



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

TESIS:

“Fabricación de espumas sintácticas y convencionales de la aleación CuSn”

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
Doctor en Ciencias en Ingeniería Mecánica**

**PRESENTA:
M. C. Luis Enrique Carranza García**

**Asesor:
Dra. Lada Domratcheva Lvova**

**Asesor externo:
Dr. Ismeli Alfonso López**
Instituto de Investigaciones en Materiales. Unidad Morelia-UNAM

Morelia, Michoacán, agosto de 2025

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a las personas e instituciones que hicieron posible la realización de este proyecto.

Quiero agradecer a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación Secihti por la beca recibida durante la realización del programa de doctorado. También a la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por la oportunidad de formar parte de su programa de posgrado. De igual manera, al Instituto de Investigaciones en Materiales Unidad Morelia de la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme realizar mi programa de doctorado como estudiante adjunto.

Al Dr. Ismeli Alfonso López, primeramente, por aceptarme como su estudiante y asesorarme durante mis estudios de posgrado, por ser un buen amigo dentro y fuera de la institución, por todas las aventuras y convertirse en una persona muy importante para mí y mi familia.

A la Dra. Lada Domratheva Lvova por aceptarme como su estudiante, por todo su apoyo y consejos durante mis estudios de posgrado, además de su ayuda en momentos complicados.

Dr. Luis Béjar Gómez †, por todas sus enseñanzas, consejos y amistad.

Al Dr. Orlando Hernández Cristóbal por su apoyo en la toma y análisis de imágenes en Microscopio Electrónico de Barrido, así como por su amistad y disponibilidad para enseñarme las técnicas de análisis.

Finalmente, el más grande de mis agradecimientos a mis padres y hermano Rosa María García Solís, Belisario Carranza Ochoa y Juan Carlos Carranza García por su constante apoyo y ser un ejemplo de vida para mí y a mi esposa Diana Saray Ramos Valencia por siempre estar conmigo, apoyarme en mi trabajo, ser mi inspiración y motivación para siempre seguir adelante.

Resumen

Este trabajo aborda la fabricación y caracterización de espumas metálicas sintácticas y convencionales elaboradas con la aleación Cu₂₀Sn mediante el método de infiltración. Se emplearon esferas huecas de hierro (Fe) para las espumas sintácticas y partículas granulares de K₂SO₄ como agente espaciador para las espumas convencionales, ambas con un tamaño aproximado de 3 mm. Las porosidades obtenidas fueron del 52% y 64%, respectivamente.

Se realizaron tratamientos térmicos de solubilización a 750 °C, seguidos de temple en agua, con el objetivo de modificar la microestructura y mejorar las propiedades mecánicas. La caracterización se llevó a cabo mediante microscopía, análisis elemental, difracción de rayos X y ensayos mecánicos de compresión. Los resultados mostraron una transformación de la fase ϵ a la fase β , lo que contribuyó a un incremento en la resistencia mecánica.

En las espumas sintácticas, el tratamiento térmico elevó el esfuerzo de compresión de 195 a 246 MPa y la absorción de energía de 79 a 88 MJ/m³. En las espumas convencionales, la resistencia aumentó de 16 a 25 MPa y la absorción de energía de 2.9 a 15.26 MJ/m³. Además, las curvas esfuerzo-deformación evidenciaron un comportamiento más dúctil en las espumas tratadas térmicamente.

En conjunto, las espumas sintácticas presentaron un desempeño mecánico superior respecto a las espumas convencionales, debido a la presencia de las esferas huecas de hierro, que actúan como elementos de refuerzo y mejoran la capacidad de carga del material.

Palabras clave: espuma metálica, infiltración, porosidad, propiedades mecánicas, metales.

Abstract

This work addresses the fabrication and characterization of syntactic and conventional metallic foams made with the Cu20Sn alloy using the infiltration method. Hollow iron (Fe) spheres were used for the syntactic foams and granular K_2SO_4 particles as a spacer for the conventional foams, both with a size of approximately 3 mm. The porosities obtained were 52% and 64%, respectively.

Solubilization heat treatments at 750°C, followed by quenching in water, were performed to modify the microstructure and improve mechanical properties. Characterization was carried out using microscopy, elemental analysis, X-ray diffraction, and mechanical compression tests. The results showed a transformation from the ϵ phase to the β phase, which contributed to an increase in mechanical strength.

In the syntactic foams, heat treatment increased the compressive strength from 195 to 246 MPa and the energy absorption from 79 to 88 MJ/m³. In the conventional foams, the strength increased from 16 to 25 MPa and the energy absorption from 2.9 to 15.26 MJ/m³. Furthermore, the stress-strain curves showed more ductile behavior in the heat-treated foams.

Overall, the syntactic foams exhibited superior mechanical performance compared to conventional foams due to the presence of hollow iron spheres, which act as reinforcing elements and improve the material's load-bearing capacity.

Índice	
Introducción.....	13
Objetivos	15
Hipótesis.....	16
Justificación.....	17
1. Marco teórico	19
1.1 Espumas convencionales.....	21
1.1.1 Estructura	21
1.1.2 Propiedades de las espumas metálicas	22
1.1.2.1 Propiedades mecánicas	23
1.1.2.1.1 Compresión	23
1.1.2.1.2 Módulo de Young	25
1.1.2.2 Propiedades eléctricas	27
1.1.2.3 Propiedades térmicas.....	28
1.1.2.4 Propiedades acústicas	28
1.1.3 Métodos de fabricación	29
1.1.3.1 Metalurgia de polvos	31
1.1.3.1.1 Metalurgia de polvos con generación de gases	31
1.1.3.1.2 Metalurgia de polvos utilizando espaciadores	32
1.1.3.2 Procesos que involucran fundición del metal base.....	33
1.1.3.2.1 Método de infiltración	33
1.1.4 Aplicaciones de las espumas metálicas convencionales.....	35
1.1.4.1 Aplicaciones estructurales.....	36
1.1.4.1.1 Industria automotriz	36
1.1.4.1.2 Industria aeroespacial	37
1.1.4.1.3 Industria ferroviaria y naval	38
1.1.4.2 Aplicaciones funcionales	39
1.1.4.2.1 Intercambiadores de calor	39
1.1.4.2.2 Silenciadores.....	40
1.2 Espumas sintácticas.....	41
1.2.1 Esferas huecas.....	42
1.2.2 Estructura de las espumas sintácticas	44

1.2.3 Métodos de fabricación	45
1.2.3.1 Colada por agitación.....	45
1.2.3.2 Infiltración	47
1.2.3.3 Pulvimetalurgia.....	48
1.2.4 Propiedades de las espumas sintácticas.....	49
1.2.4.1 Resistencia a la compresión.....	49
1.2.4.2 Mecanismo de deformación	51
1.2.4.3 Absorción de energía	52
1.2.5 Aplicaciones	53
1.2.5.1 Aplicaciones en la industria automotora	53
1.2.5.2 Aplicaciones de defensa.....	55
1.2.5.3 Aplicaciones de construcción	55
1.3 Espumas de cobre	56
1.4 Aleación CuSn.....	57
2. Desarrollo experimental	60
2.1 Suministro de materia prima.....	61
2.2 Fabricación de espumas de Cu ₂₀ Sn	63
2.2.1 Dispositivo de infiltración	63
2.2.2 Horno para fabricación de espumas.....	64
2.3 Espumas sintácticas.....	64
2.4 Espumas convencionales.....	66
2.5 Tratamientos térmicos	67
2.6 Caracterización	68
2.6.1 Preparación metalográfica.....	68
2.6.2 Microscopio óptico.....	68
2.6.3 Microscopio electrónico de barrido	68
2.6.4 Difracción de rayos x.....	69
2.6.5 Fluorescencia de rayos x.....	69
2.6.6 Caracterización mecánica	70
2.6.7 Densidad	70
3. Resultados y discusión.....	72
3.1 Aleación Cu ₂₀ Sn.....	72

3.1.1 Microscopía electrónica de barrido.....	72
3.1.2 Mapeo químico elemental	73
3.1.3 Fluorescencia de rayos x.....	74
3.1.4 Difracción de rayos x.....	74
3.2 Esferas huecas de Fe	75
3.3 Sulfato de potasio (K_2SO_4)	77
3.4 Espumas sintácticas.....	79
3.4.1 Caracterización microestructural	80
3.4.2 Análisis elemental	82
3.4.2.1 Espectro EDS.....	82
3.4.2.2 Mapeo elemental	83
3.4.2.3 Line Scan	84
3.4.2.4 Difracción de rayos x.....	85
3.4.3 Caracterización mecánica (compresión)	86
3.5 Espuma sintáctica con tratamiento térmico	89
3.5.1 Caracterización microestructural	89
3.5.2 Análisis elemental	91
3.5.2.1 Espectro EDS.....	91
3.5.2.2 Mapeo elemental	92
3.5.2.3 Line Scan	94
3.5.2.4 Difracción de rayos x.....	95
3.5.3 Caracterización mecánica (compresión)	96
3.6 Comparación entre las espumas sintácticas	98
3.6.1 Microestructura.....	98
3.6.2 Compresión	99
3.7 Espumas convencionales.....	101
3.7.1 Caracterización microestructural	102
3.7.2 Análisis elemental	104
3.7.2.1 Espectro EDS.....	104
3.7.2.2 Mapeo elemental	105
3.7.2.3 Line Scan	107
3.7.2.4 Difracción de rayos x.....	108

3.7.3 Caracterización mecánica (compresión)	109
3.8 Espumas convencionales con tratamiento térmico	111
3.8.1 Caracterización microestructural	112
3.8.2 Análisis elemental	114
3.8.2.1 Espectro EDS.....	114
3.8.2.2 Mapeo elemental.....	115
3.8.2.3 Line Scan	116
3.8.2.4 Difracción de rayos x.....	118
3.8.3 Caracterización mecánica (compresión)	119
3.9 Comparación entre las espumas convencionales	120
3.9.1 Microestructura.....	120
3.9.2 Compresión	121
3.10 Comparación entre espumas sintácticas y convencionales	123
Conclusiones.....	125
Recomendaciones.....	127
Referencias	128

Índice de figuras

Fig. 1 Diferentes tipos de estructuras de las espumas metálicas: a) celda abierta, b) celda cerrada y c) sintáctica.[2]	20
Fig. 2 Elementos estructurales de las espumas metálicas. 1) nodo, 2) espesor de pared 3) pared de celda, 4) tamaño de celda o poro [Elaboración propia].	22
Fig. 3 Curva esfuerzo deformación típica de una espuma elástico-plástica sometida a compresión [Elaboración propia].....	24
Fig. 4 Curva esfuerzo deformación típica de una espuma elástico-frágil sometida a compresión [Elaboración propia].....	25
Fig. 5 Métodos de producción de espumas metálicas.[5].....	30
Fig. 6 Fabricación de espumas metálicas por medio de metalurgia de polvos.[14]	32
Fig. 7 Proceso de fabricación de espumas metálicas por método de infiltración [Elaboración propia].	35
Fig. 8 Aplicaciones de las espumas metálicas dependiendo de su tipo de porosidad.[36].....	36
Fig. 9 a) Soporte de chasis Ferrari relleno de espuma metálica, b) caja de impacto para auto[37],[38].....	37
Fig. 10 Paneles sándwich basados en espumas metálicas.[40].....	38
Fig. 11 Estructura de panel sándwich de espuma para prototipo de tren de alta velocidad.[38]	39
Fig. 12 Intercambiadores de calor fabricados a) de cobre y b) de aluminio.[38]	40
Fig. 13 Diagrama de diferentes clases de materiales utilizados como matriz para espumas sintácticas.[44]	41
Fig. 14 Tipos de material de relleno para espumas sintácticas: a) esferas con alto grado de porosidad, b) esferas huecas.[46], [47]	43
Fig. 15 Fases principales de la estructura de una espuma sintáctica [51].	44
Fig. 16 Diagrama de métodos de síntesis de espumas sintácticas de matriz metálica [52].	45
Fig. 17 Técnica de fabricación de espumas sintácticas de matriz metálica por fundición agitada.[44]	46
Fig. 18 Método de fabricación de espumas sintácticas de matriz metálica por infiltración [52].	47
Fig. 19 Proceso de fabricación de espumas sintácticas de matriz metálica por metalurgia de polvos [48].	48
Fig. 20 Comparación entre curvas esfuerzo deformación de una espuma sintáctica y convencional de matriz de aluminio.[57].....	51
Fig. 21 Proceso de deformación por compresión de una espuma sintáctica de matriz metálica. [57]	52

Fig. 22 Región de absorción de energía en un diagrama esfuerzo deformación [Elaboración propia].	53
Fig. 23 Aplicaciones de las espumas sintácticas en partes de un automóvil [59].	54
Fig. 24 Turbina con partes fabricadas de espumas sintácticas.[40]	54
Fig. 25 paneles producidos por la empresa Cymat [63].	55
Fig. 26 Ladrillo ligero fabricado de espuma sintáctica [40]	56
Fig. 27 Diagrama de fases Cu-Sn[68].	58
Fig. 28 Metodología experimental del proyecto	60
Fig. 29 Esferas huecas de Fe.	62
Fig. 30 Sulfato de potasio granulado.	62
Fig. 31 Dispositivo de infiltración utilizado en la fabricación de espumas metálicas.	63
Fig. 32 Arreglo del dispositivo dentro del horno a) Modelo representativo, b) arreglo real	64
Fig. 33 Diagrama del ciclo de tratamiento térmico aplicado a las espumas metálicas.	67
Fig. 34 Micrografía de la aleación Cu ₂₀ Sn tomada mediante microscopio electrónico de barrido.	72
Fig. 35 Mapeo químico elemental de la aleación Cu ₂₀ Sn.	73
Fig. 36 Difractograma de la aleación Cu ₂₀ Sn en estado as cast.	75
Fig. 37 a) Vista macroscópica de las espumas huecas de Fe, b) corte transversal de las esferas huecas de Fe, c) histograma de frecuencias de la distribución de tamaño de las esferas, d) difractograma de las esferas huecas de Fe.	76
Fig. 38 a) vista macroscópica de los gránulos de sulfato de potasio, b) histograma de frecuencias del tamaño de los gránulos, c) difractograma de rayos x de las partículas de sulfato de potasio.	78
Fig. 39 Vista en isométrico y superior de las espumas sintácticas fabricadas con la aleación Cu ₂₀ Sn y esferas huecas de Fe.	80
Fig. 40 Micrografías de la espuma sintáctica a) baja, b) alta magnificación.	81
Fig. 41 Espectro EDS para la espuma sintáctica.	82
Fig. 42 Mapeo químico elemental de la espuma sintáctica.	83
Fig. 43 Line Scan obtenido por EDS de la espuma sintáctica en la región entre la pared de la esfera y la matriz.	85
Fig. 44 Difractograma de la espuma sintáctica.	86
Fig. 45 Grafica del comportamiento mecánico bajo compresión de las espumas sintácticas.	88
Fig. 46 Micrografías de la espuma sintáctica tratada térmicamente a) esferas rodeadas de la matriz CuSn, b) pared de la esfera y fases.	91
Fig. 47 Espectro EDS para la espuma sintáctica tratada térmicamente.	92
Fig. 48 Mapeo químico elemental de la espuma sintáctica tratada térmicamente.	93

Fig. 49 Line Scan obtenido por EDS de la espuma sintáctica sobre la pared de la esfera y la matriz de la espuma tratada térmicamente.	95
Fig. 50 Difractograma de la espuma sintáctica tratada térmicamente.	96
Fig. 51 Grafica del comportamiento mecánico bajo compresión de las espumas sintácticas tratadas térmicamente.	97
Fig. 52 Micrografías de las microestructuras de las espumas sintácticas, a) sin tratamiento, b) con tratamiento térmico.	99
Fig. 53 Curvas esfuerzo deformación para las espumas sintácticas con y sin tratamiento térmico.	100
Fig. 54 Espumas metálicas convencionales de celda abierta fabricas con la aleación Cu20Sn, a) con el espaciador en su interior, b) vista superior sin espaciador, c) vista isométrica sin espaciador.	102
Fig. 55 Micrografías de la espuma convencional de la aleación Cu20Sn mostrando, a) poros interconectados baja, b) microestructura de la matriz.	104
Fig. 56 Espectro EDS para la espuma convencional.	105
Fig. 57 Mapeo químico elemental de la espuma convencional.	106
Fig. 58 Line Scan obtenido por EDS de la espuma convencional sobre la matriz metálica.	108
Fig. 59 Difractograma para la espuma convencional fabricada con la aleación Cu20Sn y partículas espaciadoras de sulfato de potasio.	109
Fig. 60 Grafica del comportamiento mecánico bajo compresión de las espumas convencionales.	110
Fig. 61 Micrografías de la espuma convencional tratada térmicamente de la aleación Cu20Sn, mostrando a) el sistema poroso, b) la microestructura obtenida.	113
Fig. 62 Espectro EDS para la espuma convencional tratada térmicamente.	114
Fig. 63 Mapeo químico elemental de la espuma convencional tratada térmicamente.	116
Fig. 64 Line Scan obtenido por EDS de la espuma convencional tratada térmicamente sobre la matriz metálica.	117
Fig. 65 Difractograma para la espuma convencional tratada térmicamente fabricada con la aleación Cu20Sn y partículas espaciadoras de sulfato de potasio.	118
Fig. 66 Grafica del comportamiento mecánico bajo compresión de las espumas convencionales tratadas térmicamente.	119
Fig. 67 Micrografías de la comparación de microestructuras de las espumas convencionales, a) sin tratamiento, b) con tratamiento térmico.	121
Fig. 68 Curvas esfuerzo deformación para las espumas convencionales con y sin tratamiento térmico.	122
Fig. 69 Curvas esfuerzo deformación obtenidas en el presente proyecto.	124

Índice de tablas

Tabla 1 Propiedades mecánicas de espumas metálicas comerciales.[17].....	27
Tabla 2 Características de los materiales utilizados como reforzante o partícula espaciadora	78
Tabla 3 Características físicas de las espumas sintácticas.....	80
Tabla 4 Propiedades mecánicas de la espuma sintáctica.....	88
Tabla 5 Características físicas de las espumas sintácticas tratadas térmicamente.....	89
Tabla 6 Propiedades mecánicas de las espumas sintácticas tratadas térmicamente.....	98
Tabla 7 Características físicas de las espumas convencionales de la aleación Cu ₂₀ Sn.	102
Tabla 8 Propiedades mecánicas de las espumas convencionales de la aleación Cu ₂₀ Sn.	111
Tabla 9 Características físicas de las espumas convencionales tratadas térmicamente de la aleación Cu ₂₀ Sn.....	112
Tabla 10 Propiedades mecánicas de las espumas convencionales tratadas térmicamente de la aleación Cu ₂₀ Sn.....	120

Introducción

Las espumas metálicas son un nuevo tipo de material, con densidades bajas y propiedades físicas, mecánicas, eléctricas, térmicas y acústicas novedosas. Para referirse a este tipo de material se ha manejado el término espuma metálica, usado para cualquier material metálico que contiene poros generados deliberadamente en su estructura. Este tipo de materiales ofrece aplicaciones potenciales para estructuras ligeras, absorción de energía y disipación de energía térmica. Además, es destacable que algunas de ellas son económicas. Las espumas metálicas pueden ser producidas por una gran variedad de métodos, y conformadas de diversas maneras. Estos materiales ofrecen una interesante gama de propiedades, tales como una alta rigidez, baja densidad, aumento de absorción de energía al impacto, mayor tolerancia a altas temperaturas, además de que son reciclables y no tóxicas. Todo esto es debido a la combinación de propiedades de un material poroso y las propiedades intrínsecas de los metales. Actualmente, las espumas que son más comúnmente usadas y fabricadas son las de aluminio, titanio y níquel. No obstante, la lista de metales que se utilizan para la fabricación de estos materiales comprende el magnesio, plomo, zinc, cobre, bronce, acero e incluso oro.

Las espumas metálicas suelen clasificarse de acuerdo con el proceso empleado para su fabricación, y por su estructura celular. Tomando en cuenta esta última propiedad, se clasifican en tres tipos: espumas de celda abierta, siendo estas las que contienen poros interconectados; de celda cerrada, donde sus poros están aislados; y en espumas sintácticas, donde se utilizan partículas huecas como refuerzo. No obstante, una combinación entre los tipos de porosidades es posible. A pesar de todas las ventajas y aplicaciones favorables que presentan estos materiales, no han sido caracterizados suficiente ni apropiadamente, además de que algunos procesos de manufactura no se han podido estandarizar. Todo lo anterior ha generado que no exista uniformidad en sus propiedades, dificultando así su aplicación en algunos ámbitos.

Tomando en cuenta todos los retos que estos procesos requieren, y de acuerdo con la experiencia adquirida en experimentos realizados anteriormente en donde se ha llevado a cabo la obtención y caracterización de espumas metálicas, ha surgido la necesidad de emplear nuevos métodos de fabricación, con la finalidad de cumplir con los requerimientos que exigen estos nuevos materiales. Asimismo, también se busca ampliar la cantidad de aleaciones empleadas para fabricar estos materiales.

El presente proyecto comprende la fabricación de espumas metálicas de la aleación Cu₂₀Sn, utilizando la técnica de infiltración, mediante la cual se fabricaron espumas de celda abierta y espumas sintácticas. Se propuso producir espumas donde los espaciadores y las partículas de refuerzo fueran aproximadamente del mismo tamaño, con el objetivo de poder comparar los resultados obtenidos. De igual forma, a los 2 tipos de espumas se les aplicó un tratamiento térmico de solubilización, seguido de un temple, esto con el objetivo de mejorar las propiedades mecánicas, y así potencializar el uso de esta aleación en aplicaciones donde se requiera tener una disminución de densidad y aumento del área superficial de los poros.

Las espumas así obtenidas fueron caracterizadas mediante diferentes técnicas, como fueron su comportamiento a la compresión, densidad, tamaño y distribución de los poros, así como las fases formadas en el material sólido.

Objetivos

El objetivo del presente proyecto es producir espumas metálicas de la aleación Cu-Sn con distintos tipos de porosidad mediante el proceso de infiltración.

Objetivos específicos

1. Producir espumas mediante infiltración utilizando distintos espaciadores y/o reforzantes con una aleación Cu-Sn.
2. Caracterizar las espumas obtenidas mediante el proceso de infiltración.
3. Aplicar tratamientos térmicos a las espumas obtenidas por infiltración.
4. Analizar las espumas obtenidas mediante la combinación de estos procesos.
5. Comparar las propiedades de las espumas obtenidas, tanto antes como después de los tratamientos térmicos.

Hipótesis

Es posible obtener espumas metálicas Cu₂₀Sn mediante el proceso de infiltración, con la selección adecuada de partículas espaciadoras.

Es posible obtener espumas sintácticas con la aleación Cu₂₀Sn mediante el proceso de infiltración, obteniendo alta porosidad y propiedades mecánicas elevadas.

La aplicación de tratamientos térmicos a las espumas aumentará la resistencia a la compresión y absorción de energía.

Justificación

La investigación de nuevos materiales, incluidas las espumas metálicas, es un tema con importancia relevante en el proceso de aplicaciones de materiales metálicos en la ingeniería, ya sea para usos funcionales o estructurales.

Dentro de estos materiales, las espumas metálicas de cobre han despertado un gran interés en los últimos años por sus excelentes propiedades. Por un lado, exhiben un comportamiento propio de materiales celulares (buen aislamiento térmico y acústico, excelente absorción de impactos y vibraciones, propiedades escalables con la densidad, etc.) y por otro lado poseen ventajas propias del cobre como son una elevada resistencia a la corrosión, altas conductividades eléctrica y térmica, elevada ductilidad, y resistencia a altas temperaturas. Además, el cobre y sus aleaciones conforman uno de los mayores grupos de materiales metálicos disponibles actualmente en el mercado.

La importancia del conocimiento de las espumas de cobre radica en sus diversas aplicaciones en industrias como intercambiadores térmicos y eléctricos, y su uso en filtración, por lo cual es importante conocer diferentes formas de procesamiento. Relacionado con esto, en el presente trabajo se plantea un método novedoso para la fabricación de estas espumas, el cual consiste en fabricar espumas de cobre utilizando el método de infiltración con distintos espaciadores, incluyendo la doble función de generar porosidad y reforzar al material, esto para el caso de espumas sintéticas.

Capítulo I

1. Marco teórico

Los materiales ligeros presentan una fuerte demanda de aplicaciones, ya que cuentan con ventajas que pocos materiales ofrecen, que van desde aplicaciones en medios de transporte hasta biomédicas. Las espumas metálicas son producidas generando porosidad en un material metálico sólido. La morfología de la porosidad se puede controlar para adaptar las propiedades de las espumas, que van a depender del tamaño de la celda, su forma y el espesor de pared entre los poros [1].

Las espumas metálicas pueden ser categorizadas de diversas formas, dependiendo del tipo de celda, método de fabricación, reforzante, o porcentaje de porosidad. Una de las formas más fáciles de clasificarlas es en base a cómo están constituidas, si son de celda abierta o cerrada. También pueden clasificarse en espumas convencionales, que presentan poros, y las espumas sintácticas, en donde la porosidad es producida por partículas huecas en su interior, por lo que a la vez que generan porosidad refuerzan al material.

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, que se pueden observar en la Fig. 1 a, 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, utilizándose en aplicaciones funcionales que requieran flujos o intercambios a través del sistema poroso interconectado.
- b) Espumas metálicas de celdas (poros) cerradas, mostradas en la Fig. 1 b, caso en el cual la estructura no contiene poros de aire interconectados, ya que cada poro se encuentra encapsulado en la matriz metálica. Su

resistencia mecánica y tenacidad son mayores que para las espumas de celdas abiertas, razón por la cual sus aplicaciones están restringidas a estructuras, donde se requieran mayores propiedades mecánicas.

c) Espumas metálicas compuestas reforzadas con partículas huecas, conocidas también como espumas sintácticas, como se muestra en la Fig. 1 c. En este caso, los poros son incorporados en la matriz metálica mediante la adición de partículas huecas, generalmente microesferas. Con este tipo de espumas existe un mayor control sobre la cantidad y morfología de los poros encapsulados en la matriz metálica. También con ella se obtienen elevadas propiedades mecánicas.

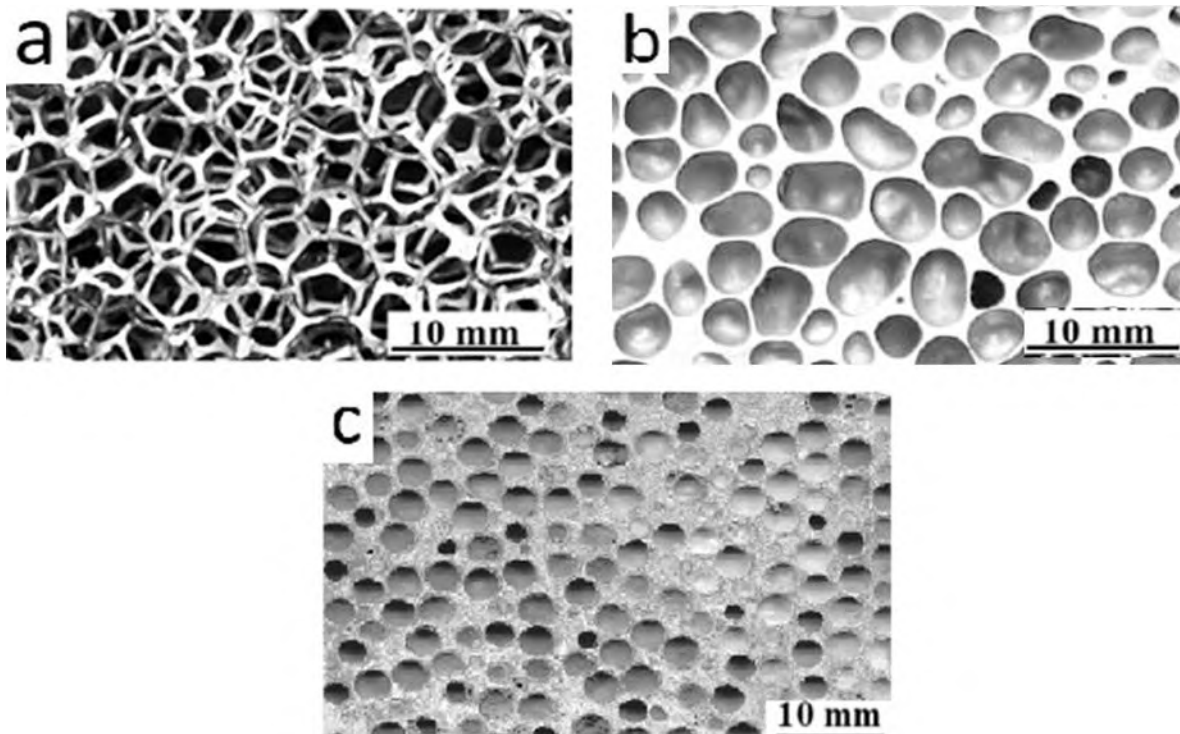


Fig. 1 Diferentes tipos de estructuras de las espumas metálicas: a) celda abierta, b) celda cerrada y c) sintáctica.[2]

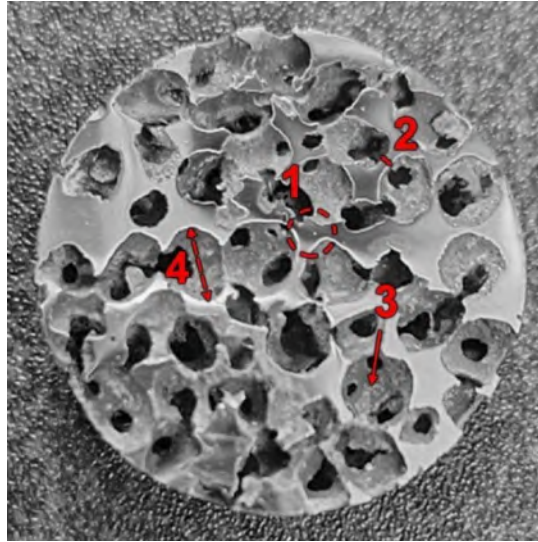
1.1 Espumas convencionales

1.1.1 Estructura

La estructura de una espuma metálica se caracteriza por contener huecos o poros bien distribuidos a lo largo de su estructura, con un rango de porcentaje de porosidad muy amplio, pudiendo ir de un 30 a un 90%, esto dependiendo de la ruta de procesamiento para manufacturarlas. Las espumas metálicas convencionales se caracterizan por tener una composición única y uniforme en toda su estructura, independientemente si se trata de un metal o aleación. [2], [3]

Una de las principales características de las espumas metálicas es la morfología que pueden tener los poros y si estos están conectados entre sí o no, como se puede ver en la Fig. 1 a (poros interconectados) y Fig. 1 b (poros aislados). La morfología y distribución de los poros en una espuma es de gran importancia, ya que de ella depende que las propiedades tengan un comportamiento isotrópico. Estos idealmente deben presentar una morfología geométrica definida, sin embargo, los poros pueden llegar a tener formas irregulares de acuerdo a los métodos y materiales que se usen para fabricar las espumas. [4]

Los elementos estructurales más importantes de las espumas convencionales se muestran en la Fig. 2. Estos son: 1) los nodos, que son los puntos de unión entre dos o más poros, 2) el espesor de pared, 3) la pared de la celda y 4) el tamaño de la celda o poro. Aunque realmente la fracción de volumen de poros es la característica más influyente en las propiedades de una espuma, estos cuatro elementos también presentan relevancia. [5]



*Fig. 2 Elementos estructurales de las espumas metálicas. 1) nodo, 2) espesor de pared
3) pared de celda, 4) tamaño de celda o poro [Elaboración propia].*

1.1.2 Propiedades de las espumas metálicas

Las características de las espumas metálicas dependen principalmente del material del cual están hechas, como pueden ser aluminio, níquel, magnesio, plomo, zinc, cobre, titanio o aleaciones de estos metales. Sus propiedades están determinadas principalmente por los factores listados a continuación:

- Densidad relativa de la espuma (ρ/ρ_s) donde ρ es la densidad de la espuma y ρ_s es la densidad del material del cual está fabricada.
- Estructura de la celda de la espuma, ya sea espuma de celda abierta o de celda cerrada.
- La anisotropía de la espuma. [5]

1.1.2.1 Propiedades mecánicas

1.1.2.1.1 Compresión

Las espumas metálicas convencionales presentan comportamientos mecánicos característicos influenciados por la complejidad de los poros, su estructura y volumen de porosidad. Generalmente, las propiedades de las espumas metálicas son analizadas de acuerdo con pruebas de compresión, ya que este tipo de carga es al que más está sometida una espuma en sus aplicaciones prácticas. La Fig. 3 muestra una curva característica esfuerzo-deformación de las espumas metálicas, obtenida bajo esfuerzo de compresión.[6] Las tres etapas que conforman la gráfica se describen a continuación:

- Región elástica: corresponde el inicio de la gráfica. En esta zona la estructura de celda abierta de la espuma responde de forma elásticamente lineal de acuerdo con el esfuerzo aplicado. Ocurre una ligera deformación sin que las celdas de la espuma lleguen a colapsar, manteniendo una proporción directa entre el esfuerzo y la deformación. Esta región está influenciada por la estructura de la celda y el material base de la espuma.
- Región de meseta: en esta zona, la espuma muestra un comportamiento relativamente constante en el esfuerzo, experimentando aumentos de deformación significativa debido al colapso de las celdas, cerrándose paulatinamente los poros. El colapso de las celdas ocurre de forma progresiva, mientras la espuma absorbe energía a través de la compresión de las celdas. Esta es la etapa más crucial en el diseño de materiales para aplicaciones relacionadas con la absorción de energía.
- Región de densificación: esta zona se caracteriza por el incremento drástico del esfuerzo en la espuma, debido a que la mayoría de las celdas han colapsado compactándose entre sí y la espuma actúa como un sólido compacto.[7]–[9]

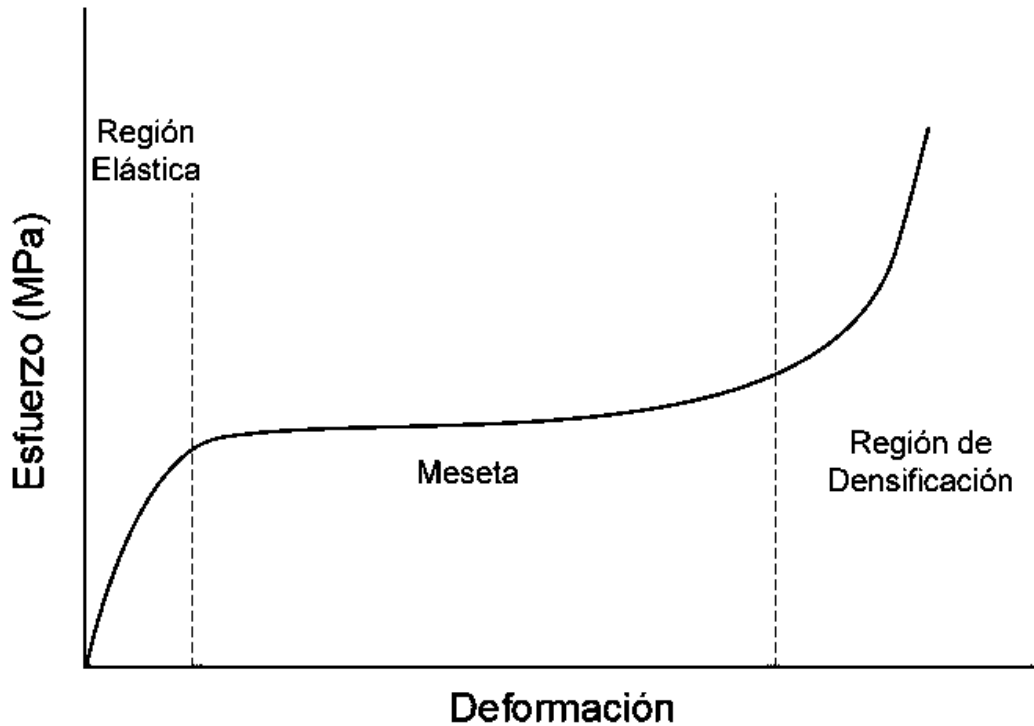


Fig. 3 Curva esfuerzo deformación típica de una espuma elástico-plástica sometida a compresión [Elaboración propia].

Además de un comportamiento elástico plástico como el descrito anteriormente, las espumas metálicas de celda abierta también pueden presentar un comportamiento elástico frágil, es decir, presentan una falla o ruptura abrupta después de alcanzar el esfuerzo de compresión. La grafica de la Fig. 4 muestra este tipo de comportamiento, donde además de una caída inicial en el esfuerzo, que ocurre una vez se llega al esfuerzo de máximo de compresión, muestran una región de meseta con un comportamiento irregular debido a la desintegración de las celdas, el cual se mantiene hasta la etapa de densificación[10]. Estas caídas van ocurriendo paulatinamente, mientras se van rompiendo grupos paredes celulares.

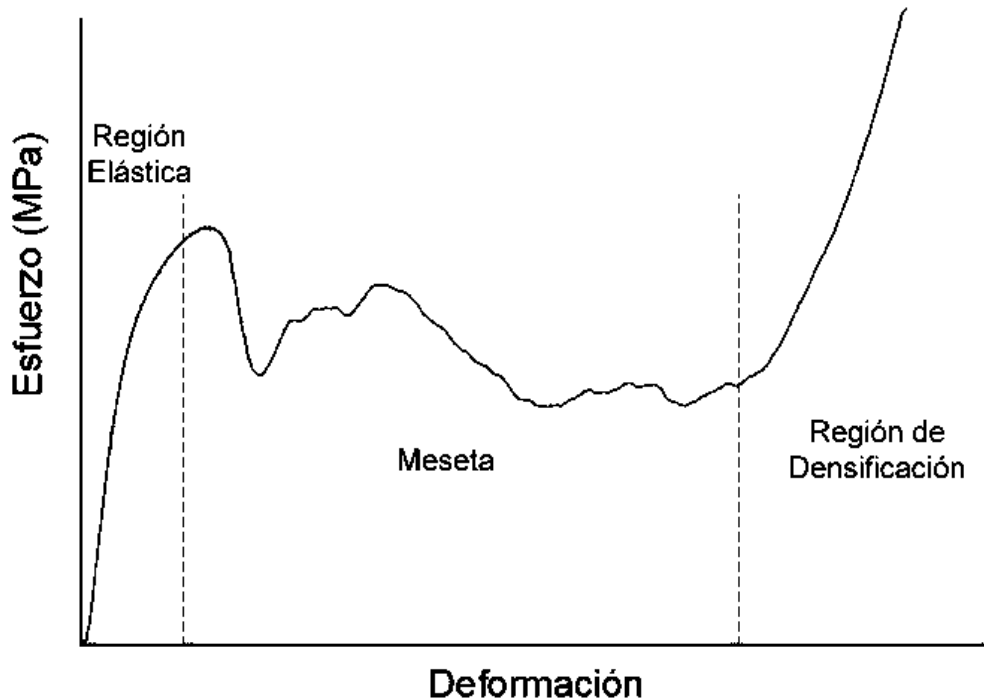


Fig. 4 Curva esfuerzo deformación típica de una espuma elástico-frágil sometida a compresión [Elaboración propia].

1.1.2.1.2 Módulo de Young

El módulo de Young, también llamado módulo de elasticidad (E), es una medida para evaluar la rigidez de un material. Cuanto mayor es el valor del módulo mayor será la capacidad de resistir esfuerzos sin experimentar deformaciones significativas.[11], [12] Esto hace que ésta sea una propiedad clave en las aplicaciones donde las espumas están sujetas a esfuerzos de tensión o deformación. En las espumas metálicas este valor está influenciado por el tipo de estructura de la espuma[13]. El valor del módulo de Young tiene una relación inversa con la porosidad, ya que a medida que aumenta la porosidad el módulo de Young disminuye.[14] Esto ocurre debido a que el área efectiva disminuye con el aumento de la cantidad de poros, concentrándose los esfuerzos.

El valor del módulo de elasticidad para las espumas de celda abierta se relaciona con la densidad relativa como se indica a continuación [15]:

$$E \approx (0.1 - 4)E_s(\rho/\rho_s)^n \quad \text{Ec. 1}$$

Donde E_s es el módulo de Young del material base, ρ/ρ_s , es la densidad relativa. Por otra parte, para las espumas de celda cerrada se determina por medio de la siguiente ecuación[15]:

$$E \approx (0.1 - 1)[E_s(\rho/\rho_s)^n + 0.3 (\rho/\rho_s)] \quad \text{Ec. 2}$$

Algunas investigaciones relacionadas con las espumas metálicas han recopilado información acerca de las propiedades mecánicas de algunos de estos materiales, mostrándose en la Tabla 1 algunos ejemplos[16]. Los nombres de estas espumas corresponden a procesos y espumas reportados en la literatura. Como puede apreciarse, las espumas Alulight destacan por tener el módulo de elasticidad más alto, lo cual la convierte en la espuma más adecuada para aplicaciones estructurales que requieren alta rigidez, igualmente es la espuma que presenta los valores de densidad más altos. Al contrario, las espumas ERG presentan los valores de módulos de elasticidad más bajos comparándolas con el resto, lo cual las hace más útiles en aplicaciones funcionales en lugar de estructurales. En la tabla también podemos apreciar un mayor control en el rango de densidad de las espumas producidas por el método Alporas, lo cual indica que por este método se puede tener mayor repetibilidad del producto final. Todas estas características dependen completamente del proceso de fabricación por el cual fueron manufacturadas y del material base del cual están fabricadas.

Tabla 1 Propiedades mecánicas de espumas metálicas comerciales.[17]

Propiedad	Cymat	Alulight	Alporas	ERG	Inco
Material	Al-SiC	Al	Al	Al	Ni
Densidad relativa ρ/ρ_s	0.02—0.2	0.1—0.35	0.08—0.1	0.05—0.1	0.03—0.04
Estructura	Celda cerrada	Celda cerrada	Celda cerrada	Celda cerrada	Celda cerrada
Densidad $\rho/\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$	0.07—0.56	0.3—1.0	0.2—0.25	0.16—0.25	0.26—0.37
Módulo de elasticidad E/GPa	0.02—2.0	1.7—12	0.4—1.0	0.06—0.3	0.4—1.0
Módulo de corte G/GPa	0.001—1.0	0.6—5.2	0.3—0.35	0.02—0.1	0.17—0.37
Módulo de flexión E_f/GPa	0.03—3.3	1.7—12.0	0.9—1.2	0.06—0.3	0.4—1.0
Coefficiente de Poisson ν	0.31—0.34	0.31—0.34	0.31—0.34	0.31—0.34	0.31—0.34
Esfuerzo de compresión σ_c/MPa	0.04—7.0	1.9—14.0	1.3—1.7	0.9—3.0	0.6—1.1
Límite elástico σ_y/MPa	0.04—7.0	2.0—20	1.6—1.8	0.9—2.7	0.6—1.1
Esfuerzo de tensión σ_t/MPa	0.05—8.5	2.2—30	1.6—1.9	1.9—3.5	1.0—2.4
Deformación de densificación ϵ_D	0.6—0.9	0.4—0.8	0.7—0.82	0.8—0.9	0.9—0.94
Dureza H/MPa	0.05—10	2.4—35	2.0—2.2	2.0—3.5	0.6—1.0

1.1.2.2 Propiedades eléctricas

Las espumas metálicas presentan propiedades eléctricas bastante interesantes, las cuales dependen de su estructura y composición. Estas tienen valores de conductividad eléctrica más bajas en comparación con el material sólido del cual están hechas debido a que el alto grado de porosidad disminuye la cantidad de material conductor en comparación con el volumen total. Además, la porosidad genera una dispersión en la trayectoria del flujo de electrones, por lo tanto, tiene una relación directa entre el valor de resistividad y porosidad. También la conductividad de las espumas metálicas depende del metal base (Cu, Al, Ti, etc.). Por sí solos los materiales base presentan altos niveles de conductividad, lo cual se ve reflejado en las propiedades de la espuma, pero disminuido por el grado de porosidad.[16]–[18]

Esta propiedad puede ser ajustada durante la fabricación de las espumas, controlando el tamaño de los poros, el grado de porosidad, la composición de la espuma y la aplicación de tratamientos térmicos, los cuales pueden mejorar la conductividad térmica al eliminar impurezas en las paredes.[13], [19], [20]

1.1.2.3 Propiedades térmicas

Las espumas metálicas retienen propiedades térmicas inherentes del metal base, como son el coeficiente de expansión térmica o el calor específico. Sin embargo, algunas otras propiedades cambian de acuerdo con las características estructurales de la espuma, las cuales puede modificar el mecanismo de transferencia de calor. El tipo de celda de la espuma puede facilitar o dificultar el flujo de calor a través de ella.[21], [22], [23].

Por ejemplo, la porosidad de la espuma tiene gran influencia en la conductividad térmica. En las espumas de celda cerrada el calor debe atravesar toda la red de celdas, lo cual complica conducir el calor en comparación con un material sólido. Por otra parte, las espumas de celda abierta permiten un transporte de calor más eficiente, ya que las celdas están interconectadas, favoreciendo que el aire o gas puedan fluir libremente, facilitando la conducción de calor por convección.[20]–[22], [24].

1.1.2.4 Propiedades acústicas

Las espumas metálicas, especialmente las de celda abierta, tienen como característica una buena amortiguación acústica y de vibraciones en un amplio rango de frecuencias. Esto es gracias a su estructura porosa. Cuando el sonido entra a la espuma se ve reflejado entre los poros, provocando vibraciones en sus superficies, disipando la energía acústica en otras formas de energía, como pudiera ser calor. Como resultado de esto, muy poca cantidad de sonido logra atravesarla.[20] El coeficiente de absorción de sonido depende de características estructurales de las espumas como la densidad, el tamaño de poro, el espesor del material y el grado de porosidad. Esta propiedad puede ser modificada de acuerdo con las características mencionadas anteriormente, por ejemplo, el ajuste del tamaño de poro puede optimizarse para absorber determinadas frecuencias [24].

Por el contrario, las espumas de celda cerrada presentan absorción de sonido menor, ya que al ser impermeables a los gases no permiten el movimiento de fluidos hacia el interior de la estructura, el cual es un requisito para atenuación acústica por fricción. Igualmente, las espumas con alto nivel de rigidez limitan la capacidad de la espuma de vibrar y absorber el sonido[26], [27].

1.1.3 Métodos de fabricación

Los procesos de manufactura de las espumas metálicas son diversos, algunos están inspirados en procesos utilizados para el espumado de polímeros, mientras que otros han sido diseñados específicamente para metales, aprovechando propiedades intrínsecas tales como su capacidad de sinterización o su facilidad en proceso de deposición electroquímica.[3], [14], [28] Los métodos más destacados en cuanto a calidad y uniformidad en características estructurales suelen ser capaces de producir únicamente un tipo de celda, sin embargo, presentan limitaciones tales como el control en el tamaño de poro o presencia residual en las paredes celulares, lo cual puede comprometer las propiedades mecánicas de la espuma. Estas limitaciones, aunadas al elevado costo de producción y los desafíos técnicos, restringen las aplicaciones de las espumas metálicas.[29] Por este motivo, gran parte de las investigaciones en el campo de las espumas metálicas está destinado a optimizar los procesos de fabricación, así como al desarrollo de nuevas técnicas para la manufactura de éstas, con el objetivo de obtener un mejor control de los parámetros estructurales y de composición química críticos, como la homogeneidad y la uniformidad, además de reducir los altos costos de producción y así poder ampliar los posibles usos de estos materiales[30].

Diversos autores han propuesto clasificaciones para los métodos de fabricación de espumas metálicas basándose en su criterio. Banhart divide estos métodos en 4 familias de procesos[14]:

- Procesos que emplean metales en estado líquido.
- Procesos basados en metales en forma de polvo.

- Métodos que utilizan metales en fase de vapor.
- Técnicas que parten de soluciones que contienen iones metálicos.

En la Fig. 5 se muestran estas cuatro familias y los métodos de producción que los componen.

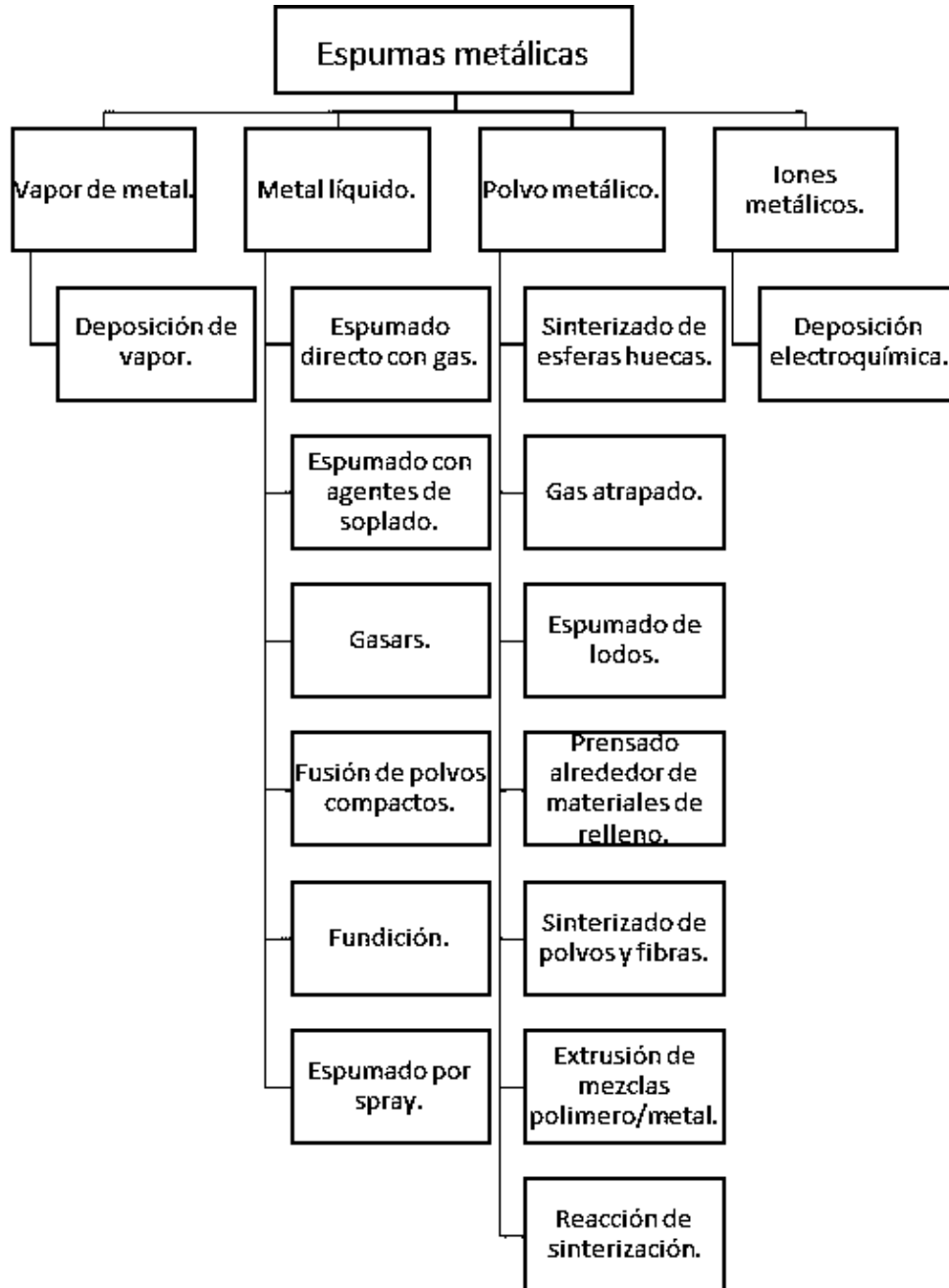


Fig. 5 Métodos de producción de espumas metálicas.[5]

Algunos de los métodos de fabricación más importantes y utilizados, que están relacionados con el presente trabajo, incluyen la generación de gases por reacciones a elevadas temperaturas, así como el uso de espaciadores. Las partículas espaciadoras se utilizan para fabricar espumas metálicas con el fin de crear y controlar la distribución de poros, su función es actuar como molde temporal del espacio que ocuparan los poros, estas partículas pueden ser de distintos materiales, como NaCl, polímeros, entre otros. Estas son eliminadas después por disolución o por combustión. El uso de espaciadores permite tener un control más preciso de porosidad, debido a que el tamaño de las partículas define el tamaño del poro, la cantidad define el volumen de porosidad, por lo cual se puede obtener una alta reproducibilidad del material obtenido. Para ambos casos se destacan los casos de los procesos de metalurgia de polvos e infiltración. Ambos se describen a continuación.

1.1.3.1 Metalurgia de polvos

La técnica de fabricación por procesos de metalurgia de polvos puede utilizarse generando poros por medio de la descomposición de sustancias tales como hidruros o carbonatos, o mediante el uso de espaciadores y un proceso subsiguiente de eliminación de éstos.

1.1.3.1.1 Metalurgia de polvos con generación de gases

El más utilizada consiste en generación de gas por medio de la descomposición de hidruros metálicos. El proceso comienza mezclando el polvo metálico con hidruro de metal en polvo, luego de lo cual se compacta la mezcla y se conforma utilizando generalmente métodos de laminado o extrusión. Posteriormente, la sección formada se calienta a temperaturas superiores de las de la descomposición del hidruro y cerca del punto de fusión de la aleación para así producir la espuma.[31], [32]. Con este método es posible obtener componentes con geometrías muy específicas mediante el calentamiento del precursor dentro de un molde hueco, lo cual puede permitir que la espuma se expanda hasta ocupar la forma completa del molde.

Además, se pueden manufacturar piezas con geometrías más complejas inyectando la espuma en moldes mientras aún se sigue expandiendo.[29]

Principalmente se fabrican espumas de aluminio utilizando hidruro de titanio como agente espumante, sin embargo, también se utilizan otras aleaciones a partir de estaño, zinc, cobre, plomo y latón, demostrando la versatilidad de este método. Esta técnica es utilizada por el Instituto Fraunhofer en Bremen, Alemania y por Mepura en Ranshofen, Austria (nombre comercial Alulight) [30]. En la Fig. 6 se describe gráficamente el proceso con algunas variantes presentes en este método.

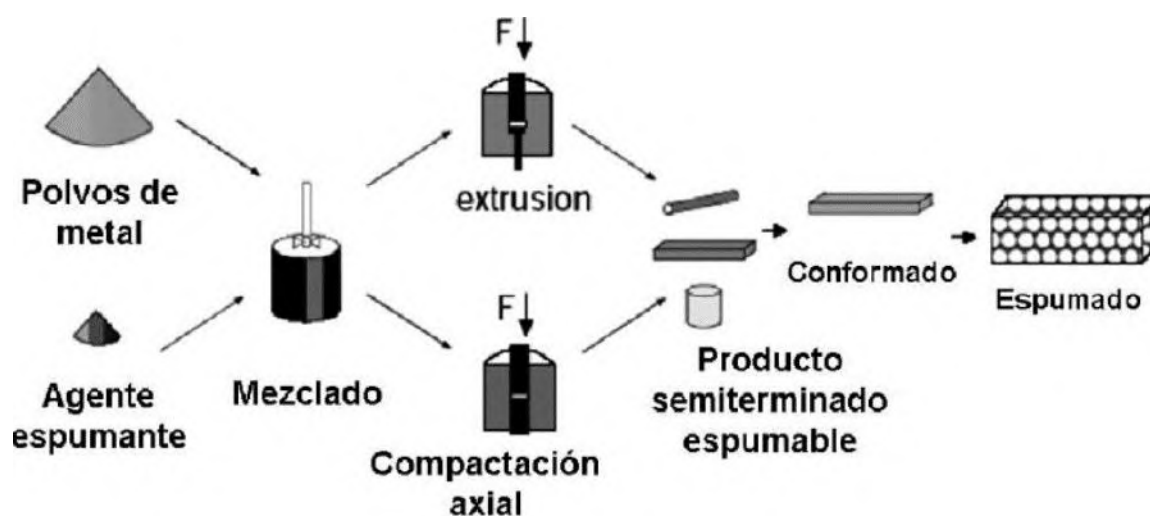


Fig. 6 Fabricación de espumas metálicas por medio de metalurgia de polvos.[14]

1.1.3.1.2 Metalurgia de polvos utilizando espaciadores

Este método es bastante similar al proceso mencionado anteriormente, en este proceso se emplea una mezcla inicial compuesta por polvos metálicos y las partículas espaciadoras, las cuales serán eliminadas posteriormente. Después de realizada la mezcla se somete a un proceso de compactación y sinterización, durante el cual los polvos metálicos se consolidan para formar la matriz de la espuma. Posteriormente los espaciadores son eliminados utilizando los solventes adecuados o mediante el uso de algún tratamiento térmico específico.[33]

En este método de fabricación los espaciadores no tienen que ser superiores a la temperatura de fusión de la aleación base, ya que las temperaturas de sinterización son considerablemente más bajas. Las principales partículas espaciadoras utilizadas en este proceso son: carbamida, cloruro de sodio, urea (que son solubles en agua), magnesio (soluble en ácido clorhídrico) y partículas de acero inoxidable (soluble en ácido acético).[4]

1.1.3.2 Procesos que involucran fundición del metal base

En esos procesos la formación de los poros ocurre cuando el metal o la aleación base se encuentran en estado líquido. Similar a los procesos de fabricación de espumas metálicas por medio de metalurgia de polvos se utilizan agentes espumantes como hidruros o carbonatos los cuales con el aumento de temperatura generan burbujas de gas las cuales se distribuyen en el metal líquido y quedan atrapadas cuando este solidifica. Otra variante de este método es la inyección de gases presurizados (aire, argón, nitrógeno, etc.), los cuales son depositados en el fondo de un baño metálico a través de una boquilla los cuales por diferencia de densidad viajan a la superficie para posteriormente solidificarse y obtener la espuma metálica. Sin embargo, una de las principales desventajas de este proceso es que es muy difícil de controlar la distribución de poros obteniendo materiales anisótropos. [34]

1.1.3.2.1 Método de infiltración

El método de infiltración está basado en el llenado de un molde con una partícula espaciadora, preferentemente de bajo costo y de fácil eliminación, la cual determina la formación de los poros en la espuma metálica. A diferencia del proceso de metalurgia de polvos que utiliza espaciadores, en este caso es más importante el control de la temperatura de fusión del espaciador, que debe ser mayor la temperatura de fusión del metal que infiltra. Los espaciadores pueden eliminarse

por diferentes métodos, entre los cuales destacan la disolución y la calcinación, además de la pulverización por ultrasonido y su posterior eliminación. Este espaciador puede o no ser sinterizado para mantener una preforma homogénea.

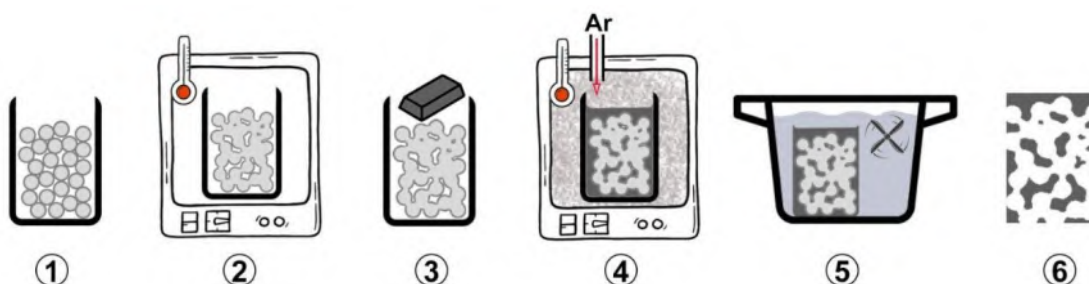
Los espaciadores más utilizados para obtener espumas, tanto por metalurgia de polvos como por infiltración, incluyen al NaCl, bromuro de potasio, vermiculita, esferas de vidrio espumado, arcilla cocida y expandida entre otros. En su forma más básica el proceso consiste en verter metal líquido sobre la preforma, permitiendo que la infiltración del metal entre los canales ocurra por gravedad. Posteriormente la estructura se deja enfriar en el interior del molde, tras lo cual se llevan a cabo procesos para eliminar o retirar las partículas espaciadoras. Como resultado se obtienen espumas con poros abiertos, en donde las características del poro son un reflejo del material espaciador utilizado.[29]

Una variación de este método consiste en la infiltración asistida por presión de un gas inerte, con el objetivo de forzar que el metal líquido infiltre entre los canales de los espaciadores. Esta variante permite la producción de espumas con tamaños de poro pequeños, de hasta 50 μm . Además, ofrece la posibilidad de incorporar espaciadores de distintos tamaños y morfologías durante la formación de la preforma, logrando espumas con tamaños de poros distribuidos y controlados o diferenciada por regiones. Este método garantiza una alta calidad en las espumas producidas, sin embargo, presenta desventajas como la lentitud del proceso, complejidad para escalarlo a nivel industrial y un número elevado de etapas involucradas[3], [29], [35], que se describen a continuación:

1. Moldeo de la preforma: Se vierte un espaciador con geometría específica y soluble dentro de un molde de forma definida.
2. Sinterizado de la preforma: El molde que contiene los espaciadores es puesto dentro del horno para sinterizarlos y así producir una preforma rígida soluble de partículas interconectadas.
3. Fundición del metal: Se coloca el metal sobre la preforma previamente sinterizada y se introduce nuevamente al horno para fundir el metal.

4. Infiltración del metal: El metal líquido es infiltrado en la preforma sinterizada para llenar los espacios vacíos en ella, puede usarse presión de gas para forzar la infiltración.
5. Eliminación de la preforma: Después de que el molde ha sido retirado del horno se extrae la espuma y ésta se introduce en el solvente ideal para disolver el espaciador.
6. Finalmente se obtiene una espuma metálica con poros interconectados.

Las etapas 2, 3 y 4 descritas anteriormente pueden llevarse a cabo en condiciones de vacío para evitar formación de contaminación. El proceso se describe en la Fig. 7.



*Fig. 7 Proceso de fabricación de espumas metálicas por método de infiltración
[Elaboración propia].*

En este proceso existen parámetros que afectan la estructura final de la espuma producida, los cuales pueden ser asociados a los materiales (morfología, composición, etc.) y/o a las condiciones de infiltración (tiempo, temperatura y atmósfera). Estos parámetros deben ser controlados adecuadamente para obtener las espumas con las cualidades precisas que el proceso ofrece.

1.1.4 Aplicaciones de las espumas metálicas convencionales

Las espumas metálicas convencionales presentan una excelente combinación de propiedades, que las convierten en materiales versátiles para aplicaciones en el campo de la ingeniería. Estas aplicaciones dependen del proceso de fabricación y

de su estructura (celda abierta o celda cerrada). Pueden clasificarse en aplicaciones funcionales y aplicaciones estructurales, como se puede ver en la Fig. 8. Las aplicaciones estructurales se centran en el uso de las espumas para soportar esfuerzos mecánicos o como parte de un sistema estructural, aprovechando sus propiedades como capacidad de absorber energía y su relación resistencia-peso. Por otra parte, las aplicaciones funcionales están relacionadas con las propiedades físicas y químicas que ofrecen las espumas metálicas. A continuación, se describen de manera breve algunas de las aplicaciones más comunes de las espumas metálicas.

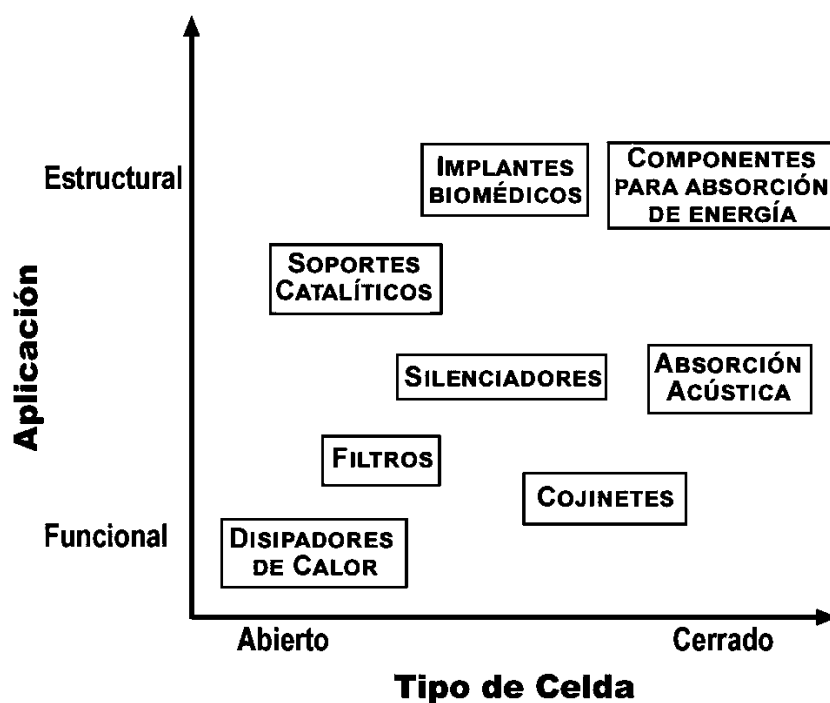


Fig. 8 Aplicaciones de las espumas metálicas dependiendo de su tipo de porosidad.[36]

1.1.4.1 Aplicaciones estructurales

1.1.4.1.1 Industria automotriz

En el pasado la exigencia de mayor seguridad en los vehículos orillaba a los fabricantes a poner un mayor peso en el vehículo, lo que comprometía la eficiencia

del combustible. Actualmente los coches pequeños tienen una mayor demanda para reducir los costos de viaje y las emisiones de gas de efecto invernadero sin comprometer la seguridad y comodidad de los pasajeros. Como resultado de estas exigencias se han desarrollado materiales como las espumas metálicas para reducir el peso y aumentar la seguridad de los tripulantes. Por ejemplo, en algunos automóviles se ha optado por reemplazar algunas de las partes tradicionales con estos nuevos materiales. En la Fig.9 a se puede observar el umbral de la puerta de un Ferrari F360, en donde el umbral se rellenó de espuma metálica para reforzar el marco y aumentar la rigidez, además de hacer el auto más ligero.[37] Otra aplicación automotriz puede verse en la Fig. 9b, donde se muestra una caja de impacto diseñada para absorber energía en caso de colisión.[38]

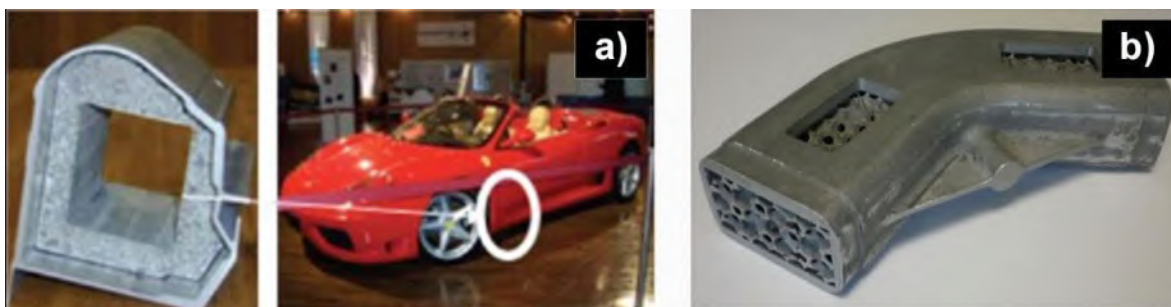


Fig. 9 a) Soporte de chasis Ferrari relleno de espuma metálica, b) caja de impacto para auto[37],[38]

1.1.4.1.2 Industria aeroespacial

En la industria aeroespacial, el objetivo fundamental es la selección de materiales que logren una reducción de peso significativa manteniendo una resistencia igual o superior a la de los materiales convencionales.[14] En este contexto las estructuras tipo panel de abeja que tradicionalmente han sido utilizadas debido a sus propiedades mecánicas han sido reemplazadas progresivamente por paneles de espuma metálica (Fig.10) y láminas de aluminio espumado, ya que estos materiales ofrecen un menor costo y un rendimiento mecánico superior. Una de las ventajas claves de estos materiales son sus propiedades isotrópicas que aseguran un comportamiento uniforme independientemente de la dirección en que se les aplique

una carga, además su diseño facilita la fabricación de estructuras compuestas evitando la necesidad de emplear adhesivos para su unión.[39]



Fig. 10 Paneles sándwich basados en espumas metálicas.[40]

1.1.4.1.3 Industria ferroviaria y naval

Los componentes livianos desempeñan un papel crucial en la construcción naval ya que contribuyen a la eficiencia y rendimiento de las embarcaciones. En particular los paneles tipo sándwich con núcleo de aluminio se emplean en la fabricación de modernas embarcaciones. En las aplicaciones navales el método de unión de los elementos estructurales resulta un factor determinante para su durabilidad y vida útil de la nave. Entre los componentes más comunes donde se utilizan espumas metálicas se encuentran los mamparos estructurales, los casilleros pirotécnicos, las plataformas de los elevadores, plataformas de antenas, entre otros[13].

Por otra parte, en la industria ferroviaria las espumas metálicas encuentran aplicaciones relevantes siguiendo los mismos principios establecidos en la industria automotriz, centrándose en 3 áreas principales: rigidez específica, absorción de energía frente a impactos y absorción de sonido, la Fig.11 muestra el fuselaje prototipo de un tren fabricado con panel sándwich de espuma metálica [38].



Fig. 11 Estructura de panel sándwich de espuma para prototipo de tren de alta velocidad.[38]

1.1.4.2 Aplicaciones funcionales

1.1.4.2.1 Intercambiadores de calor

Las espumas metálicas de aleaciones de Cu y Al son materiales ideales en la fabricación de componentes con conductividades térmica y eléctrica altas, especialmente cuando presentan una estructura de porosidad interconectada.[25], [40] Una aplicación destacada de las espumas metálicas es la refrigeración por transpiración, gracias a que presentan una elevada área superficial, excelente conductividad térmica y baja resistividad. Estas características las convierten en componentes atractivos para componentes de refrigeración e intercambiadores de calor. Además, las espumas de cobre y aluminio se utilizan como disipadores de calor en componentes electrónicos en aplicaciones que demandan alta disipación térmica, como la electrónica de potencia, las placas de circuitos y los chips de computadora. En la Fig.12 se observan disipadores de calor para componentes microelectrónicos [38].

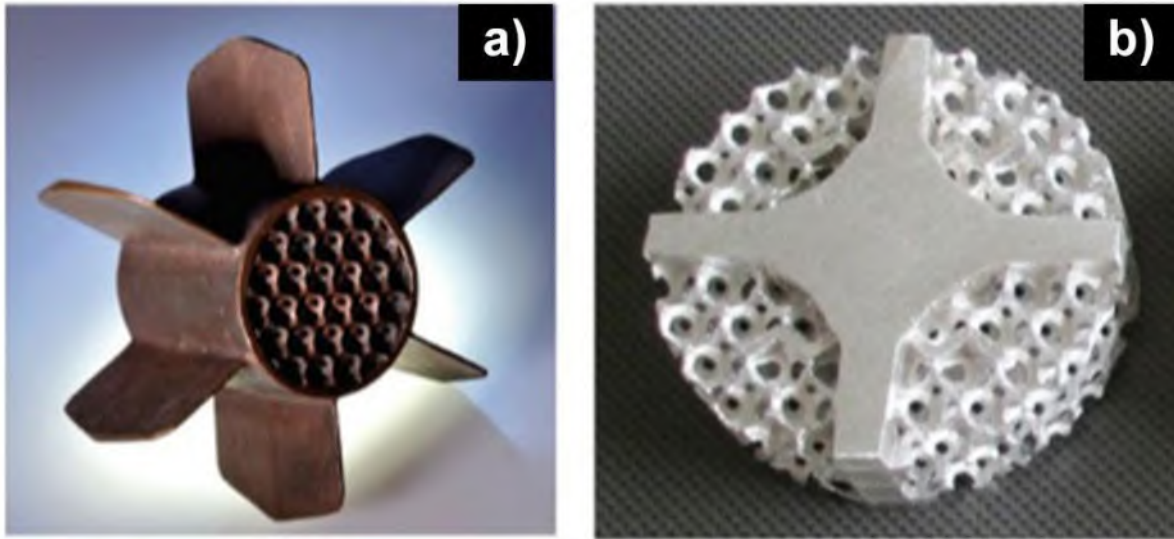


Fig. 12 Intercambiadores de calor fabricados a) de cobre y b) de aluminio.[38]

1.1.4.2.2 Silenciadores

Gracias a su porosidad las espumas metálicas pueden emplearse para amortiguar vibraciones, ruidos y variaciones de presión de fluidos. Las espumas metálicas pueden diseñarse y producirse para amortiguar ciertas frecuencias según las características requeridas, pueden absorber cambios repentinos de presión en compresores neumáticos e hidráulicos, además que tienen una relación costo beneficio muy buena.[25], [38].

1.2 Espumas sintácticas

En los últimos años, ha habido un interés creciente en el estudio de las espumas sintácticas debido a sus propiedades adaptables y aplicaciones en diversos tipos de industrias. Estas espumas son materiales compuestos que están constituidos por partículas huecas embebidas en una matriz metálica.[41], [42] Los estudios sobre este tema se centran en aspectos particulares tales como los tipos de matrices, los rellenos, que pueden ser esferas huecas o partículas porosas, los tipos de técnicas de producción, que incluyen metalurgia de polvos, infiltración, moldeado mecánico y deposición química; y las aplicaciones industriales, enmarcadas en las industrias aeroespacial, marina, edificación y construcción, automotriz, y eléctrica y electrónica.[1], [43] Además de las metálicas, existen diferentes tipos de matrices usadas para fabricar espumas sintácticas, que se muestran en la Fig. 13.[44][45]

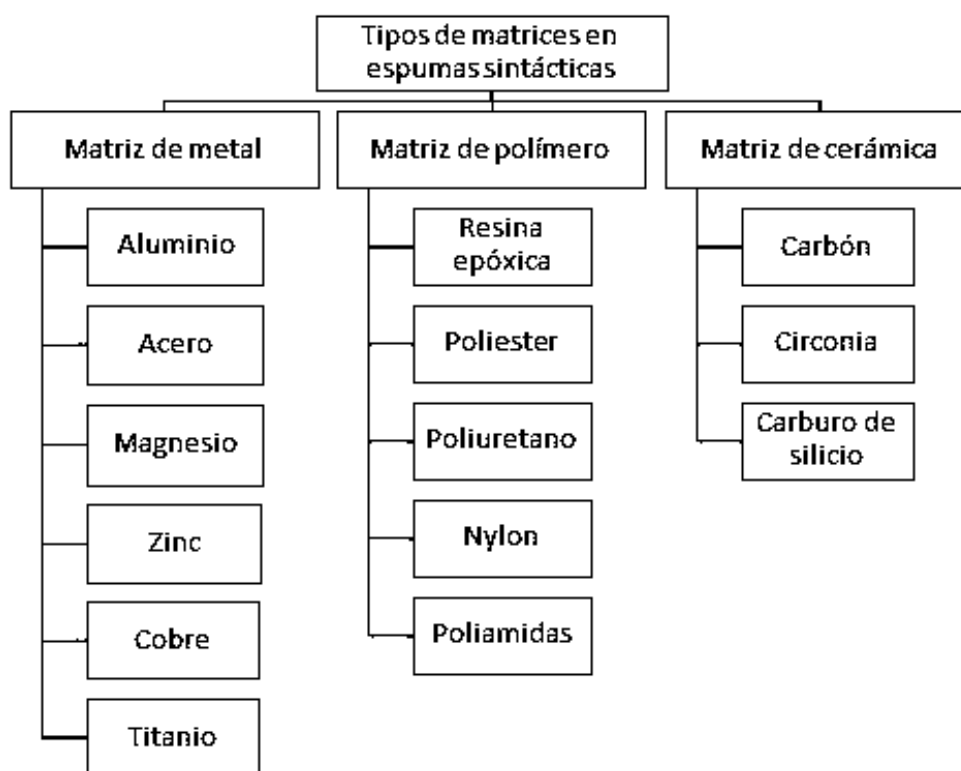


Fig. 13 Diagrama de diferentes clases de materiales utilizados como matriz para espumas sintácticas.[44]

Las espumas sintácticas de matriz metálica son altamente competitivas para diversas aplicaciones industriales. El interés en este tipo de espumas se ha incrementado significativamente debido a varias razones, entre ellas:

- 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 y microesferas).
- Permiten incrementar la resistencia de la matriz metálica mediante la incorporación de micro y nano partículas.[41], [44]

1.2.1 Esferas huecas

Diversos refuerzos de relleno hueco se han utilizado en el desarrollo de las espumas sintácticas, sobresaliendo las esferas porosas, que pueden ser de 2 tipos: esferas con alto grado de porosidad (Fig. 14 a), o esferas huecas, como se observa en la Fig. 14 b. Estas partículas huecas juegan un papel importante debido a su naturaleza ligera, absorción de energía, comportamiento de amortiguación y propiedades de aislamiento térmico. La selección correcta de estas partículas es de vital importancia para lograr fabricar espumas sintácticas de manera correcta y que puedan ser funcionales, dentro de los problemas más comunes debido a una mala selección de esfera hueca están los siguientes: la baja densidad de las esferas puede provocar que estas floten en el metal líquido, causando gradientes de densidad en la espuma producida, las partículas huecas pueden fracturarse durante el proceso de fabricación. Además, la temperatura de fusión de muchas esferas es menor que la de varios metales, lo que puede llevar a la difusión de la matriz hacia

las partículas o viceversa, también originando una baja mojabilidad entre la matriz y las esferas cerámicas.[1]

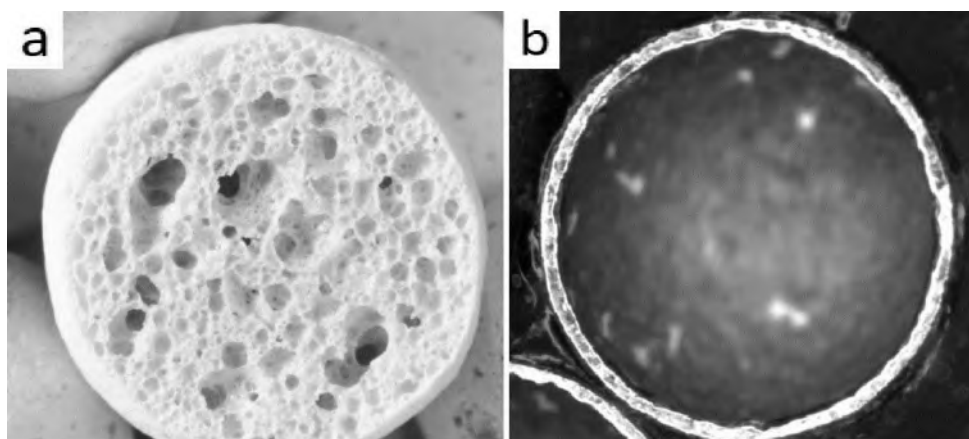


Fig. 14 Tipos de material de relleno para espumas sintácticas: a) esferas con alto grado de porosidad, b) esferas huecas.[46], [47]

De acuerdo con la búsqueda realizada en la literatura, las esferas huecas que más se utilizan para fabricar espumas sintácticas de acuerdo a la matriz son las siguientes:

- Aluminio: Cenoesferas, alúmina, partículas de arcilla, vidrio expandido, partículas de vidrio huecas.
- Magnesio: Cenoesfera de cenizas, cenoesferas, microesferas de vidrio huecas, microesferas de cenizas, microesferas huecas de vidrio.
- Titanio: Microesferas cerámicas, cenoesferas, Carbonato de hidrógeno y amonio, carbamida.
- Zinc: Esferas de ceniza volante, carburo de silicio, microesferas de vidrio, hidruro de circonio, alúmina, carbonato de calcio, perlita expandida.
- Hierro: Microesferas huecas de vidrio, estearato de zinc, esferas huecas de alúmina, alúmina.
- Cobre: Cenoesferas, sulfato de potasio, esferas huecas de hierro.[45], [48], [49]

1.2.2 Estructura de las espumas sintácticas

La estructura de las espumas sintácticas está formada por 3 fases principales, como se muestra en la Fig. 15. Estas son una matriz metálica que rodea al material reforzante, la parte sólida de la esfera, y su vacío interno o porosidad.[9] Comúnmente las esferas están ubicadas de manera aleatoria en la matriz y pueden o no estar unidas unas a otras mediante algún proceso de sinterizado previo, ya que en algunos procesos de fabricación se colocan rejillas que evitan que floten a la hora de infiltrarlas. Las esferas le confieren la porosidad a la espuma, pero también incrementan su resistencia. En la mayoría de los casos, en la periferia de las esferas existe una difusión de material de la esfera en la matriz, lo cual ocurre durante el proceso de fabricación. Dicha interfase es responsable de la transferencia de carga entre la matriz y la esfera, por lo cual es importante la selección correcta de materiales para propiciar una formación de interfase resistente. [50] Asimismo, la formación de productos interfaciales frágiles puede afectar la resistencia de la espuma, por lo que estas reacciones deben ser vigiladas con atención. También podría presentarse falta de mojado debido a la mala selección del par material de matriz-esfera.

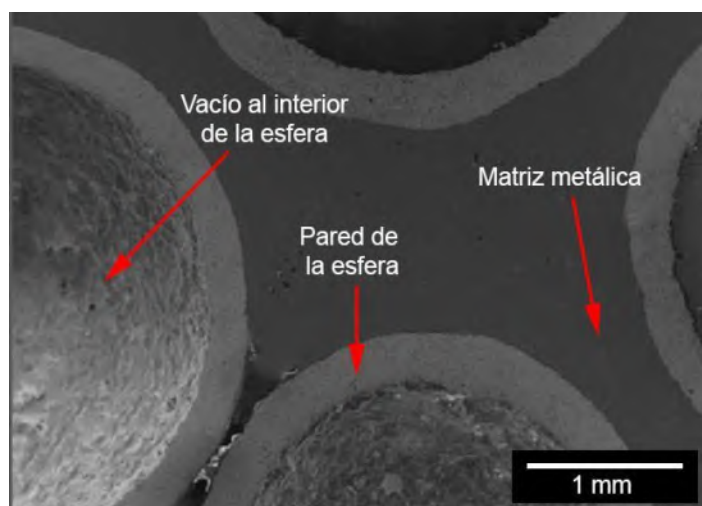


Fig. 15 Fases principales de la estructura de una espuma sintáctica [51].

1.2.3 Métodos de fabricación

Las espumas sintácticas de matriz metálica han sido desarrolladas usando varias técnicas de síntesis. Entre ellas, los métodos más utilizados son la colada por agitación, la colada por infiltración y la ruta de la Pulvimetalurgia, los cuales están representados en la Fig. 6 y serán descritos a continuación: [45]

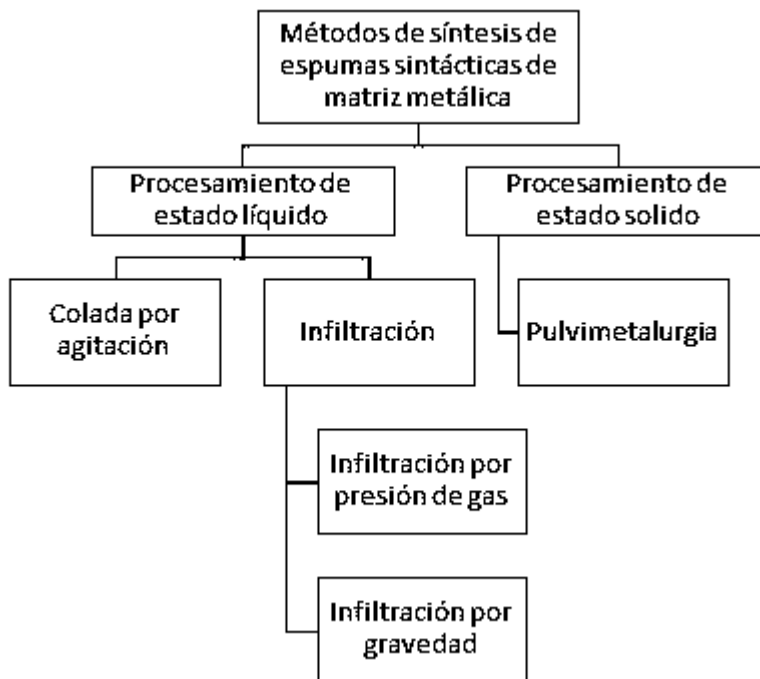


Fig. 16 Diagrama de métodos de síntesis de espumas sintácticas de matriz metálica [52].

1.2.3.1 Colada por agitación

La fundición con agitación es una de las técnicas más utilizadas para desarrollar espumas sintácticas de matriz metálica, ya que este proceso es relativamente barato de desarrollar, además de ser un proceso simple. Los metales más usados para fabricar espumas sintácticas por este método son aluminio, magnesio y zinc, mientras que los materiales necesarios para llevar a cabo este método incluyen a un crisol, horno de resistencia eléctrica, un agitador y por supuesto el metal de la matriz y las partículas huecas.

En la Fig. 17 se puede observar el diagrama explicativo de este método. El proceso comienza con llevar hasta la temperatura de fusión el metal utilizando el horno, simultáneamente las partículas huecas que han sido precalentadas anteriormente son añadidas manualmente en el metal fundido para mejorar el enlace entre la matriz y las partículas, además de evitar la aglomeración. Posteriormente se utiliza el agitador mecánico con el objetivo de lograr una dispersión uniforme de las partículas en el metal fundido. Comúnmente se utilizan aglutinantes como calcio o magnesio para mejorar la mojabilidad de la partícula de relleno hueca en esta técnica. Finalmente, el crisol es retirado del horno y enfriado de manera forzada con el objetivo de evitar la aglomeración debido a la diferencia de densidad entre la matriz y las partículas huecas.[53]

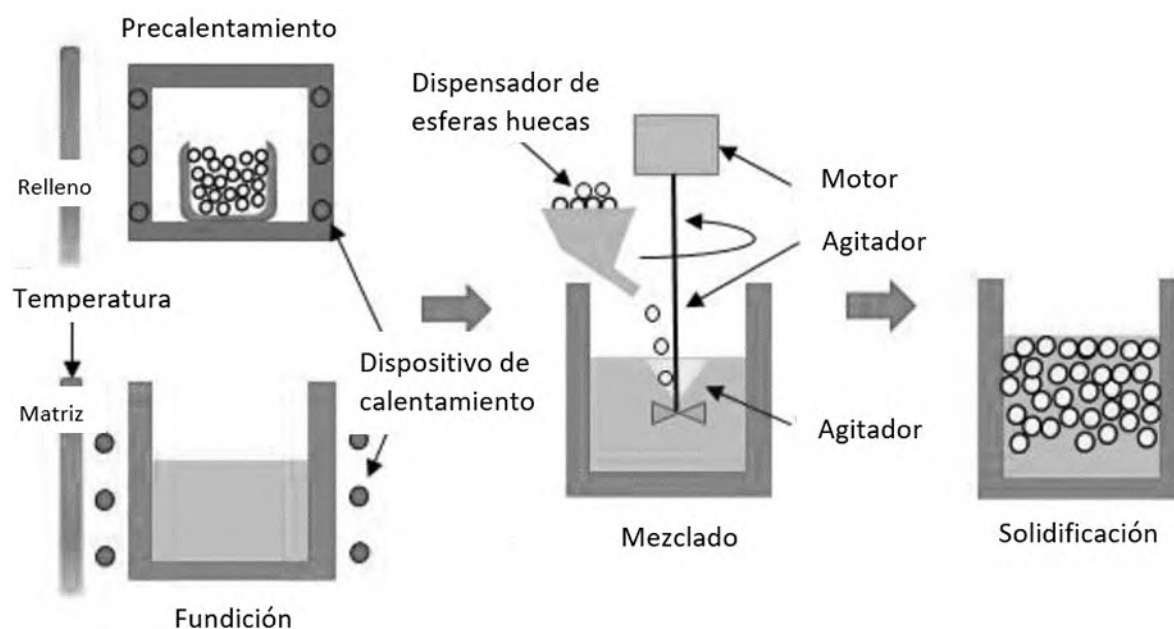


Fig. 17 Técnica de fabricación de espumas sintácticas de matriz metálica por fundición agitada.[44]

Las limitaciones que presenta este proceso son que al agregar una fracción volumétrica alta de esferas huecas se promueve la interacción entre las partículas provocando que estas se fracturen, por lo tanto, la forma de evitar esto es añadir fracciones de volumen de esferas más bajas, produciendo espumas con menor nivel de porosidad. Además de presentar el problema de la aglomeración de las esferas huecas en la parte superior de la espuma.[53]

1.2.3.2 Infiltración

El método de infiltración es una de las técnicas más potenciales para producir espumas sintácticas con una fracción de volumen de esferas huecas alta, lo que conlleva a espumas con una porosidad más alta. Sin embargo, presenta dificultades para fabricar espumas con una menor fracción de volumen de estas esferas.

El procedimiento se puede observar en la Fig. 18. En primer lugar, se dispone una preforma de partículas huecas de forma aleatoria en el fondo del molde, como segundo paso el metal líquido es forzado a pasar a través de la preforma, esto puede lograrse por gravedad o utilizando un gas para presurizar y forzar la infiltración. Una vez que se ha logrado una buena infiltración de metal líquido en la preforma, como tercer paso es el enfriado del molde, el cual puede ser un enfriamiento en condiciones de ambiente o una convección forzada. [54]

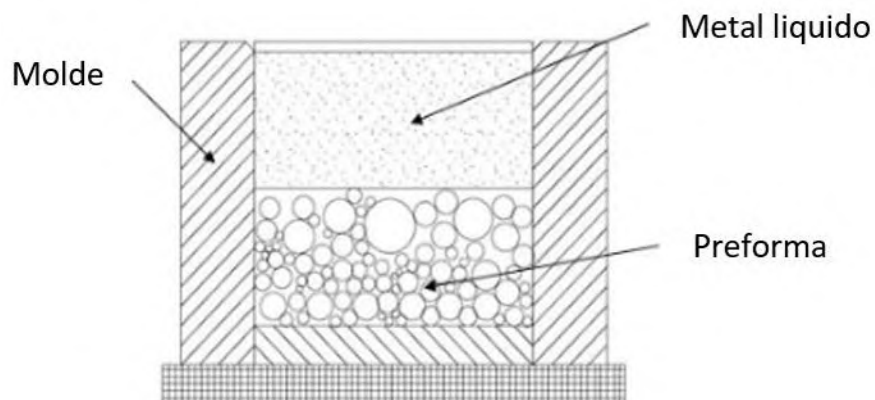


Fig. 18 Método de fabricación de espumas sintácticas de matriz metálica por infiltración [52].

Dentro de las desventajas de este método se encuentra el uso de la presión para asegurar la infiltración, ya que altas presiones tienden a deformar las partículas huecas, lo cual promueve la formación de celdas débiles induciendo a la fractura de la espuma. Otra desventaja es que las altas temperaturas pueden afectar la propiedad de mojabilidad entre las partículas y el metal fundido, debido a la posibilidad de formación de óxidos en la superficie. Además, en ocasiones no se puede asegurar una dispersión homogénea de partículas en la mezcla.

1.2.3.3 Pulvimetalurgia

La ruta de metalurgia de polvos tiene potencial para superar la problemática que puede surgir por los métodos de infiltración y colada por agitación. Dicho proceso es más versátil que los métodos de procesamiento de solidificación, ya que se puede incorporar en la espuma una gama más amplia de fracciones de volumen de partículas huecas sin problemas tales como la segregación. En el proceso fundamental de Pulvimetalurgia, como se observa en la Fig. 19, como primer paso la fase de relleno se deposita en el interior de un molde y se vibra para lograr el empaquetamiento deseado, a continuación, se añade el constituyente de la matriz en polvo hasta llenar por completo el espacio intersticial entre las partículas huecas. La mezcla puede volver a vibrarse con el objetivo de lograr el máximo contacto entre partículas. A continuación, se sella la muestra en condiciones de vacío o en una atmosfera inerte para posteriormente realizar el sinterizado. Por último, la muestra se enfría hasta temperatura ambiente para obtener el producto final. [49]

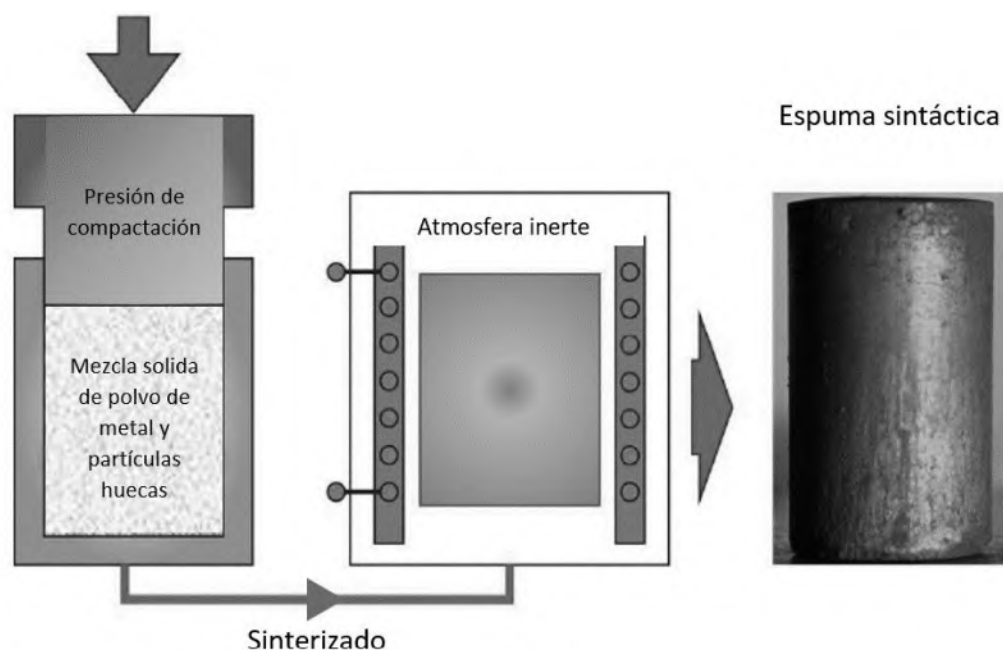


Fig. 19 Proceso de fabricación de espumas sintácticas de matriz metálica por metalurgia de polvos [48].

Como ventajas de este proceso está el de permitir emplear aleaciones metálicas de elevado punto de fusión como matriz, además de que se puede variar el rango de empaquetamiento sin tener problemas de aglomeración. Su desventaja principal es que durante el mezclado y compactación de la mezcla se pueden fracturar las partículas huecas.

1.2.4 Propiedades de las espumas sintácticas

Las espumas sintácticas de matriz metálica tienen mejores propiedades mecánicas que las espumas convencionales, sobre todo cuando el proceso de fabricación y las esferas utilizadas lo posibilitan, al generarse las condiciones óptimas. Entre las mejoras que se originan al utilizar esferas reforzantes huecas están una mayor resistencia a la compresión, elevada capacidad de amortiguamiento y mejores características de absorción de energía. Similar a las espumas convencionales, las propiedades mecánicas de las espumas sintácticas dependen del metal usado como matriz, la fracción volumétrica, tamaño y material de partículas huecas y su proceso de fabricación. La interface o productos de reacción también juegan un papel preponderante.

Dependiendo de la distribución de tamaños de partículas huecas utilizado se pueden obtener rangos de porosidades variados, en el caso de utilizar esferas huecas de tamaño uniforme se pueden obtener un máximo de 64-67 % de porosidad, según lo reportado para un empaquetamiento aleatorio. [55].

1.2.4.1 Resistencia a la compresión

Las espumas sintácticas de matriz metálica tienen un comportamiento de resistencia a la compresión similar a las espumas convencionales, con algunas variaciones, que estaremos analizando. La Fig. 20 muestra la curva esfuerzo-deformación representativa bajo compresión de una espuma de matriz de aluminio convencional (línea negra, porosidad 58%), comparándola con una espuma

sintáctica de aluminio con esferas huecas de Fe (línea roja, porosidad 56%). Como puede observarse la espuma sintáctica presenta un comportamiento mecánico claramente superior alcanzando valores de resistencia de compresión de 70 MPa comparando los 36 MPa de la espuma convencional, las regiones de meseta comprenden hasta una deformación de 50 y 65% para la espuma sintáctica y la espuma convencional respectivamente, para la espuma sintáctica se puede observar que en la región de meseta la curva no presenta muchas fluctuaciones, lo que indica que no hay un colapso de las celdas, en su lugar, las esferas sufren un comportamiento progresivo, lo cual nos sugiere que la espuma sintáctica de aluminio es un material diseñado para absorber energía de manera controlada, en comparación con la espuma convencional, presenta una región de meseta con mayores fluctuaciones, típica de materiales de celda abierta, o que conduce a fallos localizados y una menor estabilidad mecánica. La energía absorbida por cada espuma es de 8.31 ± 13.1 y 29.03 ± 6.52 MJ/m³ para la espuma convencional y sintáctica respectivamente.

Las espumas sintácticas de matriz metálica tienen ventajas en la absorción de energía debido a la tensión de meseta relativamente más alta y al régimen de meseta extenso. El primero depende principalmente de las resistencias de la matriz metálica y las esferas huecas, así como de la relación de volumen entre las dos. Este último se relaciona con la tensión de densificación que está determinada por la porosidad de la espuma sintáctica.[6]

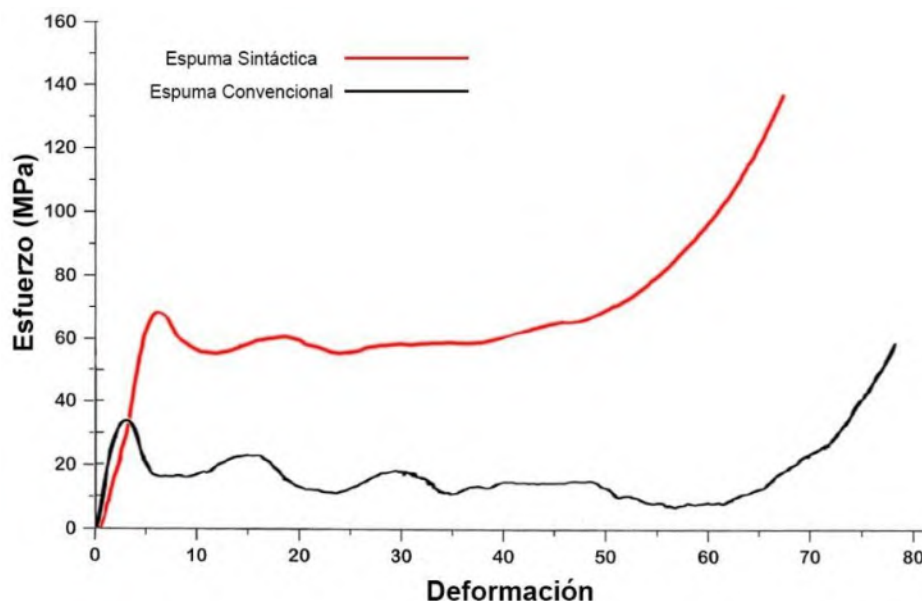


Fig. 20 Comparación entre curvas esfuerzo deformación de una espuma sintáctica y convencional de matriz de aluminio.[57]

De acuerdo a varios estudios en los que se compara la resistencia a la compresión de espumas sintácticas utilizando esferas huecas similares variando únicamente el metal de matriz base, se determinó que la resistencia máxima, la resistencia meseta y la tenacidad de las espumas sintácticas aumentan al aumentar el límite elástico del material de la matriz. De igual forma la selección de la partícula hueca produce cambios en la curva esfuerzo deformación, en caso de que dicha partícula sea de metal cambia el comportamiento de la espuma, ya que esta se vuelve un material más dúctil.[44], [50], [58]

1.2.4.2 Mecanismo de deformación

Existe alguna similitud en la deformación por compresión de las espumas metálicas con los materiales densos. Bajo compresión, la deformación comienza en las esquinas y continua en un ángulo aproximado de 45° hasta el centro de la muestra.[59] La Fig. 21 muestra un esquema del proceso de deformación por compresión de las espumas sintácticas de matriz metálica. Las regiones del centro y las esquinas de la espuma sintáctica sufren mayor compresión y esfuerzo cortante

durante el proceso de compresión. Esto conduce a una banda de corte de microesferas, colapsadas casi 45° con respecto a la dirección de carga, después de que se alcanza la tensión máxima en la curva de tensión-deformación. En una mayor compresión, la muestra adquiere forma de tambor debido a la ductilidad de la matriz metálica. Las microesferas adyacentes a la banda de corte se aplastan gradualmente, lo que da lugar a que surjan grietas de corte en las esquinas y en las partes centrales. No se produce deformación significativa en la región cercana a los extremos superior e inferior del espécimen debido al efecto de restricción de las platinas del dispositivo de compresión. En la etapa de densificación, la mayoría de las microesferas se trituran y la muestra se compacta.[60]

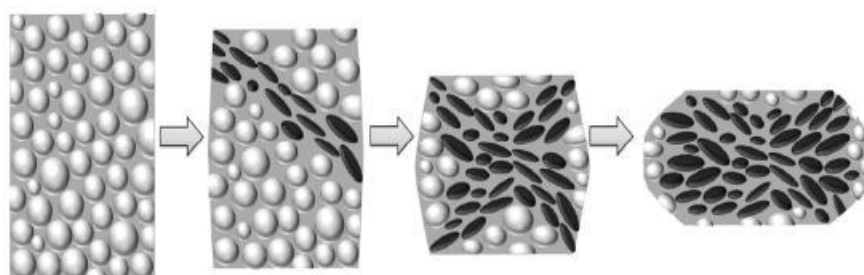
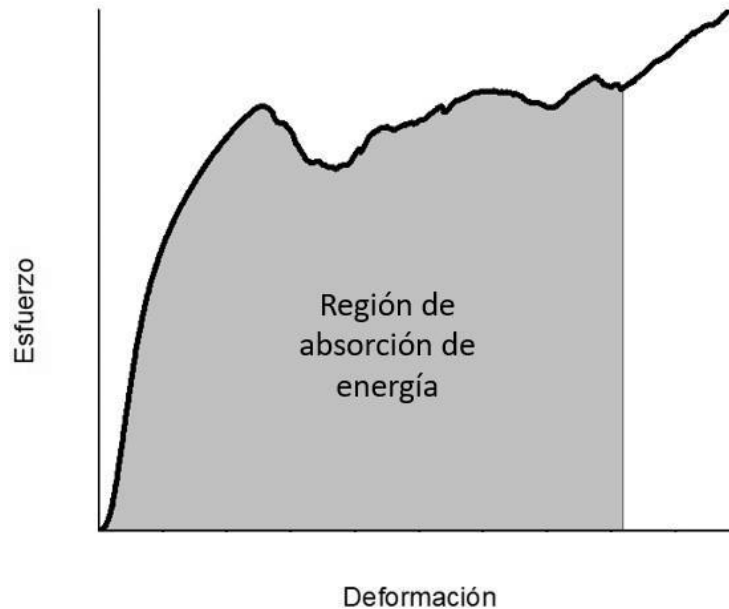


Fig. 21 Proceso de deformación por compresión de una espuma sintáctica de matriz metálica. [57]

1.2.4.3 Absorción de energía

La tenacidad de la espuma es la capacidad de absorción de energía obtenida a partir del trabajo de absorción realizado durante el ensayo de compresión al que es sometida. Las espumas sintácticas de matriz metálica combinan las propiedades características de un metal tales como una elevada resistencia mecánica, conductividad eléctrica y térmica y las ventajas estructurales de una espuma como baja densidad y alta tenacidad.[54] Las características antes mencionadas se traducen en una elevada capacidad de absorción de energía y una alta resistencia a la compresión, las cuales son propiedades deseables tanto para aplicaciones industriales, así como para aplicaciones biomédicas y electrónicas.[22]

En la Fig. 22 se muestra la región de absorción de energía comprendida dentro de un diagrama esfuerzo deformación, la cual comprende desde el inicio de la curva hasta el inicio de la zona de densificación.



*Fig. 22 Región de absorción de energía en un diagrama esfuerzo deformación
[Elaboración propia].*

1.2.5 Aplicaciones

Las espumas sintéticas de matriz metálica no son tan familiares como las espumas convencionales, pero tienen un gran potencial para reemplazarlas en varias aplicaciones industriales. Las primeras industrias en comenzar a utilizar las espumas sintéticas de matriz metálica son la industria marina, automotriz, aeroespacial y militar.[41], [47], [61]

1.2.5.1 Aplicaciones en la industria automotora

Las espumas sintéticas de matriz metálica tienen aplicaciones muy prometedoras en la industria del transporte. Los numerosos componentes, como los pilares A, B,

C en la estructura de la carrocería del automóvil (ver Fig. 23), la caja de choque, los marcos, el silenciador, la protección inferior, las salpicaderas, los componentes interiores de primera calidad, vehículos de clase, etc., son las aplicaciones más familiares que utilizan espumas sintácticas a base de metal.[62]

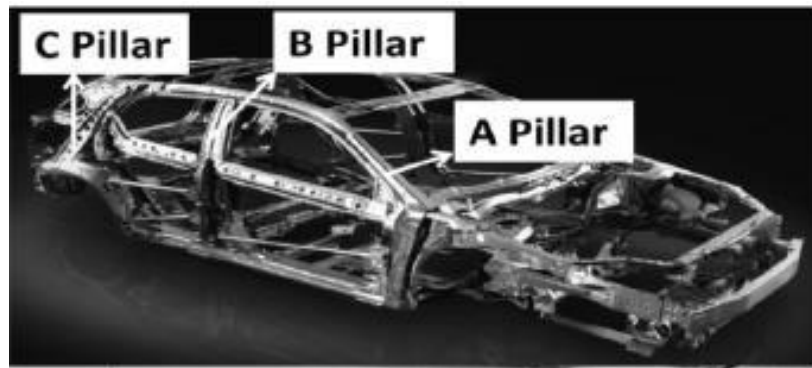


Fig. 23 Aplicaciones de las espumas sintácticas en partes de un automóvil [59].

La industria aeroespacial también utiliza varios componentes fabricados por espumas sintácticas como lo son la estructura de panal y lamina aerodinámica de un motor de turbina de gas Fig. 24, la cual está fabricada de espuma sintáctica a base de magnesio.[41]



Fig. 24 Turbina con partes fabricadas de espumas sintácticas.[40]

1.2.5.2 Aplicaciones de defensa

Las espumas sintácticas de matriz metálica tienen un potencial muy alto en aplicaciones de ares de defensa, como son en vehículos militares, protección contra armas de fuego y balística.[43]

Para cubrir estos requerimientos, la industria de defensa militar se ha interesado en el desarrollo de nuevas clases de espumas sintácticas basadas en metales que tengan la característica de una alta adsorción de energía de impacto y peso ligero. Diversos diseños de paneles sándwich se muestra en la Fig. 25. Los desarrollos de espumas sintácticas en las aplicaciones de defensa son altamente confidenciales y tienen información al público limitada, pero se tienen informes acerca del correcto funcionamiento de estos paneles al detener municiones calibre 50. Lo cual es una gran evidencia que las espumas sintácticas de matriz metálica tienen un enorme potencial en aplicaciones relacionadas con la defensa.[22]



Fig. 25 paneles producidos por la empresa Cymat [63].

1.2.5.3 Aplicaciones de construcción

Los avances en el área de espumas metálicas han permitido las aplicaciones de estas en el campo de la construcción, debido a su bajo peso, capacidad de soportar esfuerzos y su capacidad de reciclaje. Las aplicaciones de estos materiales son comúnmente en fachadas, muros interiores y cielos. Las espumas sintácticas con esferas huecas como refuerzo ofrecen un excelente remplazo a las espumas convencionales debido a su peso ligero y mayor resistencia a esfuerzos.[41]



Fig. 26 Ladrillo ligero fabricado de espuma sintáctica [40]

1.3 Espumas de cobre

Las espumas de cobre son un nuevo tipo de material multifuncional con una gran cantidad de poros, los cuales pueden ser interconectados o no, distribuidos en la matriz. Este tipo de espumas tienen buena conductividad y ductilidad, además comparado con las espumas de níquel es menos costoso fabricarlas además de tener mejor conductividad. [64] Algunos de sus usos son: [21], [31], [65], [66].

Catalizador: el cobre espumado se utiliza en muchas reacciones químicas debido a que tiene una gran área superficial, en reemplazo a las placas de cobre perforado.

Material de electrodo: la excelente conductividad eléctrica hace que el cobre espumado sea utilizado como electrodo en las baterías nuevas, donde algunos fabricantes las utilizan en reemplazo del níquel-zinc. Además, tiene potencial como colector de electrodos para condensadores eléctricos de doble capa.

Material de silenciamiento y protector: debido a la superficie de la espuma de cobre las ondas acústicas sufren un efecto de atenuación. Igualmente funciona como un material de blindaje electromagnético con un excelente rendimiento.

Material termoconductor: las espumas de cobre tienen una excelente conductividad térmica por lo que es un material ignífugo con muy buen rendimiento, por lo que se

ha utilizado como equipo de aislamiento de llamas. Igualmente debido a su buena propiedad de conductividad térmica las espumas de cobre se utilizan como material de disipación de calor para motores y electrodomésticos.

Material de filtro: las espumas de cobre tienen buenas propiedades estructurales adema de ser un material inofensivo para el cuerpo humano y sus propiedades antisépticas se han utilizado en la aplicación de purificación de agua y filtros médicos.

Material tampón de presión de fluido: las espumas de cobre tienen un efecto de dispersión y amortiguación en el fluido, lo que lo convierte en un material de protección para instrumentos de presión.[21], [31], [65], [66].

Por su parte las espumas sintácticas de cobre se encuentran en etapa de desarrollo, siendo utilizadas y desarrolladas principalmente para investigaciones de seguridad por parte de militares, debido a esto mucha de la información existente es confidencial.

1.4 Aleación CuSn

El cobre y sus aleaciones representan uno de los grupos más importantes y disponibles en el mercado actual, junto con los aceros y las aleaciones de aluminio. El bronce destaca como una aleación de cobre con estaño, en donde las concentraciones de estaño varían entre un 3 y un 20%. La adición de estaño al cobre mejora sus propiedades mecánicas significativamente aportando mayor dureza y baja dilatación térmica. Históricamente, el bronce fue la primera aleación de importancia para la humanidad alcanzando tanta relevancia que una de las edades del hombre se conoce como Edad de Bronce.[67]

El bronce presenta ventajas frente al cobre, como una mayor resistencia a la corrosión, una mayor dureza y una mejor maquinabilidad, asimismo destaca por su notable resistencia al desgaste y a la acción de ácidos no oxidantes. Estas propiedades lo convierten en un material ampliamente utilizado en diversos campos

industriales como al naval, ferroviaria, automotriz, de mecanizado, eólica, minera, así como en la creación de elementos decorativos.

El cobre tiene una estructura FCC, mientras que el estaño tiene una estructura tetragonal simple, al mezclarse los dos metales, las partículas de estaño se difunden en el cobre formando el bronce. Por lo cual las partículas de estaño se pueden colocar de dos distintas formas:

- Sustituyendo a los átomos de cobre en la red FCC (sustitucional).
- Se combinan con el cobre y forman regiones localizadas (fases) donde la estructura cristalina es de una forma que difiere de la de cristal de cobre FCC.[68]–[71]

La Fig. 27 muestra que el sistema se define por la ocurrencia de múltiples reacciones peritéticas, las cuales dan lugar a la formación de diversas fases intermetálicas ordenadas [68].

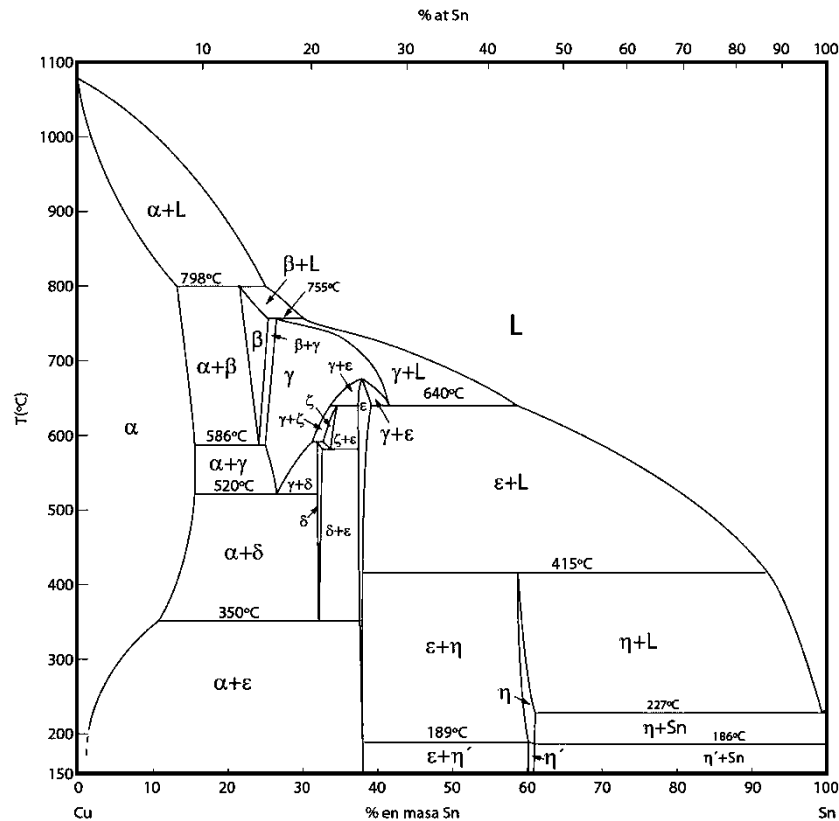


Fig. 27 Diagrama de fases Cu-Sn[68].

Capítulo II

2. Desarrollo experimental

La metodología que se llevó a cabo para el trabajo se muestra a continuación:

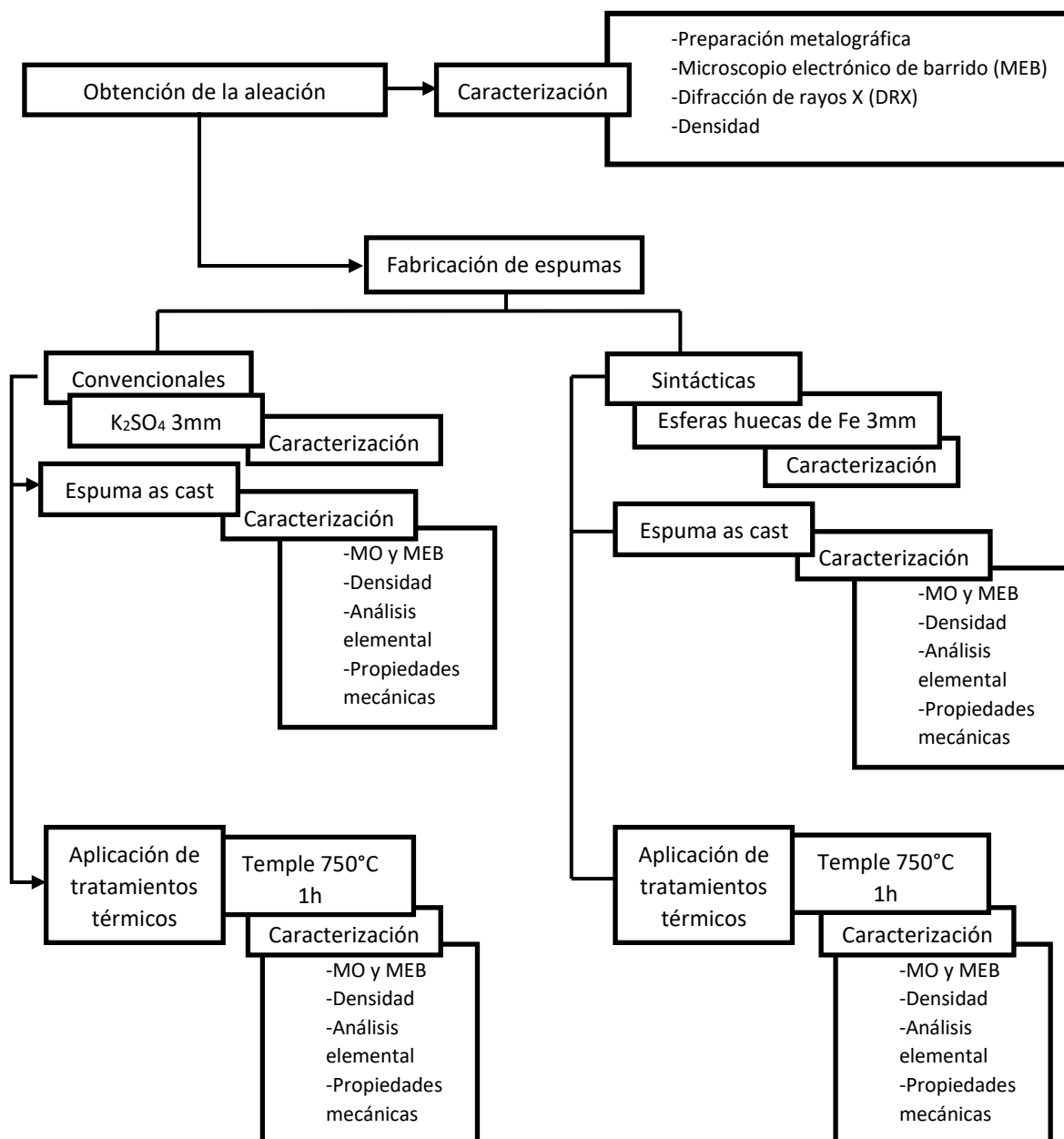


Fig. 28 Metodología experimental del proyecto

2.1 Suministro de materia prima

Nos vamos a referir como materia prima, al material utilizado en este proyecto para fabricar las espumas metálicas, estos serán: una aleación Cu₂₀Sn, esferas huecas de Fe, y partículas granuladas de sulfato de potasio (K₂SO₄).

La aleación Cu₂₀Sn (% en peso) fue fabricada utilizando un horno de inducción Leybold-Heraeus tipo IS1/EM, utilizando un crisol de grafito y una atmósfera controlada de gas argón. Los metales utilizados para fabricar la aleación fueron cobre electrolítico en barra con un 99.9% de pureza y estaño electrolítico en lingote con un 99.9%, adquiridos por la comercializadora Metales la Paloma. La selección de esta aleación se realizó tomando en cuenta el diagrama de fases Cu-Sn (véase Fig. 27), debido a que en la composición seleccionada (Cu₂₀Sn) encontramos diferentes fases que podrían ayudarnos a modificar las propiedades de las espumas resultantes. Para este porcentaje de Sn las fases presentes, dependiendo de la temperatura son: α -Cu, la cual es una fase dúctil, de buena resistencia y resistente a la corrosión además que incrementa la dureza del material, la fase δ (Cu₄₁Sn₁₁) es más frágil y contribuye a tener una ductilidad más baja [72], la fase β (Cu₁₇Sn₃) es dúctil a altas temperaturas, la fase γ (Cu₃Sn) es una fase más frágil que la fase β y la fase ϵ (Cu₃Sn) que es una fase frágil y dura [73].

Por otra parte, las esferas huecas de hierro, utilizadas para fabricar las espumas sintácticas, fueron adquiridas por la empresa Hollomet GmbH, ubicada en Alemania. Las esferas son producidas por métodos de metalurgia de polvos, tienen una dimensión de 3 mm de diámetro aproximadamente y cuentan con un alto grado de pureza de Fe. Pueden observarse en la Fig. 30.

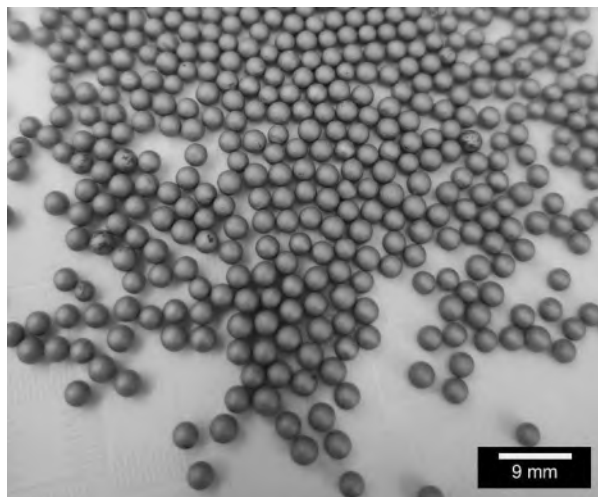


Fig. 29 Esferas huecas de Fe.

En cuanto a las partículas de sulfato de potasio granulado, que se aprecian en la Fig. 31, fueron adquiridas por la comercializadora ISAOSA. Estas partículas fueron tamizadas a un diámetro aproximado de 3 mm. Algunas características de estos gránulos son su solubilidad en agua y que no desprenden gases tóxicos con la temperatura.

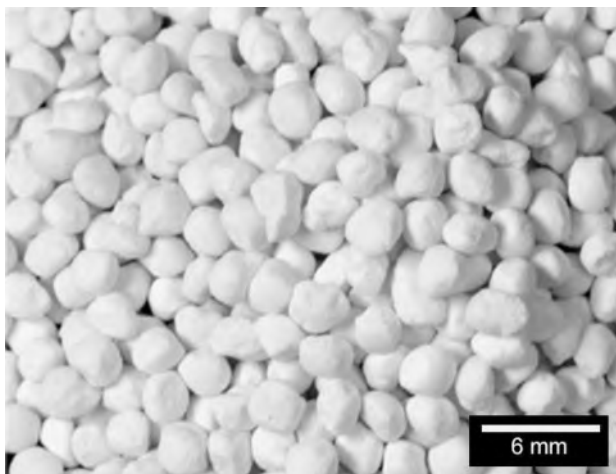


Fig. 30 Sulfato de potasio granulado.

2.2 Fabricación de espumas de Cu₂₀Sn

2.2.1 Dispositivo de infiltración

Las espumas, tanto convencionales como sintácticas, se fabricaron utilizando la aleación Cu₂₀Sn como material matriz, y utilizando respectivamente las partículas de sulfato de potasio o las esferas huecas de Fe como partícula reforzante. El equipo utilizado para llevar a cabo la manufactura de la espuma fue desarrollado por el equipo de trabajo al que pertenecemos, el cual está protegido como modelo de utilidad con número MX_W_2024_126551 ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. En la Fig. 32 se muestra un diagrama de las partes que conforman este dispositivo: 1) Boquilla de inyección de gas, 2) Maneral de sujeción, 3) Capucha, 4) Cámara de infiltración y 5) Cuchara de fundición. Las dimensiones de la cámara de infiltración son 5.8 cm de diámetro y 30 cm de alto. Esto permite fabricar espumas con el diámetro de la cámara, y con una altura máxima de 15 cm aproximadamente. Este dispositivo se calienta introduciéndolo en un horno, como se muestra a continuación.

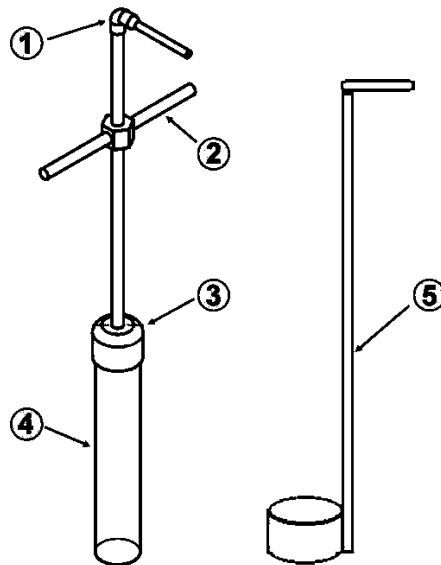


Fig. 31 Dispositivo de infiltración utilizado en la fabricación de espumas metálicas.

2.2.2 Horno para fabricación de espumas

El horno utilizado para la fabricación de las espumas metálicas, en el cual se introduce el dispositivo mostrado en la Fig. 32, es un horno de piso, de resistencias eléctricas, marca PREFINSA, el cual cuenta con control de temperatura digital, alarma auditiva y una temperatura máxima de operación de 1200°C. En la Fig. 32 a puede observarse el horno, que cuenta con una apertura en su parte superior, por donde se inserta el dispositivo para infiltración, resultando en un arreglo conjunto mostrado en la Fig. 33 b.

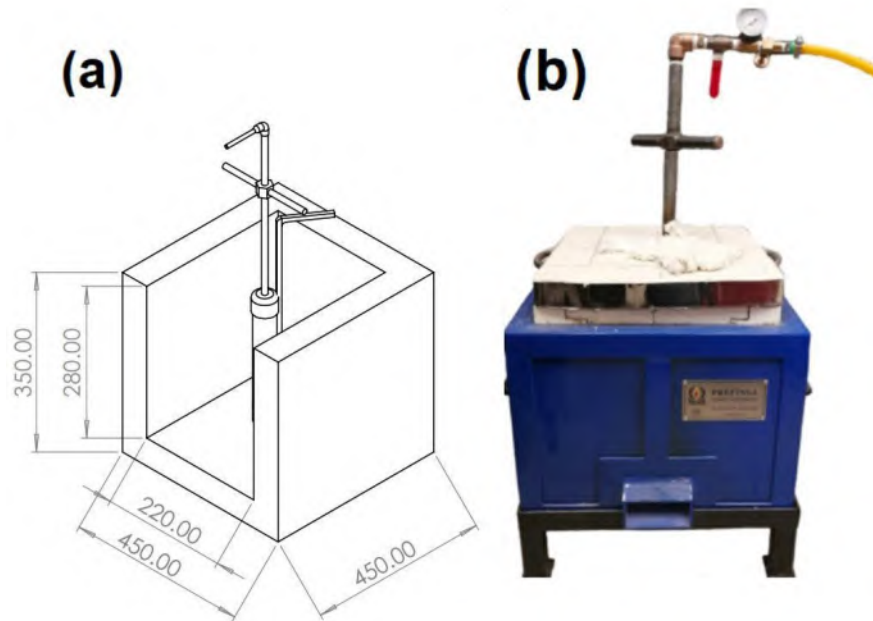


Fig. 32 Arreglo del dispositivo dentro del horno a) Modelo representativo, b) arreglo real

2.3 Espumas sintácticas

Las espumas sintácticas se fabricaron utilizando la aleación Cu₂₀Sn como matriz de la espuma y esferas huecas de Fe como partícula reforzante, mediante el siguiente proceso de manufactura:

Preparación del dispositivo: para comenzar el proceso, primeramente, se realiza una limpieza de la cámara de infiltración, de tal forma que no tenga polvo o residuos, a lo que sigue la aplicación de un recubrimiento de nitruro de boro (BN), el cual funciona como antiadherente y ayuda al desmolde de la espuma al final del proceso.

Preparación del material espaciador y sinterizado: una vez que la cámara de infiltración esté limpia se coloca en la cuchara, y se procede al vaciado de las esferas huecas de Fe dentro de la cámara de infiltración. La cantidad de esferas se selecciona de acuerdo con la altura a la que se desean fabricar las espumas. Entonces la cámara de infiltración con las esferas se introduce en el horno de resistencias para llevar a cabo el proceso de sinterizado de las esferas, lo cual se realizó a 1000°C durante una hora, esto se hace para generar una preforma homogénea y que las esferas no floten durante el proceso de infiltración. La selección de estas condiciones de sinterizado se realizó de acuerdo con un trabajo previo [57]. Este proceso es necesario debido a que si las esferas no están unidas o sujetadas pueden flotar debido a su densidad menor al metal fundido, no resultando en una adecuada distribución de esferas en la espuma sintáctica final.

Fundición e infiltración: una vez terminado el tiempo de sinterizado de las esferas, se deja enfriar la cámara de infiltración, seguido de lo cual se procede a colocar una cantidad suficiente de la aleación Cu₂₀Sn sobre la preforma de esferas, de tal manera que ésta pueda llenar los espacios vacíos entre las esferas, y se procede a colocar la capucha para inyección de gas. Una vez ensamblado el dispositivo se vuelve a introducir en el horno a una temperatura de 950°C, durante aproximadamente 30 minutos, para asegurarnos que la aleación se encuentre totalmente en estado líquido. El tiempo y la temperatura de infiltración fueron seleccionados de acuerdo a una serie de experimentos realizados previamente.

Infiltración: después de transcurridos los 30 minutos de permanencia del dispositivo en el horno, a 950 °C, la aleación se encuentra en estado líquido, y se comienza con la inyección de gas argón a 1.5 m³/h durante un minuto, lo que provoca que el metal fundido se infiltre entre los huecos de la preforma de esferas de Fe. Es durante

este proceso donde se forma la espuma, posterior a lo cual se retira el dispositivo de infiltración del horno y se deja enfriar al aire.

Finalmente se retira la espuma de la cámara de infiltración.

2.4 Espumas convencionales

El proceso de manufactura de las espumas convencionales presenta unas pequeñas variaciones, comparado con el proceso de obtención de las espumas sintácticas. A continuación, se describe el proceso utilizado:

Preparación del dispositivo: esta etapa no cambia en comparación con el proceso de fabricación de las espumas sintácticas.

Preparación del material espaciador y sinterizado: se coloca la cámara de infiltración en la cuchara y se procede al vaciado de los granos de sulfato de potasio, relleno hasta el nivel en el cual se desea obtener la altura de la espuma.

Fundición e infiltración: en este paso se sigue el mismo procedimiento que para la fabricación de las espumas sintácticas.

Infiltración: el proceso de infiltración igualmente coincide con el empleado para fabricar las espumas sintácticas. No obstante, en este caso no termina la fabricación, pues una vez finalizada la infiltración no se obtienen las espumas, sino un material compuesto formado por la matriz Cu-20Sn y las partículas espaciadoras de sulfato de potasio.

Disolución de las partículas espaciadoras: después de haber desmontado la espuma de la cámara de infiltración, el material compuesto introduce en agua durante aproximadamente 24 horas para promover la disolución de los granos de K_2SO_4 . Es importante destacar que pasadas las 24 horas es necesario agitar la espuma obtenida, o repetir este proceso de disolución, para retirar todo el sulfato de potasio de la espuma, ya que llega a quedar residuo de éste en forma de polvo. Como se comentó anteriormente, ambos tipos de espumas tuvieron diámetros de

5.8 cm, coincidiendo con el tamaño de la cámara cilíndrica de infiltración, y una altura que estuvo entre los 10 y 15 cm.

2.5 Tratamientos térmicos

Se realizaron tratamientos térmicos tanto a las espumas sintácticas como a las convencionales, para lo cual las muestras seleccionadas se introdujeron en una mufla marca Prefinsa, modelo FB1315M. El proceso del tratamiento térmico consistió en colocar las muestras en la mufla y aumentar la temperatura hasta los 750°C, una vez alcanzada la temperatura se dejó un tiempo de permanencia de una hora. Al cumplir el tiempo de permanencia las muestras se retiraron de la mufla y se templaron en agua a temperatura ambiente, esto con la finalidad de conservar la microestructura obtenida. En la Fig. 33 se puede ver la gráfica del ciclo de tratamiento térmico realizado. La elección de estas condiciones de tratamientos térmicos se realizó de acuerdo con resultados previos para este tipo de aleación[74], donde se comprobó que bajo estas condiciones podíamos obtener una microestructura $\alpha+\beta$, la cual podría mejorar las propiedades mecánicas de la espuma de acuerdo a las características de las fases mencionadas anteriormente.

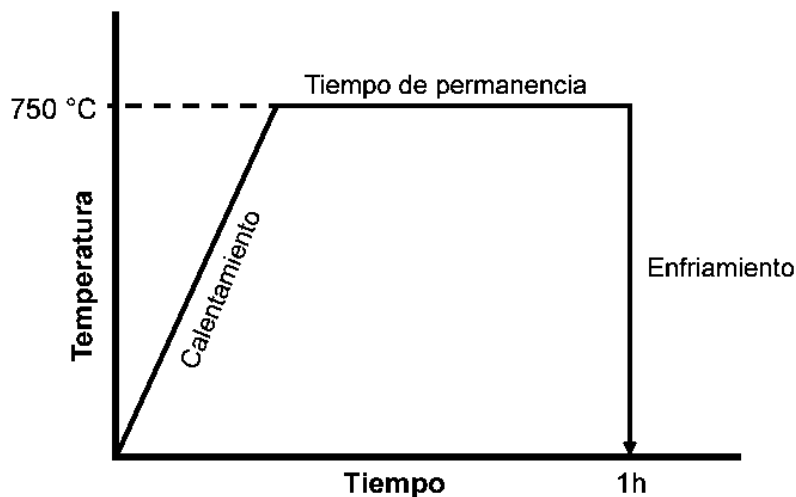


Fig. 33 Diagrama del ciclo de tratamiento térmico aplicado a las espumas metálicas.

2.6 Caracterización

2.6.1 Preparación metalográfica

Para llevar a cabo el análisis elemental y micrográfico de las aleaciones por microscopía fue necesario preparar las probetas, las cuales se cortaron de diferentes partes de las espumas cilíndricas obtenidas, tal manera que su tamaño final fue de 1 cm x 1 cm x 1 cm aproximadamente. Para cada tipo de espuma se tomaron 3 muestras con el objetivo de evaluar la uniformidad del material y asegurar que las propiedades sean consistentes. Este proceso incluye el desbaste con lija de carburo de silicio con granulometrías de 80 a 1200, seguido de un proceso de pulido con un equipo de la marca PACE TECHNOLOGIES modelo NANO-1000T, utilizando pasta de diamante de 6, 3 y 1 μm , hasta lograr un acabado espejo.

2.6.2 Microscopio óptico

Este microscopio es importante en el estudio de la microestructura de las espumas, ya que nos permite realizar evaluaciones preliminares antes de pasar a análisis a mayores magnificaciones. La caracterización mediante microscopio óptico se llevó a cabo utilizando un equipo de la marca LABOMED modelo MET400 con aumentos de 5x, 10x, 20x y 100x, y una cámara incorporada para la captura de imágenes de la marca LANOPTIK modelo MCX501.

2.6.3 Microscopio electrónico de barrido

En el laboratorio de la Unidad Morelia, de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) de la UNAM, se dispone de un microscopio JEOL JSM IT300LV. Este instrumento permite la observación de muestras utilizando electrones secundarios, retrodispersados y un detector LV-SEC para electrones secundarios

en modo de bajo vacío. Además, cuenta con una platina con un rango de temperatura de -30 a 50°C, y está equipado con dos detectores EDS OXFORD INSTRUMENTS X-MAXN para análisis mediante EDS (Energy Dispersive Spectroscopy). Mediante esta técnica se realizaron diversas caracterizaciones de las aleaciones con el objetivo de verificar los elementos constitutivos y su distribución en las distintas fases. Además, estos estudios permitieron analizar la región interfacial existente entre la aleación y los reforzantes o partículas espaciadoras, en caso de que no se eliminaran completamente, o quedaran residuos. El voltaje utilizado en la operación de este microscopio fue de 20 kV.

2.6.4 Difracción de rayos x

Para el estudio de las fases presentes en la aleación Cu-Sn, además del estudio de posibles reacciones interfaciales o formación de nuevas fases o productos, se empleó la técnica de Difracción de Rayos-X (DRX), utilizando un equipo D2PHASER de la marca Bruker equipado con el detector LYNXEYE XE-T. Los parámetros del análisis fueron los siguientes: radiación $K\alpha\text{Cu}$ de 1.54 Å, un rango de ángulo 2θ de 20 a 80° y un incremento de 0.3.

2.6.5 Fluorescencia de rayos x

El análisis de rayos x se utiliza para determinar la composición elemental de una muestra. Esta técnica nos permite identificar y cuantificar los elementos presentes en un material sólido sin destruir la muestra, por lo cual fue una técnica muy buena para determinar la composición de nuestra aleación, el equipo que se utilizó fue un espectrómetro portátil modelo TITÁN S1 de la marca BRUKER.

2.6.6 Caracterización mecánica

Para la caracterización mecánica de las espumas, se llevaron a cabo pruebas de compresión empleando una máquina Instron 1125-5500R, configurada con una velocidad de deformación de 0.5 mm/min. Estos ensayos se realizaron conforme a la norma ASTM E9-09, titulada 'Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature'. Las probetas utilizadas se maquinaron a partir de las espumas cilíndricas obtenidas, resultando en cilindros menores, con un diámetro de 30 mm y una altura de 25 mm. Estos ensayos nos permitieron determinar información como el módulo de Young, esfuerzos de compresión, y absorción de energía de la espuma, entre otros.

2.6.7 Densidad

La medición de la densidad se realizó utilizando dos metodologías diferentes, la primera fue por la fórmula de la siguiente ecuación:

$$\rho = m/V \quad \text{Ec. 3}$$

Siendo m la masa de la espuma y v el volumen de la muestra que se está midiendo.

No obstante, debido a la presencia de irregularidades y porosidad en las probetas, la densidad de las espumas fabricadas también se determinó utilizando el método de Arquímedes. Para ello, se empleó una balanza analítica Sartorius modelo QUINTIX 124-1S, aplicando la fórmula de la ecuación para calcular la densidad del material presentada a continuación.

$$\rho = \frac{p_a}{(p_a) - (p_l)} \rho(\text{líquido}) \quad \text{Ec. 4}$$

Donde p_a es el peso de la muestra en aire y p_l es el peso de la muestra en el líquido.

Capítulo III

3. Resultados y discusión

3.1 Aleación Cu20Sn

La caracterización de la aleación Cu20Sn se llevó a cabo mediante análisis de microscopía electrónica de barrido, difracción y fluorescencia de rayos x para determinar composición y fases de la aleación.

3.1.1 Microscopía electrónica de barrido

La Fig. 34 muestra una micrografía de la aleación Cu20Sn, obtenida mediante MEB, mostrando una microestructura con crecimiento dendrítico, formada por una fase gris claro $\epsilon(\text{Cu}_3\text{Sn})$ y una fase gris oscuro rica en Cu (α). Estas fases se encuentran en porcentajes de 41% para la fase ϵ y 59% para la fase α . La existencia de estas fases coincide con lo observado en el diagrama de fases Cu-Sn, y su composición será comprobada a continuación.

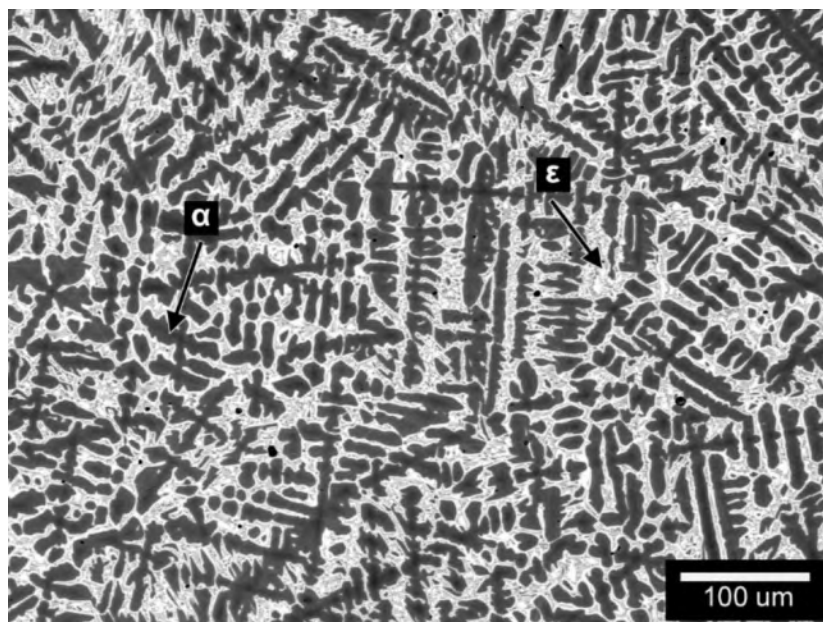


Fig. 34 Micrografía de la aleación Cu20Sn tomada mediante microscopio electrónico de barrido.

3.1.2 Mapeo químico elemental

En la Fig. 35 observamos el mapeo elemental, realizado mediante EDS, de la aleación Cu₂₀Sn. Se puede identificar claramente la presencia de los elementos que componen la aleación (Cu y Sn) sin encontrar la presencia de inclusiones o impurezas ajenos a los materiales de la aleación. También podemos observar una distribución uniforme de los elementos, con una mayor concentración de Cu en la fase más oscura de la Fig. 35 (fase α), y más estaño en la ϵ . El análisis semicuantitativo suministrado por esta técnica arroja que los porcentajes atómicos son de 84% de Cu y 16% de Sn en la fase α , y 73% de Cu y 17% de Sn en la ϵ . Esto coincide con lo reportado en la literatura, y de acuerdo con el diagrama de fases, para esta aleación [68][74].

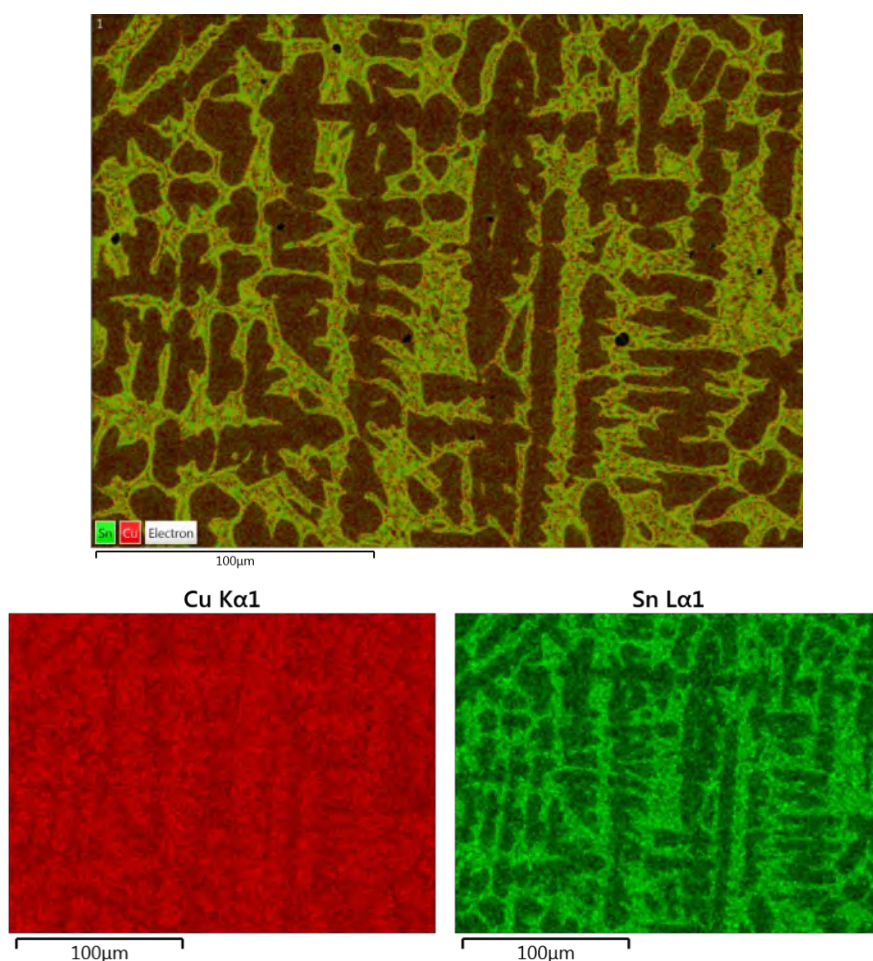


Fig. 35 Mapeo químico elemental de la aleación Cu₂₀Sn.

3.1.3 Fluorescencia de rayos x

El análisis de fluorescencia de rayos x se llevó a cabo para conocer la composición química de la aleación, obteniendo como resultado un porcentaje en peso de Cu de 80.93% y Sn de 19.07%. La presencia única de los dos elementos nos muestra una alta pureza en los materiales utilizados para la fabricación de la aleación. Asimismo, el contenido de la aleación fue muy similar al planificado de acuerdo con el diseño de la aleación antes de la fundición. También se comprueba el resultado semicuantitativo determinado por EDS.

3.1.4 Difracción de rayos x

Con la ayuda del difractograma mostrado en la Fig. 36 corroboramos la composición de las fases α y ϵ , anteriormente analizadas mediante MEB. Encontramos picos característicos de la fase α (Cu) en los ángulos aproximados 42.8° , 48.5° y 72.6° y la fase ϵ (Cu_3Sn) en los ángulos aproximados 42° , 48.5° , 61.5° , 72° y 77.5° 2θ . Se puede identificar que la fase predominante es la fase α (Cu) debido a que es la fase que presenta el pico más alto, asimismo podemos observar que no existen picos que puedan sugerir la presencia de otras fases, esto debido a que se lograron identificar todos los picos presentes. Igualmente, la intensidad de los picos encontrados sugiere que existe orientación preferencial, lo cual podría estar relacionado al proceso de preparación metalográfica de la muestra para llevar a cabo su caracterización.

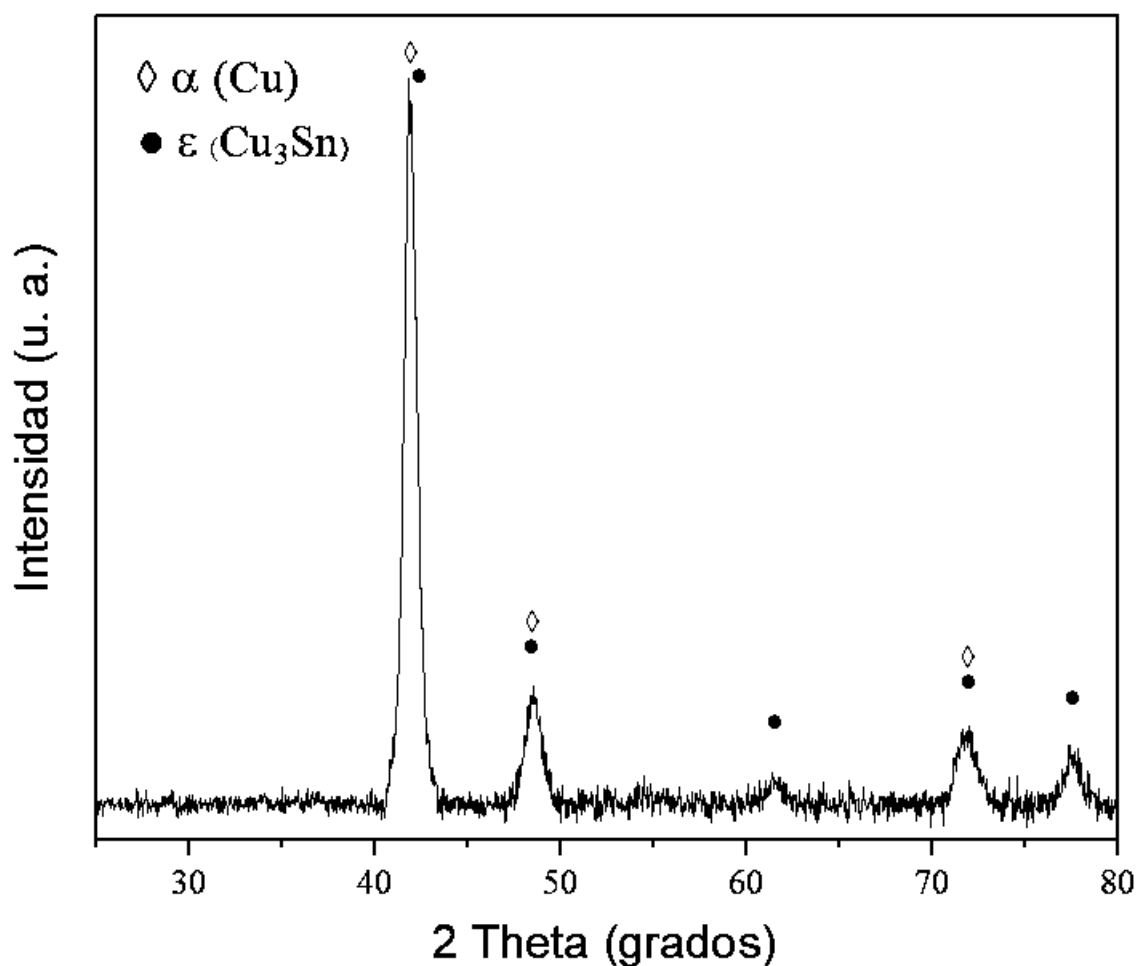


Fig. 36 Difractograma de la aleación Cu20Sn en estado as cast.

3.2 Esferas huecas de Fe

Para llevar a cabo la caracterización de las esferas huecas de hierro que se utilizaron para fabricar las espumas sintácticas, se realizó un análisis mediante microscopía óptica para así determinar su tamaño. Los resultados arrojaron un diámetro promedio de las esferas de 3.09 ± 0.15 mm. En la Fig. 37 a se observa una vista macroscópica de las esferas, mientras que la Fig. 37 b presenta una micrografía obtenida por microscopio óptico donde se muestran varias esferas cortadas diametralmente, claramente apreciándose sus estructuras huecas y sus paredes. Con estas micrografías se llevó a cabo el análisis de espesor de pared de las esferas, obteniendo un promedio de 130 ± 10 μm . Tanto el diámetro como el

espesor de pared fueron obtenidos utilizando la técnica de análisis de imagen. En la Fig. 37 c podemos observar el histograma de frecuencias de aproximadamente 300 esferas analizadas, mostrando que tienen un diámetro variable. Sin embargo, la mayoría de las esferas tienen un diámetro entre 3.0 y 3.1 mm (aproximadamente el 70%), lo cual nos indica una distribución de tamaño relativamente reducido, lo cual fue relevante para garantizar uniformidad y la repetitividad en los experimentos que se realizaron. Por otra parte, el difractograma presentado en la Fig. 37 d, realizado a las esferas de Fe, muestra picos definidos de este elemento como única fase, aproximadamente en los grados 45 y 65, lo que nos indica que las esferas son de material mayormente puro, lo que está de acuerdo con lo reportado por el fabricante de estas esferas huecas.

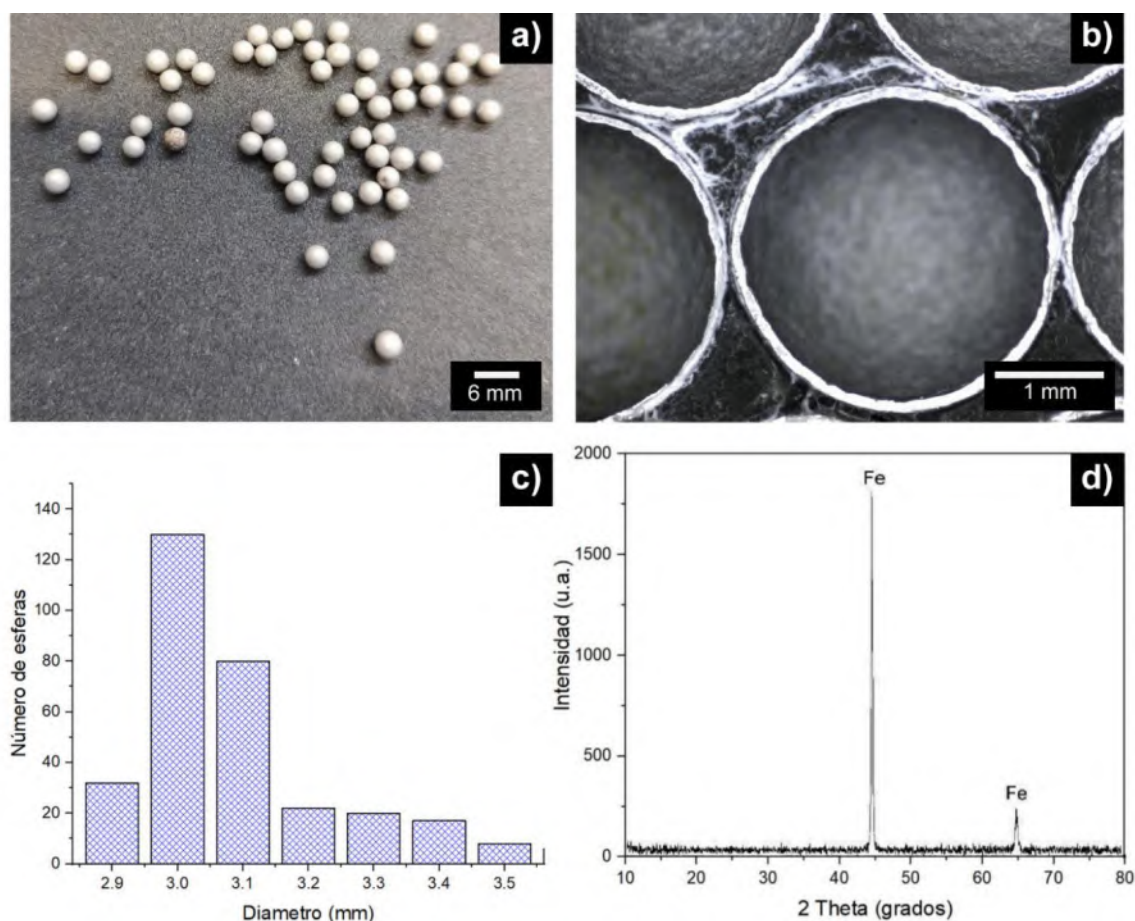


Fig. 37 a) Vista macroscópica de las espumas huecas de Fe, b) corte transversal de las esferas huecas de Fe, c) histograma de frecuencias de la distribución de tamaño de las esferas, d) difractograma de las esferas huecas de Fe.

Con la información obtenida podemos concluir que las esferas huecas presentan una distribución de tamaño controlada y las características del espesor de pared continuo y bien definido, además de confirmar la pureza de éstas

3.3 Sulfato de potasio (K_2SO_4)

El sulfato de potasio granulado fue caracterizado, como todos los materiales utilizados en la fabricación de las espumas metálicas. En la Fig. 38 a se observa a nivel macro los granos utilizados, que presentan una morfología redondeada, con una relación de aspecto muy cercana a 1.0, con superficie lisa y se puede apreciar un tamaño de partícula uniforme. Este tipo de partícula fue seleccionada y tamizada para poder comparar la información obtenida de las espumas convencionales con las espumas sintéticas fabricadas con las esferas huecas de Fe descritas anteriormente, debido a que ambas partículas presentan dimensiones y morfologías similares. El histograma de la Fig. 38 b muestra la distribución de diámetros promedio de los gránulos, y como puede apreciarse la mayoría de las partículas tienen un diámetro entre 3.0 y 3.2 mm, lo que indica un tamaño de grano homogéneo. El lograr esto nos da la certeza en que la repetibilidad de los experimentos es fiable. El difractograma de rayos x de la Fig. 38 c muestra que la composición de los gránulos es químicamente pura, ya que solo se encontraron picos bien definidos correspondientes a la fase de K_2SO_4 .

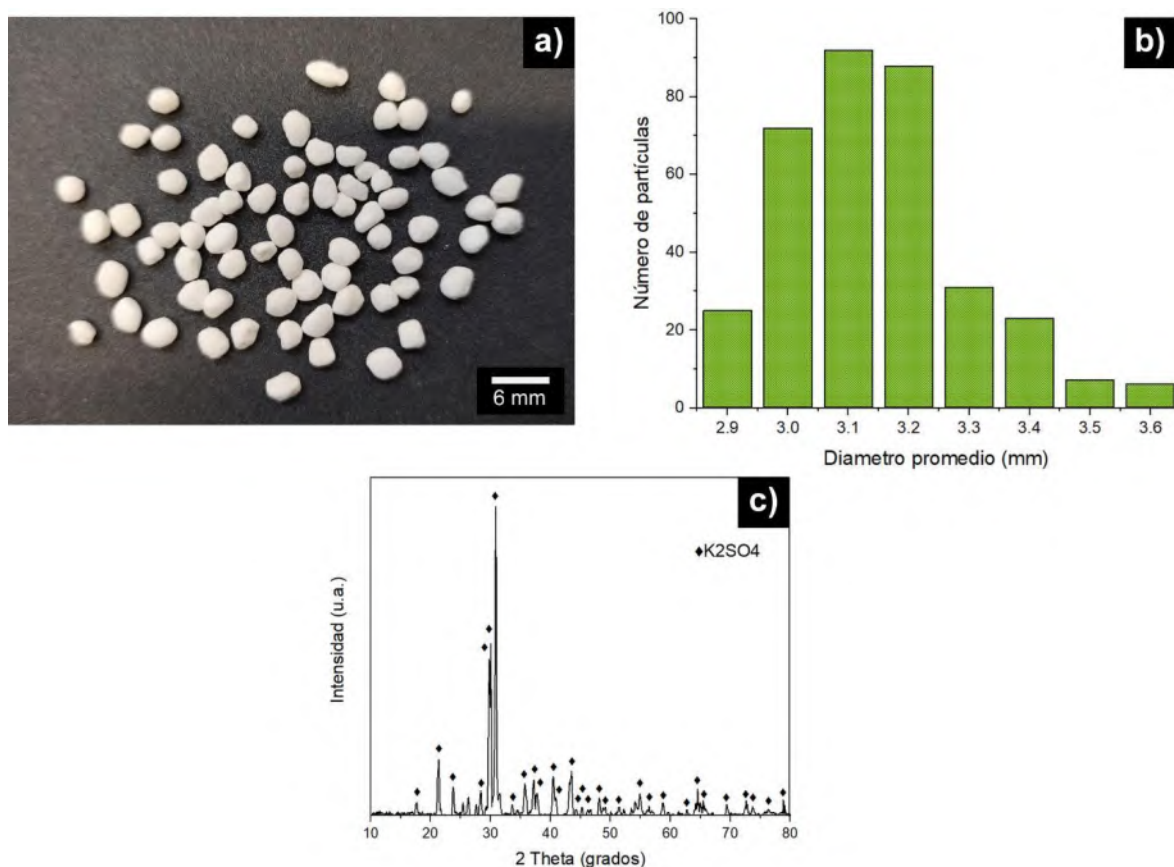


Fig. 38 a) vista macroscópica de los gránulos de sulfato de potasio, b) histograma de frecuencias del tamaño de los gránulos, c) difractograma de rayos x de las partículas de sulfato de potasio.

En la Tabla 2 se incluye la información sobre las caracterizaciones realizadas a los materiales que serán utilizados para fabricar las espumas, tanto convencionales como sintéticas.

Tabla 2 Características de los materiales utilizados como reforzante o partícula espaciadora

Material	Diámetro	Densidad	Espesor de pared
Esferas huecas de Fe	3.09 ± 0.15 mm	0.7 ± 0.10 g/cm ³	130 ± 10.00 μm
K ₂ SO ₄ granulado	3.14 ± 0.15 mm	1.2 ± 0.30 g/cm ³	-

3.4 Espumas sintácticas

Se obtuvieron exitosamente espumas sintácticas de la aleación Cu₂₀Sn, fabricadas utilizando esferas huecas de Fe. Esto fue posible después de determinar los parámetros de fabricación correctos, sobre todo de las condiciones de la inyección de gas Ar para lograr la infiltración completa, ya que tanto el exceso como la falta de presión provocaban la obtención de materiales donde no todas las partes de las espumas eran sólidas, ya que quedaban esferas huecas expuestas, sin infiltrar. Las espumas se fabricaron utilizando una temperatura de infiltración superior a la temperatura de fusión de la aleación, la cual fue de 950°C, lo que se realizó utilizando un flujo de gas argón de 1.5 m³/h durante 1 min. Esto fue posible al fundir la aleación e infiltrarla sobre una preforma de esferas huecas, previamente sinterizadas a 1000°C durante una hora. En la Fig. 39 podemos observar las espumas sintácticas fabricadas con una infiltración completa, ya maquinadas de acuerdo con las dimensiones establecidas por la norma ASTM E9-89a "Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room temperatura". Estos materiales presentan una estructura porosa con una distribución homogénea de esferas huecas en toda la matriz metálica. En la Tabla 3 se muestran algunos de los valores obtenidos a partir del análisis de las probetas fabricadas, como lo es la densidad promedio de 4.5 g/cm³, lo cual es significativamente menor que la densidad de la aleación sólida Cu₂₀Sn (~ 8.9 g/cm³). Esta reducción en la densidad se debe a la alta porosidad de las espumas (52%), lo que nos muestra que más de la mitad del volumen de la espuma está ocupado por esferas huecas de Fe. Esto permite una disminución significativa del peso del material. Por otra parte, el espesor de pared de celda promedio encontrado (1.94 ± 1.35 mm) presenta una desviación relativamente alta, indicando una variabilidad en el grosor de las paredes de las celdas.

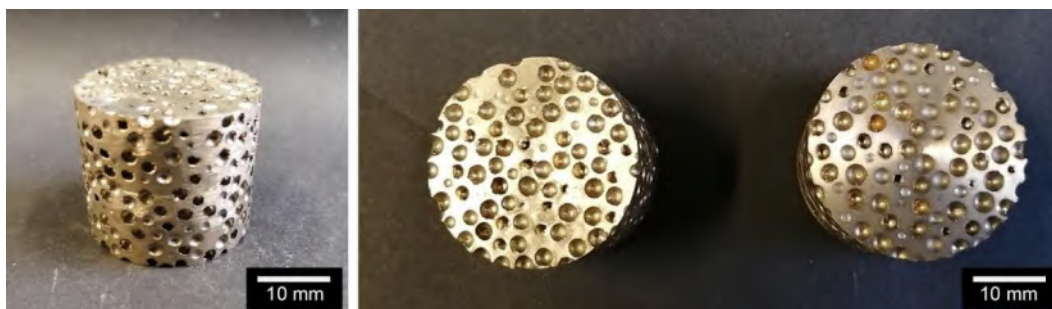


Fig. 39 Vista en isométrico y superior de las espumas sintácticas fabricadas con la aleación Cu20Sn y esferas huecas de Fe.

Tabla 3 Características físicas de las espumas sintácticas.

Altura (mm)	Diámetro (mm)	Densidad (g/cm ³)	Porosidad (%)	Densidad relativa	Espesor de pared celdas (mm)
25 ± 1.00	30 ± 0.20	4.5 ± 0.20	52 ± 2.00	0.5 ± 0.06	1.94 ± 1.35

3.4.1 Caracterización microestructural

En la Fig. 40 se muestran micrografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido, donde se observan cambios en la microestructura en comparación con la aleación en estado bruto (véase Fig. 34). A pesar de encontrar las mismas fases [$\alpha(\text{Cu})$ y $\epsilon(\text{Cu}_3\text{Sn})$] tanto en la espuma como en la aleación en bruto, la morfología presente en las espumas es diferente, desapareciendo la microestructura dendrítica debido a que fueron distintas las velocidades de solidificación. En la Fig. 40 a puede apreciarse la macroestructura de la espuma, donde se observa que las esferas están bien distribuidas en la matriz de la aleación Cu20Sn. Igualmente podemos ver que existe una completa unión las paredes (exterior) de las esferas y de la matriz, sin espacios interfaciales vacíos, lo que indica que el proceso de infiltración fue exitoso. En la Fig. 40 b podemos observar que ocurre el fenómeno de infiltración de la matriz también hacia el interior de la esfera, sin llegar a ocupar el total del espacio vacío interior de la esfera. Esta infiltración nos asegura una buena adhesión entre la matriz y las esferas huecas, además podemos comprobar que no ocurrió la

formación de alguna capa intermetálica entre la esfera y la matriz. Esta infiltración entre los granos que conforman las paredes de las esferas huecas pudiera influir positivamente sobre las propiedades mecánicas de las espumas sintácticas.

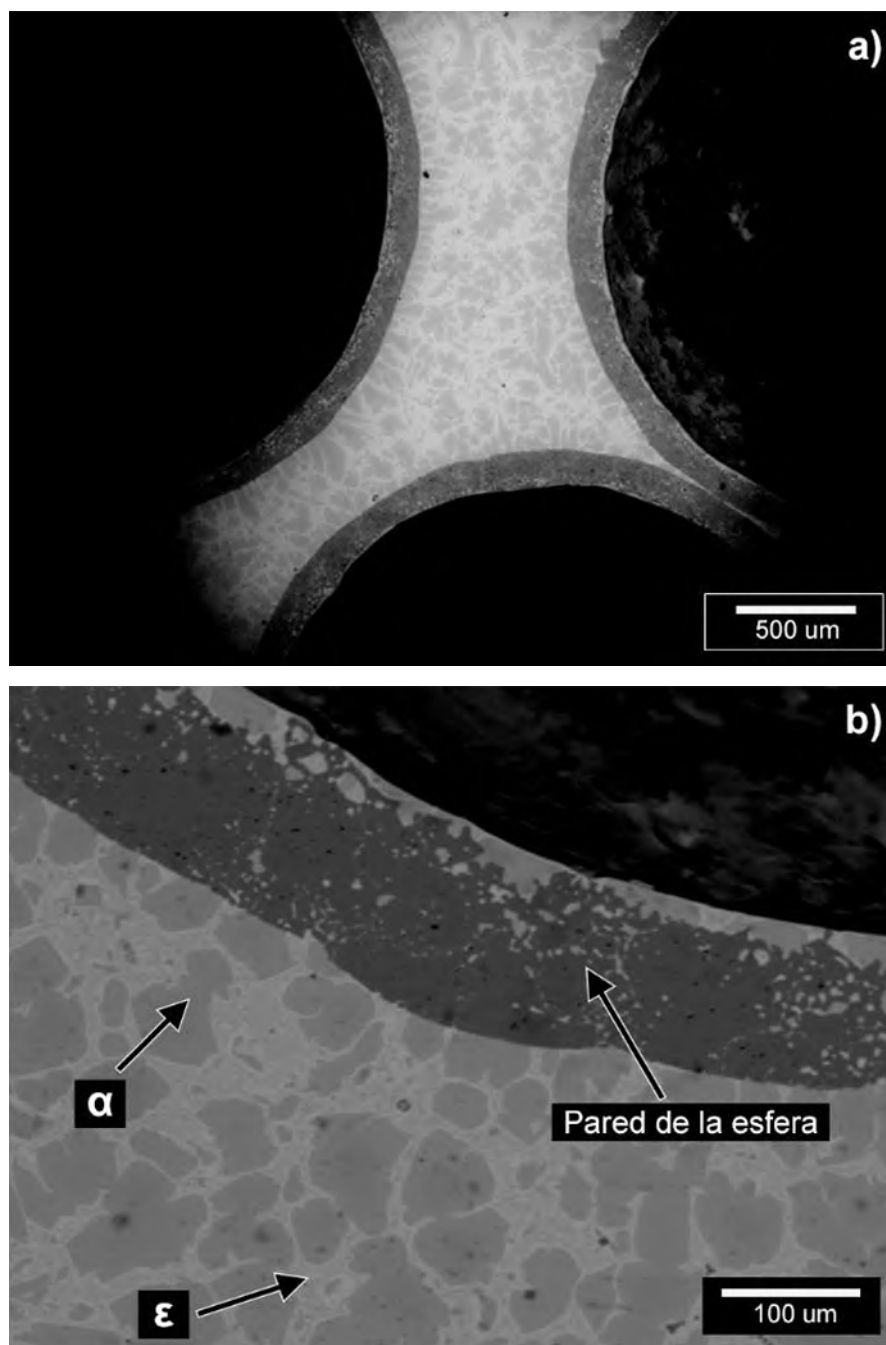


Fig. 40 Micrografías de la espuma sintáctica a) baja, b) alta magnificación.

3.4.2 Análisis elemental

3.4.2.1 Espectro EDS

Para llevar a cabo un análisis elemental de la espuma fabricada se realizó un análisis global de las espumas, para lo cual se utilizó EDS, incluyendo en el estudio a la matriz, las esferas y la región interfacial. En la Fig. 41 podemos apreciar el espectro obtenido, en el cual identificamos picos característicos de cobre, estaño y hierro. Cabe destacar que los valores de porcentaje en peso coinciden con los esperados, ya que el 13 % de Sn corresponde a que en la aleación está presente en un contenido cercano al 19 %. Aunque el EDS es una técnica mediante la cual se obtienen resultados semicuantitativos, es de gran utilidad para el estudio de estos materiales. No se observaron picos correspondientes a otros elementos químicos, por lo que podemos concluir que durante el proceso de fabricación de las espumas no ocurrió ningún tipo de contaminación del molde a la espuma.

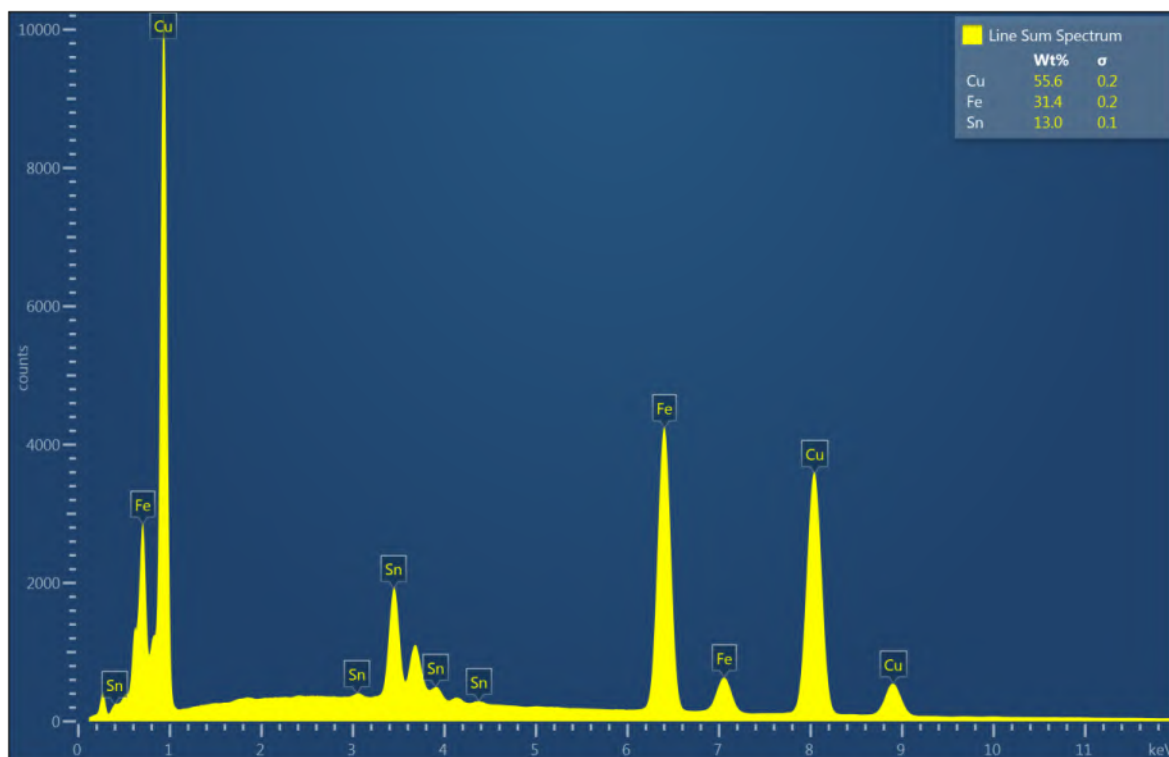


Fig. 41 Espectro EDS para la espuma sintáctica.

3.4.2.2 Mapeo elemental

En el mapeo elemental de la Fig. 42 se puede observar claramente la distribución de los elementos encontrados mediante el espectro EDS (Cu, Sn y Fe). El mapeo del Fe (color azul) nos indica el espesor de la pared de la esfera hueca, apreciándose como un anillo bien definido, igualmente podemos encontrar algunas partículas de hierro en la matriz de la aleación Cu₂₀Sn, esto puede ser atribuido a la naturaleza de las esferas, ya que estas fueron fabricadas por el método de metalurgia de polvos, permitiendo el desprendimiento de algunas partículas de Fe. De forma similar se aprecia el mapeo del Cu y Sn (morado y amarillo respectivamente), donde, aunque estos elementos se distribuyen de manera uniforme principalmente en la matriz, podemos confirmar que ocurre infiltración de estos elementos desde la matriz hacia el interior de la esfera, lo que se comprueba por la presencia de coloración más intensa de estos dos elementos en el interior del anillo de la esfera de Fe. Para el caso del Cu este fenómeno es más marcado.

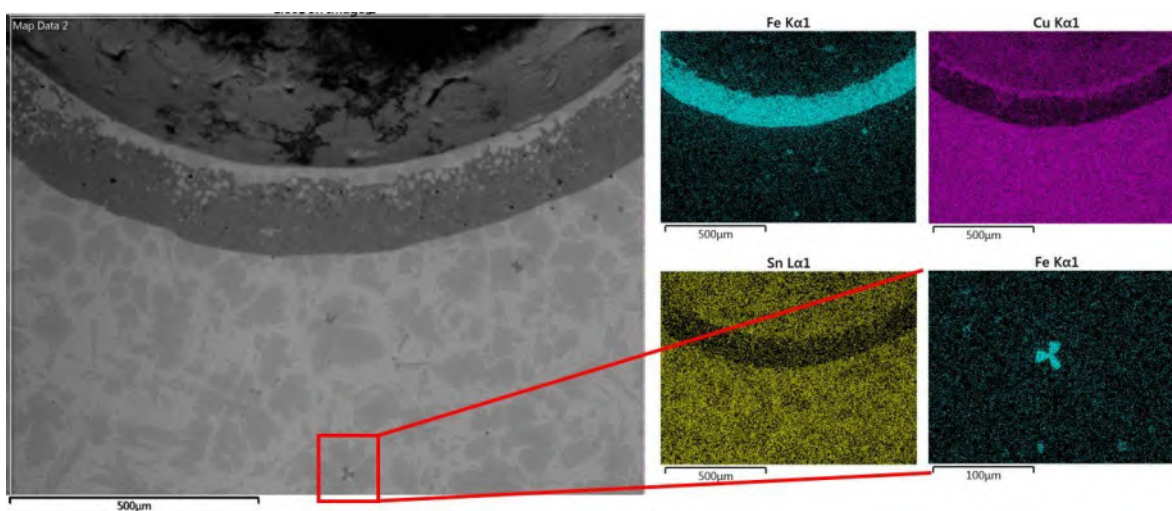
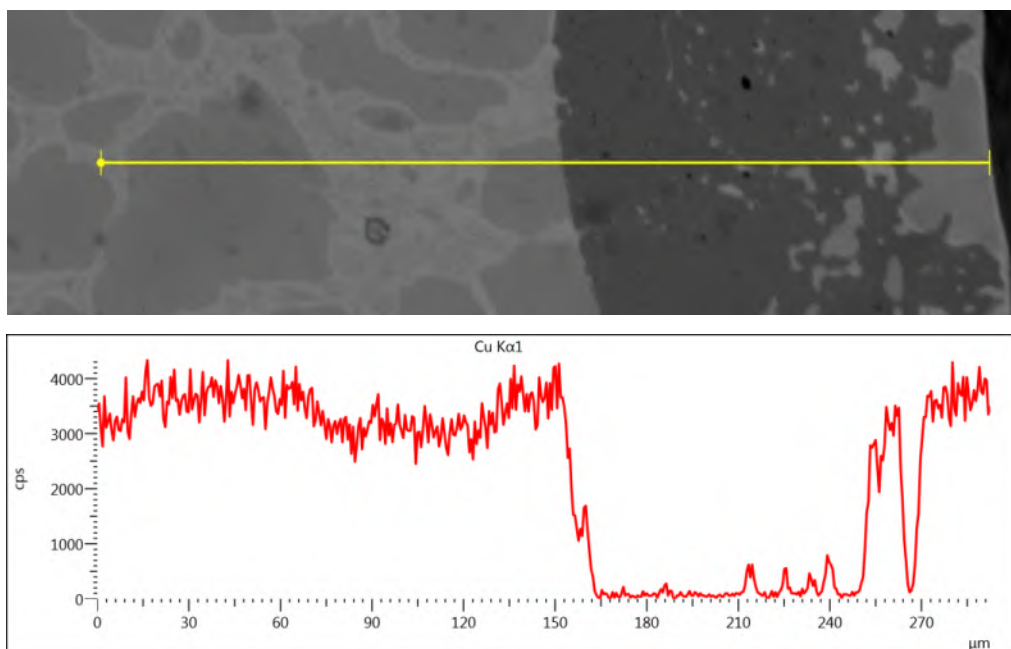


Fig. 42 Mapeo químico elemental de la espuma sintáctica.

3.4.2.3 Line Scan

Del line scan mostrado en la Fig.43 podemos observar la distribución de Cu, Sn y Fe en la sección transversal de la interface entre las esferas y la matriz, en las espumas sintácticas. La línea amarilla nos muestra que durante esta técnica el haz de electrones pasa primeramente por la matriz (Cu₂₀Sn), luego por la pared de la esfera (Fe) y finalmente vuelve a encontrar la matriz que se infiltró en la pared de la esfera. Esto se comprueba por la alta intensidad de Cu y Sn en el inicio y fin del recorrido del haz de electrones, lo cual nos indica que efectivamente ocurre infiltración al interior de la esfera. También podemos decir que la transición entre las 150 μm y 255 μm es bastante marcada, lo cual indica que no ocurre la formación de subproductos derivados de la matriz y el Fe de las esferas, ya que si existieran algunos de estos productos observaríamos un cambio más gradual en los elementos. Estos resultados muestran la buena unión entre la matriz y las esferas.



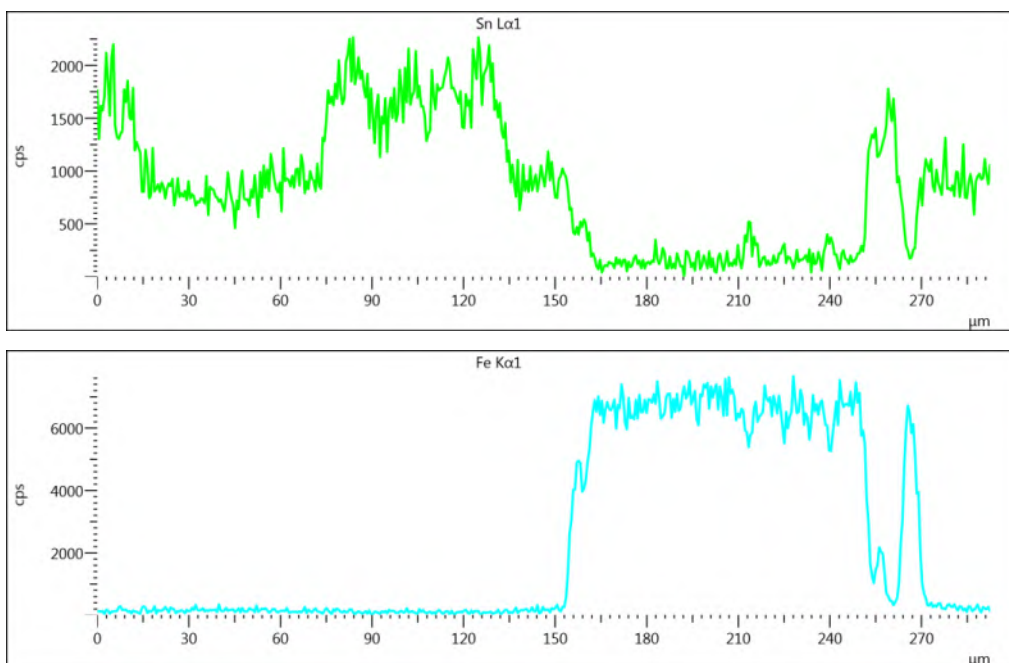


Fig. 43 Line Scan obtenido por EDS de la espuma sintáctica en la región entre la pared de la esfera y la matriz.

3.4.2.4 Difracción de rayos x

El difractograma mostrado en la Fig. 44 concuerda con la información obtenida mediante las técnicas anteriores, donde identificamos los picos de las fases: α -Cu, ϵ (Cu_3Sn) y α -Fe. La intensidad de los picos de la fase α -Cu indican que es la fase mayoritaria en la matriz y en la esfera. La detección de los picos de la fase α -Fe, significa que las esferas no reaccionaron de manera significativa con la matriz formando compuestos entre ellos, cuya ausencia de comprueba por la falta de picos de otras fases, lo que comprueba los resultados obtenidos mediante microscopía.

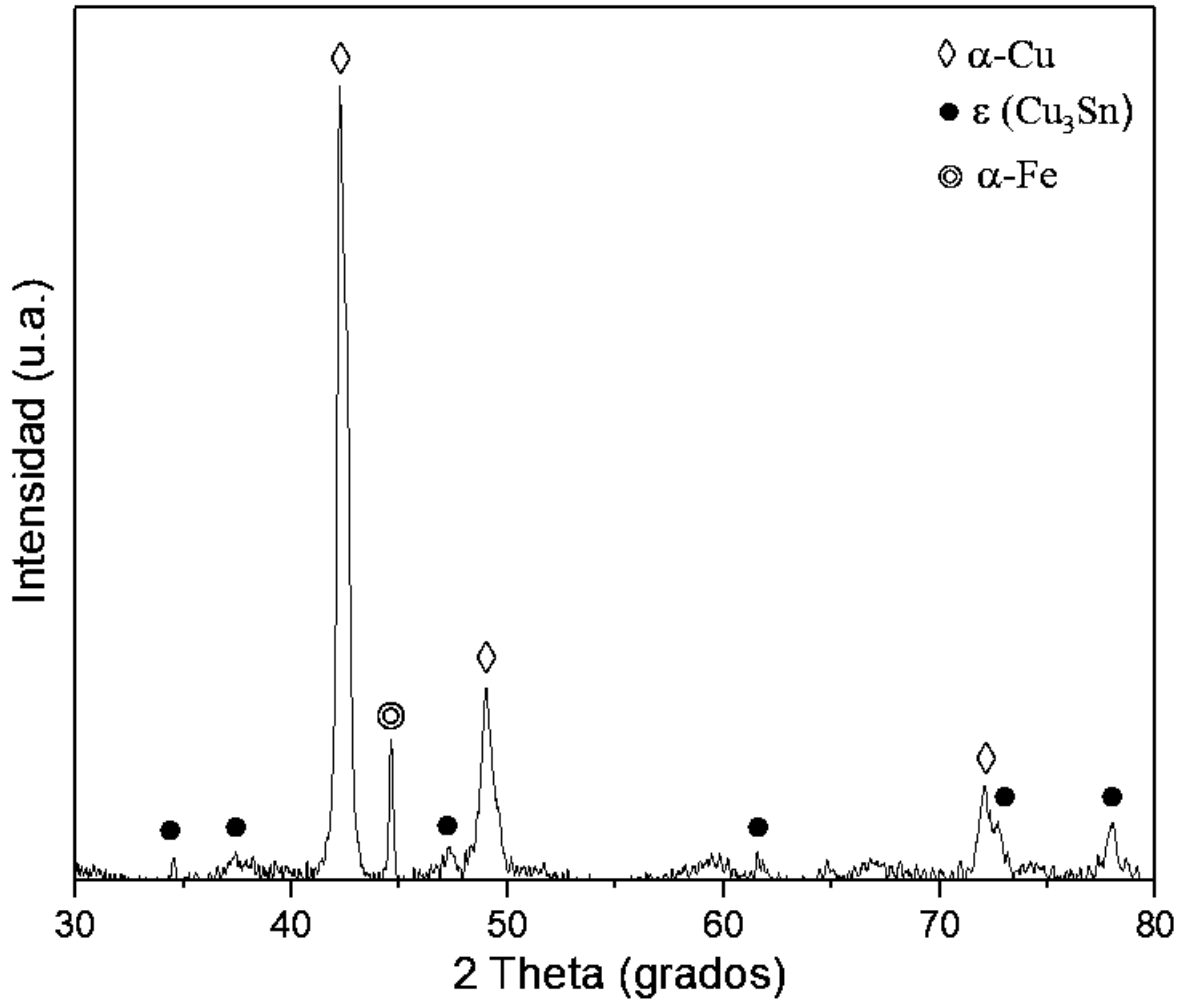


Fig. 44 Difractograma de la espuma sintáctica.

3.4.3 Caracterización mecánica (compresión)

Ya que algunas de las posibles aplicaciones de las espumas sintácticas de matriz metálica son usos estructurales, es importante caracterizar estos materiales a compresión uniaxial, para lo cual se utilizaron las probetas mostradas en la Fig.39. La Fig. 45 muestra la gráfica esfuerzo-deformación resultante, con su desviación estándar. Es importante mencionar que se llevaron a cabo 3 análisis para obtener la gráfica promedio. Principalmente podemos encontrar 3 regiones características de la compresión en espumas metálicas: la primera zona corresponde a la región elástica, que comprende desde el inicio hasta un 10% aproximadamente de

deformación. De esta zona podemos obtener información de la resistencia de la espuma, la cual muestra un módulo de Young (44 ± 2 GPa), valor significativamente inferior comparado con el del material en bruto, pero relativamente alto para una espuma metálica. Es importante destacar que las espumas metálicas presentan módulos de elasticidad relativos por debajo de 1, lo que significa que su módulo de elasticidad es menor que el del material sólido del que están fabricadas. Si tomamos en cuenta que la aleación matriz tiene un módulo elástico de 120 GPa, la espuma sintáctica obtenida presenta un módulo relativo de 0.36. Este alto valor del módulo de Young muestra la contribución de rigidez que aportan las esferas huecas de Fe a la espuma, ya que, a pesar de la presencia de huecos en el material, las paredes sólidas de Fe aumentan la resistencia de las espumas obtenidas al actuar como materiales reforzantes. Por su parte, el esfuerzo de fluencia se encuentra alrededor de los 180 ± 13 MPa, y nos indica el punto a partir del cual la deformación se hace de forma permanente. En cuanto al valor del esfuerzo de compresión, éste alcanzó 195 ± 15 MPa. Este esfuerzo es el máximo permisible antes de que comience a ocurrir el colapso de las esferas huecas. En esta curva esfuerzo-deformación de las espumas, posterior a la zona elástica y al esfuerzo máximo, se observa la zona de meseta, la cual se encuentra entre 10% y 60% de deformación. En esta región ocurre el colapso progresivo de las esferas, así como de las paredes sólidas de la matriz CuSn, ocasionando las fluctuaciones de esfuerzo que se aprecian en la región mencionada. Utilizando los datos de esta región se puede obtener el valor de energía absorbida por la espuma, el cual fue de 79 ± 3 MJ/m³, y confirma la excelente capacidad de absorción de impacto de la espuma sintáctica. El cálculo de la energía absorbida se realiza mediante la determinación del área bajo la curva, antes de que comience la zona 3, conocida como región de densificación. Esta última región comprende de un 60% de deformación aproximadamente hasta el final de la gráfica. El aumento brusco del esfuerzo se debe a que la mayoría de las celdas han colapsado y la espuma entonces se comporta como un material sólido compacto. Por otra parte, podemos decir que el comportamiento total de la curva corresponde a una espuma frágil de acuerdo con estudios que ha realizado Floreck [58], esto corroborado por las fluctuaciones intensas en los valores de esfuerzo en

la zona de la meseta. En la Tabla 4 podemos encontrar un resumen de las propiedades y datos que obtuvimos de la gráfica obtenida durante el ensayo de compresión de las espumas sintácticas.

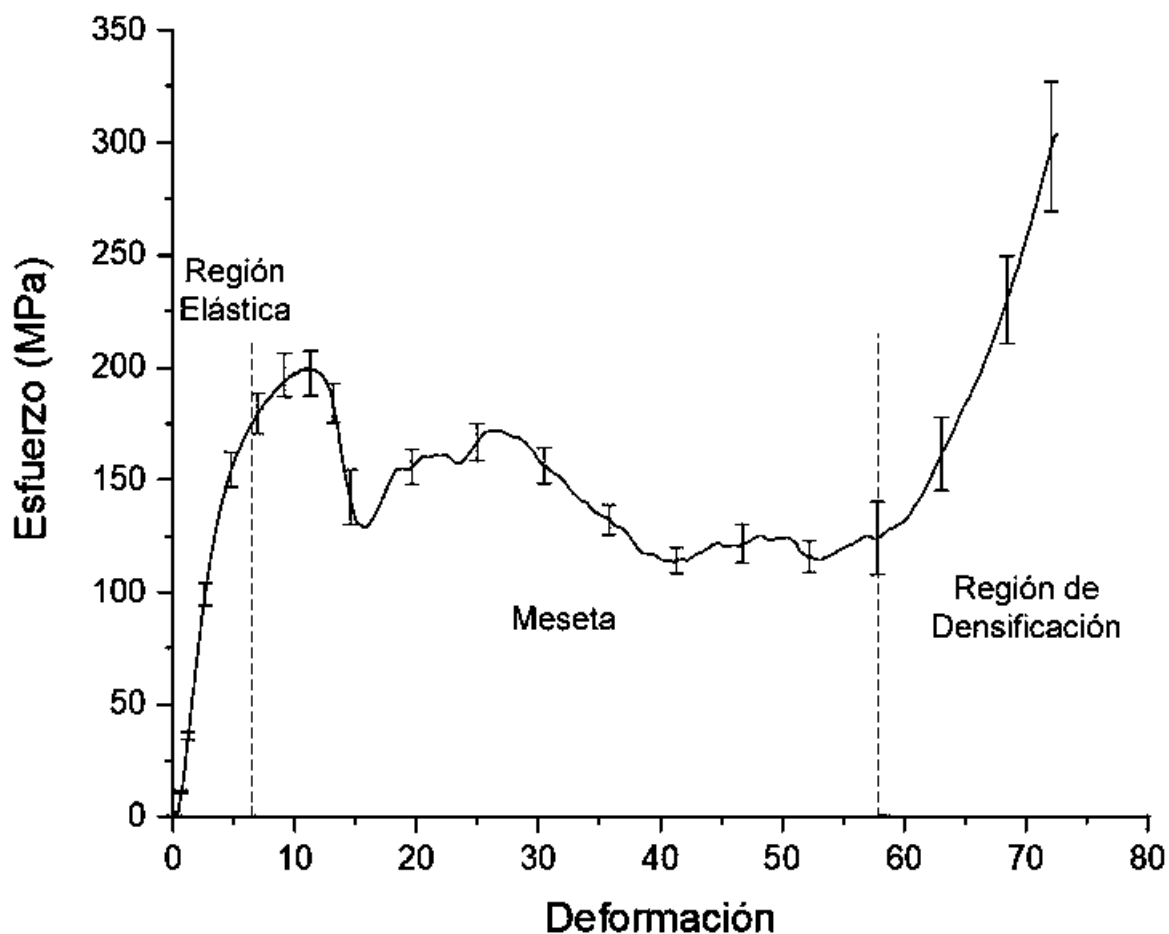


Fig. 45 Gráfica del comportamiento mecánico bajo compresión de las espumas sintácticas.

Tabla 4 Propiedades mecánicas de la espuma sintáctica.

Densidad (g/cm ³)	Módulo de Young (GPa)	Esfuerzo de compresión (MPa)	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Absorción de energía (MJ/m ³)	Deformación de densificación
4.5 ± 0.30	44 ± 2.00	195 ± 15.00	180 ± 13.00	79 ± 3.00	58 ± 4.00 %

3.5 Espuma sintáctica con tratamiento térmico

Con el objetivo de modificar la microestructura y obtener propiedades diferente a las que presentan las espumas as-cast, se realizó un tratamiento térmico de solubilización a 750°C seguido de un temple en agua, a algunas de las espumas fabricadas, para analizar su comportamiento y compararlas con las espumas sin tratamientos térmicos. En la Tabla 5 podemos encontrar los resultados obtenidos al aplicar este procedimiento a las espumas. Para realizar estas mediciones se partió de probetas con 25 mm de altura y 30 mm de diámetro, coincidiendo con las dimensiones de las espumas que no fueron tratadas. Estos resultados no se modificaron de manera significativa debido a que durante el tratamiento térmico únicamente se buscaba obtener cambios en la microestructura, sin tener cambios en dimensiones y peso.

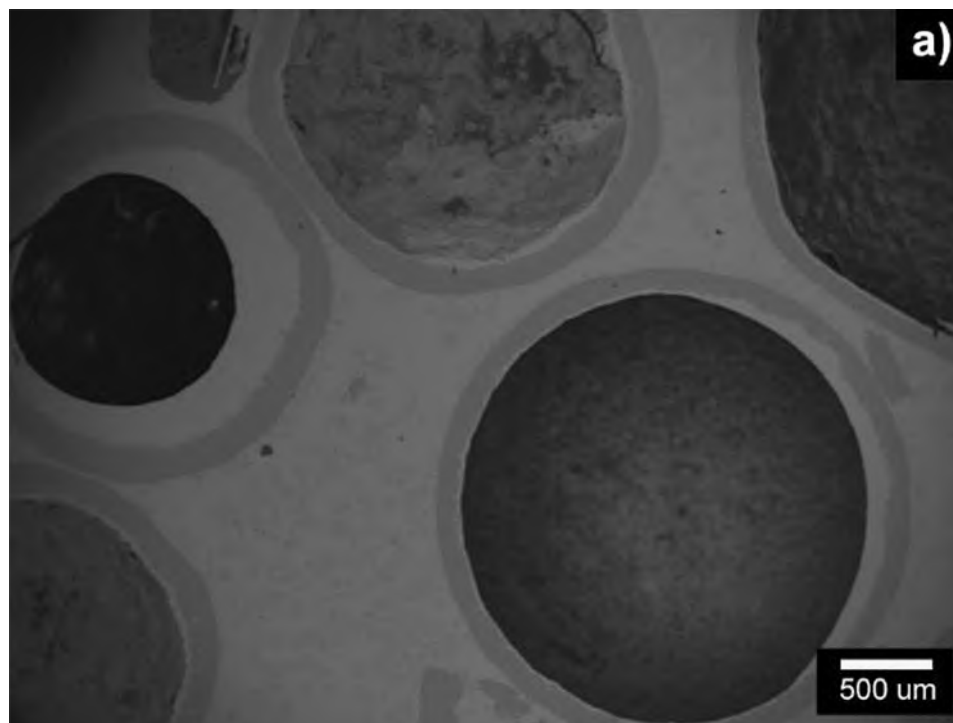
Tabla 5 Características físicas de las espumas sintácticas tratadas térmicamente.

Altura (mm)	Diámetro (mm)	Densidad (g/cm ³)	Porosidad %	Densidad relativa	Espesor de pared de espuma (mm)
25 ± 1.00	30 ± 0.20	4.5 ± 0.20	52 ± 2.00	0.5 ± 0.05	2.03 ± 1.44

3.5.1 Caracterización microestructural

Las Fig. 46 muestran micrografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido, donde se aprecia la estructura interna de las espumas sintácticas de aleación Cu20Sn con esferas huecas de Fe. La Fig. 46 a muestra una vista a menor magnificación donde apreciamos la sección transversal de varias esferas, y se puede observar que las esferas tienen una distribución homogénea y presentan tamaños similares. Igualmente podemos apreciar que algunas de las paredes de las esferas tienen un grosor diferente, lo cual es normal de acuerdo al proceso de

fabricación que se llevó a cabo para manufacturar dichas esferas. No se observaron vacíos entre las esferas y la matriz, lo cual nos indica que el proceso de tratamientos térmicos no provocó desunión u otro fenómeno dañino para las propiedades mecánicas. En la Fig. 46 b se observa a mayor aumento la región entre la matriz y la pared de la esfera, y se aprecia que el cambio más significativo es en la microestructura de la matriz, ya que después del tratamiento térmico la fase α presenta estructura globular, lo cual ocurrió debido a la difusión de los elementos químicos, originándose la modificación a través de mecanismos de fragmentación y esferoidización [74]. La fase $\alpha(\text{Cu})$ es quien presenta esta forma globular, con relación de aspecto cercana a 1, mientras que la fase $\epsilon(\text{Cu}_3\text{Sn})$ de la aleación as cast se transformó en $\beta(\text{Cu}_{17}\text{Sn}_3)$, como comprobaremos más adelante.



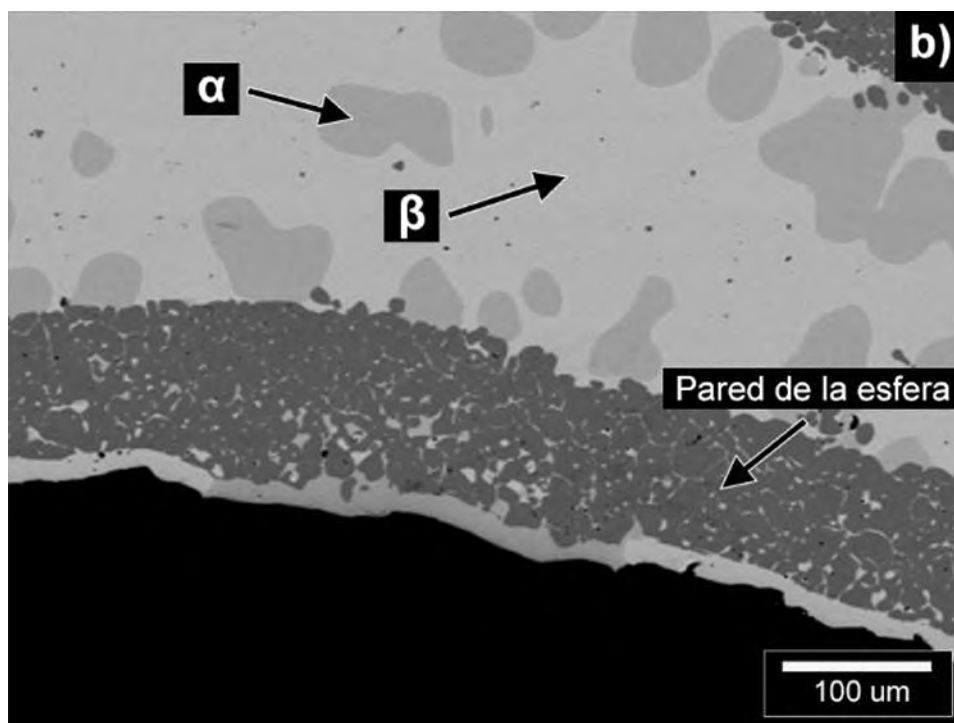


Fig. 46 Micrografías de la espuma sintáctica tratada térmicamente a) esferas rodeadas de la matriz CuSn, b) pared de la esfera y fases.

3.5.2 Análisis elemental

3.5.2.1 Espectro EDS

En la Fig. 47 se observa el espectro de EDS para la espuma tratada térmicamente de la Fig. 46 b. De este espectro podemos comentar que se encontraron los picos característicos de los elementos Cu, Sn y Fe únicamente, lo cual nos indica que no se produjo algún tipo de contaminación durante la fabricación y tratamiento térmico de las espumas. El pico intenso de Cu nos indica que el Cu es el elemento mayoritario en la región analizada.

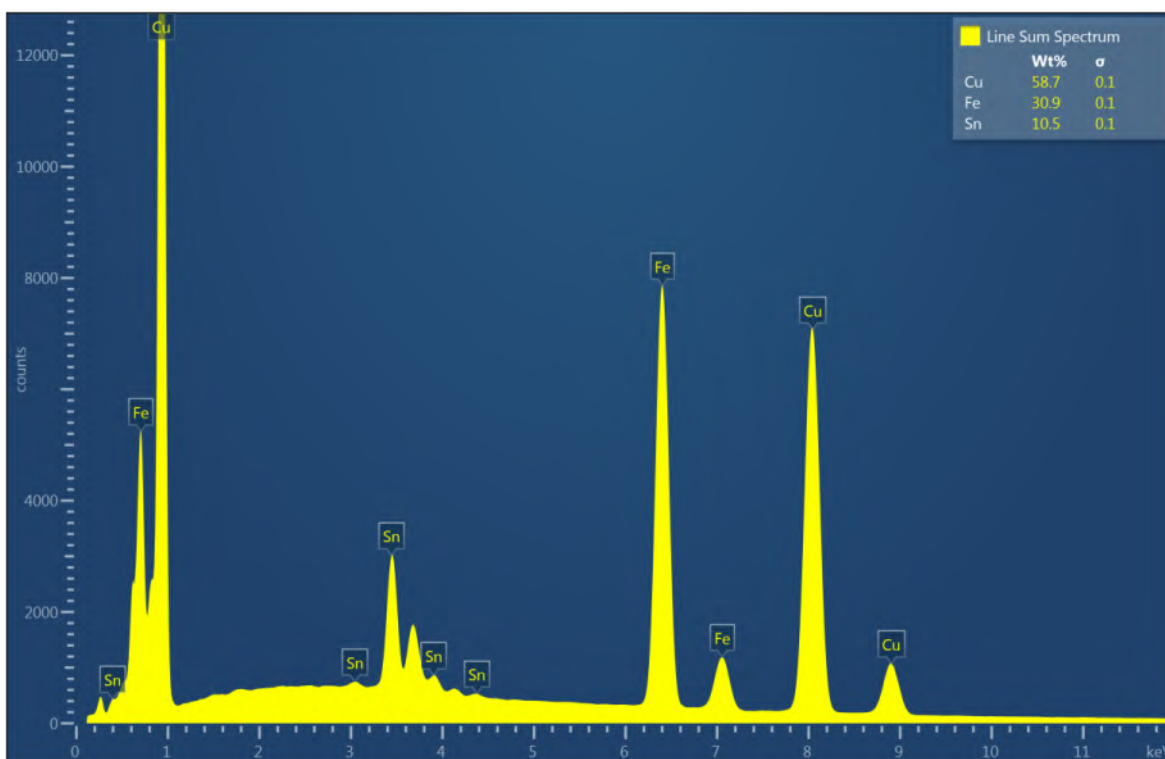


Fig. 47 Espectro EDS para la espuma sintáctica tratada térmicamente.

3.5.2.2 Mapeo elemental

El mapeo elemental mostrado en la Fig. 48 muestra el análisis en la sección transversal de la espuma sintáctica, donde se logran identificar claramente la distribución de los elementos Cu, Sn y Fe. La zona con coloración azul corresponde al elemento Fe, formando un anillo bien definido el cual coincide con la pared de la esfera hueca. Igualmente observamos partículas de Fe en la matriz debido al desprendimiento de gránulos durante el proceso de infiltración. La distribución de Cu (rojo) y Sn (verde) están homogéneamente distribuidos en el interior de la matriz, con mayores concentraciones del Cu en la fase globular (α). También se observan ambos elementos en el interior de la esfera de Fe, lo cual no fue modificado por el tratamiento térmico. Tampoco se aprecia que se haya originado la formación de compuestos interfaciales intermetálicos entre la matriz y la esfera.

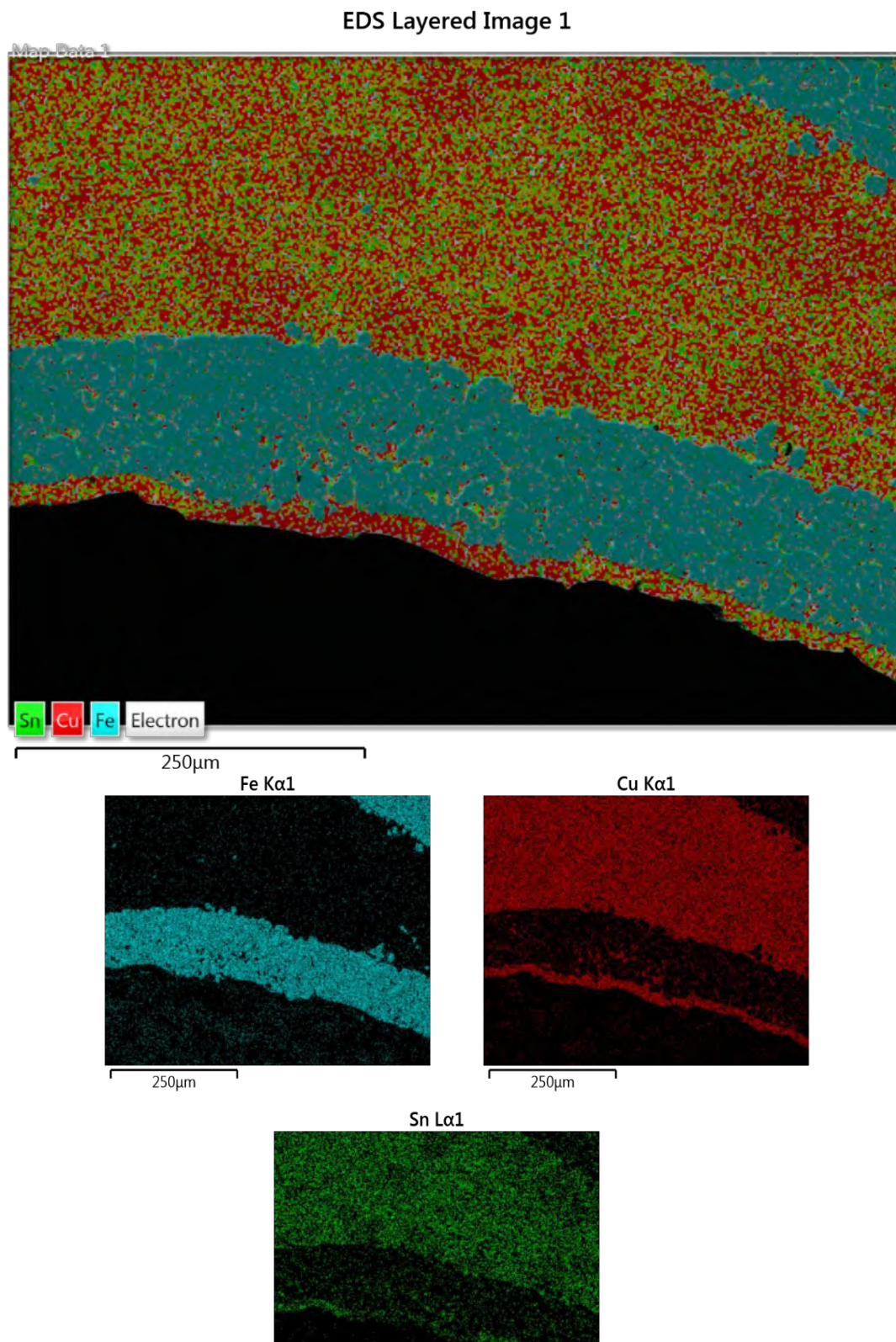
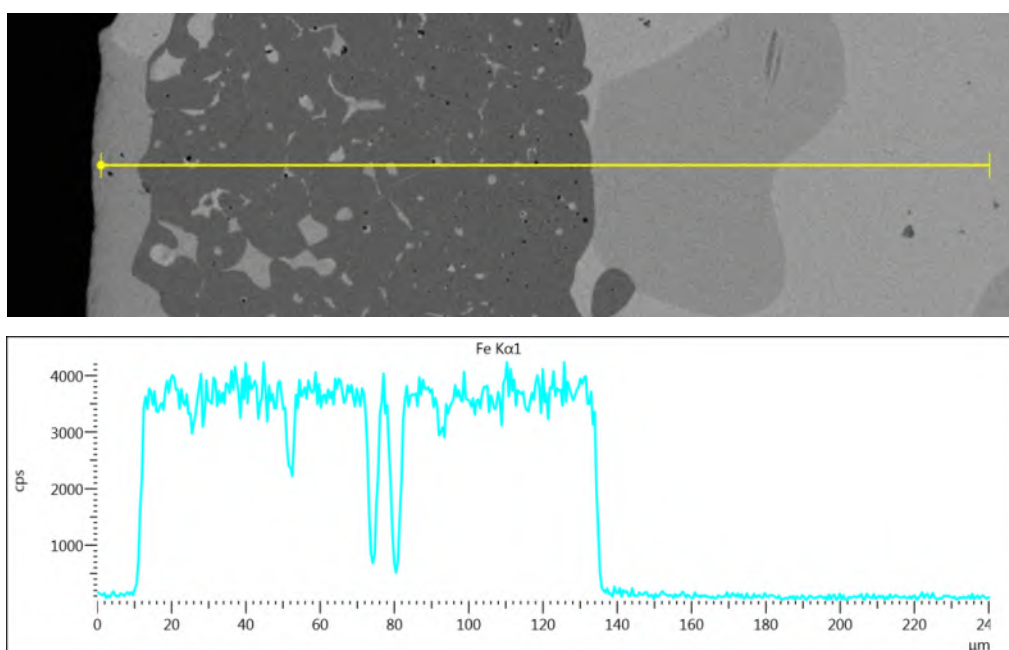


Fig. 48 Mapeo químico elemental de la espuma sintáctica tratada térmicamente.

3.5.2.3 Line Scan

El line scan mostrado en la Fig. 49 muestra la distribución de los elementos Cu, Sn y Fe en la sección transversal de la espuma, marcada por una línea amarilla. El comportamiento es similar al observado para las espumas sin tratar térmicamente, observado en la Fig. 43. Podemos apreciar que existe Cu y Sn dentro de la esfera, debido a su naturaleza intergranular, con la zona de la pared de la esfera de entre 10 y 140 μm aproximadamente. En este caso tampoco se observó la formación de un subproducto entre la matriz y las esferas, ni la difusión del Fe hacia el interior de la matriz sólida, lo cual demuestra que el tratamiento térmico solamente provocó la transformación morfológica y composicional de las fases.



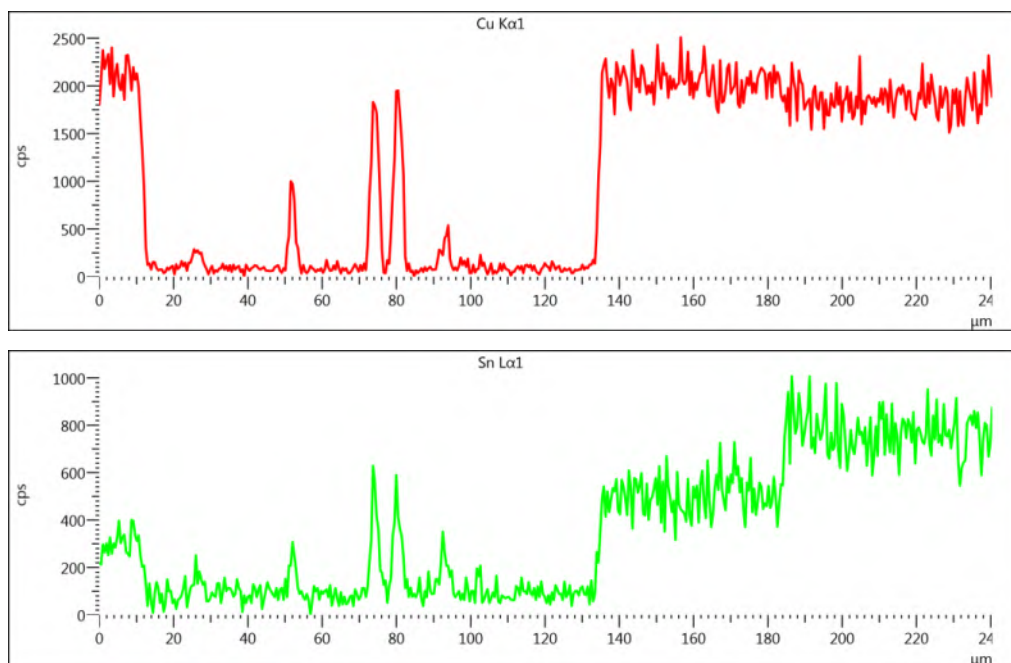


Fig. 49 Line Scan obtenido por EDS de la espuma sintáctica sobre la pared de la esfera y la matriz de la espuma tratada térmicamente.

3.5.2.4 Difracción de rayos x

El análisis de difracción de rayos x que se observa en la Fig. 50 nos confirma las fases observadas mediante microscopía, con picos característicos intensos de la fase α -Cu, que nos indica que es la fase mayoritaria en la espuma. Encontramos diferencias con el difractograma de la Fig. 44, ya que en la Fig. 50 se aprecian picos diferentes, que corresponden a la transformación de la fase ϵ a la fase β . Igualmente, el encontrar los picos de la fase α -Fe, nos indica que no ha ocurrido la formación de fases secundarias Fe-Cu o Fe-Sn.

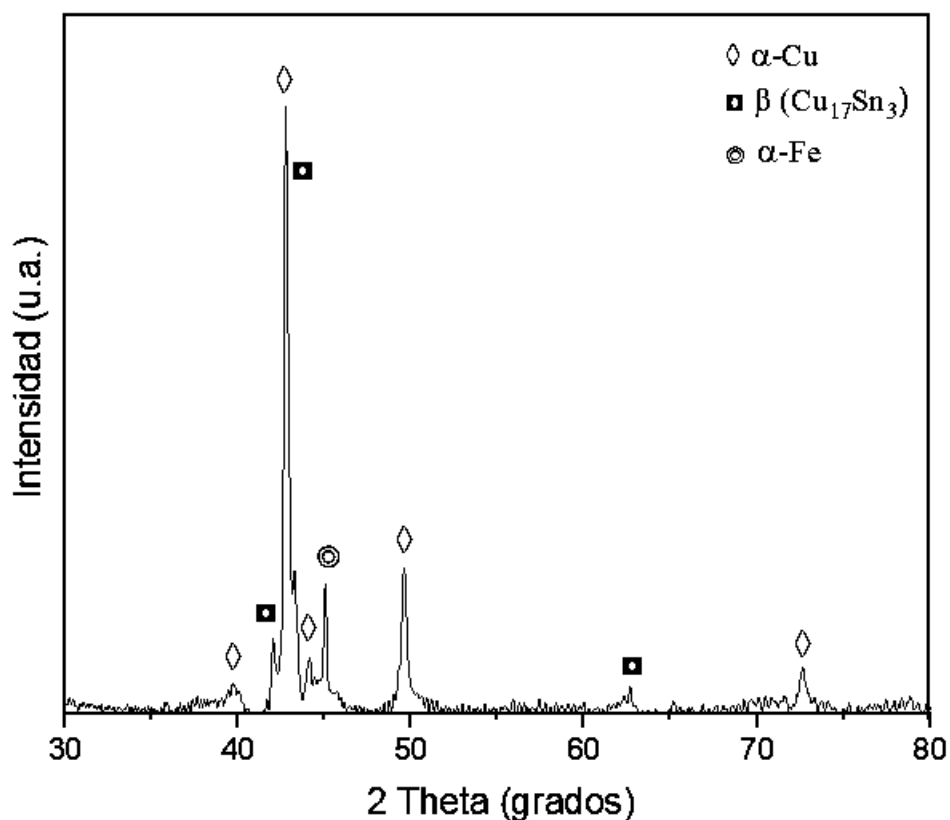


Fig. 50 Difractograma de la espuma sintáctica tratada térmicamente.

3.5.3 Caracterización mecánica (compresión)

El gráfico esfuerzo-deformación correspondiente a las espumas sintácticas tratadas térmicamente es mostrado en la Fig. 51, a partir del cual se recopilieron los datos mostrados en la Tabla 6. Como puede apreciarse, aunque presenta similitudes con el comportamiento mecánico de la espuma sin tratar, existen algunas diferencias significativas, como analizaremos más adelante. Al comienzo de la gráfica de la Fig. 51 encontramos la región elástica, hasta aproximadamente un 10% de deformación, en donde el esfuerzo crece rápidamente. El módulo de Young de la espuma resultó 46 ± 1.5 GPa, este valor es significativamente superior comparando con otras espumas sintácticas fabricadas con esferas huecas de Fe [57]. Posterior al 10% de deformación encontramos el pico de esfuerzo, cercano a los 250 MPa, tras el cual ocurre una caída ligera de esfuerzo, dando lugar a la zona de meseta y al colapso

progresivo de las esferas huecas. Esta región ocurre para valores de deformación de entre 12 y el 40 % aproximadamente. La cantidad de energía que absorbe la espuma, calculada mediante el área bajo la curva, fue de $88 \pm 3 \text{ MJ/m}^3$. Finalmente, a partir del 40% encontramos el punto a partir del cual la estructura comienza a comportarse como un sólido, esto debido al colapso completo de las celdas de la espuma. El comportamiento de la espuma en la región de la meseta nos indica que la espuma es un material frágil, sin embargo, presenta valores de resistencia bastante altos.

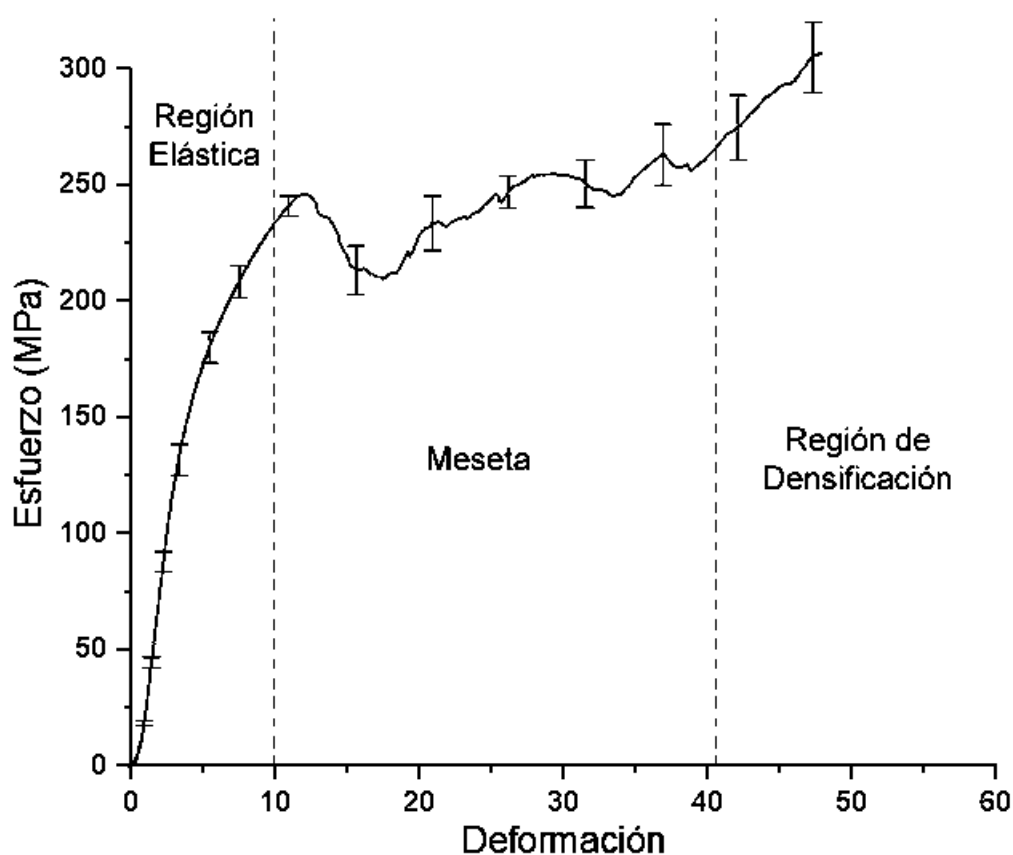


Fig. 51 Grafica del comportamiento mecánico bajo compresión de las espumas sintácticas tratadas térmicamente.

Tabla 6 Propiedades mecánicas de las espumas sintácticas tratadas térmicamente.

Densidad (g/cm ³)	Módulo de Young (GPa)	Esfuerzo de compresión (MPa)	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Absorción de energía (MJ/m ³)	Deformación de densificación (MPa)
4.5 ± 0.30	46 ± 1.50	246 ± 12.00	230 ± 11.00	88 ± 3.00	41 ± 4.00

3.6 Comparación entre las espumas sintácticas

3.6.1 Microestructura

La Fig. 52 muestra las micrografías obtenidas mediante MEB de las espumas sin tratar y tratadas térmicamente. Se observan cambios en la morfología de las fases en comparación con la aleación as-cast (ver Fig. 34). A pesar de que la espuma de la Fig. 52 a presenta las mismas fases que la aleación as cast tienen morfologías diferentes debido a los procesos de fabricación que tuvieron cada una, atribuyendo la ausencia de dendritas sobre todo a la velocidad de solidificación de la aleación. Por otra parte, para las espumas tratadas térmicamente la fase α se transformó completamente a una fase globular mediante mecanismos de fragmentación y esferoidización. Podemos observar que el tratamiento térmico disminuyó la fracción de volumen de la fase α del 45% en la Fig. 52 a al 39% en la Fig. 52 b. También de acuerdo con los análisis obtenidos por difracción de rayos x se encontró la transformación de la fase ϵ a la fase β . Esta transformación se produce debido a que la fase α comienza a disolverse en la fase ortorrómbica ϵ (74 % Cu - 27 %Sn), aumentando sobre todo el contenido de Cu en esta fase, lo que hace que al continuar el tratamiento térmico se transforme en la fase bcc β (86% Cu- 14%Sn), con mayor contenido de Cu. En ninguno de las dos espumas se detectó la formación de una interfaz en la pared de la esfera con la matriz, conservándose igualmente la matriz infiltrada en las paredes de las esferas de Fe.

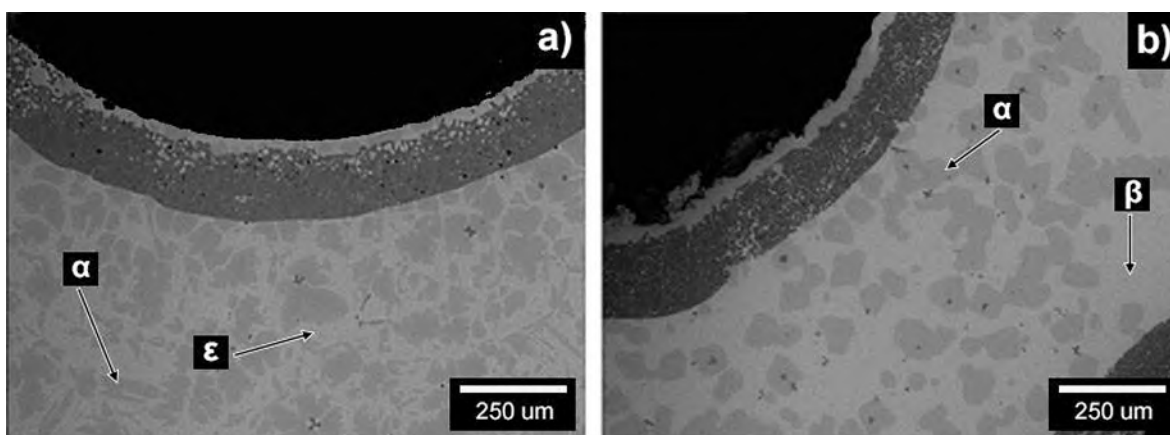


Fig. 52 Micrografías de las microestructuras de las espumas sintácticas, a) sin tratamiento, b) con tratamiento térmico.

3.6.2 Compresión

En la Fig. 53 podemos observar las curvas de compresión superpuestas para las espumas sintácticas sin (curva roja) y con tratamiento térmico (curva negra). El comportamiento de ambas curvas corresponde a materiales frágiles, corroborándolo al analizar las regiones de meseta de ambas curvas, ya que éstas presentan oscilaciones pronunciadas donde los poros se desintegran. En estos materiales la fragilidad es causada por la combinación de una alta porosidad y las paredes delgadas de las esferas huecas. No obstante, las espumas sin tratar presentan una caída más pronunciada después del máximo de compresión, lo que representa que es una espuma más frágil, rompiéndose en esta primera caída una mayor cantidad de paredes entre poros. También se aprecia que la espuma tratada presenta mejores propiedades mecánicas, incluyendo la ductilidad, con esfuerzos de fluencia y compresión (230 y 246 MPa) significativamente más altos que en las espumas sin tratar (180 y 195 MPa) respectivamente. Este fenómeno lo atribuimos a que la fase β martensítica es más dura, causando una meseta con tendencia ascendente del esfuerzo, ya que una matriz más dura necesita un mayor esfuerzo para ser deformada. La espuma tratada mostró una región de meseta más corta,

dando inicio a la zona de densificación a partir del 40 % de deformación aproximadamente, comparado con el inicio de la densificación en la espuma sin tratar en un 60% de deformación. Igualmente, la estructura globular de la matriz Cu₂₀Sn y la presencia de la fase bcc- β favorecieron una mayor ductilidad comparada con la espuma sin tratar. La fragilidad de la espuma sin tratar se atribuye a que la fractura de las paredes es más catastrófica, esto asociado a la fragilidad de la aleación atribuida a la fase ϵ ortorrómbica en lugar de la fase bcc- β y la presencia de la microestructura sin modificar. La información obtenida de las gráficas de compresión, combinada con la densidad reducida de las espumas (4.5 g/cm³) hacen que las espumas sintéticas sean materiales muy atractivos para aplicaciones donde sea requerido gran capacidad de absorción de energía y elevada resistencia, con un peso menor al de un metal sólido.

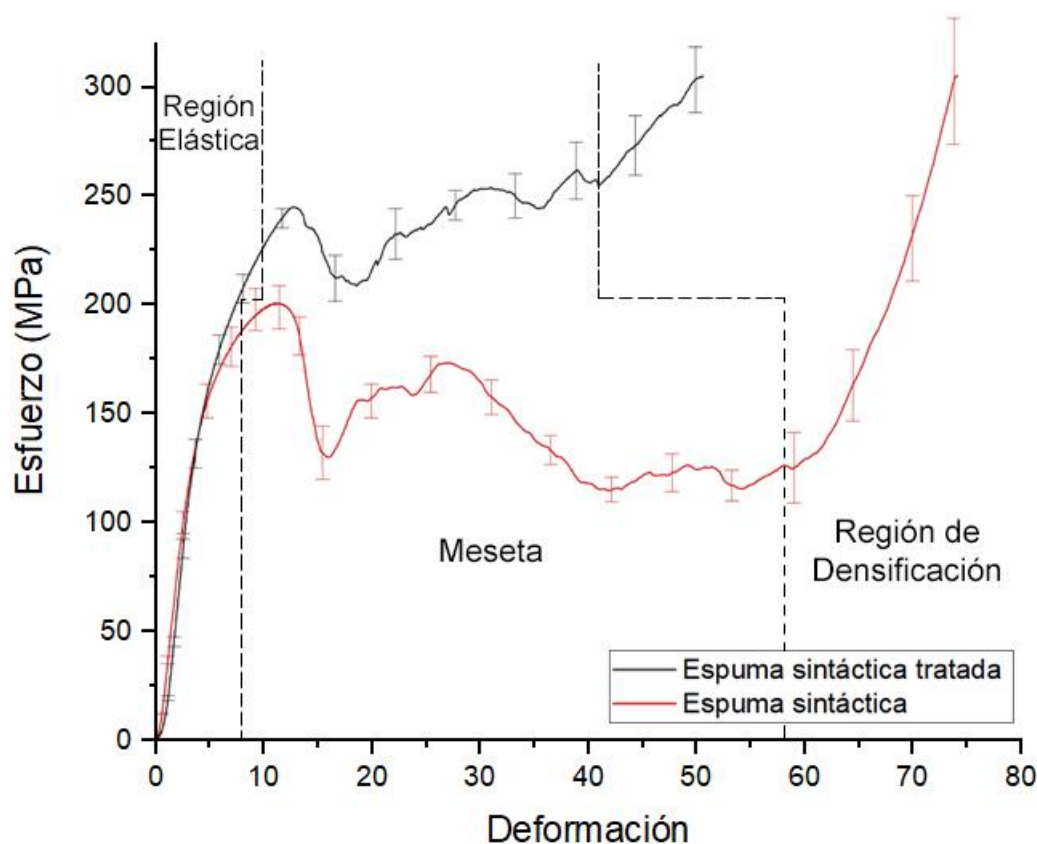


Fig. 53 Curvas esfuerzo deformación para las espumas sintéticas con y sin tratamiento térmico.

3.7 Espumas convencionales

Al igual que en las espumas sintácticas se lograron obtener de forma exitosa espumas metálicas convencionales, después de encontrar los parámetros de fabricación correctos. En este caso el parámetro más difícil de encontrar fue el tiempo en que el metal líquido iba a permanecer antes de ser forzado a infiltrar con gas argón. Las espumas se fabricaron utilizando una temperatura de fusión superior a la temperatura de fusión de la aleación, para lo cual se seleccionó 950°C . En este caso, el proceso de fabricación consistió en la infiltración de la aleación de Cu sobre las partículas de K_2SO_4 . En la Fig. 54 a podemos observar una espuma después de ser desmontada, en la cual se puede apreciar que aun las partículas de sulfato de potasio se encuentran dentro de la espuma. Para retirarlas, se sumergió la espuma en agua, lo que originó su completa disolución, como se puede apreciar en la Fig. 54 b-c. En estas imágenes las espumas ya fueron maquinadas de acuerdo con la norma ASTM E9-89a, por lo que sus dimensiones fueron las mismas que las obtenidas para las espumas sintácticas (25 mm de altura y 30 mm de diámetro). En las espumas se puede apreciar una estructura porosa uniformemente distribuida en todo el volumen. Asimismo, se aprecia que la porosidad obtenida es de tipo celda abierta o interconectada, ya que cada poro de la espuma está conectado con por lo menos otro poro. En la Tabla 7 se presentan algunos de los resultados obtenidos mediante el análisis de las probetas fabricadas. La densidad obtenida de las espumas presenta una reducción considerable comparándolas con la aleación en bruto (8.9 g/cm^3). La porosidad del 64% nos indica que casi $2/3$ del volumen total son poros interconectados, esto explica por qué la densidad de las espumas (3.34 g/cm^3) es aproximadamente una tercera parte de la densidad de la aleación en bruto. El espesor de pared promedio resultó ser de $\sim 1.67 \text{ mm}$ lo cual indica que las paredes que separan los poros son delgadas, este espesor proporciona equilibrio entre rigidez y ligereza, sin embargo, es el alto grado de porosidad lo que se le atribuye la disminución en la densidad.

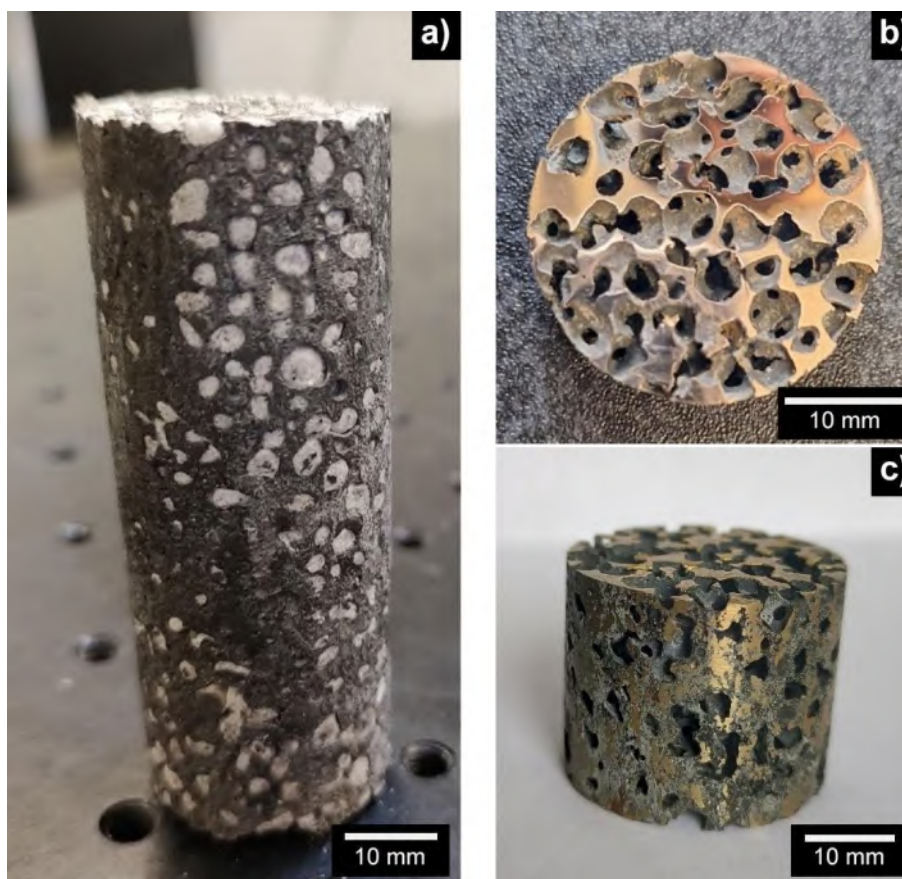


Fig. 54 Espumas metálicas convencionales de celda abierta fabricas con la aleación Cu20Sn, a) con el espaciador en su interior, b) vista superior sin espaciador, c) vista isométrica sin espaciador.

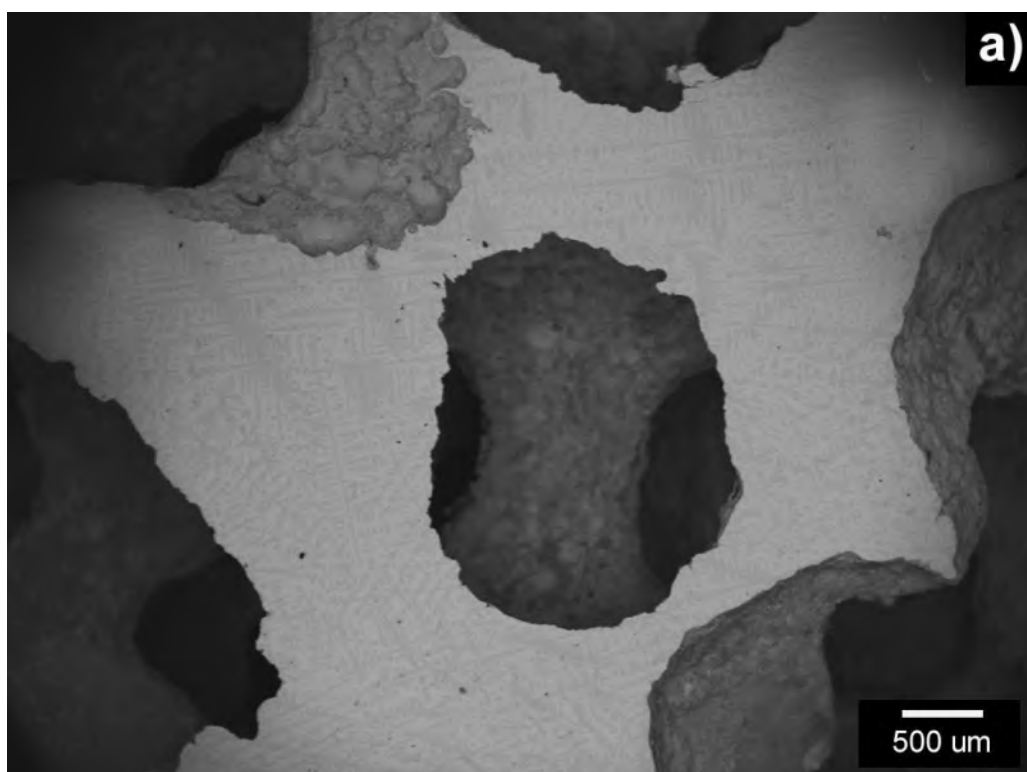
Tabla 7 Características físicas de las espumas convencionales de la aleación Cu20Sn.

Altura (mm)	Diámetro (mm)	Densidad (g/cm ³)	Porosidad (%)	Densidad relativa	Espesor de pared de espuma (mm)
25 ± 1.00	30 ± 0.20	3.34 ± 0.30	64 ± 3.00	0.37 ± 0.04	1.67 ± 0.14

3.7.1 Caracterización microestructural

En la Fig. 55 se muestran micrografías obtenidas mediante microscopio electrónico de barrido, donde se puede apreciar que la microestructura corresponde a la

microestructura dendrítica de aleación as cast, en donde encontramos las fases $\alpha(\text{Cu})$ y $\epsilon(\text{Cu}_3\text{Sn})$. En la Fig. 55 a se puede apreciar la macroestructura de la espuma, donde podemos observar principalmente la interconexión de los poros, se puede observar la superficie irregular dentro de los poros, resultado de la eliminación del agente espaciador. En la Fig. 55 b se observa de forma más clara la microestructura dendrítica, además de la presencia de manchas negras en la matriz, lo cual nos indica la posible formación de un compuesto resultante entre la matriz de la espuma y el espaciador utilizado (K_2SO_4), por lo cual se realizaron análisis elementales que describimos a continuación.



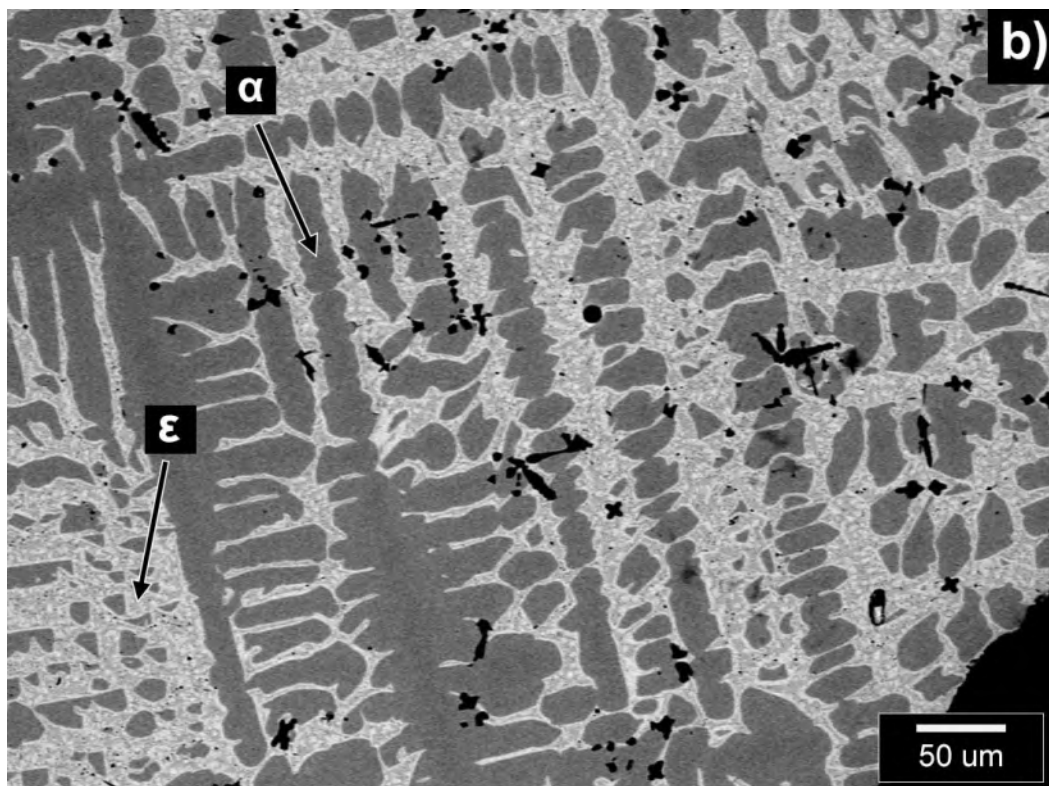


Fig. 55 Micrografías de la espuma convencional de la aleación Cu₂₀Sn mostrando, a) poros interconectados baja, b) microestructura de la matriz.

3.7.2 Análisis elemental

3.7.2.1 Espectro EDS

La Fig. 56 muestra el espectro EDS obtenido mediante el uso de microscopio electrónico de barrido de la espuma metálica de la Fig. 55b. En el espectro se observan los picos característicos de cobre y estaño en proporciones similares a las de la aleación en bruto (78 y 21% respectivamente). Igualmente, se registran picos de azufre, lo cual nos puede indicar la formación de compuestos con el Cu o Sn en forma de posibles sulfuros, o como contenido residual atribuible a remanentes del proceso de eliminación de la partícula espaciadora. No se registraron picos de O ni de K, lo que muestra que no existen estos elementos en las fases formadas.

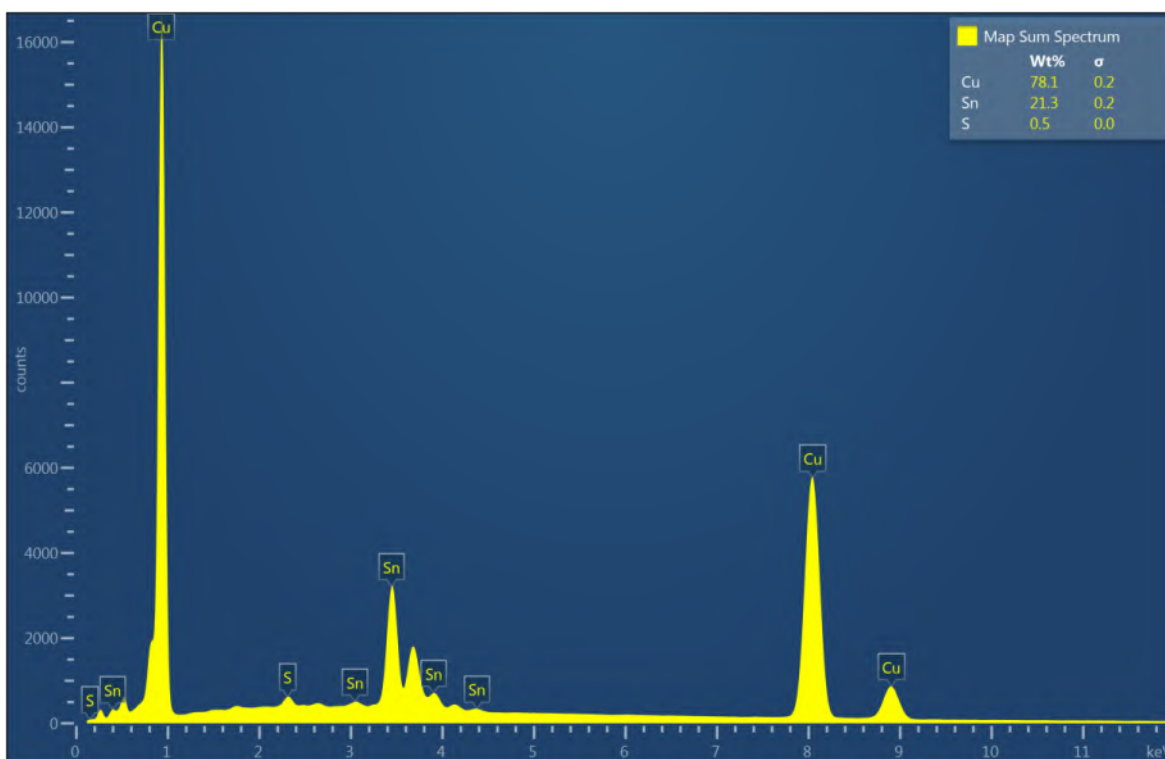


Fig. 56 Espectro EDS para la espuma convencional.

3.7.2.2 Mapeo elemental

En la Fig. 57 se observa el mapeo elemental de la espuma metálica, en donde se muestra la distribución de los elementos Cu, Sn y S. El color rojo (Cu) domina en casi toda la sección analizada indicando que es el elemento dominante en proporción en la matriz metálica, la intensidad uniforme indica que este elemento está distribuido de manera homogénea y uniforme. De igual forma el color verde (Sn) aparece de manera homogénea en toda la matriz metálica. El color azul (S) se ve distribuido en forma de manchas o puntos dispersos dentro de la matriz metálica.

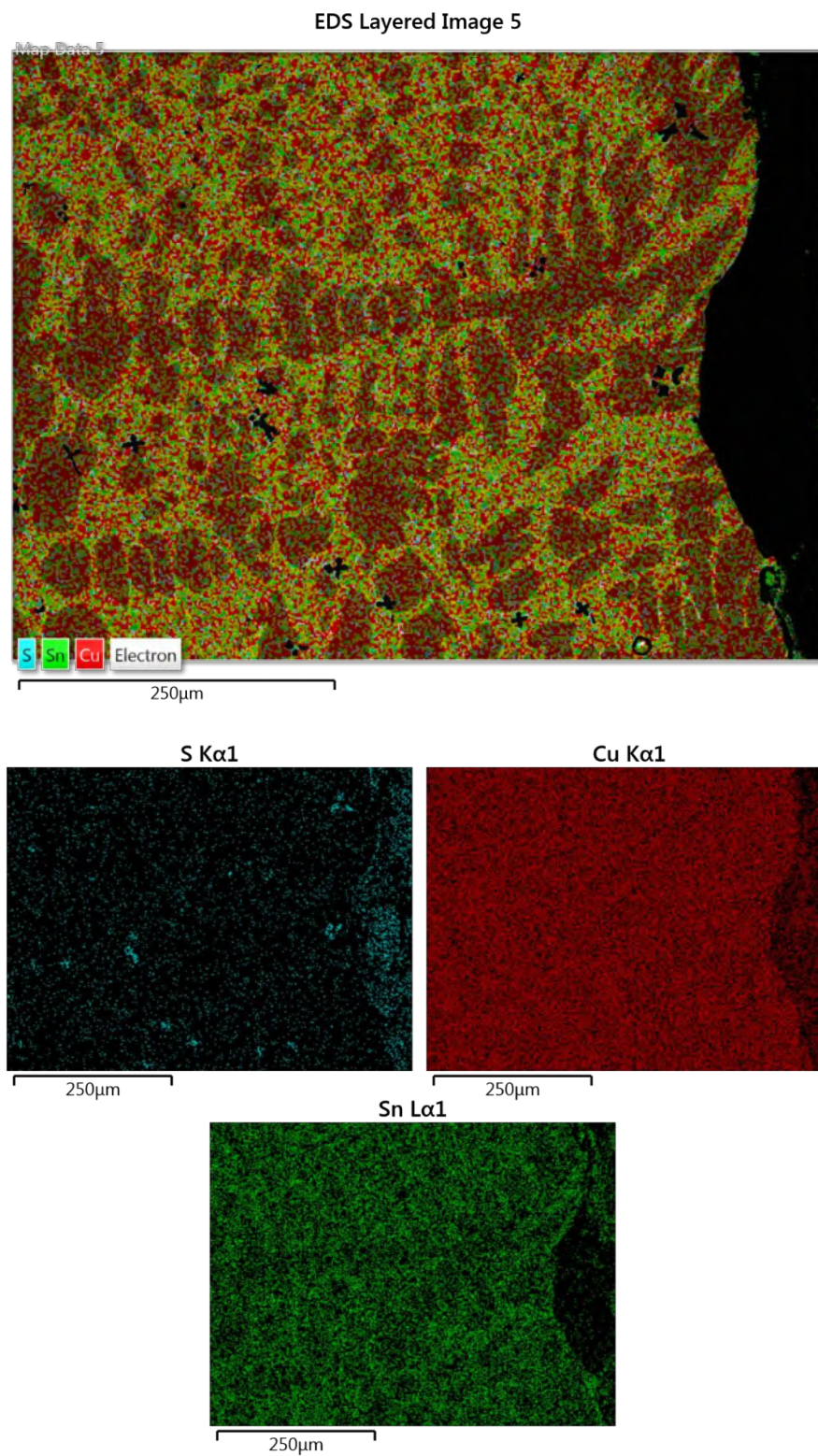
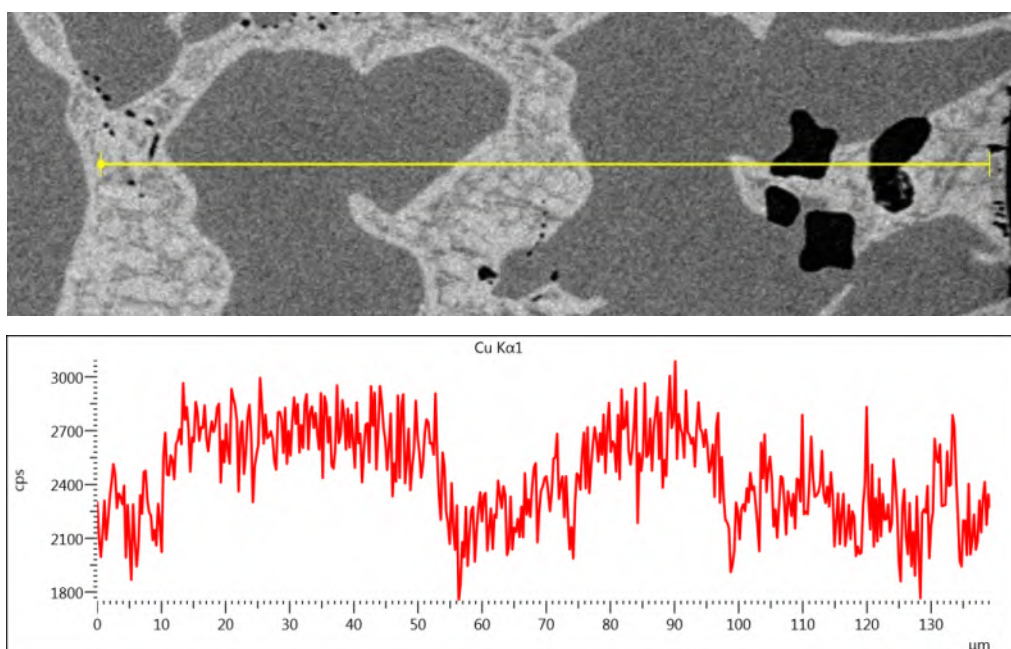


Fig. 57 Mapeo químico elemental de la espuma convencional.

3.7.2.3 Line Scan

La Fig. 58 muestra el análisis de line scan realizado en la micrografía mostrada, en donde observamos cómo varían las concentraciones de Cu, Sn y S a lo largo de la línea amarilla trazada. La señal de cobre se mantiene de forma estable a lo largo de la línea amarilla con alteraciones moderadas, lo cual indica la distribución homogénea de este elemento en la matriz. La señal de azufre muestra presencia casi inexistente en casi todo el trayecto de la línea amarilla, pero cercano a las 100 y 120 μm se observan picos muy marcados, mostrando su contenido en las partículas negras. La señal de estaño es relativamente constante en el transcurso del trayecto, pero muestra descensos en las zonas donde se detecta un incremento de azufre. Esto puede indicar que las manchas negras en la matriz metálica puede ser una fase formada principalmente por Cu y S. No se detectaron contenidos de O o de K, lo que indica que estas partículas solo contienen Cu y S, lo que analizaremos a continuación. El contenido de las fases es 45 % de fase α y 54.2 % de fase ϵ y 0.8 % del compuesto formado por Cu y S, el cual no afecta las propiedades de la espuma ya que se encuentra en una proporción muy baja.



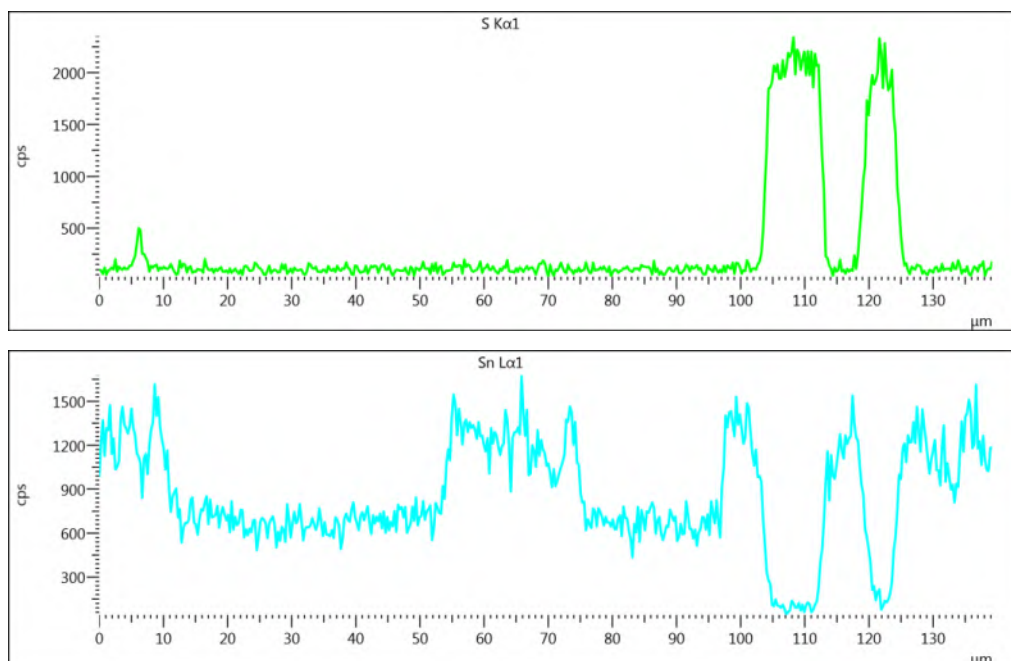


Fig. 58 Line Scan obtenido por EDS de la espuma convencional sobre la matriz metálica.

3.7.2.4 Difracción de rayos x

El difractograma de la Fig.59 muestra la presencia de tres fases principales en la aleación Cu₂₀Sn, con remanentes de S, analizada con anterioridad. Principalmente encontramos las fases ϵ (Cu₃Sn) y α (Cu), la cual es la fase predominante representada por el pico más intenso cerca de los 43°. Finalmente se logró la identificación de la fase resultante debido a la interacción entre la matriz y el azufre presente en el sulfato de potasio, ya que se detectaron picos de la fase Cu₂S (corresponde a sulfuro de cobre). Su presencia se explica por el uso de la partícula espaciadora (K₂SO₄), en la cual el azufre se combina con el cobre de la matriz para formar el sulfuro. La cantidad de esta fase es despreciable (0.8% aproximadamente) por lo que no representaría una limitante para obtener propiedades mecánicas elevadas.

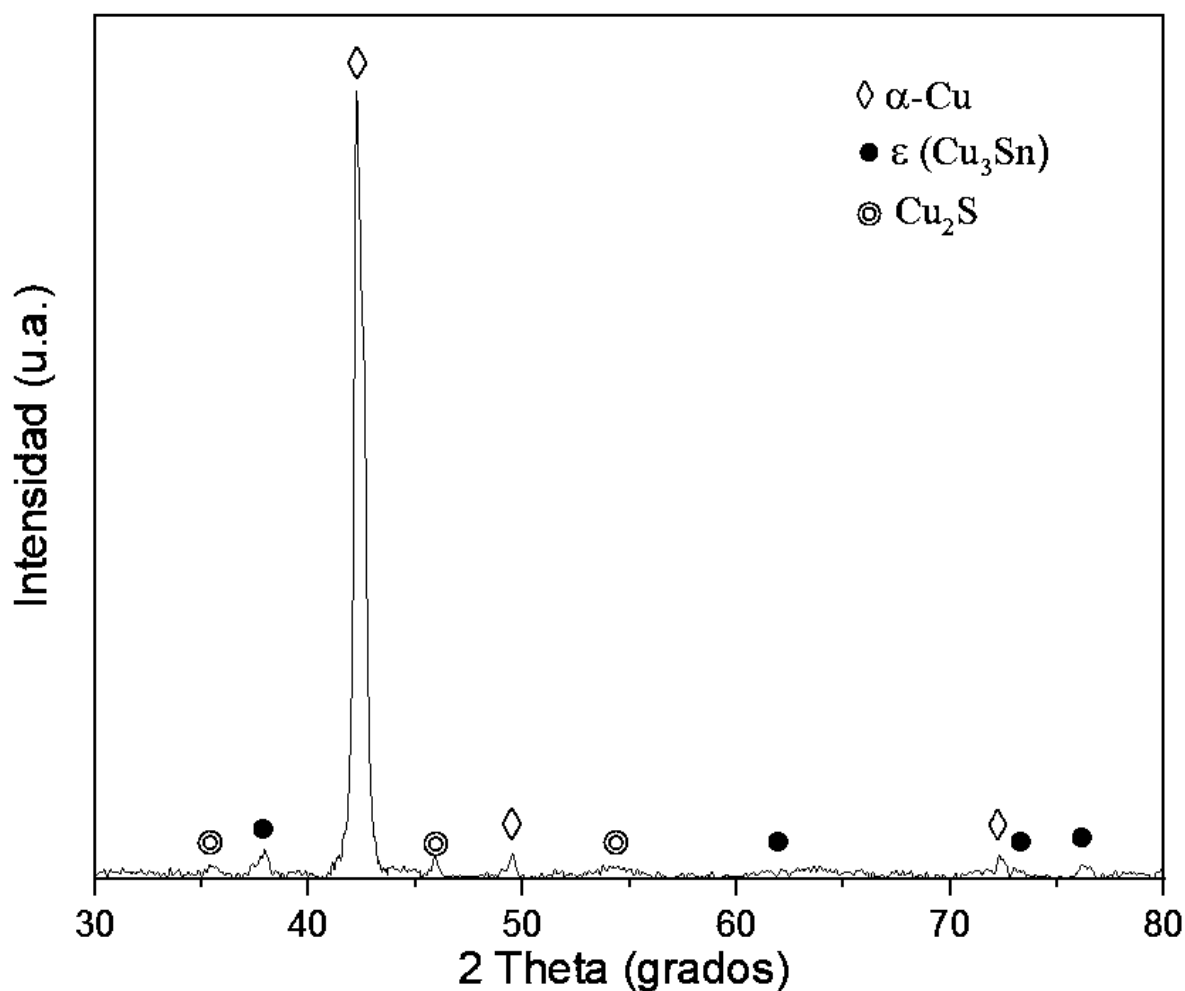


Fig. 59 Difractograma para la espuma convencional fabricada con la aleación Cu20Sn y partículas espaciadoras de sulfato de potasio.

3.7.3 Caracterización mecánica (compresión)

Como parte de la caracterización de las espumas metálicas convencionales de celda abierta se llevaron a cabo pruebas de compresión uniaxial, para lo cual se utilizaron probetas con las dimensiones descritas en la Tabla 7. La Fig. 60 muestra una gráfica de esfuerzo-deformación con desviación estándar obtenida de haber repetido por lo menos 3 veces la prueba. La grafica muestra las 3 regiones características de una gráfica esfuerzo deformación para espumas metálicas: la región elástica, región de meseta y zona de densificación. En esta curva, la región

elástica comprende aproximadamente de 0 a 4% de deformación, parte que está relacionada con el módulo de Young del material, del cual se obtuvo un valor de 4.81 GPa. Este valor es mucho más pequeño que el de la aleación en estado bruto, pero es un valor lógico debido al alto grado de porosidad de la espuma. Igualmente podemos obtener el valor de la resistencia a la fluencia, el cual se encuentra cerca de los 14 MPa y un valor de la resistencia a la compresión máximo de 16 MPa. Después de este pico inicia el colapso de las celdas de la espuma. La región de la meseta comprende un rango de deformación de entre 4 y 73% de deformación. Este amplio rango de deformación es típico de una espuma metálica con alta porosidad, además de que esta zona de la curva nos permitió hacer el cálculo de absorción de energía el cual fue de $2.9 \pm 1.3 \text{ MJ/m}^3$. Finalmente, como región 3 encontramos la zona de densificación, que comienza alrededor del 73% de deformación hasta el final de la gráfica. La Tabla 8 muestra en resumen los datos obtenidos del análisis de la gráfica.

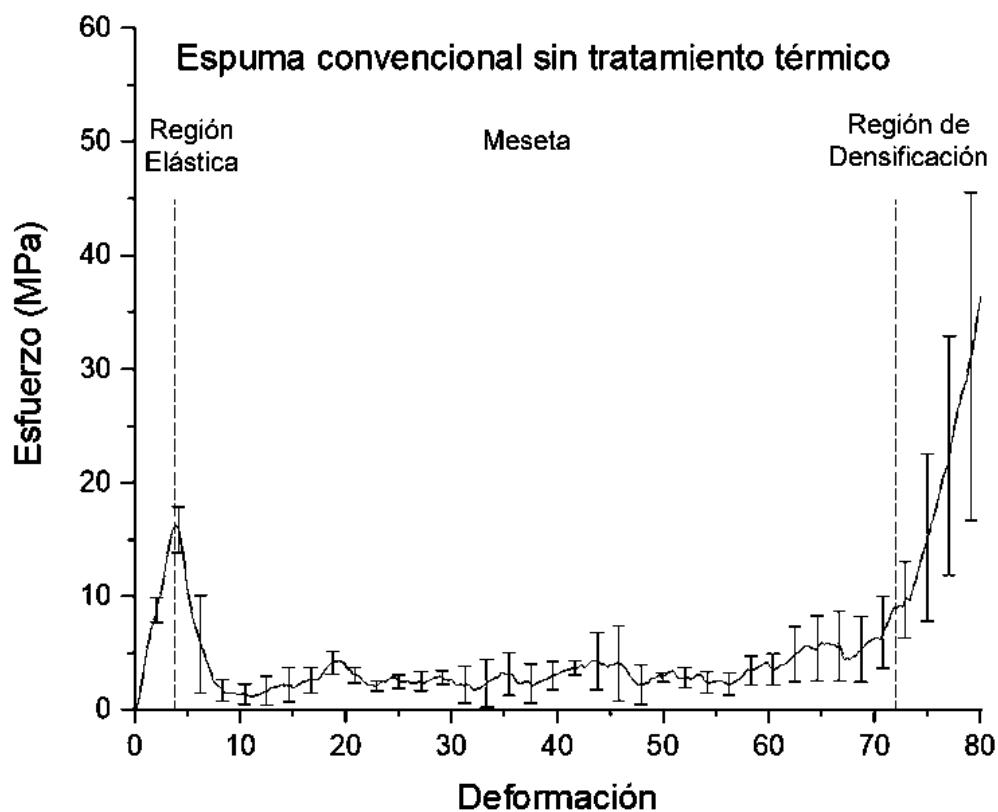


Fig. 60 Gráfica del comportamiento mecánico bajo compresión de las espumas convencionales.

Tabla 8 Propiedades mecánicas de las espumas convencionales de la aleación Cu20Sn.

Densidad (g/cm ³)	Módulo de Young (GPa)	Esfuerzo de compresión (MPa)	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Absorción de energía (MJ/m ³)	Deformación de densificación (%)
3.34 ± 0.30	4.81 ± 0.30	16 ± 2.00	14 ± 1.40	2.9 ± .13	73 ± 3.00

3.8 Espumas convencionales con tratamiento térmico

Para modificar la microestructura y obtener propiedades diferentes a las de la espuma en bruto, se realizó un tratamiento térmico de solubilización a 750°C seguido de un temple a 3 muestras de las espumas fabricadas. En la Tabla 9 se presentan algunos datos obtenidos de las espumas a nivel macroscópico, las dimensiones de las probetas fabricadas fueron cilindros de 25 mm de altura y 30 mm de diámetro de acuerdo a la norma ASTM E9-89a. El valor de densidad obtenido fue de 3.34 g/cm³, si bien es un valor bastante bajo comparado con la densidad de la aleación Cu20Sn corresponde con el valor de la porosidad de la espuma, ya que el sólido en la espuma es aproximadamente 1/3 del volumen total. El espesor de pared de la espuma es bastante delgado, esto se atribuye a un alto grado de porosidad y gran tamaño de poro.

Tabla 9 Características físicas de las espumas convencionales tratadas térmicamente de la aleación Cu₂₀Sn.

Altura (mm)	Diámetro (mm)	Densidad (g/cm ³)	Porosidad (%)	Densidad relativa	Espesor de pared de espuma (mm)
25 ± 1.00	30 ± 0.20	3.34 ± 0.20	64 ± 3.00	0.36 ± 0.05	1.75 ± 0.14

3.8.1 Caracterización microestructural

En la Fig. 61 se muestran micrográficas obtenidas por microscopio electrónico de barrido, primeramente, apreciándose el sistema poroso de las espumas, además de la microestructura con las fases presentes α (Cu) siendo esta la fase más oscura y β (Cu₁₇Sn₃) fase clara, como podremos observar más adelante. Igualmente podemos observar que los poros de las espumas son grandes y están interconectados, siendo esta una espuma de celda abierta. En la Fig. 61 b podemos observar la microestructura a un mayor aumento en donde podemos apreciar los cambios en la morfología de las fases. Se pueden observar vestigios de lo que fueron dendritas de la aleación en bruto, ya que la aplicación del tratamiento térmico ocasiono un proceso de fragmentación de las dendritas, cambiando su morfología a fases en forma de bloque con distinta relación de aspecto. También podemos observar la presencia de manchas negras en el interior de la matriz de la aleación Cu₂₀Sn, lo que coincidió con lo observado antes del tratamiento térmico, lo que comprueba que este proceso no provocó cambios en el sulfuro de cobre anteriormente identificado. El contenido de las fases es 32% de fase α , 67.1% de fase β y 0.9% de sulfuro de cobre.

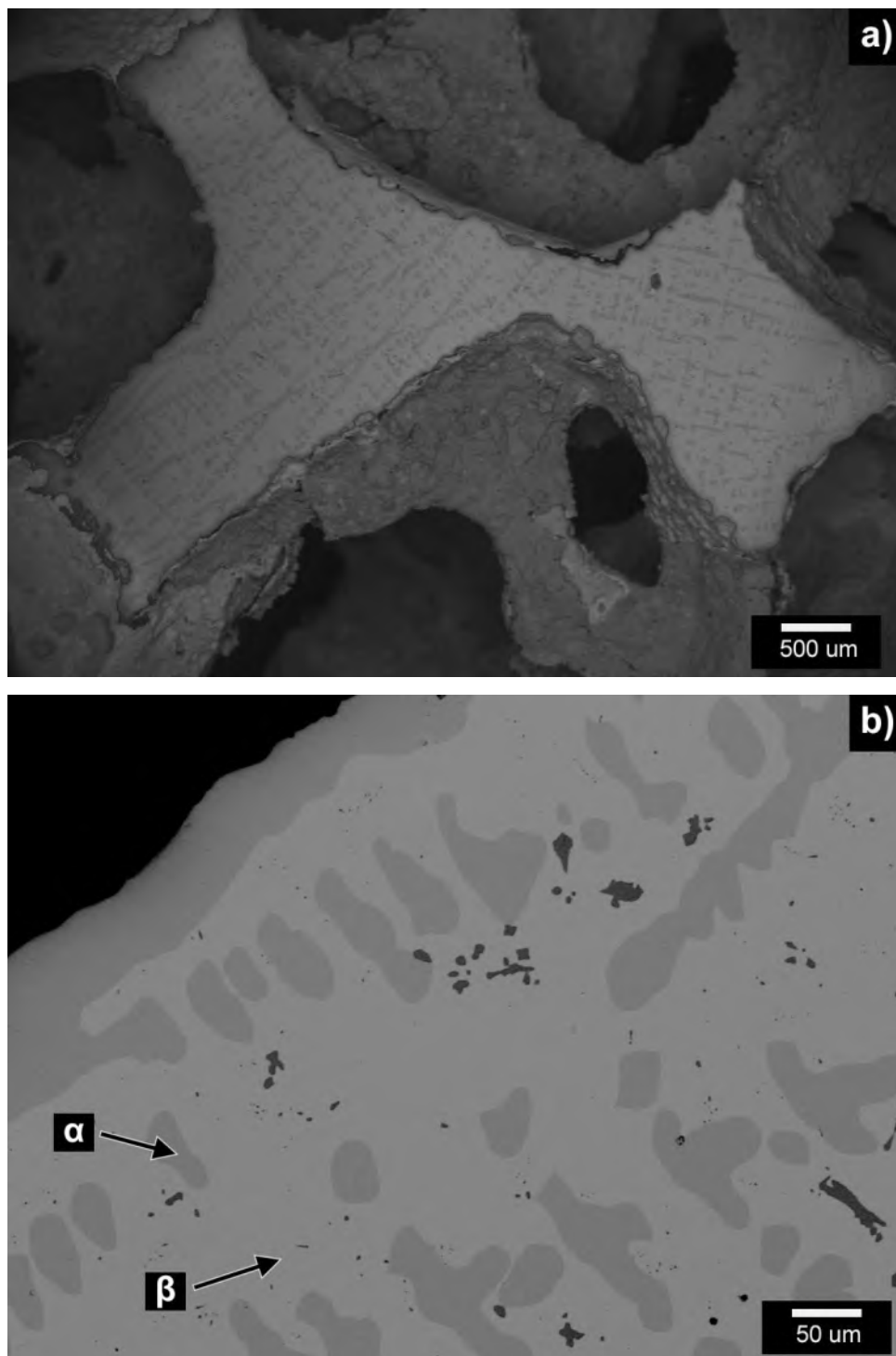


Fig. 61 Micrografías de la espuma convencional tratada térmicamente de la aleación Cu₂₀Sn, mostrando a) el sistema poroso, b) la microestructura obtenida.

3.8.2 Análisis elemental

3.8.2.1 Espectro EDS

En el espectro de energía dispersiva de rayos x (EDS) mostrado en la Fig. 62 se pueden observar picos de los elementos Cu, con un porcentaje en peso de 80.5%, esto sugiere que es el componente mayoritario en la matriz, también encontramos picos de Sn, en aproximadamente un 19% en peso, esto indica la presencia de una fase típica del bronce (CuSn). Además, se detectó un contenido residual de S en porcentaje en peso de 0.2%. Comparado con la espuma convencional sin tratamiento térmico esta cantidad de S prácticamente permaneció en el mismo porcentaje, lo cual indica que la formación del sulfuro de cobre ocurre durante la fundición del metal y la infiltración y no durante el tratamiento térmico.

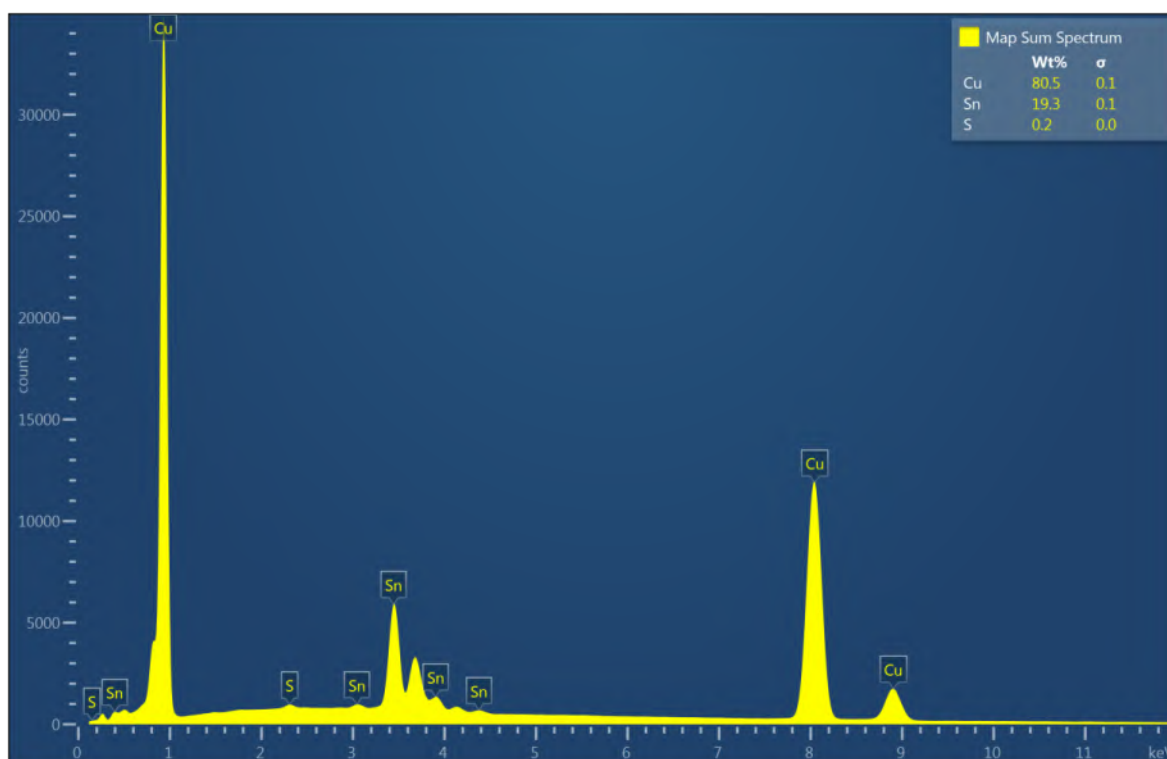
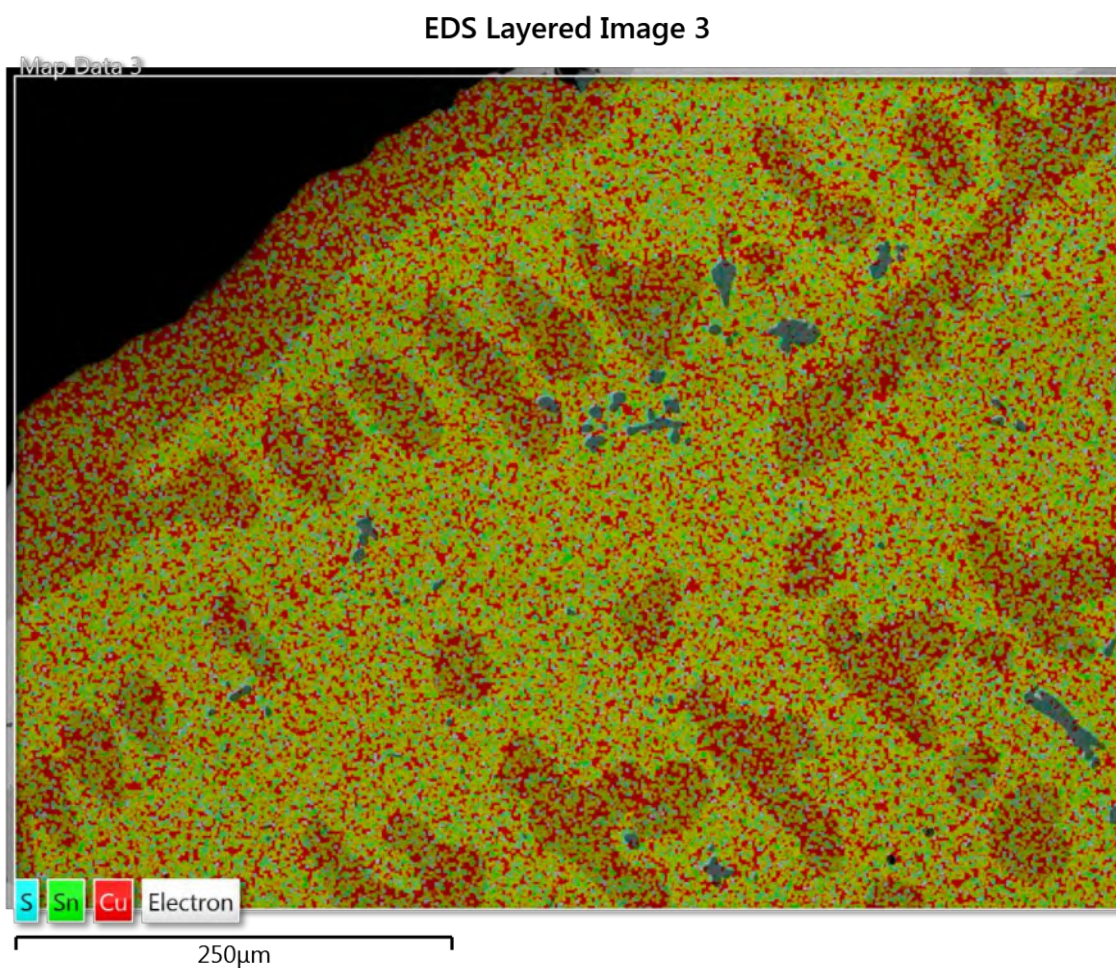


Fig. 62 Espectro EDS para la espuma convencional tratada térmicamente.

3.8.2.2 Mapeo elemental

En el mapeo elemental mostrado en la Fig. 63 se muestran los 3 elementos detectados en el espectro EDS mostrado en la Fig.62, Cu, Sn y S en los colores rojo, verde y azul respectivamente. Los elementos cobre y estaño se aprecian uniformemente distribuidos de manera homogénea en toda la superficie analizada, sin indicios de tener segregaciones o acumulaciones localizadas. Por otra parte, se pueden apreciar pequeñas acumulaciones de azufre en forma de manchas o puntos dispersos en la matriz metálica.



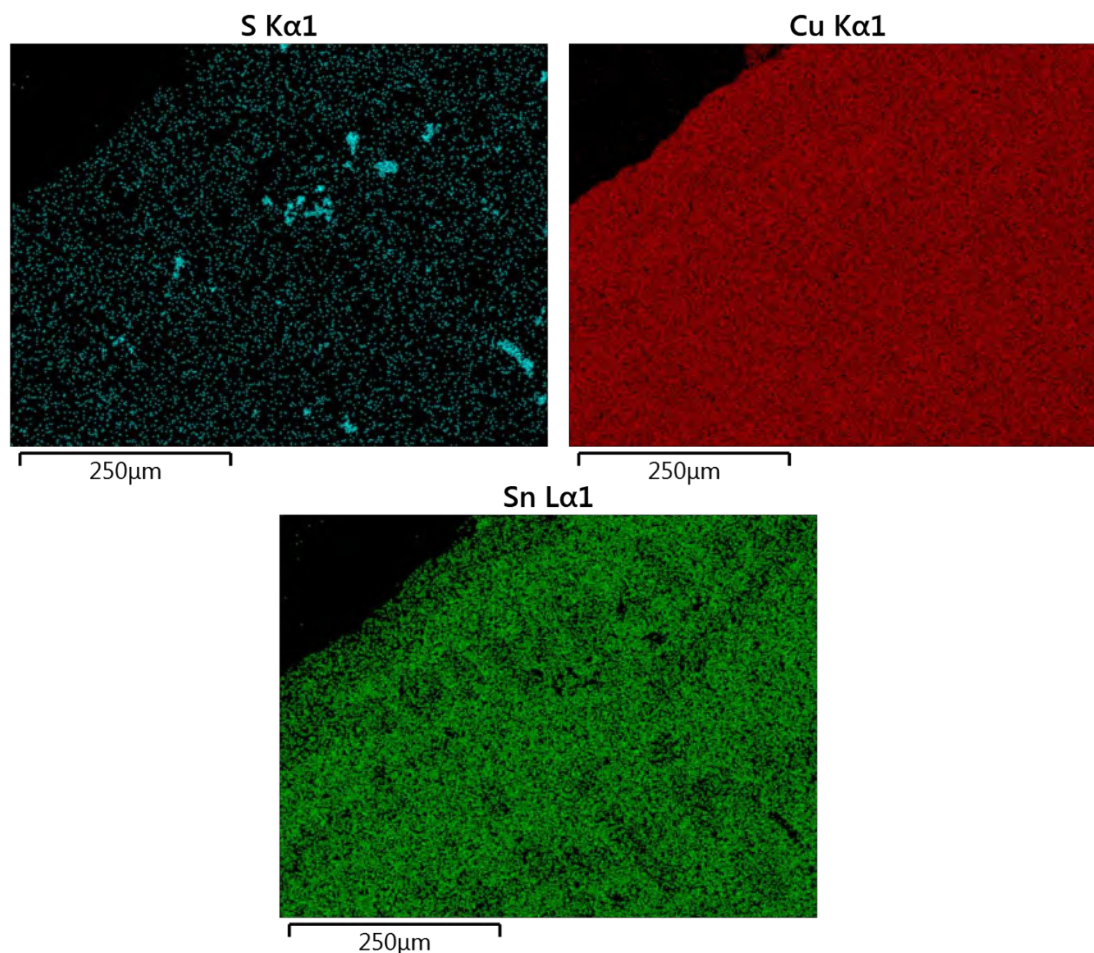


Fig. 63 Mapeo químico elemental de la espuma convencional tratada térmicamente.

3.8.2.3 Line Scan

En el line scan presentado en la Fig. 64 se presentan las gráficas donde se han registrado las intensidades de Cu, Sn y S en función de la distancia señalada por la línea amarilla sobre la micrografía. El comportamiento del Cu a lo largo de la línea de análisis presenta variaciones moderadas, pero permanece en un intervalo relativamente constante. El estaño presenta variaciones a lo largo de la línea de análisis, lo que nos permite identificar las fases ricas en cobre (en este caso las fases de color gris oscuro). Además, podemos observar el descenso repentino de estaño en las zonas de 200 y 220 μm, donde coincide con la aparición de los picos de azufre. La presencia de azufre a lo largo de la región de estudio es casi nula con

excepción de la zona entre las 200 y 220 μm donde se presentan picos muy marcados, la relación inversa entre los picos de Sn y S nos indica que los puntos negros son fases formadas entre Cu y S.

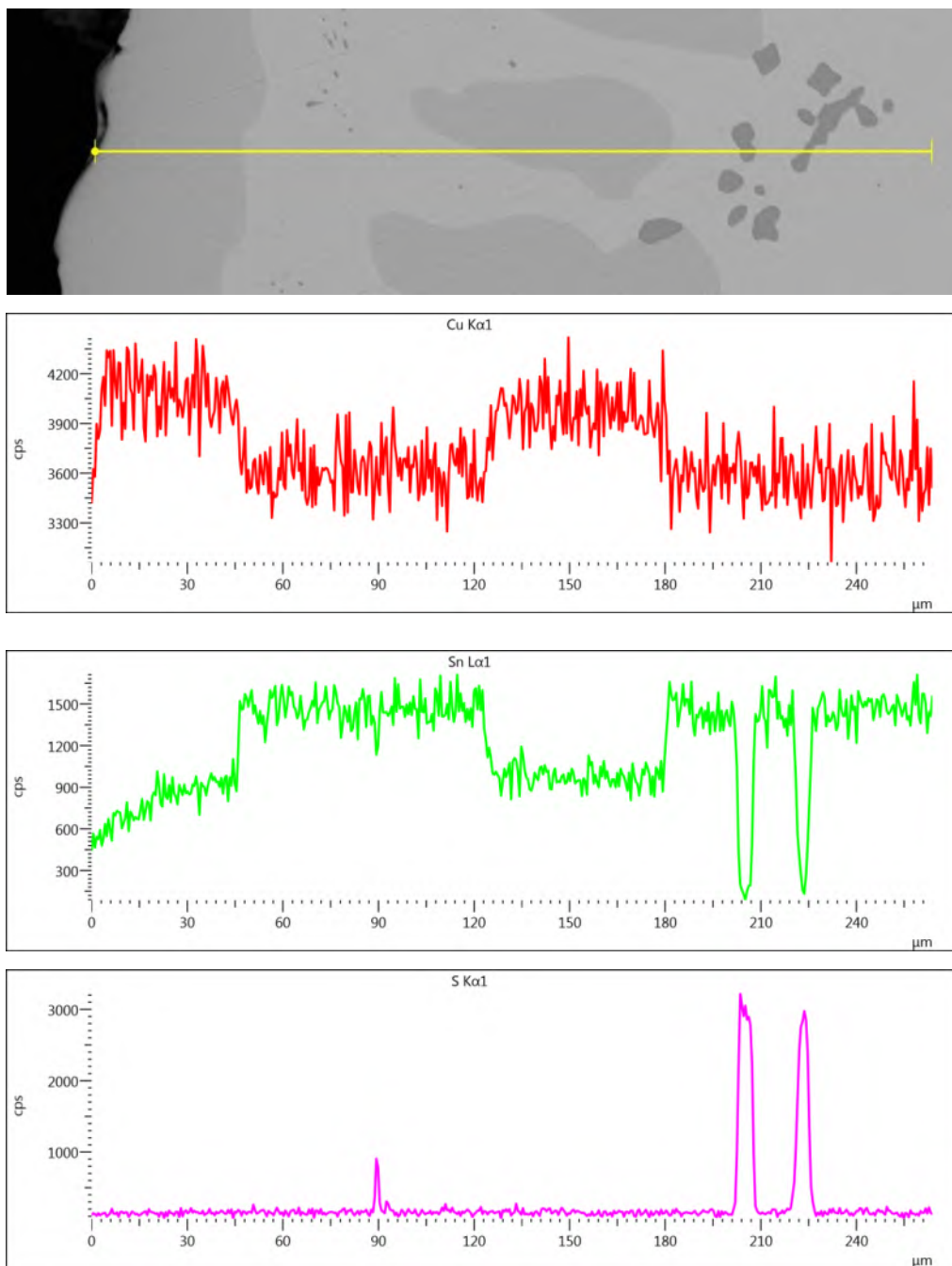


Fig. 64 Line Scan obtenido por EDS de la espuma convencional tratada térmicamente sobre la matriz metálica.

3.8.2.4 Difracción de rayos x

En el difractograma de rayos x de la Fig. 65 se identifican tres fases principales en la muestra, la fase α -Cu, la fase β ($\text{Cu}_{17}\text{Sn}_3$) y la fase Cu_2S . La fase α -Cu es la fase mayoritaria en la muestra, con el pico más intenso en el ángulo 42 aproximadamente. La presencia de los picos de la fase β ($\text{Cu}_{17}\text{Sn}_3$) nos indican que el tratamiento térmico que se realizó se hizo de manera correcta. La identificación de los picos de Cu_2S nos permitió confirmar la composición de la fase oscura que se aparecía en las micrográficas. Esto corrobora la información obtenida previamente en el espectro EDS, mapeos, line scan y lo observado en las micrográficas.

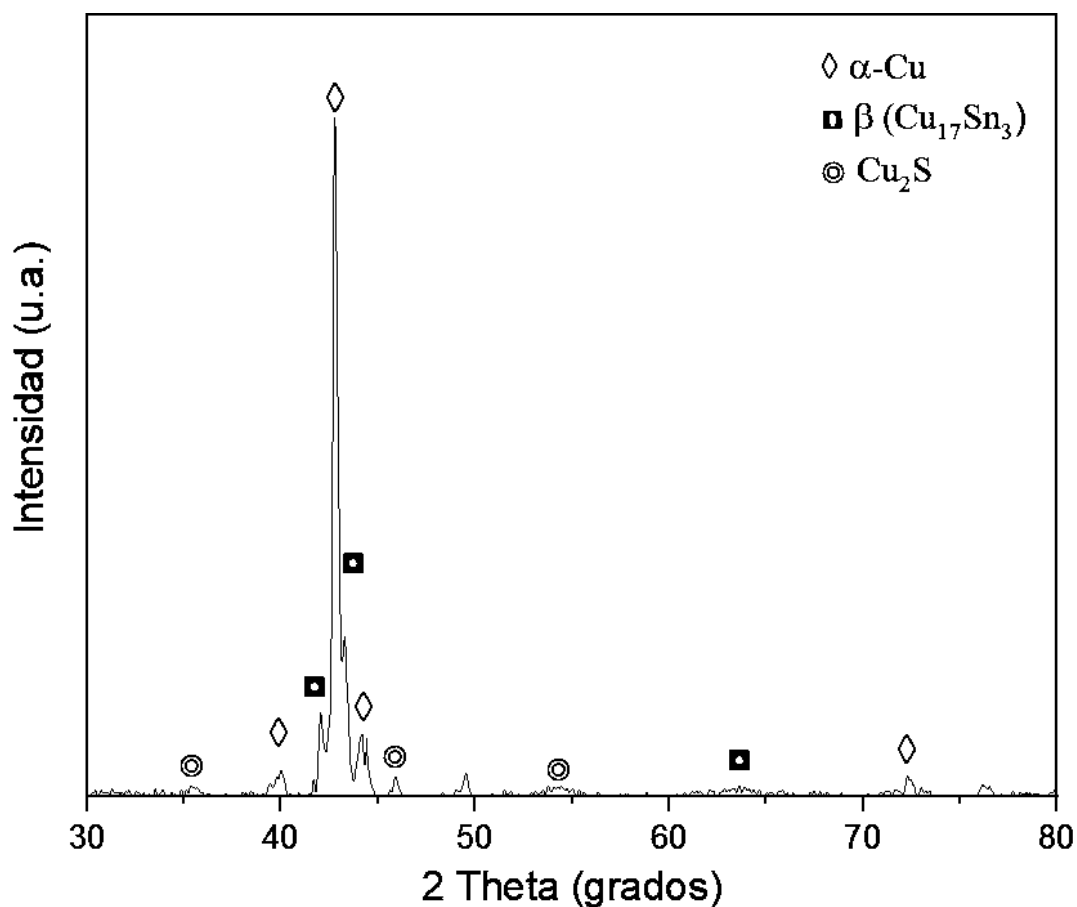


Fig. 65 Difractograma para la espuma convencional tratada térmicamente fabricada con la aleación Cu_{20}Sn y partículas espaciadoras de sulfato de potasio.

3.8.3 Caracterización mecánica (compresión)

La Fig. 66 muestra una gráfica esfuerzo deformación de la espuma metálica convencional tratada térmicamente. En este caso no se presenta una caída abrupta de la resistencia al sobrepasar el máximo de compresión, lo que muestra que esta espuma es del tipo dúctil, como analizaremos de manera comparativa más adelante. Se puede apreciar la región de la zona elástica, la cual comprende de un 0 a un 5% de deformación aproximadamente. De la parte de la curva perteneciente a la región elástica podemos obtener el módulo de Young, que fue 5.5 GPa. Igualmente encontramos un esfuerzo de fluencia y compresión de 23 y 25 MPa respectivamente. La zona de la meseta se ubica de 5 a 55% de deformación aproximadamente, y es en esta zona donde la espuma absorbe energía, la cual fue de 15 MJ/m³. La tercera zona se identifica como la región de densificación y, en esta gráfica, comienza alrededor del 54% extendiéndose hasta el final de la misma. En la Tabla 10 se encuentra un resumen de las propiedades que podemos obtener de la gráfica.

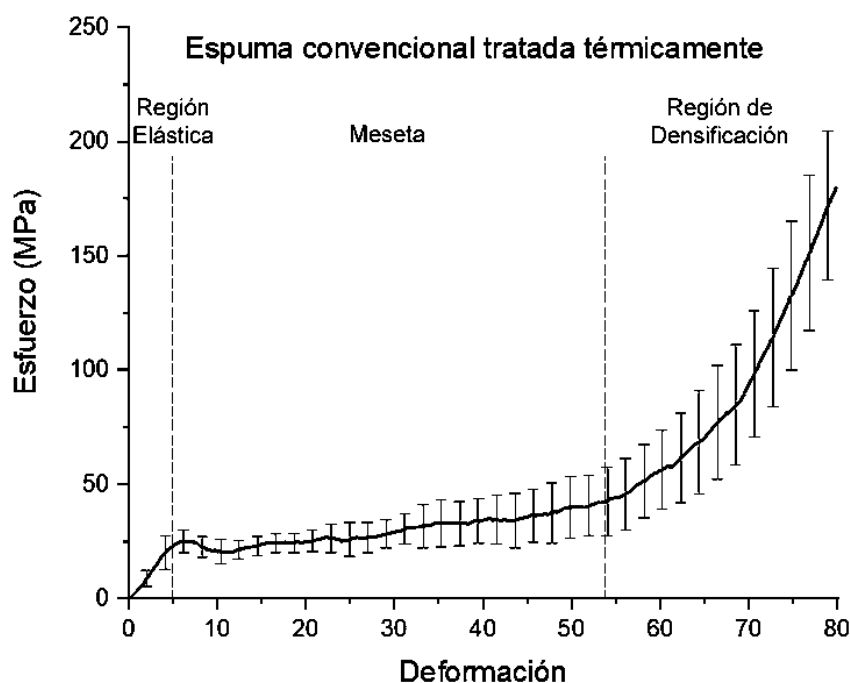


Fig. 66 Gráfica del comportamiento mecánico bajo compresión de las espumas convencionales tratadas térmicamente.

Tabla 10 Propiedades mecánicas de las espumas convencionales tratadas térmicamente de la aleación Cu₂₀Sn.

Densidad (g/cm ³)	Módulo de Young (GPa)	Esfuerzo de compresión (MPa)	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Absorción de energía (MJ/m ³)	Deformación de densificación (%)
2.22 ± 0.2	5.5 ± 0.3	25 ± 4	23 ± 3	15.26 ± 3.21	54 ± 3

3.9 Comparación entre las espumas convencionales

3.9.1 Microestructura

La Fig. 67 muestra las micrografías obtenidas mediante microscopio electrónico de barrido de las espumas convencionales fabricadas por el método de infiltración, se pueden observar cambios significativos en comparación con la aleación en bruto (ver Fig.34). A pesar que la microestructura de la Fig.67a tiene las mismas fases presentes que la aleación as cast podemos apreciar que las dendritas no alcanzaron a formarse completamente debido a la velocidad de solidificación. Mientras que para la micrografía de la espuma tratada térmicamente (Fig. 67 b) la fase α (antes dendritas) se transformó completamente a una fase α en forma de bloque, con relaciones de aspecto diferentes. Durante el tratamiento térmico se disminuyó la fracción de volumen de la fase α del 45% al 32% aproximadamente. Los análisis obtenidos mediante difracción de rayos X revelaron la transformación de la fase ϵ hacia la fase β . Este cambio ocurre debido a la disolución de la fase α en la fase ortorrómbica ϵ , que presenta una composición de 74 % Cu y 27 % Sn. Posteriormente, como resultado del tratamiento térmico, la fase ϵ se transforma en la fase β con estructura cúbica centrada en el cuerpo, con una composición de 86 % Cu y 14 % Sn. Otro fenómeno que se puede apreciar en la Fig. 67b es la

presencia de la fase α en el borde, esto se debe a que durante el tratamiento térmico se favoreció la difusión en estado sólido de la fase α en la matriz de fase β , el gradiente de temperatura entre el poro y la aleación y el porcentaje de fases favorecieron la colocación de esta fase en el borde del poro. También puede apreciarse una menor cantidad del Cu_2S , que disminuyó debido al tratamiento térmico (0.8 y 0.9% respectivamente).

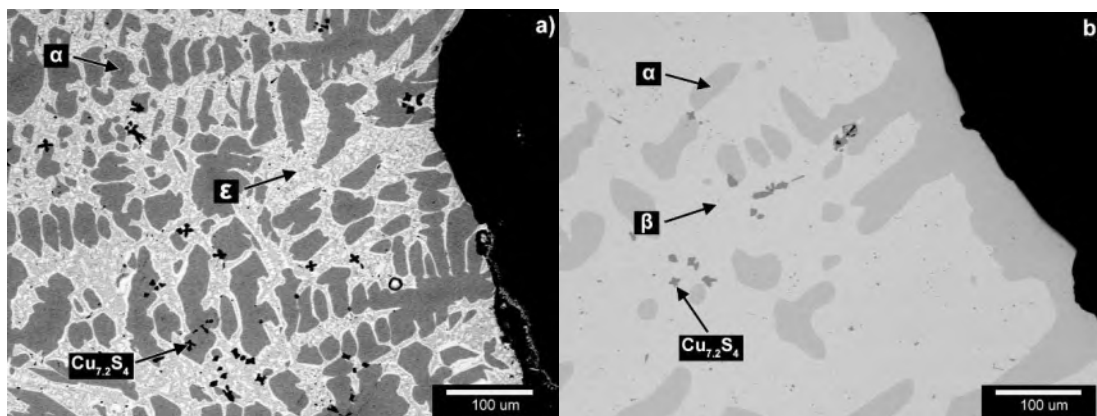


Fig. 67 Micrográficas de la comparación de microestructuras de las espumas convencionales, a) sin tratamiento, b) con tratamiento térmico.

3.9.2 Compresión

En la gráfica de la Fig.68 se compara el comportamiento de compresión de las espumas con y sin tratamiento térmico. Analizando la gráfica podemos destacar lo siguiente: la espuma convencional con tratamiento térmico (línea negra) presenta esfuerzos de fluencia y de compresión de 23 y 25 MPa respectivamente, significativamente más altos que los calculados para la espuma sin tratamiento térmico lo cuales se encuentran en 14 y 16 MPa respectivamente. El aumento continuo del esfuerzo en la región elástica de la espuma convencional tratada indica un módulo de Young mayor (5.5 GPa) que la espuma sin tratamiento (4.8 GPa). El análisis en la zona de la meseta nos indica que la curva roja presenta un colapso de las celdas muy pronunciado, mientras que la espuma tratada no exhibe esta caída, además que presenta un comportamiento donde el esfuerzo va aumentando

de forma paulatina. Este comportamiento de la espuma tratada térmicamente, con mayor resistencia, pero a la vez con mayor ductilidad, es atribuido a la presencia de la fase martensítica β , ya que esta es más dura y necesita un mayor esfuerzo para deformarse. En comparación con la absorción de energía se puede apreciar que el área bajo la curva de la espuma tratada es mucho mayor, lo cual sugiere una mayor capacidad de absorción de energía comparándola con la curva negra, llegando hasta 5 veces más. Finalmente, el comportamiento de ambas curvas corresponde al de un material frágil, sin embargo, podemos decir que de acuerdo al comportamiento creciente de la curva de la espuma tratada esta es más dúctil que la espuma sin tratar, lo que se debe a la morfología de la fase α en forma de bloque, con relaciones de aspecto más cercanas a 1. La presencia de la fase β con estructura cúbica centrada en el cuerpo también le atribuye más ductilidad a esta fase.

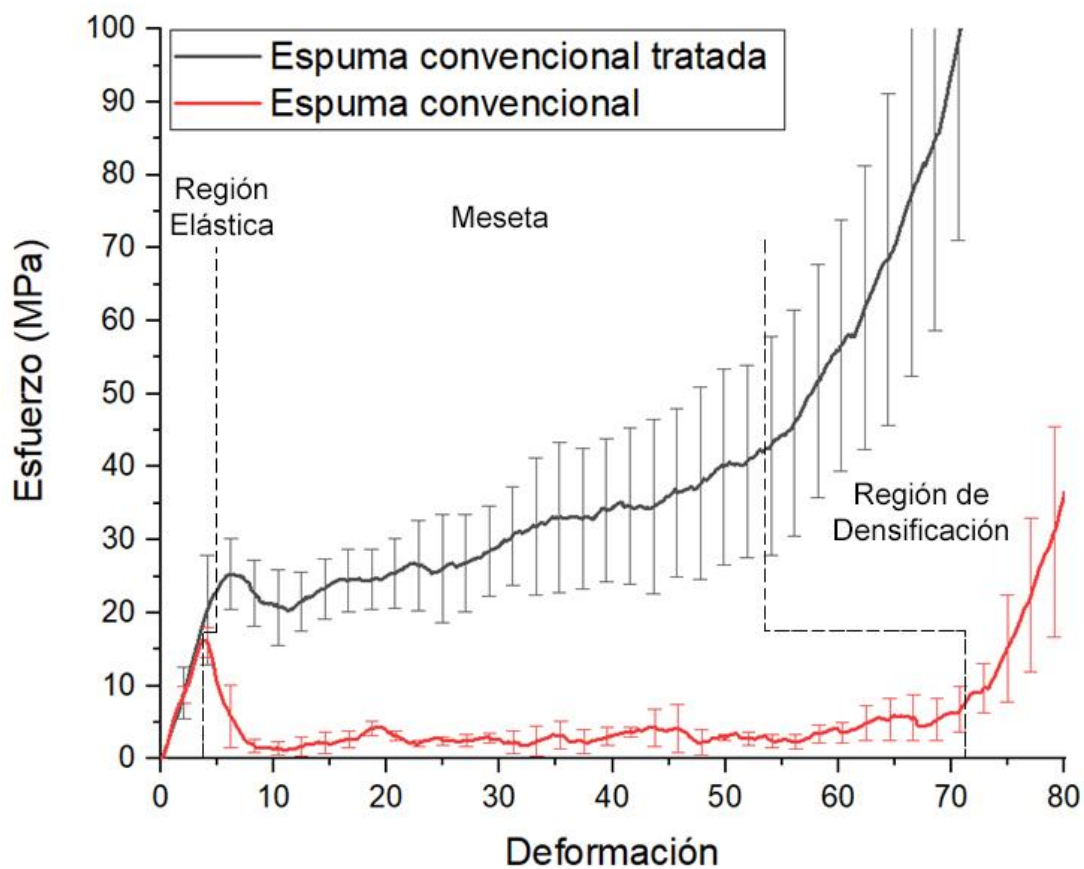


Fig. 68 Curvas esfuerzo deformación para las espumas convencionales con y sin tratamiento térmico.

3.10 Comparación entre espumas sintácticas y convencionales

Finalmente, en la Fig. 69 se presenta un gráfico con las 4 curvas esfuerzo-deformación analizadas para las espumas fabricadas en el presente trabajo. El análisis comparativo permite evaluar y comparar el tipo de estructura (celda abierta vs celda cerrada con material reforzante o sintáctica) y el tratamiento térmico sobre el comportamiento mecánico específicamente en términos de resistencia, absorción de energía y deformación de densificación. Particularmente la espuma sintáctica con tratamiento térmico alcanza el mayor esfuerzo de compresión cercano a los 246 MPa, mientras que las espumas convencionales no sobrepasaron los 30 MPa. Igualmente, en los valores de módulo de Young encontramos diferencias bastante notables, teniendo módulos de elasticidad con valores de 45 GPa para las espumas sintácticas contra 5 GPa para las espumas convencionales

Podemos observar comportamientos distintos en las curvas de los dos tipos de espumas, teniendo mayores fluctuaciones en las espumas sin tratamiento térmico, observando caídas más abruptas después del esfuerzo de compresión, lo cual nos indica que el tratamiento térmico también aumentó la ductilidad de las espumas.

Esta diferencia se debe principalmente tanto del refuerzo estructural inducido por las esferas huecas de Fe como por el endurecimiento debido al tratamiento térmico. Igualmente se pueden observar que en ambas espumas (sintácticas y convencionales) tratadas térmicamente presentan esfuerzos de compresión más altos que las espumas que no fueron tratadas térmicamente, indicando mayor rigidez, además de mesetas más extensas indicando una mayor capacidad de absorción de energía.

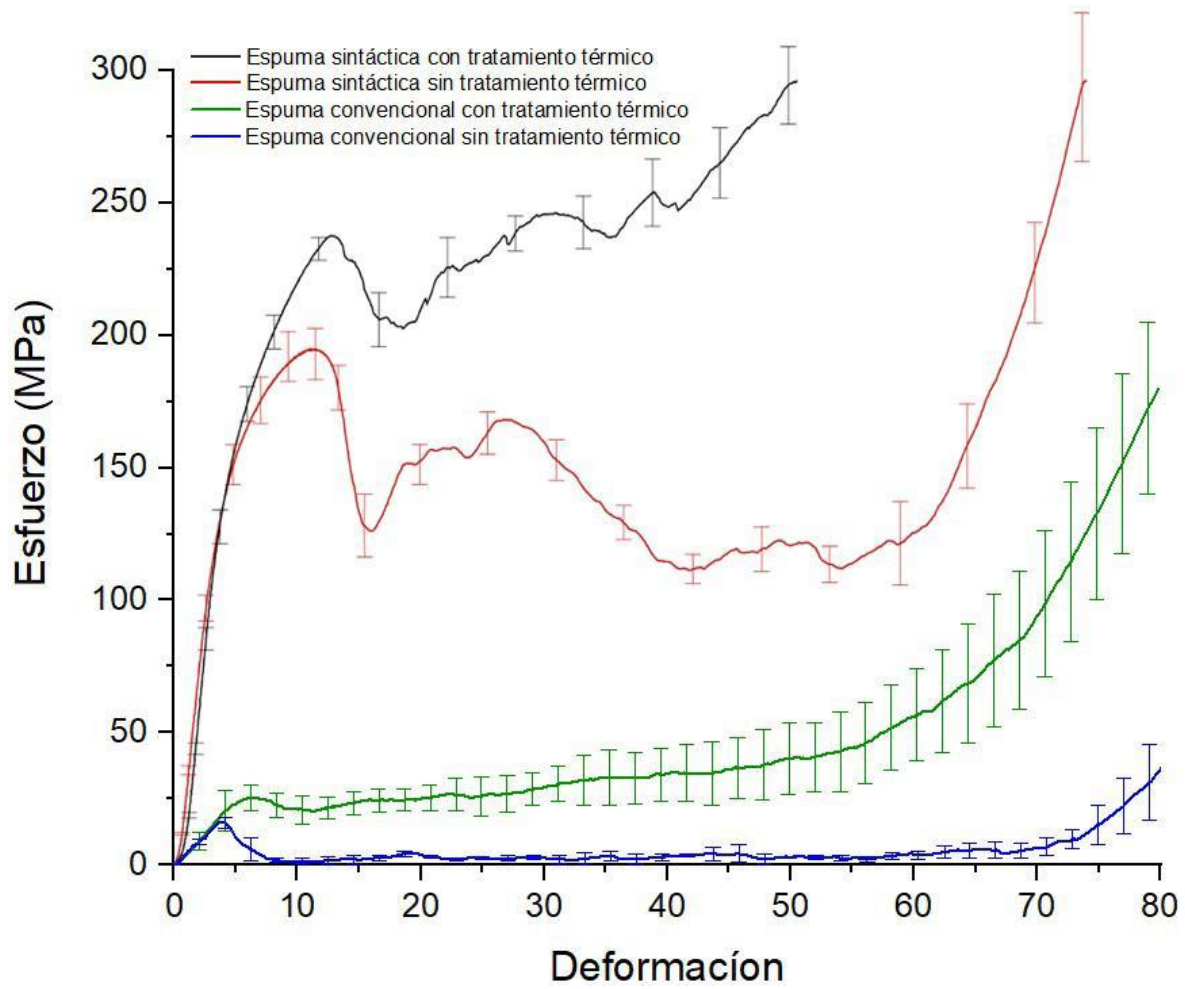


Fig. 69 Curvas esfuerzo deformación obtenidas en el presente proyecto.

Conclusiones

Una vez analizados los resultados obtenidos, se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- El proceso de fabricación por medio de infiltración resultó ser óptimo para la obtención, mediante la infiltración de la aleación Cu₂₀Sn, de espumas metálicas sintácticas y convencionales, utilizando respectivamente esferas huecas de Fe como partícula de refuerzo, y sulfato de potasio granulado como partícula espaciadora.
- La porosidad obtenida para las espumas sintácticas resultó del 52%, mientras que para las espumas convencionales se obtuvo una porosidad del 64%, esto producto de la morfología y empaquetamiento logrado para los materiales que fueron infiltrados.
- Las densidades relativas de las espumas fueron de 0.5 y 0.36 para las espumas sintácticas y convencionales, respectivamente. Esto resultó en una importante reducción en el peso comparado con el peso de la aleación en bulto.
- En las espumas sintácticas, durante el proceso de infiltración ocurre infiltración intergranular al interior de las esferas, recubriendo su superficie interna, lo que provoca una fuerte unión entre la esfera y la matriz metálica.
- En las espumas sintácticas no se observó ninguna formación de interfase entre la matriz Cu₂₀Sn y las esferas huecas de Fe.
- En las espumas convencionales durante el proceso de infiltración de la aleación líquida se formaron sulfuros de cobre, producto de la utilización del K₂SO₄ como partícula espaciadora.
- Tanto en las espumas metálicas sintácticas como en las convencionales la aplicación de tratamientos térmicos de solubilización originó cambios microestructurales, modificando las fases por procesos de fragmentación y esferoidización. En ambas espumas los tratamientos térmicos también llevaron a la transformación de la fase ϵ a la fase β en la aleación CuSn.

- Las modificaciones originadas por los tratamientos térmicos motivaron el aumento de las propiedades mecánicas de las espumas tratadas comparadas con las que no sufrieron tratamiento térmico. Tanto la ductilidad como la resistencia de las espumas se vieron favorecidas.
- Las espumas metálicas sintácticas demostraron tener una mayor capacidad de resistencia en comparación con las espumas convencionales, esta diferencia se atribuye a la estructura reforzada por las esferas huecas de hierro que mejoran la capacidad de carga, especialmente cuando se combina con el tratamiento térmico de solubilización a 750°C durante 1h seguido de un temple.

Recomendaciones

De acuerdo a la experiencia obtenida en el presente trabajo se puede recomendar para investigaciones futuras lo siguiente:

- Generar modelos computacionales de las espumas obtenidas en el presente trabajo de tesis con el objetivo de comparar los resultados de simulación de elemento finito con los obtenidos de forma experimental.
- Estudiar el uso de partículas reforzantes o espaciadoras de distintos tamaños y proporciones con el objetivo de obtener diferentes rangos de porosidades.
- Realizar estudios de tratamientos térmicos para estudiar la posible formación de microporosidad en la matriz, la cual podría sumarse a la porosidad generada por las partículas espaciadoras y reforzantes.
- Probar diferentes geometrías de partículas espaciadoras para evaluar el comportamiento mecánico comparando al obtenido en el presente trabajo.
- Complementar los estudios obtenidos en el presente trabajo con propiedades eléctricas y térmicas de las espumas fabricadas.

Referencias

- [1] N. Gupta and P. K. Rohatgi, "Metal matrix syntactic foams," *Compr. Compos. Mater. II*, vol. 4, pp. 364–385, 2017, doi: 10.1016/B978-0-12-803581-8.09971-9.
- [2] L. P. Lefebvre et al., "The effect of microstructure on the permeability of metallic foams," *J. Mater. Sci.*, vol. 42, pp. 4372–4383, 2007, doi: 10.1007/s10853-006-0602-x.
- [3] P. S. Liu and G. F. Chen, "General Introduction to Porous Materials," *Porous Mater.*, pp. 1–20, 2014, doi: 10.1016/b978-0-12-407788-1.00001-0.
- [4] N. Kränzlin and M. Niederberger, "Controlled fabrication of porous metals from the nanometer to the macroscopic scale," *Mater. Horizons*, vol. 2, no. 4, pp. 359–377, 2015, <https://doi.org/10.1039/C4MH00244J>.
- [5] S. Kishimoto et al., "Compressive mechanical properties of closed-cell aluminum foam-polymer composites," *Compos. Part B Eng*, vol. 64, pp. 43–19, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.04.009>.
- [6] M. Altenaïji et al., "Characterisation of aluminium matrix syntactic foams dynamic loading," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 564, pp. 449–454, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.564.449.
- [7] L. Gibson and M. Ashby, *Cellular Solids: Structure and Properties*. New York: Cambridge University Press, 1997, <https://doi.org/10.1017/CBO9781139878326>.
- [8] Y. N. Loginov et al., "Compression deformation and fracture behavior of additively manufactured Ti–6Al–4V cellular structures," *Int. J. Light. Mater. Manuf.*, vol. 5, pp. 126–135, 2022, doi: 10.1016/j.ijlmm.2021.11.003.
- [9] A. Szlancsik et al., "Compressive behaviour of aluminium matrix syntactic foams reinforced by iron hollow spheres," *Mater. Des.*, vol. 83, pp. 230–237, 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.06.011.
- [10] L. J. Gibson, "Mechanical Behavior of Metallic Foams. Annual Review of Materials Science", *Annu rev mater sci.* 30. 191-227. doi: 10.1146/annurev.matsci.30.1.191.
- [11] N. Nomura et al., "Mechanical properties of porous Ti – 15Mo – 5Zr – 3Al compacts prepared by powder sintering," *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 25, pp. 330–335, 2005, doi: 10.1016/j.msec.2005.04.001.
- [12] K. Zhu et al., "Measurement of the dynamic Young ' s modulus of porous titanium and Ti6Al4V," *J. Mater. Sci.*, vol. 42, pp. 7348–7353, 2007, doi: 10.1007/s10853-007-1532-y.
- [13] I. Castro, Tesis doctoral "Caracterización mecánica de espumas metálicas y

su aplicación en sistemas de absorción de energía,” Universidad Carlos III de Madrid, 2012.

- [14] J. Banhart, “Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 46, pp. 559–632, 2001, doi: 10.1016/S0079-6425(00)00002-5.
- [15] T. Imwinkelried, “Mechanical properties of open-pore titanium foam,” *J. Biomed. Mater. Res. A*, vol. 81, pp. 964–970, 2007, <https://doi.org/10.1002/jbm.a.31118>.
- [16] M. F. Ashby et al., “Metal Foams: a Design Guide”. *Materials & Design*. vol. 23. pp.119, 2000. 10.1016/S0261-3069(01)00049-8.T..
- [17] S. Báez–Pimiento, M. E. Hernández–Rojas, and M. E. Palomar–Pardavé, “Processing and Characterization of Open–Cell Aluminum Foams Obtained through Infiltration Processes,” *Procedia Mater. Sci.*, vol. 9, pp. 54–61, 2015, doi: 10.1016/j.mspro.2015.04.007.
- [18] S. Y. Chen et al., “Microstructure and fracture properties of open-cell porous Ti-6Al-4V with high porosity fabricated by electron beam melting,” *Mater. Charact.*, vol. 138, no. February, pp. 255–262, 2018, doi: 10.1016/j.matchar.2018.02.016.
- [19] F. G. Cuevas et al., “Electrical conductivity and porosity relationship in metal foams,” *J. Porous Mater.*, vol. 16, pp. 675–681, 2009, doi: 10.1007/s10934-008-9248-1.
- [20] G. J. Davies and S. Zhen, “Metallic foams: their production, properties and applications,” *J. Mater. Sci.*, vol. 18, no. 7, pp. 1899–1911, 1983, doi: 10.1007/BF00554981.
- [21] B. Hanet al., “Temperature effects on the compressive behaviors of closed-cell copper foams prepared by powder metallurgy,” *Materials (Basel)*., vol. 14, no. 21, 2021, doi: 10.3390/ma14216405.
- [22] B. H. Smith et al., “Steel foam for structures: A review of applications, manufacturing and material properties,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 71, pp. 1–10, 2012, doi: 10.1016/j.jcsr.2011.10.028.
- [23] C. Martínez et al., “Effect of porosity on mechanical and electrochemical properties of Ti e 6Al e 4V alloy,” *Electrochim. Acta*, vol. 338, pp. 2–11, 2020, doi: 10.1016/j.electacta.2020.135858.
- [24] N. Dukhan, “Metal foams: fundamentals and applications,” *DEStech Publ. Inc*, 2013.
- [25] T. Miyoshi et al., “ALPORAS aluminum foam: Production process, properties, and applications,” *Adv. Eng. Mater.*, vol. 2, no. 4, pp. 179–183, 2000, doi: 10.1002/(SICI)1527-2648(200004)2:4<179::AID-ADEM179>3.0.CO;2-G.
- [26] L. Nielsen, “Elasticity and Damping of Porous Materials and Impregnated

- Materials,” J. Am. Ceram. Soc., vol. 67, pp. 93–98, 1984, <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1984.tb09622.x>.
- [27] G. Kotan and A. S. Bor, “Production and characterization of high porosity Ti-6Al-4V foam by space holder technique in powder metallurgy,” Turkish J. Eng. Environ. Sci., vol. 31, no. 3, pp. 149–156, 2007.
 - [28] H. P. Degischer and B. Kriszt, Handbook of Cellular Metals - Production, Processing, Applications. 2002. doi: 10.1002/3527600558.fmatter_indsub.
 - [29] F. García-Moreno, “Commercial applications of metal foams: Their properties and production,” Materials (Basel)., vol. 9, no. 2, pp. 20–24, 2016, doi: 10.3390/ma9020085.
 - [30] J. Banhart, “Metal foams: Production and stability,” Adv. Eng. Mater., vol. 8, no. 9, pp. 781–794, 2006, doi: 10.1002/adem.200600071.
 - [31] M. T. Malachevsky et al., “Fabrication of copper foams by powder metallurgy,” Rev. Mater., vol. 23, no. 2, 2018, doi: 10.1590/S1517-707620180002.0356.
 - [32] D. L. Zhang and D. Y. Ying, “Formation of fcc titanium during heating high energy ball milled Al-Ti powders,” Mater. Lett., vol. 52, no. 4–5, pp. 329–333, 2002, doi: 10.1016/S0167-577X(01)00417-7.
 - [33] A. Kennedy, “Porous Metals and Metal Foams Made from Powders,” Powder Metall., no. March 2012, pp. 31–46, 2012, doi: 10.5772/33060.
 - [34] L. P. Zhang and Y. Y. Zhao, “Mechanical response of Al matrix syntactic foams produced by pressure infiltration casting,” J. Compos. Mater., vol. 41, no. 17, pp. 2105–2117, 2007, doi: 10.1177/0021998307074132.
 - [35] G. Ryan, A. Pandit, and D. P. A. ã, “Fabrication methods of porous metals for use in orthopaedic applications,” Biomaterials, vol. 27, pp. 2651–2670, 2006, doi: 10.1016/j.biomaterials.2005.12.002.
 - [36] J. a. Gutierrez and J. Oñoro, “Espumas de aluminio. Fabricación, propiedades y aplicaciones,” Rev. Metal., vol. 44, no. 5, pp. 457–476, 2008, doi: 10.3989/REVMETALM.0751.
 - [37] J. L. Nebreda, “Optimización de la estructura celular en espumas de aluminio,” Universidad de Valladolid, p. 326, 2014.
 - [38] D. K. Rajak and M. Gupta, "An Insight Into Metal Based Foams", Springer, vol. 145. 2020. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/978-981-15-9069-6>
 - [39] J. Banhart, “Light-metal foams - History of innovation and technological challenges,” Adv. Eng. Mater., vol. 15, no. 3, pp. 82–111, 2013, doi: 10.1002/adem.201200217.
 - [40] J. Banhart and H. W. Seeliger, “Aluminium foam sandwich panels: Manufacture, metallurgy and applications,” Adv. Eng. Mater., vol. 10, no. 9, pp. 793–802, 2008, doi: 10.1002/adem.200800091.

- [41] L. O. Afolabi et al., "Syntactic foams formulations, production techniques, and industry applications: A review," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, no. 5, pp. 10698–10718, 2020, doi: 10.1016/j.jmrt.2020.07.074.
- [42] G. Castro and S. R. Nutt, "Synthesis of syntactic steel foam using mechanical pressure infiltration," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 535, pp. 274–280, 2012, doi: 10.1016/j.msea.2011.12.084.
- [43] J. Marx and A. Rabiei, "Overview of Composite Metal Foams and Their Properties and Performance," *Adv. Eng. Mater.*, vol. 19, no. 11, pp. 1–13, 2017, doi: 10.1002/adem.201600776.
- [44] Rohatgi, P.K., Gupta, N., Schultz, B.F. et al. The synthesis, compressive properties, and applications of metal matrix syntactic foams. *JOM* 63, 36–42, 2011. <https://doi.org/10.1007/s11837-011-0026-1>.
- [45] R. Thiyagarajan and M. Senthil kumar, "A Review on Closed Cell Metal Matrix Syntactic Foams: A Green Initiative towards Eco-Sustainability," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 36, no. 12, pp. 1333–1351, 2021, doi: 10.1080/10426914.2021.1928696.
- [46] Q. Yang et al., "The processing and structure of steel matrix syntactic foams prepared by infiltration casting," *Mater. Sci. Forum*, vol. 933 MSF, pp. 129–135, 2018, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.933.129.
- [47] Rivero Rocha, "Síntesis y evaluación de espumas sintácticas metálicas para aplicaciones que requieren elevada absorción de energía", Universidad Autónoma de Ica, 2016.
- [48] G. M. Gladysz, K. K. Chawla, and A. R. Boccaccini, "Preface: Syntactic and composite foams special section," *J. Mater. Sci.*, vol. 47, no. 15, pp. 5625–5626, 2012, doi: 10.1007/s10853-012-6503-2.
- [49] C. A. Vogiatzis, A. Tsouknidas, D. T. Kountouras, and S. Skolianos, "Aluminum-ceramic cenospheres syntactic foams produced by powder metallurgy route," *Mater. Des.*, vol. 85, pp. 444–454, 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.06.154.
- [50] N. Gupta and W. Ricci, "Comparison of compressive properties of layered syntactic foams having gradient in microballoon volume fraction and wall thickness," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 427, no. 1–2, pp. 331–342, 2006, doi: 10.1016/j.msea.2006.04.078.
- [51] A. Rabiei and A. T. O'Neill, "A study on processing of a composite metal foam via casting," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 404, no. 1–2, pp. 159–164, 2005, doi: 10.1016/j.msea.2005.05.089.
- [52] M. Hartmann, K. Reindel, and R. F. Singer, "Fabrication and properties of syntactic magnesium foams," *Mater. Res. Soc. Symp. - Proc.*, vol. 521, pp. 211–216, 1998, doi: 10.1557/proc-521-211.
- [53] A. M. Sánchez de la Muela, J. Duarte, J. Santos Baptista, L. E. García

- Cambroner, J. M. Ruiz-Román, and F. J. Elorza, "Stir Casting Routes for Processing Metal Matrix Syntactic Foams: A Scoping Review," *Processes*, vol. 10, no. 3, 2022, doi: 10.3390/pr10030478.
- [54] A. M. S-De-la-muela, L. E. G. Cambroner, and J. M. Ruiz-Román, "Molten metal infiltration methods to process metal matrix syntactic foams," *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 1, 2020, doi: 10.3390/met10010149.
- [55] Y. Wu, Z. Fan, and Y. Lu, "Bulk and interior packing densities of random close packing of hard spheres," *J. Mater. Sci.*, vol. 38, no. 9, pp. 2019–2025, 2003, doi: 10.1023/A:1023597707363.
- [56] Yue Zhang, "Mechanical Properties of Metal Matrix Syntactic Foam," University of Liverpool, January, 2020.
- [57] C. T. Guerrero et al., "A study on syntactic aluminum foams manufactured infiltrating sintered preforms of iron hollow spheres," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 323, no. May, p. 129656, 2024, doi: 10.1016/j.matchemphys.2024.129656.
- [58] R. Florek and M. Nosko, "Compression test evaluation method for aluminium foam parts of different alloys and densities," *Powder Metall. Prog.*, vol. 10, no. 4, pp. 207–212, 2010.
- [59] J. Wu, W. Wang, X. Gao, "Design of lattice and zero-mean curvature structures". *IEEE Trans Vis Comput Graph*, vol. 27, pp. 43-56, 2020. doi:10.1109/TVCG.2019.2938946.
- [60] Q. Zhang et al., "Quasi-static and dynamic compression behavior of glass cenospheres/5A03 syntactic foam and its sandwich structure," *Compos. Struct.*, vol. 183, no. 1, pp. 499–509, 2018, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.05.024.
- [61] A. Macke, B. F. Schultz, and P. Rohatgi, "Metal matrix: Composites offer the automotive industry an opportunity to reduce vehicle weight, improve performance," *Adv. Mater. Process.*, vol. 170, no. 3, pp. 19–23, 2012.
- [62] Ç. Bolat, İ. C. Akgün, and A. Göksenli, "On the Way to Real Applications: Aluminum Matrix Syntactic Foams," *Eur. Mech. Sci.*, vol. 4, no. 3, pp. 131–141, 2020, doi: 10.26701/ems.703619.
- [63] <https://www.cymat.com/industries-defense-military/> (accessed Jan. 16, 2025).
- [64] H. C. Shin and M. Liu, "Copper foam structures with highly porous nanostructured walls," *Chem. Mater.*, vol. 16, no. 25, pp. 5460–5464, 2004, doi: 10.1021/cm048887b.
- [65] S. Báez-Pimiento, O. Rosas-Carballar, and M. E. Hernández-Rojas, "Manufacturing of Cu-Sn foams through SDP," *Rev. Mater.*, vol. 23, no. 2, 2018, doi: 10.1590/s1517-707620180002.0340.
- [66] R. Juškeenas et al., "XRD studies of the phase composition of the electrodeposited copper-rich Cu-Sn alloys," *Electrochim. Acta*, vol. 52, no. 3,

pp. 928–935, 2006, doi: 10.1016/j.electacta.2006.06.029.

- [67] K. H. Prakash and T. Sritharan, “Textured growth of Cu/Sn intermetallic compounds,” *J. Electron. Mater.*, vol. 31, no. 11, pp. 1250–1255, 2002, doi: 10.1007/s11664-002-0017-7.
- [68] S. Fürtauer, D. Li, D. Cupid, and H. Flandorfer, “The Cu-Sn phase diagram, Part I: New experimental results,” *Intermetallics*, vol. 34, pp. 142–147, 2013, doi: 10.1016/j.intermet.2012.10.004.
- [69] M. Rappaz, F. Kohler, and L. Germond, “Peritectic solidification of Cu – Sn alloys: Microstructural competition at low speed,” vol. 57, pp. 56–68, 2009, doi: 10.1016/j.actamat.2008.08.058.
- [70] X. Li et al. “Phase and microstructure formation in rapidly solidified Cu-Sn and Cu-Sn-Ti alloys,” *J. Alloys Compd.*, vol. 735, pp. 1374–1382, 2018, doi: 10.1016/j.jallcom.2017.11.237.
- [71] M. Karthik, J. Abhinav, and K. V. Shankar, *Morphological and Mechanical Behaviour of Cu–Sn Alloys—A review*, vol. 27, no. 7. The Korean Institute of Metals and Materials, 2021. doi: 10.1007/s12540-020-00899-z.
- [72] Y. Li et al., “Measurements of mechanical properties of α -phase in Cu-Sn alloys by using instrumented nanoindentation,” *J. Mater. Res.*, vol. 27, no. 1, pp. 192–196, 2012, doi: 10.1557/jmr.2011.299.
- [73] S. M. So et al., “Effects of Sn content and hot deformation on microstructure and mechanical properties of binary high Sn content Cu–Sn alloys,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 796, no. July, p. 140054, 2020, doi: 10.1016/j.msea.2020.140054.
- [74] L. E. Carranza et al., “Phase transformations and porosity formation for Cu-Sn alloys over solution heat treated,” *Mater. Lett.*, vol. 330, no. October 2022, pp. 18–21, 2023, doi: 10.1016/j.matlet.2022.133362.

Luis Enrique Carranza García

Fabricación de espumas sintácticas y convencionales de la aleación CuSn.pdf

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:483481512

Fecha de entrega

14 ago 2025, 11:14 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

14 ago 2025, 11:20 a.m. GMT-6

Nombre de archivo

Fabricación de espumas sintácticas y convencionales de la aleación CuSn.pdf

Tamaño de archivo

7.2 MB

133 Páginas

26.127 Palabras

153.053 Caracteres

17% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

Fuentes principales

- 16%  Fuentes de Internet
- 8%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Doctorado en Ciencias en Ingeniería Mecánica	
Título del trabajo	Fabricación de espumas sintácticas y convencionales de la aleación CuSn	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Luis Enrique Carranza García	1838328h@umich.mx
Director	Lada Domratcheva Lvova	
Codirector	Ismeli Alfonso López	ialfonso@unam.mx
Coordinador del programa	Gilberto Gonzalez Avalos	doc.cs.ingenieria.mecanica@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	No	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	No	
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	No	
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	No	
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	No	
Otro	No	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Luis Enrique Carranza García
Lugar y fecha	Morelia Michoacan a 14 de agosto del 2025