



UNIVERSIDAD  
**AUTÓNOMA**  
DE ICA

**DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y PRODUCCIÓN INTELECTUAL**

**Estado del arte en la síntesis de espumas sintácticas con matriz metálica para aplicaciones industriales que requieran una baja densidad y elevada tenacidad**

Dr. Hernando Martín Campos Martínez  
5/30/2017

## TABLA DE CONTENIDO

	INTRODUCCIÓN .....	4
	RESUMEN .....	5
I.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN ....	6
1.1	Situación Problemática .....	6
1.2	Formulación del Problema Principal y Específicos.....	7
1.3	Importancia.....	8
II.	MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN.....	10
2.1	Antecedentes .....	10
2.2	Bases Teóricas.....	10
2.3	Marco Conceptual .....	11
III.	OBJETIVOS .....	13
3.1	Objetivo Principal .....	13
3.2	Objetivos Específicos .....	13
IV.	ESTRATEGIA METODOLÓGICA .....	14
V.	PRESENTACIÓN, INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	15
5.1	Síntesis de las Espumas Sintácticas con Matriz Metálica .....	15
5.1.1	Infiltración bajo Presión o Vacío .....	15
5.1.2	Fundición con Agitación .....	18
5.1.3	Pulvimetalurgia.....	18
5.2.	Defectos de Procesamiento en Espumas Sintácticas .....	19
5.2.1	Interacciones Físicas y Químicas.....	19
5.2.2	Parámetros de Procesamiento .....	20
5.2.3	Calidad de las Esferas Huecas .....	21
5.3	Comportamiento Mecánico de las Espumas Sintácticas .....	22
5.3.1	Comportamiento General bajo Deformación .....	23
5.3.2	Efecto de Reforzamiento de la Matriz .....	27

5.3.3	Efecto de la Fracción Volumétrica.....	28
5.3.4	Espesor de pared de las Microesferas/Diámetro.....	29
5.4	Aplicaciones de las Espumas Sintácticas en Matriz Metálica..	30
5.4.1	Aplicaciones en el Transporte Terrestre.....	31
5.4.2	Aplicaciones en el Sector Aeroespacial .....	32
5.4.3	Aplicaciones en el Sector Defensa .....	33
5.4.4	Aplicaciones Biomédicas.....	34
5.4.5	Aplicaciones en el sector Construcción.....	35
5.4.6	Aplicaciones en Empaques Electrónicos.....	36
VI.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	37
VII.	FUENTES DE INFORMACIÓN.....	39

## INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos son producidos a partir de dos o más materiales tradicionales (metales, cerámicos y polímeros) con el fin de obtener un tercer material con mejores propiedades para aplicaciones específicas. De esta forma, durante los últimos decenios, el estudio de los materiales compuestos ha permitido mejorar sustancialmente los procesos industriales y las aplicaciones en la vida diaria, a tal punto que no sería posible concebir el mundo actual sin este tipo de materiales.

Las espumas metálicas sintácticas son materiales compuestos que están constituidas por partículas huecas (micro-balones) embebidas en una matriz metálica. Su uso se ha difundido en los últimos años debido a que combinan las propiedades características de un metal tales como elevadas resistencias mecánicas, deformación, conductividades térmica y eléctrica con las ventajas estructurales de una espuma: baja densidad y una elevada tenacidad específica. Las características antes mencionadas se traducen en una elevada capacidad de absorción de energía y una alta resistencia a la compresión, propiedades funcionales muy deseables para aplicaciones en las industrias automotriz, naval, aeroespacial, defensa y construcción civil, así como en aplicaciones biomédicas y electrónicas.

El presente documento presenta los resultados de un estudio sobre el estado del arte en la síntesis, propiedades y aplicaciones de las espumas sintácticas en matriz metálica, como una etapa previa a efecto de contar con una base teórica que posteriormente, permita efectuar trabajos experimentales con materiales propios de la zona de influencia de la Universidad Autónoma de Ica.

## RESUMEN

Con el objetivo de evaluar el estado del arte en los procesos de síntesis de espumas sintácticas con matriz metálica, considerando los defectos asociados y las técnicas de caracterización utilizadas, se realizó una investigación básica, cuya metodología consistió en una revisión bibliográfica exhaustiva de reportes de investigación publicados durante los últimos quince años en revistas especializadas e indizadas, tesis de maestría y doctorado sobre el tema en estudio, así como libros y publicaciones online especializadas. La revisión efectuada encontró que existen diversos métodos para la síntesis de las espumas sintácticas con matriz metálica; siendo la infiltración bajo presión el más utilizado con matrices metálicas de bajo punto de fusión (aluminio, magnesio y zinc), mientras que la pulvimetalurgia es el método preferido para la síntesis de espumas sintácticas con matrices de alto punto de fusión (titanio, aceros, aceros inoxidable). Se concluye que las espumas sintácticas con matriz metálica presentan una clara ventaja sobre otras espumas metálicas debido a su ligero peso, alta resistencia específica a la compresión, elevada tenacidad específica y alta capacidad de absorción de energía; lo que hace de ellas excelentes candidatos para aplicaciones en el transporte terrestre, aeroespacial, defensa y aplicaciones biomédicas. La Universidad Autónoma de Ica dispone hoy de la base teórica necesaria para iniciar estudios experimentales para la obtención de materiales compuestos utilizando materiales que existen y están al alcance de los ingenieros industriales en el contexto y área de influencia de la Universidad.

**Palabras Clave:** espumas sintácticas, síntesis de espumas sintácticas, aplicaciones industriales de espumas sintácticas.

## **I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACION**

### **1.1 Situación Problemática**

El presente trabajo de investigación se enmarca fundamentalmente dentro del ámbito del transporte terrestre con vehículos que utilizan combustibles fósiles para su funcionamiento. Más del 27% de la energía total consumida a nivel mundial es utilizada para el transporte, tanto comercial como de pasajeros, prácticamente la totalidad de estos medios de transporte dependen de la gasolina o el combustible diesel para su funcionamiento.

Considerando que este tipo de combustibles constituyen fuentes de energía no renovable y sus precios están sujetos a los vaivenes del mercado, la reducción en su consumo es un aspecto muy importante dentro de las políticas de desarrollo del transporte, tanto en países industrializados como en aquellos en vías de desarrollo.

Existe además, una razón muy importante para la reducción del consumo de estos combustibles. En años recientes, las emisiones de los motores de los automóviles y su contribución al calentamiento global han sido tema de preocupación en diversos foros sobre la protección del medio ambiente. Actualmente, existe consenso a nivel mundial, acerca de que la reducción en las emisiones de los vehículos es una prioridad para la conservación del medio ambiente de nuestro planeta.

La reducción en el consumo de combustible fósiles requiere de avances tecnológicos en diferentes campos, entre los cuales podemos mencionar:

- Un incremento en la eficiencia de los vehículos existentes, para este fin diferentes enfoques vienen siendo utilizados, tales como el uso de motores que se enciendan y apaguen durante las paradas del vehículo, mejoras en el diseño aerodinámico de los vehículos y una reducción en el tamaño del motor.

- El desarrollo de tecnologías que utilicen combustibles alternativos, como la energía eléctrica, celdas de combustible, y motores que no consuman gasolina.
- La reducción del peso de los vehículos. Independientemente del desarrollo de las tecnologías antes mencionadas, vehículos más ligeros contribuyen a una reducción en el consumo de energía. Por esta razón el desarrollo de materiales compuestos de bajo peso es una prioridad para el sector automotriz.

Actualmente, se han desarrollado diferentes enfoques para reducir el peso de un vehículo, tales como el reemplazo del acero por otros metales (aluminio o magnesio), reemplazo del acero con aceros de mayor resistencia (reducción en el espesor de los elementos), y el uso de espumas metálicas en reemplazo de estructuras metálicas monolíticas.

Este último tipo de materiales presenta varias ventajas sobre los otros enfoques y puede ser utilizado como parte de estructuras tipo sándwich. De esta forma espumas de aluminio, magnesio y acero pueden ser utilizadas para aplicaciones automotrices.

## **1.2 Formulación del Problema**

El presente informe comprende el desarrollo de espumas sintácticas en matriz metálica. Por consiguiente, el problema en estudio de la presente investigación de tipo básica o teórica, se resume en las siguientes interrogantes centrales:

1. ¿Cuáles son las metodologías existentes para la síntesis de espumas sintácticas metálicas de baja densidad y elevada tenacidad?
2. ¿Cuáles son los procedimientos experimentales utilizados para evaluar su caracterización y la evaluación de sus propiedades?

Habiendo concluido el presente proyecto de investigación se cuenta con las metodologías que permitan desarrollar experimentalmente dichas espumas. Asimismo, se dispone de la base teórica necesaria para iniciar estudios experimentales para la obtención de materiales compuestos utilizando materiales que existen y están al alcance de los ingenieros industriales en el contexto en el que se ubica la Universidad Autónoma de Ica, y en su área de influencia.

### **1.3 Importancia**

Tal como refiere Gupta N. [1], las espumas metálicas descritas en el párrafo final del acápite 1.1 pueden ser clasificadas como:

- a) Espumas metálicas de celdas (poros) abiertas, en donde los poros están interconectados de forma que permiten el flujo de aire o cualquier fluido a través de la estructura porosa, este tipo de microestructura ha limitado sus aplicaciones como elementos de absorción de energía debido a su baja resistencia mecánica y tenacidad.
- b) Espumas metálicas de celdas (poros) cerradas, en este caso la microestructura no contiene poros de aire interconectados, ya que cada poro se encuentra encapsulado en la matriz metálica. Su resistencia mecánica y tenacidad es mayor que las espumas de celdas abiertas, razón por la cual sus aplicaciones están restringidas a estructuras donde no se requiera resistencia mecánica y tenacidad elevadas.
- c) Espumas metálicas compuestas reforzadas con partículas huecas, conocidas también como espumas sintácticas en matriz metálica. En este caso los poros son incorporados en la matriz metálica mediante la adición de partículas huecas (microesferas). Con este tipo de espumas existe un mayor control sobre la cantidad y morfología de los poros encapsulados en la matriz metálica. El interés en este tipo de espumas se ha incrementado significativamente debido a varias razones:



- Su densidad y propiedades mecánicas pueden ser modificadas mediante una adecuada selección de la matriz, el tipo de microesfera (material y espesor de pared) así como la fracción volumétrica de las esferas.
- Su capacidad de absorción de energía, amortiguación acústica propiedades eléctricas y magnéticas pueden ser modificadas.
- El tratamiento térmico de este tipo de espumas permite un amplio rango de propiedades para la misma composición.
- Permiten incrementar su porosidad mediante la creación de materiales compuestos híbridos (matriz, microesferas y un tercer tipo de partículas).
- Permiten incrementar la resistencia de la matriz metálica mediante la incorporación de micro y nano partículas.

Por las razones antes mencionadas las espumas sintácticas en matriz metálica fueron seleccionadas como el material compuesto materia del presente estudio. Las aplicaciones actuales y potenciales de las espumas sintácticas en matriz metálica nos dan una idea clara de la importancia de este tipo de materiales en el mundo actual. Como se detalla en el acápite 5.4 del presente informe, los principales sectores industriales involucrados son el transporte terrestre, el transporte aeroespacial y las aplicaciones en los sectores de defensa. Además de estos sectores, cabe mencionar la importancia de este tipo de materiales con baja densidad y elevada tenacidad para aplicaciones biomédicas, específicamente en implantes biocompatibles con las estructuras óseas; así como en dispositivos electrónicos, específicamente en aplicaciones para blindaje electromagnético.

## II. MARCO TEORICO DE LA INVESTIGACION

### 2.1 Antecedentes

Las investigaciones realizadas para el desarrollo de espumas metálicas con miras a reemplazar diversos elementos metálicos industriales con las ventajas de obtener materiales más ligeros y con una elevada capacidad de absorción de energía se iniciaron en la década de los años 90 [2, 8-12, 52]. Los resultados obtenidos inicialmente y las perspectivas de uso de este tipo de materiales impulsaron dramáticamente las investigaciones en este campo a partir del año 2003, tal como se puede apreciar en la Figura 1 [39]. En el caso de las espumas sintácticas en matriz metálica, el enfoque está centrado en la obtención de materiales compuestos con una mayor y más uniforme capacidad de absorción de energía que aquellas obtenidas mediante el uso de espumas metálicas convencionales fabricadas mediante burbujeo de la masa metálica fundida u otras técnicas.

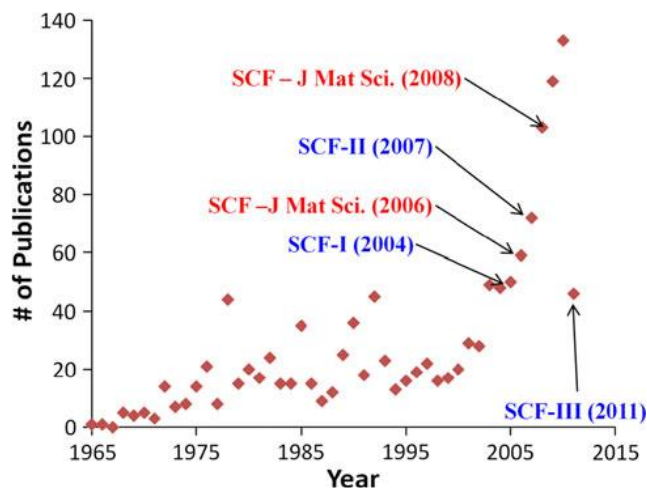


FIG. 1 Incremento en las publicaciones sobre espumas sintácticas y compuestas [39]

## **2.2 Bases Teóricas**

Una espuma sintáctica en matriz metálica eficaz debería ser capaz de transferir la carga mecánica aplicada de manera homogénea entre la matriz y las esferas de refuerzo. Por esta razón, un aspecto clave en el desempeño de las espumas sintácticas en matriz metálica es la adhesión en la interfaz entre la matriz y las esferas huecas.

Tal como se detalla en el acápite 5.2 del presente informe las condiciones que pueden afectar adversamente la adhesión en la interfaz son:

- La interacciones físicas y químicas en la interfaz metal/esfera
- Los parámetros de procesamiento (temperatura, presión y tiempo)
- La calidad de las esferas huecas (composición, tamaño y distribución)

El comportamiento mecánico de las espumas sintácticas en matriz metálica es evaluado mediante el ensayo mecánico de compresión bajo condiciones cuasi estáticas, ligeramente modificado para este tipo de materiales porosos. Este tipo de ensayo es el reportado en la literatura como el principal criterio para evaluar el desempeño de este tipo de materiales, el acápite 5.3 del presente informe detalla los factores involucrados en el comportamiento mecánico de las espumas materia del presente informe.

## **2.3 Marco Conceptual**

Los conceptos teóricos utilizados en el desarrollo del presente informe se pueden encontrar en textos sobre el comportamiento mecánico de los materiales, especialmente en lo relativo a las curvas esfuerzo–deformación, ya sea bajo tensión o compresión. En lo relativo a las variables involucradas en el desarrollo de las curvas esfuerzo – deformación de las espumas sintácticas en matriz metálica se presenta a continuación una breve descripción de estas variables y sus dimensiones en el sistema internacional de unidades:

- a) Máximo esfuerzo a la compresión: máximo esfuerzo de compresión soportado por la espuma, antes de iniciarse la fase de absorción de energía, unidades: MPa (mega pascales).
- b) Esfuerzo en absorción: esfuerzo promedio de compresión experimentado por la espuma luego de alcanzar el máximo esfuerzo a la compresión, unidades: MPa.
- c) Tenacidad de la espuma: es la capacidad de absorción de energía de la espuma, obtenida a partir del trabajo de absorción realizado durante el ensayo de compresión al que es sometida, unidades:  $J/m^3$  (joule por metro cubico).
- d) Deformación de densificación: deformación experimentada por la espuma al término del trabajo de absorción de energía, unidades: adimensional (expresada como % referido a la dimensión original de la espuma).

### **III. OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo Principal**

Evaluar el estado del arte en los procesos de síntesis de espumas sintácticas con matriz metálica, considerando los defectos asociados y las técnicas de caracterización utilizadas. Sobre la base de estas consideraciones se recomendará la metodología a ser utilizada en la fase experimental de este estudio, el cual será publicado en un trabajo posterior.

#### **3.2 Objetivos Específicos**

- 3.2.1 Analizar los resultados de investigaciones publicadas sobre la síntesis y caracterización de espumas sintácticas metálicas.
- 3.2.2 Identificar los procesos de síntesis de espumas sintácticas metálicas de baja densidad y elevada tenacidad.
- 3.2.3 Identificar las metodologías seguidas para la evaluación de las propiedades mecánicas de las espumas sintácticas metálicas y la caracterización de su estructura.
- 3.2.4 Recomendar los procesos de síntesis que serán utilizados en la etapa experimental de esta investigación, así como las metodologías de ensayo para su caracterización y propiedades.

#### **IV. ESTRATEGIA METODOLOGICA**

Al tratarse de una Investigación Básica o Teórica, la ejecución de la misma ha comprendido una revisión bibliográfica exhaustiva de reportes de investigación publicados durante los últimos quince años en revistas especializadas e indizadas, tesis de maestría y doctorado sobre el tema en estudio, así como libros y publicaciones online especializadas.

Luego de ubicada y reunida la información y los datos que permitan alcanzar los objetivos en estudio, se ha efectuado el análisis de la información recolectada y la elaboración del reporte final de la investigación.

## **V. PRESENTACION, INTERPRETACION Y DISCUSION DE RESULTADOS**

### **5.1 Síntesis de las Espumas Sintácticas con Matriz Metálica**

Los métodos utilizados para la síntesis de espumas sintácticas en matriz metálica son básicamente los mismos que aquellos utilizados para el procesamiento de la mayoría de materiales compuestos de matriz metálica, aunque en este caso la característica única de las microesferas (materiales huecos) puede imponer algunas restricciones en el uso de estos métodos. A continuación, se presentan los principales procesos utilizados para la síntesis de espumas sintácticas en matriz metálica, así como algunos de los problemas encontrados. Los métodos descritos en la literatura, se pueden dividir en dos enfoques [38]:

- a. Mediante técnicas convencionales de solidificación, estos procesos implican la incorporación de las esferas en el metal fundido y la colada de la mezcla en un molde para obtener una pieza fundida con determinada forma. La infiltración del metal fundido, así como la fundición con agitación de la mezcla fundida son dos de los principales procesos dentro de este grupo.
- b. Pulvimetalurgia, proceso mediante el cual un metal en polvo y las esferas huecas son mezclados de forma homogénea, posteriormente esta mezcla es compactada mediante la aplicación de presión, desgasificada y finalmente sinterizada en un horno a temperatura elevada para obtener la pieza metálica final.

#### **5.1.1 Infiltración bajo presión o vacío**

Es el método más utilizado para el procesamiento de espumas sintácticas en matriz metálica debido a que el metal es forzado a fluir a través de las aberturas y grietas entre las esferas huecas, superando de esta forma la pobre

humectación, generalmente observada entre una matriz metálica y los materiales cerámicos utilizados como esferas huecas. El método generalmente comprende la preparación de una preforma con las esferas huecas; alternativamente se puede utilizar un lecho de esferas sueltas no compactadas. La presión necesaria para infiltrar el metal fundido a través de las grietas de la preforma o el lecho puede ser aplicada mediante la acción de un gas inerte [2-7], infiltración al vacío [8-11], o mediante presión mecánica (colada bajo presión o colada en molde metálico) [12-17].

Una buena adhesión entre la matriz y el refuerzo es crucial para un funcionamiento apropiado de cualquier material compuesto. La humectabilidad es la capacidad de un líquido para difundirse sobre una superficie sólida [60]. Una buena humectabilidad entre la masa fundida y las esferas huecas es muy importante para una buena adhesión entre estas superficies; la matriz en estado líquido debe penetrar y humectar la superficie de las esferas para evitar una infiltración incompleta del material de refuerzo. Por lo general, la humectación de refuerzos cerámicos por metales líquidos es bastante pobre; por lo tanto, una adecuada selección de los parámetros de infiltración o el uso de preformas son opciones para mejorar este comportamiento.

En la técnica de infiltración por medio de la presión de un gas, la preforma se es mantenida en un molde o crisol, separada de la carga de metal sólido por medio de un filtro cerámico ( $ZrO_2$  o  $Y_2O_3$ ). La cámara que contiene el molde es desgasificada para eliminar el gas en los intersticios de la preforma, y calentada a una temperatura mayor que la temperatura de fusión del metal. Una vez que el metal se funde completamente, se inyecta un gas inerte en la cámara para forzar el metal líquido a través de la preforma. Posteriormente, se deja solidificar la espuma sintáctica infiltrada. La presión y la temperatura del sistema, así como la humectación en la interfaz metal/refuerzo y la permeabilidad del lecho de esferas huecas son factores críticos para una infiltración completa. Estos parámetros deben ser elegidos cuidadosamente,



para evitar una infiltración incompleta (porosidad no deseada dentro de la espuma). Sin embargo, el uso de temperaturas más altas podría aumentar la posibilidad de formación de fases indeseables originadas por la reacción química entre la matriz y el material de las esferas; por otro lado una presión de infiltración excesiva podría dar lugar a la trituración de las esferas y su llenado con el metal [3]. La aplicación de recubrimientos metálicos sobre la superficie de las esferas huecas es una alternativa que permite mejorar la humectación entre la matriz de metal y las esferas, lo que a su vez permite el uso de una presión de infiltración reducida, como fue demostrado por Kim et al. [18] donde la presión de infiltración fue reducida de 3 y 4 psi para el caso de cenizas de combustión no recubiertas a aproximadamente una psi para el caso de cenizas de combustión recubiertas con níquel.

La infiltración al vacío es similar a la infiltración bajo presión con gas, es decir, se aplica vacío a la cámara y luego calor hasta que el metal se funde completamente. La infiltración se consigue aplicando una presión diferencial negativa entre el metal y el refuerzo hueco por medio de un gas inerte. Este enfoque muestra ventajas sobre la infiltración bajo presión con gas en aquellos casos en las que las esferas huecas son frágiles y se dañan por las altas presiones de infiltración. Por lo general, este proceso se lleva a cabo con el uso de recubrimientos que mejoran la humectabilidad del metal líquido y las esferas huecas. Este método ha sido utilizado por J. Santa María et al. para la síntesis de espumas sintácticas de Al-A380 y Al-A206 con esferas huecas de  $Al_2O_3$  [19-20].

La colada bajo presión mecánica es un método alternativo de aplicar la presión necesaria para la infiltración de preformas esferas huecas. En este proceso se presiona la parte superior del molde en la masa fundida líquida mediante un pistón que fuerza la infiltración de la preforma. Este proceso presenta algunas ventajas como la posibilidad de producir una pieza con un acabado casi final, virtualmente libre de porosidad y con un tamaño de grano

más fino. Varios investigadores [12-15] han utilizado este método para infiltrar esferas sueltas y preformas y obtener espumas sintácticas en matriz de aluminio.

### **5.1.2 Fundición con Agitación**

La fundición con agitación es una técnica que comprende varios métodos en los que un metal fundido es agitado, por lo general con un impulsor, para dispersar la fase de refuerzo en toda la matriz metálica. Este método es particularmente sensible a la segregación y la aglomeración del refuerzo hueco, por lo tanto, la masa fundida tiene que mantenerse continuamente agitada antes de ser vertida en el molde. Además del método de las partículas huecas compactadas, es el método más común utilizado para la transferencia de las partículas de la masa fundida. Daoud et al. ha utilizado con éxito este método para el procesamiento de espumas sintácticas hechas de magnesio ZC63 aleación con 12 a 25% de cenizas de combustión [21] y ZnAl22 con cenizas de combustión recubiertas con níquel [22].

### **5.1.3 Pulvimetalurgia**

Este método ha sido utilizado con éxito para la síntesis de espumas sintácticas utilizando diferentes matrices como el aluminio, hierro y titanio [13, 14, 23-26, 28-30]. La aleación en polvo y las esferas huecas son mezcladas en cantidades apropiadas, luego la mezcla es compactada a presión en un molde y sinterizada en un horno para obtener una pieza con una densidad cercana a la de una pieza colada. Este método ha sido utilizado en la síntesis de muchos materiales compuestos de matriz metálica, sin embargo, en el caso de espumas sintácticas; se debe tener especial cuidado en la selección de una presión de compactación que minimice el aplastamiento de las esferas huecas. Zhao et al. sintetizaron espumas sintácticas de Fe y Ti mediante pulvimetalurgia polvos, utilizando presiones de compactación entre 100 y 150 MPa y E-esferas (huecas y porosas) [15]; los resultados obtenidos

demonstraron que un número significativo de esferas fueron aplastadas por la mayor presión de compactación. En un estudio similar, Xue et al. sintetizaron espumas sintácticas con microesferas cerámicas en matriz de titanio, utilizando presiones de compactación entre 45 y 200 MPa [56]. La densidad y la porosidad de las espumas variaban con la presión de compactación, sin embargo, una presión de compactación superior resultó en un gran número de microesferas aplastadas.

## **5.2 Defectos de Procesamiento en Espumas Sintácticas**

El procesamiento de las espumas sintácticas presenta algunos problemas tecnológicos que pueden tener consecuencias negativas en la calidad de las espumas sintácticas; generalmente evidenciadas como defectos en las espumas. Estos defectos tienen su origen en algunas de las características inherentes a las interacciones físico-químicas entre la matriz metálica y las partículas huecas añadidas, así como los parámetros de procesamiento y, finalmente en la calidad de las esferas huecas.

### **5.2.1 Interacciones Físicas y Químicas**

La mayor parte de los refuerzos huecos de las espumas sintácticas en matriz metálica son de cerámica; la humectación entre estos dos tipos de superficies no es buena y esta condición por lo general conduce a una unión deficiente y porosidad no deseada localizada alrededor de la periferia de la esfera hueca [5, 7, 31, 32]. Se ha demostrado que la porosidad no deseada tiene un efecto adverso en el comportamiento mecánico de espumas sintácticas de aluminio con cenizas de combustión, evidenciado por una reducción del máximo esfuerzo a la compresión de la curva esfuerzo-deformación [31]. Este defecto se hace más crítico a medida que el tamaño de las microesferas se reduce debido a la resistencia capilar al flujo de la masa fundida a través de los huecos entre las microesferas [7]. El recubrimiento de las microesferas con metales (Al, Ag, Cu, Ni,) es una alternativa que ha sido

utilizada para reducir la porosidad no deseada [7]. Otra opción es el incremento de la presión de infiltración, aunque esto también aumenta la posibilidad de infiltrar la cavidad de las microesferas debido a una presión excesiva.

Por otro lado, las temperaturas y presiones elevadas que normalmente se encuentran en el procesamiento de espumas sintácticas, puede conducir a reacciones químicas entre la matriz y los refuerzos huecos. Estas reacciones dependen de las composiciones particulares de ambos elementos de la espuma y pueden afectar negativamente la resistencia mecánica de la matriz debido a las modificaciones en su composición química y las fases, como ha sido demostrado por Balch et al. [27] donde la masa fundida de aluminio reacciona con las microesferas de cerámica lo que conduce a la formación de inclusiones de silicio sólido en el interior de la matriz y de alúmina sobre la superficie de las microesferas. Estos cambios también pueden tener una fuerte influencia en el tratamiento térmico de estos materiales compuestos, tal como ha sido ilustrado en el trabajo de Orbulov et al. [6].

La resistencia mecánica de las esferas también puede reducirse por estas interacciones químicas debido a una reducción en su espesor de pared u otros daños que pueden dar lugar a la infiltración de las esferas [4, 6, 7, 27].

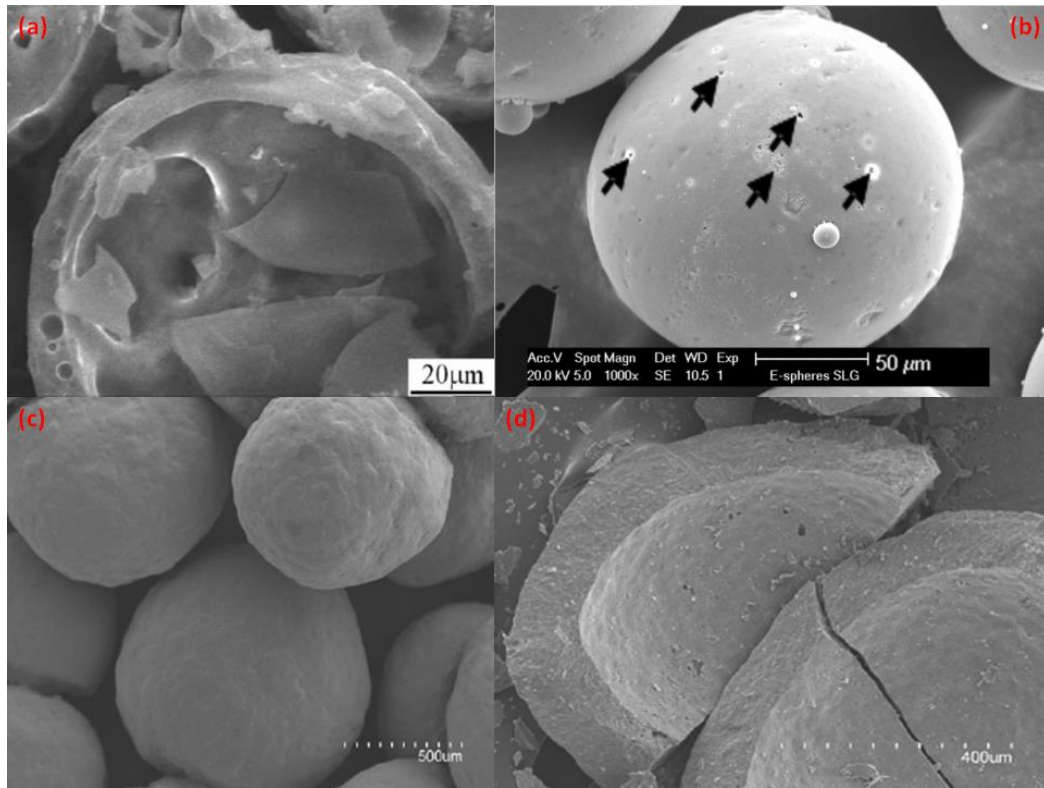
### **5.2.2 Parámetros de Procesamiento**

Además de los efectos de presión y temperatura mencionados en la sección anterior, se han encontrado los gradientes en el refuerzo los cuales han sido generados en las espumas debido a las interacciones entre las esferas huecas sólidas y el frente de avance del líquido y el frente de solidificación de la matriz [7]. Este efecto puede ser negativo si la infiltración se lleva a cabo a través de un lecho no compactado de esferas huecas, debido a que el flujo de metal líquido empuja y crea turbulencia modificando la distribución de esferas huecas dentro de la espuma; eventualmente este hecho conduce a propiedades mecánicas no consistentes en la espuma

debido a la presencia de regiones ricas en metal en algunas regiones y regiones con esferas huecas aglomeradas en otras. El uso de preformas minimiza este problema cuando la sinterización o unión de las esferas de refuerzo es posible. Además de presentar propiedades mecánicas más consistentes en las espumas sintácticas en matriz metálica, mediante este procedimiento es posible obtener preformas con una distribución bimodal de tamaño de las esferas huecas. De acuerdo con la literatura, este tipo de distribución de esferas huecas podría conducir a un incremento aun mayor en el máximo esfuerzo a la compresión y en el esfuerzo durante la absorción de energía en las espumas sintácticas [16].

### **5.2.3 Calidad de las Esferas Huecas**

La consistencia en las propiedades de las esferas huecas también juega un papel en el comportamiento mecánico de las espumas sintácticas. En este caso, los principales factores que intervienen son la distribución del tamaño de las esferas, la relación entre el espesor de pared de las microesferas y el diámetro de las mismas, así como y la cantidad de microesferas rotas o porosas. La Figura 2 muestra el aspecto y la superficie interna de los tipos más comunes de microesferas reportadas en la literatura (Cenosphere cenizas volantes, microballon cerámico (36 a 40% de  $Al_2O_3$ , 55-60%  $SiO_2$ , 1.4 a 1.6% de  $TiO_2$ , 0,4 hasta 0,5%  $Fe_2O_3$ ) y microesferas de SiC). Se puede observar que las microesferas no son completamente esféricas, su grosor no es uniforme, que son porosas y de sus cavidades internas no son completamente huecas. Estas características pueden afectar negativamente la calidad de las espumas sintácticas en matriz metálica y deben tenerse en cuenta al evaluar el comportamiento a la compresión de estas espumas. Las microesferas rotas, por lo general presentes en este tipo de refuerzos, pueden ser separadas de las enteras por flotación en un fluido con mayor densidad que las microesferas [34].



**FIG. 2** Imágenes SEM de microesferas en: (a) cenizas de combustión rotas, (b) cerámicas (c) carburo de silicio, (d) carburo de silicio rotas [6, 34, 42]

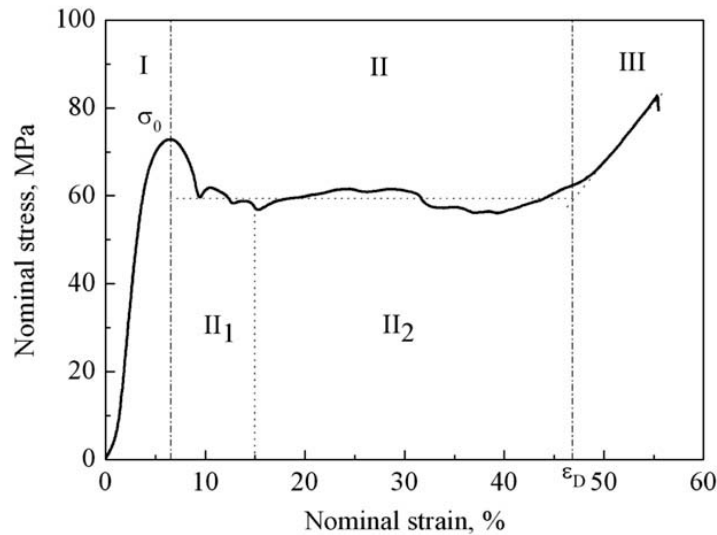
### **5.3 Comportamiento Mecánico de las Espumas Sintácticas con Matriz Metálica**

La mayoría de las publicaciones de investigación que tratan sobre espumas sintácticas en matriz metálica presentan información sobre sus propiedades mecánicas a la compresión debido a que estas espumas están diseñadas para funcionar principalmente bajo compresión, especialmente aquellas aplicaciones desarrolladas para la absorción de energía durante impactos. Las propiedades de las espumas sintácticas en matriz metálica dependen de varios parámetros tales como el tipo de material de las partículas, la relación entre el espesor de la pared de la esfera y su diámetro, el tipo de aleación de la matriz metálica, los parámetros de procesamiento, las porosidades no

intencionales atrapadas, y las condiciones de tratamiento térmico. En las siguientes secciones se describirá el comportamiento general de las espumas sintácticas en matriz metálica bajo deformación, en términos de sus curvas de compresión esfuerzo-deformación, así como los efectos de refuerzo de la matriz, la fracción de volumen y la relación t/D en el comportamiento de estas espumas.

### **5.3.1 Comportamiento General bajo Deformación**

La Figura 3 muestra la forma típica de una curva esfuerzo-deformación a la compresión cuasi-estática para las espumas sintácticas en matriz metálica [42]. Se puede apreciar tres zonas de deformación claramente definidas. En primer lugar, una deformación elástica lineal representada por la zona I, donde el esfuerzo se incrementa linealmente con la deformación hasta que se alcanza un máximo esfuerzo a la compresión ( $\sigma_0$ ). La segunda zona (II) se inicia con una caída repentina de la presión seguida por una meseta extendida donde el esfuerzo se mantiene esencialmente constante hasta que se alcanza una deformación relativamente grande. Esta es la zona donde se desarrolla la absorción de energía de las espumas sintácticas en matriz metálica, debido a un colapso progresivo de las esferas huecas. El autor diferencia dos sub zonas, II<sub>1</sub> donde se produce el colapso de las esferas huecas dispersas y II<sub>2</sub> donde se desarrollan las bandas de densificación debido a la plasticidad localizada del material compuesto. Por último, la zona III representa la etapa de densificación, que comienza con la deformación de densificación ( $\epsilon_D$ ) y se caracteriza por un rápido incremento del esfuerzo para un diferencial de deformación dado.



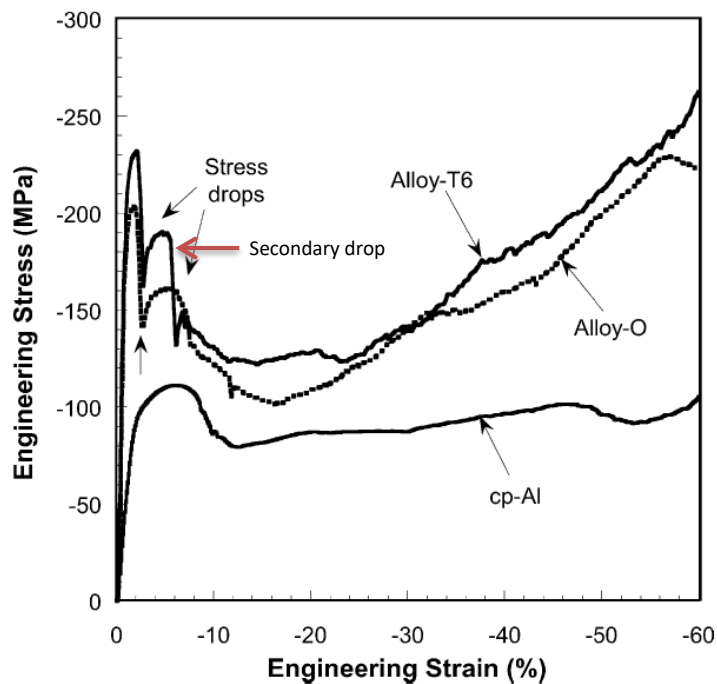
**FIG. 3 Curva esfuerzo-deformación de espumas sintácticas bajo compresión [42]**

En el presente estudio se determinó la deformación de densificación ( $\epsilon_D$ ) como la intersección de las tangentes correspondientes a las regiones de la meseta y la de densificación; este parámetro fue utilizado para cuantificar la energía absorbida por unidad de volumen, también conocida como la tenacidad de la espuma sintáctica en matriz metálica. En realidad, la zona de meseta no siempre está tan claramente definida como se muestra en la Figura 3, razón por la cual una variedad de métodos ha sido utilizada en la literatura para reportar el esfuerzo en absorción correspondiente a este tipo de espumas [8, 25, 31]. En el presente estudio la energía absorbida está representada por el área bajo la curva esfuerzo-deformación a la compresión calculada a partir del máximo esfuerzo a la compresión hasta que la deformación de densificación alcance un valor similar al máximo esfuerzo de deformación.

Las curvas cuasi-estáticas de compresión presentan diferentes modos de fallo tanto en el máximo esfuerzo a la compresión como durante la densificación, como fue demostrado por Balch et al. [4] para espumas sintácticas con matriz de aluminio comercialmente puro (cp-Al) y aleaciones de aluminios. Para el caso de la espuma de cp-Al, la Figura 4 muestra un



esfuerzo máximo de compresión bien redondeado, lo que significa que la matriz cede, es decir, se deforma plásticamente, antes de que las esferas huecas comiencen a fallar. La caída del esfuerzo luego de alcanzar un máximo corresponde a la formación de bandas de aplastamiento a 45°, como indica la flecha en la zona de meseta. Un comportamiento similar también ha sido observado para espumas sintácticas en aleaciones de aluminio con diferentes tipos de esferas huecas [4, 5, 35, 42].

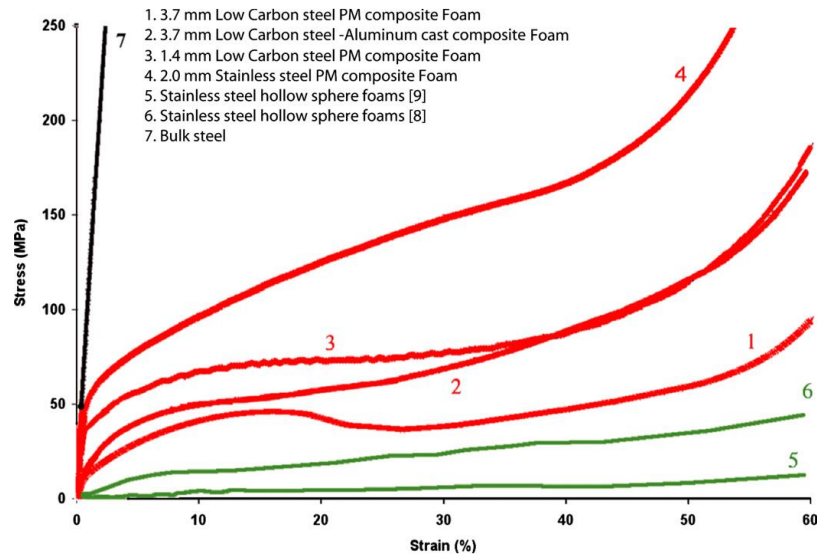


**FIG. 4 Comportamiento compresivo cuasi-estático de cp-Al y espumas sintácticas de aluminio aleado [4]**

En el caso de las espumas de aluminio aleado (O y T6) las esferas huecas fallaron antes que la matriz, se observa una caída primaria muy fuerte y una caída secundaria más redondeada. Este comportamiento ha sido explicado por el autor como el resultado de dos bandas de corte próximas a los 45° correspondientes a esferas colapsadas al interior de los especímenes,

probablemente debido a una mayor resistencia y una reducida ductilidad de las matrices (en comparación con el cp-Al) y a la presencia de refuerzos cerámicos fuertes y frágiles en las espumas. Resultados similares se han observado en otras matrices de aluminio aleado [4, 6, 8, 15].

Se ha observado un comportamiento diferente en el caso de las espumas sintácticas de matriz metálica que contienen esferas huecas metálicas. La Figura 5 muestra las curvas de compresión esfuerzo-deformación para espumas sintácticas sintetizadas con esferas huecas de acero en matrices de acero y aluminio, por colada y pulvimetalurgia, respectivamente [26].



**FIG. 5 Curvas esfuerzo-deformación de espumas sintácticas de acero con esferas metálicas huecas [26]**

En este caso, el modo de fallo bajo compresión es dúctil a diferencia de las esferas huecas de cerámica quebradizas. Hay una región inicial de deformación elasto-plástica, seguida de una caída poco pronunciada en la zona del máximo esfuerzo de compresión y una región de meseta prolongada para un valor del esfuerzo relativamente constante. Este comportamiento se

ha observado también en otras espumas sintácticas que contienen esferas huecas metálicas [13, 36].

### **5.3.2 Efecto de Reforzamiento de la Matriz**

Como se discutió en la sección anterior, un incremento en el esfuerzo máximo de compresión y en el esfuerzo en absorción (región de la meseta) de las espumas sintácticas mejora sus capacidades de absorción de energía. Un enfoque para conseguir este objetivo es incrementar la resistencia de la matriz a través de un tratamiento térmico, para las aleaciones tratables térmicamente. Balch [4] y más tarde Orbulov [6] han demostrado el efecto de un tratamiento térmico de normalizado (T6) de espumas sintácticas con matriz de aluminio sobre sus capacidades de absorción de energía. En ambos casos, las aleaciones tratadas térmicamente muestran esfuerzos máximos de compresión y valores de absorción de energía más elevados que aquellos correspondientes a las espumas no tratadas térmicamente. Un comportamiento similar ha sido reportado por Daoud [37] para el tratamiento térmico de espumas sintácticas con una matriz de ZnAl22. Según el autor las espumas con tratamiento térmico exhiben un comportamiento dúctil bajo deformación debido a una mayor plasticidad inducida por la microestructura fina de la matriz ZnAl22.

Santa María et al. [20] ha estudiado el efecto de la resistencia de la matriz, el tamaño de esferas huecas y la distribución de las propiedades de compresión de las espumas sintácticas de Al-A206/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. El estudio abarcó tres diferentes rangos de tamaño de esfera hueca y las muestras fueron ensayadas en estado de colada, así como bajo condiciones de tratamiento térmico T4 y T7. Los resultados mostraron que el máximo esfuerzo de compresión de las espumas sintácticas era directamente proporcional al esfuerzo en fluencia de las matrices tratadas térmicamente. Asimismo, el

máximo esfuerzo de compresión, el esfuerzo en absorción y la tenacidad de las espumas aumentan con el incremento en la relación  $t/D$  de las esferas.

Cabe anotar que, para el caso de las espumas sintácticas, el incremento en el máximo esfuerzo de deformación y en el esfuerzo en absorción, debidos a un tratamiento térmico, puede ser no tan alto como los valores encontrados para la misma matriz tratada térmicamente. Para el caso de espumas sintácticas de aluminio este comportamiento ha sido atribuido a una modificación en la composición y las fases de la matriz original, debido a las reacciones químicas entre la matriz de la masa fundida y la sílice de las esferas huecas, lo que lleva a la precipitación de silicio en el interior de la matriz y la formación de alúmina en las paredes de las esferas [6, 27]. Este tipo de interacciones químicas entre la masa fundida y las esferas huecas puede modificar drásticamente la composición de la matriz luego del tratamiento térmico.

### **5.3.3 Efecto de la Fracción Volumétrica**

La fracción volumétrica permitida para las esferas huecas en espumas sintácticas dependerá de su disposición espacial dentro de la matriz metálica. Sanders y Gibson [60] estudiaron la mecánica de espuma con esferas huecas suponiendo disposiciones ordenadas de las esferas en el espacio, similares a las encontradas en los sistemas cristalinos de metales, es decir, cúbico simple (SC), cúbico centrado en el cuerpo (BCC) y cúbico centrado en las caras (FCC). Utilizando los factores de empaque de estos sistemas cristalinos, se puede decir que las fracciones volumétricas que se pueden obtener de esferas en espumas sintácticas (valores teóricos) serían 0,52, 0,68 y 0,74 para SC, BCC y FCC respectivamente. Después de modelar la mecánica de esferas huecas siguiendo estos arreglos, Sanders y Gibson encontraron que el empaque FCC tiene propiedades mecánicas superiores que los sistemas SC o BCC.

El efecto de la fracción de volumen sobre las propiedades de compresión de las espumas sintácticas de matriz metálica ha sido estudiado por Tao et al. [17] mediante la infiltración de una mezcla de microbalones cerámicos y polvo de la aleación de aluminio 6082, añadidos a una masa fundida de la misma aleación. De este modo la fracción de volumen de la matriz de dichas espumas fue modificada entre 37% y 70% de aluminio. Las curvas de esfuerzo-deformación de compresión mostraron que a medida que se redujo la fracción de volumen de microbalones el esfuerzo máximo de compresión se incrementaba y la longitud de la meseta correspondiente al esfuerzo en deformación se reducía drásticamente. En cuanto a la capacidad de absorción de energía específica, la espuma con 50% de aluminio mostró el valor más alto seguido de las espumas con 60% y 43% de aluminio. Resultados similares fueron obtenidos por Daoud et al. [37] quién utilizó esferas de cenizas de combustión en una matriz de Zn22Al; se encontró la misma relación inversa entre la fracción de volumen de microbalones y el esfuerzo máximo de compresión, sin embargo, no se presentó valores de la absorción específica de energía para diferentes fracciones de volumen de las cenizas de combustión, por lo tanto, no se pueden sacar conclusiones sobre este parámetro.

Se han publicado otros estudios de investigación modificando la fracción en volumen de microesferas utilizando diferentes tamaños de esferas [14, 16, 35] con resultados variables.

#### **5.3.4 Espesor de pared de las Microesferas/Diámetro**

La capacidad de absorción de energía de las espumas sintácticas de matriz metálica depende de un número de parámetros como el material de la esfera hueca, la relación del espesor de pared de las microesferas/diámetro, el rango de tamaño de las microesferas, la aleación de la matriz, parámetros de procesamiento, porosidades no deseadas y las condiciones de tratamiento de

calor. En esta sección se revisará el efecto de la relación entre el espesor de pared de microesferas/diámetro de las mismas ( $t/D$ ).

Este efecto ha sido estudiado en detalle por Kiser et al [9], en donde tres diferentes valores de la relación ( $t/D$ ) fueron infiltradas por aleaciones de aluminio A201 y A360. Las curvas esfuerzo-deformación en compresión muestran que el esfuerzo máximo de compresión aumenta a medida que aumenta el espesor de pared/diámetro, en un factor de hasta 3 veces. Este comportamiento fue observado en las tres matrices (A201-O, A201 y A360-T6-O). Santa María et al. [19] presentó un gráfico con una revisión de las propiedades de compresión cuasi estática publicados para espumas sintácticas con aproximadamente el 60% de microesferas. El gráfico muestra la misma tendencia que el trabajo de Kiser, existe una relación directa entre el esfuerzo máximo de compresión y la relación ( $t/D$ ) de las microesferas.

#### **5.4 Aplicaciones de las Espumas Sintácticas en Matriz Metálica**

Durante la última década, las espumas metálicas ya sean de células abiertas o cerradas han sido utilizadas en la industria, fundamentalmente en aplicaciones de transporte, defensa y aeroespaciales. Las espumas sintácticas con matriz metálica presentan combinaciones de propiedades físicas y mecánicas muy deseadas, las cuales incluyen una elevada tenacidad específica, una alta absorción de energía específica, y una baja conductividad térmica que las hacen ideales para la sustitución de espumas metálicas en muchas de sus aplicaciones actuales.

La creciente importancia de las espumas sintácticas con matriz metálica ha sido subrayada por G. M. Gladysz et al. [39] en la Figura 1 que muestra el fuerte aumento de las publicaciones de investigación sobre las espumas sintácticas y compuestas desde 2003, impulsado por la posible tendencia de la industria para aumentar la funcionalidad de estructuras; ya sea para la

reducción de peso para el ahorro de combustible o para el funcionamiento óptimo de los implantes biocompatibles.

#### **5.4.1 Aplicaciones en el Transporte Terrestre**

Este segmento tiene la mayor cuota del mercado mundial de materiales compuestos con matriz metálica, y se espera que crezca con las demandas de bajo consumo de combustible y la seguridad en la industria del transporte del automóvil [40]. Un enfoque para satisfacer ambas demandas es a través del uso de espumas metálicas y espumas sintácticas con matriz metálica. Un ejemplo de estas aplicaciones es el material compuesto de aluminio y cenosferas de cenizas de combustión promovido por una empresa australiana bajo el nombre comercial ULTALITE® [41]. Este material compuesto con matriz metálica contiene una aleación de aluminio A356 con cenosferas de cenizas de combustión, en el rango de 10% a 50% en peso. El productor sostiene que este compuesto podría ser utilizado para la fabricación de varios componentes automotrices tales como tambores de freno, discos de freno, bloques de motor, culatas, pistones, bielas, bombas de aceite, y componentes de transmisión.

Las espumas sintácticas con matriz metálica son excelentes amortiguadores de energía debido a su deformación a un nivel de esfuerzos casi constante sobre un amplio rango de deformaciones, lo que los hace ideales para zonas de absorción de energía de choque en el transporte terrestre [42]. Las espumas metálicas y las espumas sintácticas con matriz metálica tienen un bajo nivel de rebote bajo condiciones dinámicas de choque, por ejemplo las espumas de aluminio con menos de 3% en comparación con 15% de las espumas de poliuretano [43]. Debe tenerse en cuenta también que las espumas sintácticas con matriz metálica tienen un rendimiento mucho mejor como elementos de absorción de energía que las espumas metálicas

[44]. Algunas de las posibles aplicaciones de las estructuras rellenas de espuma incluyen cajas de choque para los impactos de frente, y la protección de menores de paseo para los camiones semi-remolque.

Las espumas sintácticas con matriz metálica también pueden ser utilizadas para mejorar la absorción de la energía del choque en el transporte ferroviario de alta velocidad, tal como muestra un estudio realizado por Kremer et al. Con el fin de identificar, investigar y demostrar las aplicaciones específicas de la espuma de aluminio en equipo ferroviario de alta velocidad [45]. Las áreas de aplicación exploradas incluyen: paneles tipo sándwich de espuma de aluminio de peso ligero tipo sándwich para suelos, tabiques y puertas de paneles eléctricos, elementos primarios de absorción de energía para impactos en alféizares de deslizamiento o zonas deformables al final de los vehículos de pasajeros, cabezales secundarios de absorción de energía para reducir lesiones en la cabeza durante impactos, y elementos de absorción de energía para asientos deslizantes con rieles para reducir lesiones a los pasajeros durante el impacto con los respaldos de los asientos.

#### **5.4.2 Aplicaciones en el Sector Aeroespacial**

Una aplicación promisoría de las espumas sintácticas con matriz metálica que ha sido explorada por fabricantes de turbinas fabrica es la construcción de perfiles aerodinámicos. Rolls-Royce Plc ha registrado una patente en la USPTO para un método de fabricación de un perfil aerodinámico para un motor de turbina de gas, ya sea para la pala del rotor o el estator de paletas [46]. El perfil aerodinámico está compuesto por un laminado con dos hojas de metal y un núcleo de espuma sintáctica. De acuerdo con las reivindicaciones de la patente la espuma sintáctica puede ser fabricada de aluminio, titanio, níquel, magnesio o aleaciones de acero. Powdermet Inc. ha propuesto espumas sintácticas de aluminio y titanio como un reemplazo para marcos de absorción de energía para el interior de la caja del ventilador en los motores de turbina



como una alternativa para reducir el peso en las cajas de ventiladores de pared gruesa y una alternativa más compacta para las cajas de ventiladores de pared delgada [47].

### **5.4.3 Aplicaciones en el Sector Defensa**

Las necesidades actuales de las fuerzas armadas incluyen el despliegue rápido de los vehículos, personal y armamento, así como una mejor protección del personal en combate. Un enfoque común para lograr un rendimiento mayor en la absorción de energía y resistencia al impacto balístico comprende el diseño de materiales compuestos con una funcionalidad variable en la armadura (FGACs) [48]. Generalmente son materiales laminados que consisten de una capa orientada hacia el impacto frontal cuyo propósito es embotar y erosionar el proyectil entrante. Mientras tanto, una segunda capa sostiene el material de la primera capa durante el impacto inicial y luego se deforma y absorbe energía. Usualmente, el material frontal es un cerámico, por lo general  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , mientras que las capas de soporte son metales típicamente ligeros como el aluminio, pero desarrollos recientes incluyen compuestos de fibra que proporcionan una mejor combinación de absorción de energía y reducción de peso [49]. Si bien se ha demostrado que las espumas metálicas ofrecen poco en el camino de la protección balística [50], cuando son instaladas como capas intermedias entre las placas cerámicas que reciben el impacto, pueden actuar como elementos para reducir la transferencia de las ondas de choque y permitir que el proyectil sea frenado al aplastar la espuma sintáctica antes que el material de soporte se deforme [51].

La Marina de los Estados Unidos de Norteamérica ha investigado extensamente y desarrollado materiales compuestos ligeros de alto rendimiento como alternativa a los metales monolíticos, para enfrentar sus necesidades de mejorar el rendimiento operacional de los buques de guerra, es decir, un mayor alcance, sigilo, estabilidad y carga útil. Rawal y Lanning

han publicado el desarrollo de un panel compuesto de titanio reforzado con microbalones de cerámica: Ti/ ((Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) mb / Al) //Ti, para ser utilizado en aplicaciones submarinas avanzadas [52]. La estructura física del material compuesto era un laminado fabricado con dos placas de titanio como caras exteriores y la espuma sintáctica metálica (microbalones de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en una matriz de aluminio) intercalado entre ellos. Esta combinación ofrece una baja densidad, buena resistencia a la compresión, alta amortiguación, y resistencia al impacto en comparación con el acero convencional HY-80 utilizado para el casco del submarino y el anillo de unión, y las estructuras de plataforma. A pesar de lo promisorio de estos nuevos materiales, la mayoría de las aplicaciones completamente desarrolladas con materiales compuestos ligeros se encuentran sólo en un número relativamente pequeños buques de guerra o en componentes no estructurales de los grandes buques y submarinos [53].

#### **5.4.4 Aplicaciones Biomédicas**

Las aleaciones de titanio han sido utilizadas ampliamente en los implantes ortopédicos debido a su buena biocompatibilidad, elevada relación resistencia mecánica/peso, módulo de elasticidad relativamente bajo, alta resistencia a la fatiga, y una excelente resistencia a la corrosión. Sin embargo, una desventaja con el uso de estos materiales es que el implante a menudo se afloja (discontinuidad de la unión implante/hueso o de la interfaz con el cemento) debido a un efecto de apantallamiento de esfuerzos entre la aleación de titanio con una mayor tenacidad (aprox. 120 GPa) y el hueso (aprox. 18,6 GPa) [54-55]. Este fenómeno conduce a la pérdida y debilitamiento del hueso. Una estrategia para reducir este efecto es utilizar materiales de implante que imiten la estructura y las propiedades de hueso humano, donde la distribución de carga en la interfaz hueso/implante no se vea alterada por la presencia del implante. Considerando que el hueso es un material anisotrópico y sus

propiedades mecánicas varían en todo el cuerpo, los materiales compuestos son una opción ideal ya se puede lograr propiedades funcionales graduables. Se han publicado los resultados preliminares sobre las propiedades mecánicas y biológicas de una espuma sintáctica compuesta de titanio y microsferas cerámicas (diámetro: 150 micras, composición: ~ 60% de SiO<sub>2</sub>, ~ 40% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0,4 a 0,5% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), fabricada por pulvimetalurgia [56]. Los datos reportados en este estudio sugieren que las espumas sintácticas con matriz de aleación de titanio tienen potencial como materiales para implantes ortopédicos y merecen una investigación más profunda.

#### **5.4.5 Aplicaciones en el Sector Construcción**

Las espumas sintácticas con matriz metálica ofrecen muchas ventajas significativas para aplicaciones estructurales debido a su elevada tenacidad, alta energía de impacto específico y capacidad de absorción de sonido y energía. Las aplicaciones propuestas en ingeniería civil y estructuras incluyen marcos y estructuras ligeras, aislamiento térmico, y estructuras de protección. Sin embargo, en la medida que los costos de fabricación de estos materiales se mantengan elevados probablemente dichas aplicaciones se limitaran a nichos muy específicos en los que el rendimiento es de mayor importancia que el costo. Un interesante estudio realizado por Salimon et al. [57] muestra las posibles aplicaciones de espumas de acero y titanio, sobre la base de una metodología de selección de materiales, que puede ser un análogo cercano a las propiedades de las espumas sintácticas con matriz de aleación de aluminio. Las aplicaciones potenciales predichas para las espumas metálicas en el sector construcción son [57, 58]: pisos, decoración de techos y falsos techos, puertas y escotillas ligeras de protección contra el fuego y ascensores.

#### **5.4.6 Aplicaciones en Empaques Electrónicos**

Dou et al. [59] encontró que la espuma sintáctica de Al-2024 con cenizas de combustión era superior a la espuma de Al-2024 para aplicaciones de blindaje electromagnético. En la gama de frecuencias de 1 a 600 MHz la propiedad de apantallamiento EM de la aleación Al-2024 estaba en el intervalo de -36 a -46 dB, mientras que la de la espuma sintáctica estaba en el intervalo de -40 a -102 dB. Mediante una cuidadosa selección de la matriz y el material de las microesferas huecas se pueden desarrollar nuevos tipos de materiales de embalaje electrónico ligero de alto rendimiento.

## VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 6.1 Sobre la base de la revisión bibliográfica efectuada, se ha podido verificar que existen varios métodos para la síntesis de las espumas sintácticas con matriz metálica. La infiltración bajo presión es el método más ampliamente utilizado para la síntesis de espumas sintácticas con matrices metálicas de bajo punto de fusión (aluminio, magnesio y zinc), mientras que la pulvimetalurgia es el método preferido para la síntesis de espumas sintácticas con matrices de alto punto de fusión (titanio, aceros, aceros inoxidable, etc.).
- 6.2 El procesamiento de las espumas sintácticas con matriz metálica presenta algunos problemas tecnológicos que deben abordarse para evitar propiedades mecánicas indeseables derivadas de las reacciones químicas entre la matriz y las microesferas de refuerzo, las porosidades no deseadas y la calidad de las esferas huecas.
- 6.3 Las propiedades mecánicas a la compresión de las espumas sintácticas con matriz metálica dependen de varios parámetros como el material que cubre la superficie de las microesferas, la relación entre el espesor de pared de la microesfera y su diámetro, la aleación de la matriz metálica, los parámetros de procesamiento, las porosidades atrapadas y no deseadas, y las condiciones de tratamiento térmico, en aquellas matrices que pueden ser tratadas térmicamente.
- 6.4 Las espumas sintácticas con matriz metálica presentan una clara ventaja sobre otras espumas metálicas debido a su ligero peso, su elevada resistencia específica a la compresión, su elevada tenacidad específica y su elevada capacidad de absorción de energía. Estas

ventajas hacen de ellas candidatos excelentes para aplicaciones en el transporte terrestre, aeroespacial, defensa y aplicaciones biomédicas.

6.5 Sobre la base de la revisión bibliográfica efectuada, para la fase experimental del proyecto se recomienda trabajar con una aleación ligera que pueda ser tratada térmicamente, con el fin de poder incrementar la resistencia mecánica de la matriz. Una aleación base aluminio sería una opción adecuada, A-356 o A-320. Las microesferas a emplearse serían a base de alumina ( $Al_2O_3$ ) con tres rangos de diámetro nominal. El proceso de síntesis elegido será infiltración bajo presión utilizando argón como gas de presurización. La caracterización de las muestras obtenidas será efectuada mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y el análisis cuantitativo elemental mediante espectroscopia dispersa de emisión (SEM-EDS); en el país se cuenta con este tipo de equipos. Finalmente, el comportamiento mecánico de las muestras de espuma sintáctica obtenida será realizado por medio de ensayos de compresión bajo condiciones cuasi-estáticas, de acuerdo con los protocolos de ensayo discutidos en el presente informe.

## VII. FUENTES DE INFORMACION

1. Gupta N, Metal Matrix Syntactic Foam: Processing, microstructure, properties, applications. Chapter 1, ed. Gupta N, Rohatgi P (DEStech Publications, Inc); 2015.
2. Rohatgi PK, Guo RQ, Iksan H, Borchelt EJ, Asthana R. Mater. Sci. Eng. A. 1998; 244:22-30.
3. Rohatgi P, Kim J, Gupta N, Alaraj S, Daoud A. Composites Part A. 2006; 47:430-7.
4. Balch DK, O'Dwyer JG, Davis GR, Cady CM, Gray III GT, Dunand D.C. Mater. Sci. Eng. A. 2005; 391:408-17.
5. Orbulov I, Dobránsky J. Period. Polytech. Mech Eng. 2008; 52:35-42.
6. Orbulov I, Gunsztler J. Composites Part A. 2012; 43:553-61.
7. Palmer RA, Gao K, Doan TM, Green L, Cavallaro G. Mater. Sci. Eng. A. 2007; 464:85-92.
8. Drury WJ, Rickles SA, Sanders Jr. TH, Cochran JK. In: Lee EW, Chia EH, Kim NJ. (Eds.) Light-Weight Alloys for Aerospace Applications TMS 1989 pp. 311-22.
9. Kiser M, He MY, Zok FW. Acta Mater. 1999; 47:2685-94.
10. Aghajanian M, Mamillan N, Kennedy C, Luszcz S, Roy R. Mat. Sci. 1989; 24:658-70.
11. Weise J, Yezerska O, Busse M, Haesche M, Zanetti-Bueckmann V, Schmitt M. Materialwiss. Werkstofftech. 2007; 38:901-6.
12. Lanning BR, Rawal SP, Misra MS. in Advanced Metal Matrix Composites for Elevated Temperatures Conference Proceedings, Cincinnati, Ohio October 20-24 1991, pp. 79-83.
13. Rabiei A, Vendra LJ. Mater Lett. 2009; 63:533-6.
14. Zhang LP, Zhao YY. J Composite Mater. 2007; 41:2105-17.
15. Zhao Y, Tao X, Xue X. Proc. MS&T Pittsburgh Pennsylvania. 2008 pp. 2607- 2615.
16. Tao XF, Zhang LP, Zhao YY. Mater Des. 2009; 30:2732-6.

17. Tao XF, Zhao YY. *Scr. Mater.* 2009; 61:461-4.
18. Kim HS, Plubrai P. *Composites Part A.* 2004; 35:1009-15.
19. Santa Maria J, Thesis for Master of Science in Engineering at University of Wisconsin-Milwaukee, May 2012.
20. Santa Maria J, Schultz B, Ferguson J, Rohatgi P. DOI 10.1016/j.smea.2013.05.081.
21. Daoud A, Abou El-Khair MT, Abdel-Aziz M, Rohatgi P. *Compos. Sci Technol.* 2007; 67:1842-53.
22. Daoud A. *Mater Sci Eng A.* 2008; 488:281-95.
23. Nagata S, Matsuda K. *Imono.* 1981; 53:300-4.
24. Nagata S, Matsuda K. *Jpn. Foundrymen's Soc.* 1983; 2:616-20.
25. Mondal DP, Datta Majumder J, Jha N, Badkul A, Das S, Patel A, Gupta G. *Mater Des.* 2012; 34:82-9
26. Neville BP, Rabiei A. *Mater Des.* 2008; 29:388-96.
27. Balch DK, Dunand DC. *Acta Mater* 2006; 54:1501.
28. Weise J, Baumeister J, Yezerska O, Salk N, Silva GBD. *Adv. Eng. Mater.* 2010; 12:604-8.
29. Peroni L, Scapin M, Avalle M, Weise J, Lehmkus D, Baumeister J, Busse M. *Adv. Eng. Mater.* 2012; 14:909-18.
30. Peroni L, Scapin M, Avalle M, Weise J, Lehmkus D. *Mater Sci Eng A* 2012; 552:364-75.
31. Rohatgi PK, Kim JK, Gupta N, Alaraj S, Daoud A. *Composites Part A* 2006; 37:430.
32. DeFouw JD, Rohatgi PK. *Supplemental Proceedings, Vol 2: The Minerals, Metals and Materials Society, Warrendale, PA, 2011, p.797.*
33. Castro G, Nutt SR. *Mater Sci Eng A* 2012; 535:274.
34. Luong DD, Strbik III OM, Hammond VH, Gupta N, and Cho K. *J. Alloys Compd.* 550, 412 (2013).
35. Wu GH, Dou ZY, Sun DL, Jiang LT, Ding BS, He BF. *Scr Mater* 2007; 56:221.



36. Vendra LJ, Rabiei A. *Mater Sci Eng A* 465 (2007) 59–67.
37. Daoud A. *J Alloys Compd.* 2009; 487:618.
38. Schultz B, Rohatgi P, *Metal Matrix Syntactic Foam: Processing, microstructure, properties, applications.* Chapter 3, ed. Gupta N, Rohatgi P (DEStech Publications, Inc); 2015.
39. Gladysz GM, Chawla KK, Boccaccini AR. *J Mater Sci* (2012) 47:5625–5626
40. *Metal Matrix Composites: The Global Market.* Website accessed: 2-19-2013 <http://www.bccresearch.com/report/metal-matrix-composites-market-avm012d.html>
41. Withers G. ULTALITE® aluminum composites, *Adv. Mater. Proc.* 2005; 163:45-8
42. Zhang Q, Lee PD, Singh R, Wu G, and Lindley TC. *Acta Mater.* 2009; 57:3003–11
43. Niebylski LM, Fanning RJ. *SAE Transactions.* Paper 720490, 1972, doi: 10.4271/720490.
44. Rohatgi PK, Gupta N, Schultz BF, Luong DD. *JOM.* 2011; 63:30-6
45. Kremer K. *Final Report IDEA Programs, Transportation Research Board* 2004; 34:1-31
46. Read S. *Aerofoil and a Method of Manufacturing,* Patent No. US 7594325 B2 9-29- 2009
47. Powdermet Inc. *Products SCOMP™* Website accessed: 2-19-2013 <http://www.powdermetinc.com/scomp.html>
48. Chin ESC. *Army Mater. Sci. Eng. A.* 1999; 259:155-61.
49. Hogg PJ. *Composites in Armor, Science.* 2006; 314:1100-1.
50. Hou W, Zhu F, Lu G, Fang DN. *Int. J Impact Eng.* 2010; 37:1045-55.
51. Gama BA, Bogetti TA, Fink BK, Yu CJ, Claar TD, Eifert HH, Gillespie JW. *Compos. Struct.* 2001; 52:381-95.
52. Rawal SP, Lanning BR. *DARPA Report* 1994.

53. Mouritz AP, Gellert E, Burchill P, Challis K. *Compos. Struct.* 2001; 53:21-41.
54. Ridzwan MIZ, Shuib S, Hassan AY, Shokri AA. *J. Appl. Sci.* 2006; 6:183-9.
55. Soininvaara TA, Jurvelin JS, Miettinen HJA, Suomalainen OT, Alhava EM, Kröger PJ. *Calcif. Tissue Int.* 2002; 71:472-7.
56. Xue XB, Zhao YY, Kearns V, Williams RL. *Supplemental Proceedings: Vol 2: Materials Characterization, Computation, Modeling and Energy. TMS 2010.*
57. Salimon A, Bréchet Y, Ashby MF, Greer AL. *J. Mater. Sci.* 2005; 40:5793-9.
58. Banhart J. *Prog. Mater. Sci.* 2001; 46:559-632.
59. Dou Z, Wu G, Huang X, Sun D, Jiang L. *Composites Part A.* 2007; 38:186-91.
60. Chawla K. *Composite Materials: Science and Engineering, 3<sup>rd</sup> Ed.,* Springer.