy/HS carbon fiber, UD composite, quasi-isotropic laminate
	23	Epoxy/HS carbon fiber, woven fabric composite, QI laminate
	24	PA (type 612, 30% carbon fiber, 10% PTFE, lubricated)
	25	PA (type 66, 30% carbon fiber)
	26	PC (40% carbon fiber)
Highly flammable	27	Polyarylamide (30% carbon fiber)
	28	ABS (20% carbon fiber, EMI shielding, conductive)
	29	SPS (10% carbon fiber)
	30	SPS (15% carbon fiber, 15% PTFE, 2% silicone)
	31	SPS (20% carbon fiber)
	32	SPS (30% carbon fiber)
	33	SPS (40% carbon fiber)
	34	SPS(15% carbon fiber, 15% PTFE)



Tabla 6.7: Propiedades de los materiales de la segunda selección.

Número	Densidad (kg/m ³)	Densidad media (kg/m ³)	Densidad (g/cm ³)	Modulo Young (GPa)	E medio (GPa)	Modulo flexión (GPa)	E flex. medio (GPa)	Coef. Poisson	Coef. Poisson medio
AlSi12	2660	2660	2.66	71	71	71	71	0.33	0.33
20	750-1000	875	0.875	3,44-5,16	4.3	3,44-5,16	4.3	0,375-0,39	0.3825
21	1380	1380	1.38	23,5-30,9	27.2	43-57	50	0,328-0,346	0.337
22	1550-1580	1565	1.565	49,7-60,1	54.9	91-110	100.5	0,305-0,307	0.306
23	1540-1610	1575	1.575	44,2-48,2	46.2	59-65,3	62.15	0,335-0,339	0.337
24	1310-1340	1325	1.325	16-19,9	17.95	13,8-16,5	15.15	0,325-0,338	0.3315
25	1270-1290	1280	1.28	17,8-22,2	20	13,1-15,7	14.4	0,315-0,328	0.3215
26	1360-1380	1370	1.37	20,7-21,4	21.05	19,3-19,9	19.6	0,318-0,331	0.3245
27	1330-1360	1345	1.345	22,5-28,1	25.3	20,2-24,2	22.2	0,321-0,323	0.322
28	1130-1140	1135	1.135	12,4-13,8	13.1	6,12-12,4	9.26	0,337-0,351	0.344
29	1070-1090	1080	1.08	7,41-7,79	7.6	7,79-9,59	8.69	0,363-0,365	0.364
30	1280-1300	1290	1.29	18,8-19,8	19.3	13,9-19,8	19.55	0,327-0,329	0.328
31	1110-1130	1120	1.12	13,5-14,1	13.8	14,1-15	14.55	0,341-0,342	0.342
32	1160-1180	1170	1.17	19,5-20,5	20	19,8-20,5	20.15	0,326-0,328	0.327
33	1230-1250	1240	1.24	23,5-24,7	24.1	22,8-24,7	23.75	0,318-0,32	0.319
34	1280-1300	1290	1.29	18,8-19,8	19.3	19,3-19,8	19.55	0,327-0,329	0.328



Tabla 6.8: Resultados del análisis realizado con la segunda selección de materiales.

Número	Espesor placa (E) (mm)	Peso placa (E) (g)	Espesor placa (E_{Flex}) (mm)	Peso placa (E_{Flex}) (g)	$(E/(1-\nu^2))^{(1/3)}$ /Densidad	$(E_{Flex}/(1-\nu^2))^{(1/3)}$ /Densidad
AlSi12	6	6491.3	6	6491.3	1.62	1.62
20	14.8	5267	14.8	5267	1.96	1.96
21	8.1	4546.3	6.7	3760.5	2.27	2.78
22	6.5	4137.4	5.3	3373.5	2.51	3.07
23	6.8	4356	6.2	3971.6	2.37	2.62
24	9.4	5065.7	9.9	5335.1	2.05	1.94
25	8.9	4633.4	10.1	5258.1	2.20	1.97
26	8.9	4959.1	9.1	5070.6	2.09	2.04
27	8.4	4595.1	8.7	4759.2	2.26	2.17
28	10.4	4800.9	11.6	5354.9	2.17	1.93
29	12.4	5446.8	11.8	5183.2	1.91	2.00
30	9.2	4827	9.1	4774.5	2.16	2.17
31	10.2	4646.4	10	4555.3	2.23	2.27
32	9	4282.8	9	4282.8	2.41	2.42
33	8.5	4286.8	8.6	4337.3	2.41	2.40
34	9.2	4827	9.1	4774.5	2.16	2.17



Tabla 6.9: Tenacidad a la fractura de los materiales de la segunda selección.

Número	Tenacidad a fractura (MPa m ^{1/2})	Tenacidad a Fractura media (MPa m ^{1/2})
AlSi12	20-25	22.5
20	0,544-1,02	0.782
21	4,4-5,4	4.9
22	12,1-19,8	15.95
23	32,4-44,1	38.25
24	5,48-6,06	5.77
25	5,6-6,19	5.895
26	4,78-6,68	5.73
27	5,88-6,49	6.185
28	3,23-3,98	3.605
29	0,817-0,881	0.849
30	1,45-1,56	1.505
31	1,16-1,25	1.205
32	1,4-1,51	1.455
33	1,54-1,66	1.6
34	1,45-1,56	1.505



Se presentan a continuación materiales plásticos reforzados de la familia de los SMCs de la tabla 4.6. En las tablas 6.10, 6.11, 6.12 y 6.13, se indican los SMCs analizados, sus propiedades e índice característicos.

Tabla 6.10: Plásticos reforzados: SMC.

Flammability	Número	Nombre
Self-extinguishing	61	Polyester SMC (30% glass fiber, self-extinguishing, low resistivity)
	62	Polyester SMC (15% glass fiber, self-extinguishing)
	63	Polyester SMC (25% glass fiber, self-extinguishing)
	64	Polyester SMC (35% glass fibre, self-extinguishing)
	65	Polyester SMC (40% glass fibre, self-extinguishing)
	66	Polyester SMC (50% glass fiber, self-extinguishing)
	67	Polyester SMC (20% glass fiber, self-extinguishing)
	68	Polyester SMC (30% glass fiber, self-extinguishing)
Slow-burning	69	Polyester SMC (20% glass fiber, slow-burning)
	70	Polyester SMC (30% glass fibre, slow-burning, low density)
	71	Polyester SMC (50% glass fiber, slow-burning)
	72	Polyester SMC (25% glass fiber, slow-burning)
	73	Polyester SMC (30% glass fibre, slow-burning)
Self-extinguishing	74	Epoxy SMC (carbon fiber)
Slow-burning	75	Epoxy SMC (glass fiber)



Tabla 6.11: Propiedades de los SMCs.

Número	Densidad (kg/m ³)	Densidad media (kg/m ³)	Densidad (g/cm ³)	Modulo Young (GPa)	E medio (GPa)	Modulo flexión (GPa)	E flex. medio (GPa)	Coef. Poisson	Coef. Poisson medio
AlSi12	2660	2660	2.66	71	71	71	71	0.33	0.33
61	1730-2090	1910	1.91	10,5-12,7	11.6	9,5-11,6	10.55	0,27-0,33	0.3
62	1700-1900	1800	1.8	7,9-9,2	8.55	7,9-9,2	8.55	0,27-0,33	0.3
63	1600-1900	1750	1.75	8,2-9,9	9.05	8,6-10,5	9.55	0,27-0,33	0.3
64	1700-1900	1800	1.8	10-11,7	10.85	10-11,7	10.85	0,27-0,33	0.3
65	1750-1900	1825	1.825	10,7-12,5	11.6	10,7-12,5	11.6	0,27-0,33	0.3
66	1730-2090	1910	1.91	11,8-14,3	13.05	10,9-13,2	12.05	0,273-0,33	0.3015
67	1700-1900	1800	1.8	8,4-9,8	9.1	8,4-9,8	9.1	0,27-0,33	0.3
68	1650-1900	1775	1.775	9,5-11,6	10.55	9,5-11,6	10.55	0,273-0,33	0.3015
69	1780-1800	1790	1.79	7,3-8,8	8.05	7,7-9,6	8.65	0,27-0,33	0.3
70	1270-1540	1405	1.405	6,36-7,7	7.03	6,36-7,7	7.03	0,273-0,33	0.3015
71	1730-2090	1910	1.91	11,8-14,3	13.05	10,9-13,2	12.05	0,273-0,33	0.3015
72	1400-1800	1600	1.6	8,0-9,0	8.5	8,5-9,5	9	0,27-0,33	0.3
73	1580-2000	1790	1.79	10,5-11,5	11	9,55-11,6	10.575	0,273-0,33	0.3015
74	1400-1700	1550	1.55	69-150	109.5	33,5-35,2	34.35	0,219-0,266	0.2425
75	1500-1800	1650	1.65	13,8-27,6	20.7	13,8-20,6	17.2	0,313-0,342	0.3275



Tabla 6.12: Resultados obtenidos con los SMCs.

Número	Espesor placa (E) (mm)	Peso placa (g)	Espesor placa (E_{Flex}) (mm)	Peso placa (E_{Flex}) (g)	$(E/(1-\nu^2))^{(1/3)}$ /Densidad	$(E_{Flex}/(1-\nu^2))^{(1/3)}$ /Densidad
AlSi12	6	6491.3	6	6491.3	1.62	1.62
61	10.9	8467.5	11.3	8778.2	1.22	1.18
62	12.1	8858.4	12.1	8858.4	1.17	1.17
63	11.8	8398.8	11.6	8256.4	1.23	1.25
64	11.1	8126.3	11.1	8126.3	1.27	1.27
65	10.9	8090.7	10.9	8090.7	1.28	1.28
66	10.5	8156.8	10.8	8389.8	1.27	1.24
67	11.8	8638.7	11.8	8638.7	1.20	1.20
68	11.2	8085.6	11.2	8085.6	1.28	1.28
69	12.3	8954.8	12	8736.3	1.16	1.18
70	12.9	7371.6	12.9	7371.6	1.41	1.41
71	10.5	8156.8	10.8	8389.8	1.27	1.24
72	12.1	7874.1	11.9	7743.9	1.32	1.34
73	11.1	8081.1	11.2	8153.9	1.28	1.27
74	5.2	3278.2	7.7	4854.2	3.15	2.14
75	8.9	5972.7	9.5	6375.3	1.73	1.62



Tabla 6.13: Tenacidad a la fractura de los SMCs.

Número	Tenacidad a fractura (MPa m ^{1/2})	Tenacidad a Fractura media (MPa m ^{1/2})
AlSi12	20-25	22.5
61	26,8-33,7	30.25
62	7,2-10,3	8.75
63	15,3-37,4	26.35
64	24,3-34,1	29.2
65	26,8-33,7	30.25
66	49,8-63,8	56.8
67	15,3-18,8	17.05
68	15,3-28,1	21.7
69	10,8-13,3	12.05
70	13,8-17	15.4
71	49,8-63,8	56.8
72	15,3-18,8	17.05
73	22,4-30,1	26.25
74	25,8-38,3	32.05
75	40,4-82,2	61.3



Por otro lado, las aleaciones de berilio tienen altos valores del módulo elástico junto a una baja densidad. En las tablas 6.14 y 6.15 se han incluido los datos de alguna aleación de berilio.

Tabla 6.14: Propiedades e índices obtenidos con aleaciones de berilio y los composites de aluminio.

Número	Nombre	Densidad (kg/m ³)	Densidad media (kg/m ³)	Densidad (g/cm ³)	Modulo Young (GPa)	E medio (GPa)	Coef. Poisson	Coef. Poisson medio	Espesor placa(E) (mm)	Peso placa (E) (g)	(E/(1-ν ²)) ^(1/3) /Densidad
AlSi12	AlSi12	2660	2660	2.66	71	71	0.33	0.33	6	6491.3	1.62
90	Beryllium-aluminum alloy, AlBeMet 162	2070-2120	2095	2.095	179-200	189.5	0.165-0.169	0.167	4.4	3749.1	2.77
91	Beryllium-aluminum alloy, Beralcast 310,cast	2020-2230	2125	2.125	185-238	211.5	0.196-0.204	0.2	4.2	3630	2.84
92	Beryllium, grade I-400, vacuum hoy-pressed	1840-1880	1860	1.86	275-295	285	0.06-0.075	0.0675	3.9	2950.3	3.54
93	Beryllium, grade SR-200, sheet, 0.5 to 6.35mm thick	1840-1860	1850	1.85	290-315	302.5	0.06-0.075	0.0675	3.8	2859.2	3.63
94	Al(6013)-15%SiC(w), powder product	2770-2790	2780	2.78	119-121	120	0.295-0.3	0.2975	5	5653.4	1.83
95	Al(8089)-20%SiC(p) MMC powder product	2660-2680	2670	2.67	104-106	105	0.3-0.35	0.325	5.2	5646.9	1.83
96	Al(2124)-15%SiC(w), powder product	2830-2850	2840	2.84	100-120	110	0.295-0.3	0.2975	5.2	6006.4	1.74



Tabla 6.15: Tenacidad a la fractura de las aleaciones de berilio y composites de aluminio.

Número	Tenacidad a fractura (MPa m ^{1/2})	Tenacidad a Fractura media (MPa m ^{1/2})
AlSi12	20-25	22.5
90	11.3-24	17.65
91	10-20	15
92	9-15	12
93	9-15	12
94	17-23	20
95	15-19	17
96	16-21	18.5

Como resumen de este análisis, en la tabla 6.16 se recogen los materiales que mayores índices presentan. Para llevar a cabo dicha selección también se ha tenido en cuenta la tenacidad a fractura del material, ya que en el análisis hay ejemplos de materiales que poseen índices bastante elevados, pero son extremadamente frágiles, como ejemplo los materiales 4 y 5 (*Aluminum-SiC foam (0.16)* y *Aluminum-SiC foam (0.27)*).



Tabla 6.16: Materiales alternativos resultantes al AISi12

Numero	Nombre	Espesor placa (E) (mm)	Peso placa (E) (g)	$(E/(1-\nu^2))^{(1/3)}$ /Densidad	Espesor placa (E_{Flex}) (mm)	Peso placa (E_{Flex}) (g)	$(E_{Flex}/(1-\nu^2))^{(1/3)}$ /Densidad	Tenacidad a fractura ($MPa\ m^{1/2}$)
AISi12	AISi12	6	6491.3	1.62	6	6491.3	1.62	22.5
2	Aluminum foam (0.5)	14.5	2948.7	3.52	14.5	2948.7	3.52	2.05
3	Aluminum foam (1.0)	10.3	4189.2	2.48	10.3	4189.2	2.48	5.5
9	BMI/HS carbon fiber, woven fabric composite, QI laminate	6.8	4403.9	2.48	6.2	3832.9	2.72	24.45
10	Cyanate ester/HM carbon fiber, UD composite, quasi-isotropic laminate	5.2	3479.1	3.00	5.2	3479.1	3.00	30.75
17	Polyimide/HS carbon fiber, woven fabric composite, quasi-isotropic laminate	7	4583.7	2.27	6.4	4190.8	2.48	36.26
13	PEEK/IM carbon fiber, UD composite, quasi-isotropic laminate	6.4	4060.7	2.55	5.2	3299.3	3.12	29.4
21	Epoxy/aramid fiber, UD composite, quasi-isotropic laminate	8.1	4546.3	2.27	6.7	3760.5	2.78	4.9
22	Epoxy/HS carbon fiber, UD composite, quasi-isotropic laminate	6.5	4137.4	2.51	5.3	3373.5	3.07	15.95
23	Epoxy/HS carbon fiber, woven fabric composite, QI laminate	6.8	4356	2.37	6.2	3971.6	2.62	38.25
74	Epoxy SMC (carbon fiber)	5.2	3278.2	3.15	7.7	4854.2	2.14	32.05
75	Epoxy SMC (glass fiber)	8.9	5972.7	1.73	9.5	6375.3	1.73	61.3
93	Beryllium, grade SR-200, sheet, 0.5 to 6.35mm thick	3.8	2859.2	3.63	3.8	2859.2	3.63	12
94	Al(6013)-15%SiC(w), powder product	5	5653.4	1.83	5	5653.4	1.83	20
95	Al(8089)-20%SiC(p) MMC powder product	5.2	5646.9	1.83	5.2	5646.9	1.83	17



Como se puede ver en la tabla anterior, todos los materiales seleccionados tienen un índice de diseño superior al de la aleación AlSi12, es decir, permitirían fabricar un peldaño con las mismas prestaciones pero de peso inferior. Por otro lado, el material que mejor índice presenta de todas las espumas analizadas es el número 2: *Aluminum foam (0.5 g/cm³)*, cuyo índice es más un 100% superior al de la aleación AlSi12, por lo que el peso de la placa se puede reducir a un valor inferior a la mitad, aunque hay que tener en cuenta, que posee una tenacidad a fractura bastante inferior a la de la aleación de aluminio. Al comparar este material con el número 3: *Aluminum foam (1 g/cm³)*, que pertenece a la misma familia, las espumas de aluminio, se aprecia que al aumentar la densidad de la espuma, el índice de diseño se reduce significativamente, pero la tenacidad aumenta considerablemente, por lo que si se utilizara una espuma con una densidad todavía algo mayor, su tenacidad también aumentaría y el índice seguiría siendo superior al de la aleación AlSi12. Debe mencionarse también que los materiales de esta familia son incombustibles.

Siguiendo con los materiales que muestran los mayores índices de diseño, destaca el material con el número 93, una aleación de berilio, que como se ha comentado anteriormente, aunque presenten muy buenas propiedades, son unos materiales sumamente caros, con lo que en principio quedaría descartado por motivos económicos.

Otro de los materiales que presenta buenas propiedades es el número 74, *Epoxy SMC (carbon fiber)*, material de la familia de los SMCs, aunque hay que tener en cuenta que a flexión no presenta propiedades tan altas, y es justamente de este modo como va a funcionar. La ventaja es que se pueden fabricar grandes series de peldaños mediante la tecnología SMC. Tiene una tenacidad a fractura superior a la de la aleación de aluminio y otra de sus características es que son self-extinguishing. De cualquier manera este producto está reforzado con fibras de carbono, por lo que tendrá un coste relativamente elevado. Por esta razón, se ha incluido también en la tabla el material 75, que es un SMC reforzado con fibra de vidrio, dotado de un índice inferior, pero superior al que tiene la aleación AlSi12; además tiene una tenacidad a la fractura muy alta.

Los demás materiales son todos composites (plásticos reforzados con fibras largas, de tipo unidireccional o tejidos), entre los que cabe mencionar el 10, el 13 y el 22, (*Cyanate ester/HM carbon fiber, UD composite, quasi-isotropic laminate, PEEK/IM carbon fiber, UD composite, quasi-isotropic laminate, Epoxy/HS carbon fiber, UD composite, quasi-isotropic laminate*, respectivamente). Como se puede ver, todos ellos son laminados quasi-isotropicos, lo que quiere decir que están compuestos por láminas con fibras dispuestas unidireccionalmente, superpuestas en diferentes orientaciones, dando como resultado este tipo de materiales, con un comportamiento casi similar al de los materiales isótropos. El primero de ellos es incombustible, mientras que el segundo es self-extinguishing y el tercero arde lentamente. Además este último tiene una tenacidad a la fractura bastante menor que la los otros dos y que la de la aleación AlSi12. Los materiales 9 y 17 presentan una tenacidad a la fractura superior a la de la aleación AlSi12 y ambos son incombustibles.

Teniendo en cuenta el método de fabricación, debe destacarse que la fabricación de los peldaños utilizando los materiales propuestos debería modificarse completamente. Atendiendo a este punto, la técnica más económica y de rápida de producción sería a partir del SMC, ya que constituye un método de fabricación sencillo que se puede automatizar para fabricar una serie grande de piezas. Además, utiliza fibras de refuerzo cortas, que se disponen en el



producto de manera aleatoria, para dar lugar a un material isótropo. En el caso de los materiales compuestos unidireccionales es necesario superponer las láminas con diferentes orientaciones (preimpregnados), controlar muy bien la orientación de cada lámina, y luego curar el conjunto bajo presión, de tal manera que la automatización del proceso de fabricación es compleja y difícil.

En el caso de optar por fabricar los peldaños a partir de las espumas de aluminio, habría que optar por un proceso de espumación en estado líquido, siendo entonces necesario controlar muy bien los parámetros de espumación, con objeto de lograr un producto final con la densidad deseada en todos sus puntos. También cabe la posibilidad de fabricar la huella con un material tipo sándwich, en donde el núcleo estuviese formado por este tipo de espumas con unas finas láminas sólidas a modo de caras, superior e inferior, que le proporcionaría una rigidez adicional (menor peso). Esta sería una muy buena opción siempre que pudiera hacerse sin complicar en exceso el proceso de fabricación.

Finalmente, otra alternativa que parece interesante sería la sustitución de la aleación AlSi12 por un composite de matriz metálica reforzada con partículas cerámicas, como los materiales 94 y 95 (aleaciones de aluminio reforzadas con 15-20% de partículas de SiC). Ambos materiales tienen índices algo superiores a los de la aleación AlSi12 y una tenacidad parecida a la de aquella. De cualquier manera las propiedades de estos dos materiales corresponden a productos obtenidos por la vía pulvimetalúrgica (powder product), pero no serían apenas diferentes si se hubieran obtenido adicionando los polvos cerámicos a la aleación en estado líquido. Operando de este modo se podrían obtener los peldaños utilizando el mismo sistema de fabricación que se utiliza en la actualidad (fundición a presión). En este caso solo habría que conseguir una buena homogeneización de la mezcla para evitar las aglomeraciones de partículas, que suelen ser la principal fuente de defectos cuando se conforman estos productos.



7. CONCLUSIONES

En relación al trabajo realizado, cabe destacar que no se ha realizado el estudio del peldaño completo, sino que se ha analizado la huella de dicho peldaño. Dicha huella ha sido simplificada y analizada como una placa lisa, se han eliminado las ranuras que le proporcionan una rigidez adicional, debido a la complejidad geométrica. Se ha considerado que la placa está apoyada en los cuatro bordes y se ha realizado el análisis estático, dejando al margen tanto el comportamiento dinámico (fatiga), como el comportamiento a torsión y a rotura. De cualquier manera, la selección realizada sería aplicable directamente al peldaño de escalera.

La huella se ha analizado utilizando tanto el software Abaqus como Matlab y usando las teorías de placas clásicas, solución de Navier para una carga distribuida uniformemente, como para una carga puntual y la solución de Levy. Con los distintos procedimientos de análisis se han obtenido los mismos resultados. Por lo tanto queda demostrado la utilidad de los elementos finitos, en concreto Abaqus, en este tipo de aplicaciones, ampliando las posibilidades de estudio del problema al implementar la geometría real de la huella, incluyendo los citados nervios, o el peldaño en su totalidad.

Para la búsqueda de las propiedades de los materiales alternativos a la aleación AlSi12, que es con la que se están haciendo en la actualidad los peldaños de escalera, se ha utilizado el software CES EduPack, bases de datos online, como MatWeb, y también se ha realizado una búsqueda adicional en revistas científicas, dado la importancia que se espera puedan tener materiales como son los aerogeles, aunque al final se han descartado por su excesiva fragilidad.

El primer material que se plantearía a la hora de llevar a cabo la sustitución del material del peldaño sería el uso de una aleación de aluminio reforzada con partículas de SiC. Se ha demostrado que resulta posible disminuir el peso del peldaño sin apenas afectar el proceso de fabricación que se está utilizando en la actualidad, ya que la adición de las partículas cerámicas se haría sobre la aleación en estado líquido, requiriéndose exclusivamente lograr una buena homogeneidad del producto antes del llenado del molde. Otros materiales alternativos interesantes a la hora de reducir el peso de los peldaños son las espumas metálicas, en concreto las de aluminio, ya que permiten alcanzar unos índices de diseño muy elevados. El problema que presenta esta alternativa es que la tenacidad a la fractura del peldaño pudiera ser algo baja. Para aumentar la tenacidad de las espumas es necesario utilizar espumas de baja porosidad (densidad mayor que 1 g/cm^3). En este caso podría seguir utilizándose un sistema de fabricación no muy diferente al actual, sin más que añadir en el momento apropiado del proceso el agente espumante, normalmente TiH_2 , y realizar el proceso de espumación en un molde con la geometría adecuada. Esta última parte del proceso necesita un control estricto, que pudiera no ser fácil conseguir.

Otra buena opción sería el uso de materiales compuestos, entre los que hay que mencionar los SMCs, ya que estos materiales y esta tecnología se conocen bien en el mundo de la ingeniería y además permite fabricar grandes series en tiempos cortos. Dentro de los distintos SMCs, por cuestiones de costes nos decantaríamos por los reforzados con fibras de vidrio, ya que aunque los reforzados con fibras de carbono muestran índices de diseño claramente superiores, el producto tendría un precio que podría ser excesivo. El resto de materiales composites quasi-



Máster interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

isotrópicos alternativos son los plásticos reforzados con fibras unidireccionales, que se obtienen apilando con la orientación adecuada láminas reforzadas unidireccionalmente. El principal problema a la hora de utilizar estos materiales en la fabricación de los peldaños es la necesidad de tener que hacer una serie muy grande. La fabricación de los peldaños con estos materiales plantearía problemas importantes de cara a la automatización del proceso y podría también haber alguna limitación en cuanto a la geometría final del producto.

Otros materiales que han resultado muy adecuados son las aleaciones de berilio, pero el problema de las mismas es el altísimo coste del material, además de otros problemas importantes, que no se han comentado, en relación a sus procesos de fabricación.

Por último, se han analizado también materiales novedosos en el mercado, como los aerogeles. Estos materiales son muy ligeros, tienen una rigidez suficiente, son capaces de soportar grandes pesos, pero tienen el inconveniente de que son extremadamente frágiles. Además están aún en proceso de investigación, por lo que a veces no se dispone de toda la información necesaria para los cálculos. Dentro de este grupo hay que mencionar los Airloys, que son un tipo de aerogel resistente y rígido, con los que en un principio parecería factible la fabricación de los peldaños, pero no se han encontrado suficientes datos fiables para realizar el análisis del peldaño con garantías.

Como trabajo futuro, se propone analizar placas tipo sándwich, ya que con esta configuración se pueden obtener materiales muy ligeros, rígidos y resistentes. Son productos compuestos por dos láminas delgadas, superior e inferior, de aleación de aluminio, que se separan con un núcleo de baja densidad, espuma de aluminio o aerogel. El análisis de estas placas bajo las cargas impuestas es relativamente complejo, por lo que habría de abordarse específicamente en otro trabajo. También habría que estudiar si sería factible realizar una gran serie de peldaños utilizando estructuras sándwich.



8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] European committee for standardization, European Standard, EN 115-1, Safety of escalators and moving walks- Part 1: Construction and installation, July 2008.
- [2] An American National Standard, ASME A17.1-2010/CSA B44-10, Safety Code for Elevators and Escalators, 2010.
- [3] Control Calidad ThyssenKrupp Guss, Plan de Control Producto de Elevación. Condiciones Técnicas, 2014.
- [4] <http://www.matweb.com/search/QuickText.aspx?SearchText=alsi%2012>
- [5] Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de La Plata, Estructuras III, Placas planas rectangulares de espesor Delgado, 2008.
- [6] S. Timoshenko & S. Woinowsky-Krieger, Theory of plates and Shells, McGraw-Hill, Second Edition, 1989
- [7] Arthur P. Boresi & Richard J. Schmidt, Advanced Mechanics of Materials, John Wiley & Sons, Inc, Sixth Edition, 2003.
- [8] Warren C. Young & Richard G. Budynas, Roak's Formulas for Stress and Strain, McGraw-Hill, Seventh Edition, 2002.
- [9] Departamento de Mecánica de Estructuras e Ingeniería Hidráulica, Universidad de Granada, Placas Delgadas mediante Métodos Clásicos, 2007.
- [10] Johan Blaauwendraad, Plates and FEM, Springer, 2010.
- [11] ASM International, Engineered Materials Handbook, Composites, Volume 1, Metals Park, 1987.
- [12] <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Tema7.ProcesamientoMaterialesCompuestos.pdf>
- [13] <http://www.idicomposites.com/overview-products.php>
- [14] <http://www.premix.com/materials/>
- [15] Tomislav Filetin, Bending Stiffness of Aluminium foams, Rad513, Tehnicke Znanosh. Knj. 15, 2012, 93-116.
- [16] Training in Aluminium Application Technologies (TALAT), 1410 Aluminium Foam, European Aluminium Association (EAA), 1999.
- [17] Atul Katti et al, Chemical, Physical and Mechanical Characterization of Isocyanate Cross-linked Amine-modified Silica Aerogels, Chem. Mater. Vol 18, 2006, 285-296.
- [18] M. Moner-Girona et al, Micromechanical Properties of Carbon-Silica aerogel composites, Appl. Phys. A74, 2002, 119-122.
- [19] J. Fricke et al, Aerogels: Production, Characterization and Applications, Thin Solid Films 297, 1997, 212-223.



Máster interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

[20] Kelly E. Parmenter et al, Mechanical Properties of Silica Aerogels, Journal of Non-Crystalline Solids 223, 1998, 179-189.

[21] Guoqing Zu et al, Preparation and Characterization of Monolithic Alumina Aerogels, Journal of Non-Crystalline Solids 375, 2011, 2903-2906.

[22] M. Moner-Girona et al, Mechanical Properties of Silica Aerogels Measured by Microindentation: Influence of Sol-gel Processing Parameters and Carbon Addition, Journal of Non-Crystalline Solids 285, 2001, 244-250.

[23] M. Moner et al, Micromechanical Properties of Silica Aerogels, Applied Physics Letters, Volume 75, Number 5, 1990.

[24] <http://www.airloy.com/>

[25] <http://energy.lbl.gov/ecs/aerogels/sa-physical.html>

[26] J.F. Poco et al, Synthesis of High Porosity, Monolithic Alumina Aerogels, Journal of Non-Crystalline Solids 285, 2001, 57-63.

[27] Joachim Gross et al, Mechanical properties of SiO₂ Aerogels, J.Phys. D. Appl. Phys 21, 1988, 1447-1451.

[28] <http://www.aerogel.org>



9. PRESUPUESTO

El presupuesto se ha dividido en los siguientes apartados, que se han recogido en la tabla 9.1.

- Análisis bibliográfico
- Simulaciones
- Recogida y análisis de resultados
- Realización de la memoria

En el análisis bibliográfico se incluye tanto la que fue necesario para realizar las modelizaciones mediante el correspondiente software, como la búsqueda de datos de materiales a través de revistas científicas.

Dentro de las simulaciones se han englobado tanto las realizadas con Abaqus y con Matlab, a la hora de calcular la flecha en cada uno de los materiales, como la búsqueda de los materiales alternativos con CES EduPack.

En la recogida y análisis de resultados se engloba todo el análisis de los resultados facilitados por los diferentes softwares.

En la realización de la memoria se ha incluido la redacción de los documentos pertinentes.

Dando como resultado un coste bruto de 18200 €, al que hay que sumar un 6% de beneficio industrial y un 21% de IVA. Con lo cual el coste total del proyecto se cifra en 23114 €.

Tabla 9.1: Presupuesto total.

Concepto	Descripción del concepto	Coste Unitario	Horas	Total
Análisis Bibliográfico	Búsqueda y lectura de publicaciones	40	150	6000
Simulaciones	Simulación Abaqus	40	30	1200
	Simulación Matlab	40	45	1800
	Simulación CES EduPack	40	30	1200
Recogida y análisis de resultados	Análisis, clasificación y descarte de resultados	40	150	6000
Realización de memoria	Redacción y mecanografiado	40	50	2000
Coste Bruto del Proyecto				18200
Beneficio industrial (6%)				1092
IVA (21%)				3822
COSTE TOTAL DEL PROYECTO				23114

Asciende el Presupuesto de Ejecución por Contrato a la expresada cantidad de **VEINTE Y TRES MIL CIENTO CATORCE EUROS**.



10. ANEXOS



A. ANEXO A: CÓDIGO MATLAB PARA EL ANALISIS DE LA FLECHA

```
% ECUACION DE PLACAS DELGADAS
%-----%
clear variables
close all
clc
%-----%
%-----%
% DATOS DE LA CHAPA Y EL MATERIAL
b=410; %ANCHURA PLACA mm
a=992; %LONGITUD PLACA mm
t=6; %ESPESOR PLACA mm
y=[0:1:410]; % x anchura mm
x=[0:1:992]; % y longitud mm
E=71000; % MODULO YOUNG MPa
Poisson=0.33; % POISSON
p=-0.006; %FUERZA UNIFORME N/mm^2
D=E*t^3/(12*(1-Poisson^2)); %coeficiente rigidez
densidad=10^-3*2.66; %g/mm
p_cp=-6200; %FUERZA PUNTUAL N

xi=496;
eta=260;
v=300;
u=200;
%-----%
%-----%

% DATOS DEL LA FORMULA SUMATORIO BASADA EN NAVIER FUERZA UNIFORME

A_N=16*p/(pi^6*D); % COEFICIENTE MULTIPLICADOR DEL SUMATORIO
d_s_N=zeros(length(x),length(y),5,5);
% suma=0;
sumatorio=zeros(length(x),length(y));

for i=1:length(x)
    for k=1:length(y)
        for m=1:2:5
            for n=1:2:5
                d_s_N(i,k,m,n)=(sin(m*pi*x(i)/a)*sin(n*pi*y(k)/b))/(m*n*(m^2/a^2+n^2/b^2)^2);
            end
        end
        sumatorio(i,k)=d_s_N(i,k,1,1)+d_s_N(i,k,3,1)+d_s_N(i,k,5,1)+d_s_N(i,k,1,3)+d_s_N(i,k,3,3)+d_s_N(i,k,5,3)+d_s_N(i,k,1,5)+d_s_N(i,k,3,5)+d_s_N(i,k,5,5);
        w3(k,i)=[A_N*sumatorio(i,k)];
    end
end
%-----%
%-----%
%PLOTS CHAPA

%define the coordinates along the x-y plane
```



Máster interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

```
[xx,yy]=meshgrid(x,y);
%define and compute the given function along the x.y coordinates
zz=[w3];

% FIGURA EXAGERADA
figure
surf(xx,yy,zz)
xlabel('LONGITUD DE LA PLACA (mm)')
ylabel('ANCHO DE LA PLACA (mm)')
zlabel('FLECHA DE LA PLACA (mm)')
title('FLECHA EXAGERADA DE LA PLACA CON UNA FUERZA UNIFORME')
axis tight
shading interp
colorbar
pbaspect([992 410 150])

%FIGURA REAL
figure
surf(xx,yy,zz)
xlabel('LONGITUD DE LA PLACA (mm)')
ylabel('ANCHO DE LA PLACA (mm)')
zlabel('FLECHA DE LA PLACA (mm)')
title('FLECHA REAL DE LA PLACA CON UNA FUERZA UNIFORME')
axis tight
shading interp
colorbar
daspect([1 1 1])
%-----%
%-----%

% FLECHA MAXIMA OBTENIDA DE LA MATRIZ W3
flechas=min(zz); %flechas maximas de cada columna
flechas_maximas=[flechas]; % hacemos una matriz con las
flechas maximas de cada columna
flecha_max=min(flechas_maximas); % flecha maxima de la placa

disp('La flecha maxima según la fórmula de Navier es (con fuerza
uniforme): (en mm)');
disp(flecha_max);
%-----%
%-----%
%-----%
%-----%

%NAVIER FUERZA CONCENTRADA
%-----%
%-----%
% DATOS DEL LA FORMULA SUMATORIO BASADA EN NAVIER FUERZA CONCENTRADA

A_cp=1/(pi^4*D); % COEFICIENTE MULTIPLICADOR DEL SUMATORIO
d_s_cp=zeros(length(x),length(y),7,7); %termino interno del
sumatorio
% suma=0;
sumatorio_cp=zeros(length(x),length(y));

for i=1:length(x)
for k=1:length(y)
for m=1:2:7
for n=1:2:7
```



Máster interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

```
d_s_cp(i,k,m,n)=(16*p_cp/(pi^2*u*v*m*n)*sin(m*pi*x(i)/a)*sin(n*pi*y(k)/b)*sin(n*pi*eta/b)*sin(m*pi*xi/a)*sin(n*pi*v/(2*b))*sin(m*pi*u/(2*a)))/((m^2/a^2+n^2/b^2)^2);
    end
    end
sumatorio_cp(i,k)=d_s_cp(i,k,1,1)+d_s_cp(i,k,3,1)+d_s_cp(i,k,5,1)+d_s_cp(i,k,7,1)+d_s_cp(i,k,1,3)+d_s_cp(i,k,3,3)+d_s_cp(i,k,5,3)+d_s_cp(i,k,7,3)+d_s_cp(i,k,1,5)+d_s_cp(i,k,3,5)+d_s_cp(i,k,5,5)+d_s_cp(i,k,7,5)+d_s_cp(i,k,1,7)+d_s_cp(i,k,3,7)+d_s_cp(i,k,5,7)+d_s_cp(i,k,7,7);
    w3_cp(k,i)=[A_cp*sumatorio_cp(i,k)];
    end
    end
%-----%
%-----%

%PLOTS CHAPA

%define the coordinates along the x-y plane
[xx_cp,yy_cp]=meshgrid(x,y);
%define and compute the given function along the x.y coordinates
zz_cp=[w3_cp];

% FIGURA EXAGERADA
figure
surf(xx_cp,yy_cp,zz_cp)
xlabel('LONGITUD DE LA PLACA (mm)')
ylabel('ANCHO DE LA PLACA (mm)')
zlabel('FLECHA DE LA PLACA (mm)')
title('FLECHA EXAGERADA DE LA PLACA CON UNA FUERZA CONCENTRADA')
axis tight
shading interp
colorbar
pbaspect([992 410 150])

%FIGURA REAL
figure
surf(xx_cp,yy_cp,zz_cp)
xlabel('LONGITUD DE LA PLACA (mm)')
ylabel('ANCHO DE LA PLACA (mm)')
zlabel('FLECHA DE LA PLACA (mm)')
title('FLECHA REAL DE LA PLACA CON UNA FUERZA CONCENTRADA')
axis tight
shading interp
colorbar
daspect([1 1 1])

%-----%
%-----%

% FLECHA MAXIMA OBTENIDA DE LA MATRIZ W3
flechas_cp=min(zz_cp); %flechas maximas de cada
columna
flechas_maximas_cp=[flechas_cp]; % hacemos una matriz con las
flechas maximas de cada columna
flecha_max_cp=min(flechas_maximas_cp); % flecha maxima de la placa
disp('La flecha máxima es (carga concentrada según Navier): (en
mm)');
disp(flecha_max_cp);
```



Máster interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

```
%-----%
%-----%

% FORMULA DE LEVY
%-----%
%-----%
%-----%

% DATOS DE LA CHAPA Y EL MATERIAL
a_L=410; %ANCHURA PLACA mm
b_L=992; %LONGITUD PLACA mm
x_L=[0:1:410]; % x anchura mm
y_L=[-496:1:496]; % y longitud mm

%-----%
%-----%

% DATOS DEL LA FORMULA SUMATORIO BASADA EN LEVY
A_L=4*p*a_L^4/(pi^5*D); % COEFICIENTE MULTIPLICADOR DEL
SUMATORIO

d_s_L=zeros(length(x_L),length(y_L),5); %factor dentro del
sumatorio
suma=0;
sumatorio_L=zeros(length(x_L),length(y_L));

for i=1:length(x_L)
    for k=1:length(y_L)
        for m=1:2:5
            d_s_L(i,k,m)=(1/m^5*(1-
(m*pi*b_L/(2*a_L))*tanh(m*pi*b_L/(2*a_L))+2)/(2*cosh(m*pi*b_L/(2*a_L)))
*cosh(m*pi*y_L(k)/a_L)+(m*pi*y_L(k)/a_L)/(2*cosh(m*pi*b_L/(2*a_L))) *si
nh(pi*m*y_L(k)/a_L))*sin(m*pi*x_L(i)/a_L));
        end
        sumatorio_L(i,k)=d_s_L(i,k,1)+d_s_L(i,k,3)+d_s_L(i,k,5);
        w3_L(k,i)=[A_L*sumatorio_L(i,k)];
        end
    end
end

%-----%
%-----%
%PLOTS CHAPA

%define the coordinates along the x-y plane
[xx_L,yy_L]=meshgrid(x_L,y_L);
%define and compute the given function along the x.y coordinates
zz_L=[w3_L];

% FIGURA EXAGERADA
figure
surf(xx_L,yy_L,zz_L)
xlabel('ANCHO DE LA PLACA (mm)')
ylabel('LONGITUD DE LA PLACA (mm)')
zlabel('FLECHA DE LA PLACA (mm)')
title('FLECHA DE LA PLACA SEGÚN FÓRMULA LEVY (EXAGERADA)')
axis tight
shading interp
colorbar
pbaspect([410 992 150])

%FIGURA REAL
```



```
figure
surf(xx_L,yy_L,zz_L)
xlabel('ANCHO DE LA PLACA (mm)')
ylabel('LONGITUD DE LA PLACA (mm)')
zlabel('FLECHA DE LA PLACA (mm)')
title('FLECHA REAL DE LA PLACA SEGÚN FÓRMULA DE LEVY')
axis tight
shading interp
colorbar
daspect([1 1 1])

%-----%
%-----%
% FLECHA MAXIMA OBTENIDA DE LA MATRIZ W3

flechas_L=min(zz_L); %flechas maximas de cada
columna
flechas_maximas_L=[flechas_L]; % hacemos una matriz con las
flechas maximas de cada columna
flecha_max_L=min(flechas_maximas_L); % flecha maxima de la placa

disp ('La flecha máxima es (Fórmula Levy): (en mm)');
disp(flecha_max_L);
%-----%
%-----%

%FIGURA FLECHA EN b=205
figure
%plot(x,w3(206,:), 'r', 'LineWidth', 2)
hold all
plot(x,w3_cp(206,:), 'g', 'LineWidth', 2)
%plot(x,w3_L(:,206), '--b')
xlabel('LONGITUD DE LA PLACA (mm)')
ylabel('FLECHA DE LA PLACA (mm)')
title('FLECHA EN LA MITAD DEL ANCHO DE LA PLACA')
%legend('Carga distribuida', 'Carga concentrada', 'Fórmula Levy')
axis tight
grid on

%FIGURA FLECHA EN a=496
figure
%plot(y,w3(:,497), 'r', 'LineWidth', 2)
hold all
plot(y,w3_cp(:,497), 'g', 'LineWidth', 2)
%plot(x_L,w3_L(497,:), '--b')
xlabel('ANCHO DE LA PLACA (mm)')
ylabel('FLECHA DE LA PLACA (mm)')
title('FLECHA EN LA MITAD DEL LARGO DE LA PLACA')
%legend('Carga distribuida', 'Carga concentrada', 'Fórmula Levy')
axis tight
grid on
%-----%
%-----%
%PESO
PESO=b*a*t*densidad %en gramos
```



B. ANEXO B: ANÁLISIS REALIZADO CON OTROS MATERIALES

En este Anexo se incluyen los resultados obtenidos con otros materiales al realizar el análisis mostrado en el capítulo 4.1.2. Las propiedades de estos materiales han sido recogidas de la base de datos MatWeb y, en el caso de los aerogeles, de revistas científicas. En principio, todos estos materiales tenían algún problema que nos ha llevado a descartarlos en el proceso de selección, pero podrían ser candidatos para estructuras tipo sándwich (material del núcleo). Las estructuras sándwich no se han analizado en este trabajo, dada la complejidad de las fórmulas de cálculo.

En este análisis de los materiales mostrados en el capítulo 4.1.2, se han dividido las espumas (tabla 4.5) en dos grupos, las non flammable y las self-extinguishing. Los resultados de las primeras, las non flammable se pueden ver en las tablas 10.1, 10.2, 10.3 y 10.4; mientras que los de las segundas se pueden observar en las tablas 10.5, 10.6, 10.7 y 10.8.

Tabla 10.1: Tabla espumas non-flammable.

Flammability	Número	Nombre
Non-flammable	35	Aluminum-SiC foam (0.07)
	36	Carbon foam (reticulated, vitreous)(0.05)
	37	Glass foam (0.13)
	38	Graphite foam (0.12)
	39	Phenolic foam (closed cell, 0.035)
	40	Phenolic foam (closed cell, 0.080)
	41	Phenolic foam (closed cell, 0.120)
	42	Phenolic foam (closed cell, 0.160)
	43	Phenolic foam (closed cell, 0.200)



Tabla 10.2: Propiedades de las espumas no flammable.

Número	Densidad (kg/m ³)	Densidad media (kg/m ³)	Densidad (g/cm ³)	Modulo Young (GPa)	E medio (GPa)	Coef. Poisson	Coef. Poisson medio
AlSi12	2660	2660	2.66	71	71	0.33	0.33
35	64-72	68	0.068	0,045-0,07	0.0575	0,28-0,3	0.29
36	49-51	50	0.05	0,031-0,062	0.0465	0,17-0,23	0.2
37	130-140	135	0.135	0,88-0,94	0.91	0,3-0,33	0.315
38	70-180	125	0.125	0,012-0,034	0.023	0,17-0,23	0.2
39	32-38	35	0.035	0,004-0,007	0.0055	0,27-0,3	0.285
40	76-84	80	0.08	0,026-0,032	0.029	0,27-0,3	0.285
41	115-125	120	0.12	0,059-0,07	0.0645	0,27-0,3	0.285
42	155-165	160	0.16	0,11-0,125	0.1175	0,27-0,3	0.285
43	193-207	200	0.2	0,165-0,19	0.1775	0,27-0,3	0.285

Tabla 10.3: Resultados de las espumas no flammable.

Número	Espesor placa (E) (mm)	Peso placa (E) (g)	$(E/(1-\nu^2))^{(1/3)}$ /Densidad
AlSi12	6	6491.3	1.62
35	64	1770	5.84
36	70	1423.5	7.29
37	26	1427.6	7.43
38	88	4473.9	2.31
39	140	1992.9	5.19
40	81	2635.5	3.95
41	62	3026	3.44
42	51	3318.8	3.15
43	44	3579.1	2.89



Tabla 10.4: Tenacidad a la fractura de las espumas non flammable.

Número	Tenacidad a fractura (MPa m ^{1/2})	Tenacidad a Fractura media (MPa m ^{1/2})
AlSi12	20-25	22.5
35	0,09-0,11	0.1
36	0,03-0,09	0.045
37	0,006-0,01	0.008
38	0,03-0,09	0.06
39	0,0041-0,0057	0.0049
40	0,0154-0,0178	0.0166
41	0,0282-0,0322	0.0302
42	0,044-0,0486	0.0463
43	0,0614-0,0684	0.0649



Tabla 10.5: Espumas self-extinguishing.

Flammability	Número	Nombre
Self-extinguishing	44	Melamine foam (0.011)
	45	Polyetherimide foam, (closed cell, 0.06)
	46	Polyetherimide foam, (closed cell, 0.08)
	47	PVC cross-linked foam (rigid, closed cell, AC 0.040)
	48	PVC cross-linked foam (rigid, closed cell, AC 0.055)
	49	PVC cross-linked foam (rigid, closed cell, AC 0.065)
	50	PVC cross-linked foam (rigid, closed cell, AC 0.075)
	51	PVC cross-linked foam (rigid, closed cell, AC 0.090)
	52	PVC cross-linked foam (rigid, closed cell, DH 0.030)
	53	PVC cross-linked foam (rigid, closed cell, DH 0.045)
	54	PVC cross-linked foam (rigid, closed cell, DH 0.060)
	55	PVC cross-linked foam (rigid, closed cell, DH 0.080)
	56	PVC cross-linked foam (rigid, closed cell, KR 0.030)
	57	PVC cross-linked foam (rigid, closed cell, KR 0.040)
	58	PVC cross-linked foam (rigid, closed cell, KR 0.045)
	59	PVC cross-linked foam (rigid, closed cell, KR 0.055)
	60	PVC cross-linked foam (rigid, closed cell, KR 0.075)



Tabla 10.6: Propiedades de las espumas self-extinguishing.

Número	Densidad (kg/m ³)	Densidad media (kg/m ³)	Densidad (g/cm ³)	Modulo Young (GPa)	E medio (GPa)	Coef. Poisson	Coef. Poisson medio
AlSi12	2660	2660	2.66	71	71	0.33	0.33
44	9,0-12,0	10.5	0.0105	0,0001-0,0002	0.00015	0,1-0,2	0.15
45	58,8-61,2	60	0.06	0,0455-0,0503	0.0479	0.333	0.333
46	78,4-81,6	80	0.08	0,062-0,0685	0.06525	0.333	0.333
47	36-44	40	0.04	0,023-0,029	0.026	0,29-0,31	0.3
48	50-60	55	0.055	0,034-0,04	0.037	0,29-0,31	0.3
49	60-70	65	0.065	0,051-0,059	0.055	0,29-0,31	0.3
50	70-80	75	0.075	0,068-0,076	0.072	0,29-0,31	0.3
51	85-85	90	0.09	0,08-0,088	0.084	0,29-0,31	0.3
52	28-32	30	0.03	0,028-0,032	0.03	0,31-0,33	0.32
53	43-47	45	0.045	0,042-0,046	0.044	0,31-0,33	0.32
54	58-62	60	0.06	0,056-0,06	0.058	0,31-0,33	0.32
55	78-82	80	0.08	0,08-0,085	0.0825	0,31-0,33	0.32
56	28-32	30	0.03	0,019-0,021	0.02	0,3-0,32	0.31
57	38-42	40	0.04	0,027-0,03	0.0285	0,3-0,32	0.31
58	43-47	45	0.045	0,03-0,034	0.032	0,3-0,32	0.31
59	52-58	55	0.055	0,038-0,042	0.04	0,3-0,32	0.31
60	72-78	75	0.075	0,06-0,064	0.062	0,3-0,32	0.31



Tabla 10.7: Resultados del análisis de las espumas self-extinguishing.

Número	Espesor placa (E) (mm)	Peso placa (E) (g)	$(E/(1-\nu^2))^{(1/3)}$ /Densidad
AlSi12	6	6491.3	1.62
44	475	2028.5	5.10
45	68	1659.4	6.29
46	61	1984.8	5.23
47	83	1350.3	7.64
48	74	1655.4	6.25
49	65	1718.4	6.04
50	60	1830.2	5.72
51	57	2086.5	5.02
52	79	963.9	10.74
53	70	1281.2	8.13
54	64	1561.8	6.69
55	57	1854.6	5.64
56	91	1110.3	9.36
57	81	1317.8	7.90
58	78	1427.6	7.30
59	72	1610.6	6.43
60	62	1891.2	5.46



Tabla 10.8: Tenacidad a la fractura de las espumas self-extinguishing.

Número	Tenacidad a fractura (MPa m ^{1/2})	Tenacidad a Fractura media (MPa m ^{1/2})
AlSi12	20-25	22.5
44	0,005-0,01	0.0075
45		
46		
47	0,0021-0,0028	0.00245
48	0,0034-0,0044	0.0039
49	0,0044-0,0056	0.005
50	0,0056-0,0068	0.0062
51	0,0075-0,0088	0.00815
52	0,0014-0,0017	0.00155
53	0,0027-0,0031	0.0029
54	0,0042-0,0047	0.00445
55	0,0066-0,0071	0.00685
56	0,0014-0,0017	0.00155
57	0,0022-0,0026	0.0024
58	0,0027-0,0031	0.0029
59	0,0036-0,0042	0.0039
60	0,0058-0,0066	0.0062

Como todas estas espumas son materiales isótropos, el módulo de Young es el mismo que el módulo de flexión. Se puede ver que todas ellas presentan índices de diseño muy elevados. Todos estos materiales se han descartado por tener tenacidades a la fractura demasiado pequeñas, por lo que los peldaños



podrían romperse muy fácilmente bajo las solicitaciones habituales del servicio. Sin embargo podrían utilizarse para formar parte de estructuras tipo sándwich, como material del núcleo.

Al analizar los materiales provenientes de la búsqueda llevada a cabo en la base de datos MatWeb [4], otros materiales alternativos especificados en la tabla 10.9, se han analizado en las tablas 10.10 y 10.11. Como se puede ver en las tablas mencionadas, los datos obtenidos no son tan completos, de ahí, que algunas de las casillas permanezcan en blanco. Tampoco se han encontrado datos relativos a su tenacidad y por esta razón se han descartado en el proceso de selección (además en el capítulo 6 se han analizado algunos materiales parecidos a éstos).

Tabla 10.9: Materiales alternativos seleccionados con MatWeb.

Referencia	Nombre
24139	Applied Composites 8057 Polyesteer SMC
29038	Quantum Composites Lytex 4149 55% Carbon Fiber Epoxy SMC
47885	Hexcel HexMC C/2000/R1Composite SMC
89393	Park Electrochemical Nelco N7000-1 Polyimide Laminate and Prepreg
100762	Menzolit Menzolit HPC 1300 Unsaturated Polyester UP
139274	Quantum Composites AMC 8590BK 53% Carbon Fiber Reinforced Vinyl Ester SMC
139277	Quantum Composites AMC 8595 55% Carbon Fiber Reinforced Vinyl Ester SMC
139278	Quantum Composites AMC 2593 45% Carbon Fiber Reinforced Phenolic SMC
139285	Quantum Composites Lytex 4197 55% Carbon Fiber Reinforced Epoxy SMC
139287	Quantum Composites HTC 9590 55% Carbon Fiber Reinforced Bismaleimide SMC, High Temperature composite
139288	Quantum Composites HTC 9593 55% Carbon Fiber Reinforced Bismaleimide SMC, High Temperature composite
64362	RTP Company RTP 2291 HH Polyetheretherketone (PEEK) Carbon Fiber 55% High Modulus, discontinued
78219	Overview of materials for Thermoset Polyester Glass SMC
78531	Overview of materials for Vinyl Ester Sheet Molding Compound
139282	Quantum Composites Lytex 4084 63% Glass Fiber Reinforced Epoxy SMC



Tabla 10.10: Propiedades de los materiales de MatWeb.

Número	Densidad (kg/m ³)	Densidad media (kg/m ³)	Densidad (g/cm ³)	Modulo Young (GPa)	E medio (GPa)	Modulo flexión (GPa)	E flex. medio (GPa)	Coef. Poisson	Coef. Poisson medio
AlSi12	2660	2660	2.66	71	71	71	71	0.33	0.33
24139			1.68		86.2		55.2		0.3
29038			1.45		55.1		34.5		0.3
47885			1.55		45		40		0.3
89393			1.68		26.9				0.12
100762			1.7		25		28		0.3
139274			1.48		55		38.5		0.305
139277			1.5		94.5		77.9		0.3
139278			1.55		62		44.8		0.3
139285			1.45		62		46.5		0.3
139287			1.55		48.3		48.3		0.3
139288			1.55		62.1		48.3		0.3
64362			1.56		75.8		46.9		0.3
78219	810-2010		1.41	2,76-86,2//9,3-9,3	44.48	3-55,2//8-8	29.1		0.3
78531	1030-1950	1490	1.49	3,72-94,5	49.11	3,45-77,9	40.675	0,305-0,33	0.3175
139282			1.85				193		0.3



Tabla 10.11: Análisis de los materiales de MatWeb.

Número	Espesor placa (E) (mm)	Peso placa (E) (g)	Espesor placa (E_{Flex}) (mm)	Peso placa (E_{Flex}) (gr)	$(E/(1-\nu^2))^{(1/3)}$ /Densidad	$(E_{Flex}/(1-\nu^2))^{(1/3)}$ /Densidad
AlSi12	6	6491.3	6	6491.3	1.62	1.62
24139	5.6	3826.4	6.5	4441.4	2.71	2.34
29038	6.5	3833.3	7.6	4482.1	2.71	2.32
47885	7	4412.9	7.2	4539	2.37	2.28
89393	8.5	5808			1.79	
100762	8.5	5877.1	8.1	5600.5	1.77	1.84
139274	6.5	3912.6	7.3	4394.2	2.65	2.36
139277	5.4	3294.4	5.8	3538.5	3.14	2.94
139278	6.3	3971.6	7	4412.9	2.64	2.36
139285	6.3	3715.4	6.9	4069.2	2.82	2.56
139287	6.8	4286.8	6.8	4286.8	2.42	2.42
139288	6.2	3908.6	6.8	4286.8	2.64	2.42
64362	5.9	3743.5	6.9	4377.9	2.80	2.39
78219	7	4014.3	8	4587.8	2.59	2.25
78531	6.7	4060.3	7.2	4363.3	2.54	2.39
139282			4.3	3235.5		3.22

La mayoría de estos materiales se incluyen dentro de los SMCs, y todos presentan índices mayores que la aleación AlSi12. Los materiales de esta tabla con los índices mayores son los que contienen fibras de carbono en diferentes matrices plásticas. Materiales similares a éstos ya se han seleccionado y analizado en el capítulo 6. La información adicional que se ha recogido en estas tablas se refiere a materiales concretos, ya que corresponden a datos suministrados por las empresas fabricantes.



De ninguna de las bases de datos disponibles se han podido obtener las propiedades de los Aerogeles. Estos han sido obtenidos de diversas revistas científicas, debido a que son materiales nuevos, que aún están en la fase de investigación. Los datos obtenidos se muestran en las tablas 10.12, 10.13 y 10.14, en donde se han analizado estos nuevos materiales. Hay que tener en cuenta que todos estos materiales son extremadamente frágiles (son cerámicas porosas) y por esa razón se han descartado como materiales alternativos. No nos ha sido posible obtener datos de los Airloys, que según las propiedades discutidas con anterioridad, parecen ser materiales que en un futuro podrían sustituir a la aleación AlSi12.

Tabla 10.12: Diversos Aerogeles.

Número	Nombre
76	Silica Aerogel [25],
77	Silica Aerogel[28],
78	Alumina aerogel[26]
79	Alumina aerogel [21],
80	Silica Aerogel[22], [23],
81	Silica Aerogel[22], [23],
82	Silica Aerogel[22], [23],
83	Silica Aerogel[22], [23],
84	Silica Aerogel[22],
85	Silica Aerogel[22],
86	Silica Aerogel[17],
87	Silica Aerogel[17],
88	Silica Aerogel[17],
89	Silica Aerogel[17],



Tabla 10.13: Propiedades de los Aerogeles.

Número	Densidad (kg/m ³)	Densidad media (kg/m ³)	Densidad (g/cm ³)	Modulo Young (GPa)	E medio (GPa)	Coef. Poisson
AlSi12	2660	2660	2.66	71	71	0.33
76	3-350		0.1	0.001-0.01	0.005	0.2
77	1,1-650	325.5	0.3255	0,0005-0.4	0.2	0.2
78	30-100		0.037		0.00055	0.2
79			0.181		0.011	0.2
80			0.08		0.007	0.2
81			0.15		0.05	0.2
82			0.23		0.153	0.2
83			0.26		0.346	0.2
84			0.14		0.029	0.2
85			0.24		0.197	0.2
86			0.478		0.128	0.2
87			0.19		0.092	0.2
88			0.48		0.167	0.2
89			0.77		0.748	0.2



Tabla 10.14: Resultado de los análisis realizado con los Aerogeles.

Número	Espesor (E) (mm)	Peso (E) (g)	$(E/(1-\nu^2))^{(1/3)}$ /Densidad
AlSi12	6	6491.3	1.62
76	147	5978.8	1.73
77	43	5692.7	1.82
78	306	4604.9	2.24
79	112	8245	1.26
80	131	4362.4	2.42
81	68	4148.5	2.49
82	47	4396.6	2.36
83	36	3806.9	2.74
84	82	4669.1	2.23
85	43	4197.4	2.46
86	50	9720.6	1.07
87	56	4627.5	2.41
88	46	8980.4	1.16
89	28	8708.9	1.2

Como se puede comprobar, con estos materiales se podrían conseguir índices altos, similares al de la espuma de aluminio número 3, que ha resultado ser uno de los materiales que mejor índice presentaba dentro de las posibles alternativas existentes a día de hoy. De todos modos, ya se ha indicado, que todos ellos deben descartarse porque su tenacidad a la fractura los hace inviables para esta aplicación.