



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES

"Efecto de la geometría fractal del sistema poroso sobre el comportamiento a la compresión de espumas metálicas"

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
Maestro en Ciencia e Ingeniería de Materiales

PRESENTA:
Ing. Juan Carlos Carranza García

Dr. Ismeli Alfonso López
Instituto de Investigaciones en Materiales Campus Morelia-UNAM

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:

Dr. Ignacio Alejandro Figueroa Vargas
Instituto de Investigaciones en Materiales-UNAM

Dr. Jorge Alejandro Verduzco Martínez
Instituto de Investigaciones en Metalurgia y Materiales-UMSNH

Morelia, Michoacán Enero 2018.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

Agradezco el apoyo financiero del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por la beca que me otorgó durante mis estudios de maestría/doctorado.

Agradezco el apoyo financiero del proyecto PAPIIT IN117316, "Obtención mediante procesamiento en estado sólido de espumas de aleaciones de aluminio para aplicaciones automotrices".

Al **Dr. Ismeli Alfonso López** por su ayuda, apoyo y amistad durante estos dos años de estudios de posgrado.

Al **Dr. Ignacio Figueroa** y el **Dr. Jorge Verduzco** por su apoyo como miembros de mi comité asesor, cuyos comentarios fueron enriquecedores para mi trabajo.

Al **Dr. Orlando Hernández Cristóbal** por su apoyo en la toma de imágenes en Microscopio Electrónico de Barrido y el **Dr. Luis Pérez Pozo** por su apoyo para la realización de los modelos computacionales.

A todos los Doctores del Instituto de Investigación en Materiales que me dieron consejos y me hicieron comentarios durante mis estudios.

A mis padres **Belisario Carranza Ochoa** y **Rosa María García Solís** y mi hermano **Luis Enrique Carranza García** por su apoyo y cariño en todas las etapas de mi vida, y tolerancia en los momentos de estrés.

A toda mi familia que me ha acompañado durante toda mi vida, mi abuelo **Juan García Magaña** que me ha dado buenos consejos, y a **mis tíos** que supieron tratarme como un hijo.

A mi novia **Cristian Mitchell Trejo Hurtado** por su cariño, compañía y ánimos durante todo este tiempo.

A mis amigos **Juan Rogelio Tena**, **Francisco Javier Rodríguez**, **Luis Emmanuel Reyes**, **Armando Silvestre**, **Pablo Huazano**, **Marco Beirana** y **Josué Beiza** por su amistad de tantos años.

Índice

Resumen	i
Introducción.....	ii
Objetivos.....	v
Objetivo general	v
Objetivos específicos	v
Hipótesis.....	vi
Justificación.....	vii
Capítulo I.....	1
1. Marco teórico.....	2
1.1. Aluminio.....	2
1.2. Antecedentes históricos de espumas metálicas	4
1.3. Espumas, esponjas y materiales celulares	5
1.4. Espumas metálicas	11
1.5. Estructura celular de las espumas.....	13
1.5.1. Geometría de las celdas	13
1.5.2. Densidad relativa de las espumas	16
1.5.3. Anisotropía celular	16
1.5.4. Relaciones dimensionales estructura-densidad	17
1.6. Formación y estabilización de espumas metálicas.....	18
1.7. Antecedentes de técnicas de fabricación.....	18
1.8. Método de infiltración.....	26
1.9. Partículas espaciadoras (Space Holders).....	29
1.10. Propiedades de las espumas metálicas	30
1.11. Aplicaciones de las espumas metálicas	43

1.12.	Técnicas de análisis y caracterización de las espumas metálicas.....	47
1.13.	Método de elementos finitos.....	49
1.14.	Fractales.....	56
Capítulo II.....		62
2.	Procedimiento Experimental	64
2.1.	Materiales usados	64
2.1.2.	Partículas espaciadoras (Space Holders)	64
2.2.	Dispositivo para infiltración.....	66
2.2.1.	Fabricación de la espuma	68
2.3.	Caracterización.....	71
2.3.1.	Caracterización metalográfica	71
2.3.4.	Caracterización mecánica.....	72
2.4.	Modelado y simulación	73
2.4.1.	Modelos de espumas.....	73
Capítulo III		79
3.	Resultados y discusión	80
3.1.	Caracterización microscópica de la aleación	80
3.1.1.	Caracterización óptica de las espumas obtenidas	86
3.1.2.	Comparación de las espumas.....	96
3.2.	Caracterización mecánica de las espumas obtenidas	97
3.3.	Modelos y simulación	100
3.4.	Comparación de resultados experimentales con simulación computacional ...	103
Conclusiones.....		106
Recomendaciones		107
Bibliografía.....		108

Índice de ilustraciones

Ilustración 1 (a) Coral Porites de las costas de Cuba, (b) vista macroscópica de la estructura coralina y (c) micro morfología de dicha estructura. [16].....	6
Ilustración 2 Diferencia entre material poroso y un sólido celular. [17].....	7
Ilustración 3 Espuma de aluminio de poro cerrado. [15]	8
Ilustración 4 Estructura tridimensional donde la espuma es usada como núcleo.[18].....	9
Ilustración 5 Estructura de espumas de aluminio. a) Alcan-Cymat, b) Alporas, c) Alulight, d) IFAM y e) ERG de poro abierto. [15].....	10
Ilustración 6 Evolución del número de publicaciones en el campo de espumas de aluminio. Fuente www.sciencedirect.com (Octubre 2015). [15].....	12
Ilustración 7 a) Tetracaidecaedro de Kelvin. Consiste en un poliedro de 14 caras: 8 hexágonos y 6 cuadrados. b) Celda de Weaire-Phelan. Consiste en 6 poliedros de 14 caras y 2 poliedros de 12 caras. [15].....	14
Ilustración 8 Elementos de la estructura celular en una espuma metálica de aluminio de poro cerrado. a) Celda elemental, b) Conexión de bordes y paredes, c) Micrografía de la conexión bordes-paredes en la que se identifica la naturaleza de las partículas. [15]	15
Ilustración 9 Clasificación de métodos de producción de espumas metálicas. Adaptado de (Banhart 2001). [15]	20
Ilustración 10 Esquema de los métodos de producción por fusión y por Metalurgia de Polvos. [24].....	21
Ilustración 11 Fabricación de espuma de aluminio por adición directa de gas a la fundición con viscosidad reforzada. [13].....	22
Ilustración 12 Proceso de producción de Alporas. [24].....	23
Ilustración 13 Espuma de aluminio obtenida mediante un precursor espumable producido por pulvimetalurgia (Alulight). [13].....	25
Ilustración 14 Sección de espuma metálica ‘Gasar’ con poros muy alargados. [25].....	26
Ilustración 15 Proceso de infiltración con espaciadores de NaCl, versión avanzada del proceso. [28].....	28
Ilustración 16 Rango de propiedades de los materiales sólidos frente a los celulares. [6].	31

Ilustración 17	Curvas esfuerzo deformación de distintos comportamientos de un sólido celular [21].	33
Ilustración 18	Ejemplificación de deflexión elástica en un modelo de celda cúbico, mostrándose los principales puntos donde actúan las fuerzas de compresión [21].	34
Ilustración 19	Ejemplificación del análisis de espesores, en la distribución de sólido de una celda cerrada [21].	35
Ilustración 20	Mecanismo de “buckling” durante la deformación plástica de una celda [21].	36
Ilustración 21	Ejemplificación de deformación de una pared de celda durante el colapso plástico en una celda tipo cerrada [21].	36
Ilustración 22	Principales defectos en una espuma metálica de aluminio, de celda tipo cerrada [37].	39
Ilustración 23	Distribución de la densidad a lo largo de x y y [31].	41
Ilustración 24	Coefficiente de absorción de sonido de diferentes espumas de aluminio de densidad 0.5 g/cm ³ con estructura de poro abierto con diferente diámetro de poro (a) en mm, comparado con aluminio sólido, espuma de PU y matriz de fibra de vidrio [38].	42
Ilustración 25	Cafetería Baluarte en Pamplona, España [42].	44
Ilustración 26	Caja de impactos Metcomb [44].	45
Ilustración 27	Soportes del Motor de BMW con núcleo de Espuma Metálica. [18].	45
Ilustración 28	Intercambiadores de calor construidos a base de espumas metálicas [48].	47
Ilustración 29	Microscopio metalográfico.	48
Ilustración 30	Modelo obtenido por MEF a partir de un elemento representativo del volumen de la espuma metálica. [46].	55
Ilustración 31	Fractalidad en las hojas de los árboles. [53].	57
Ilustración 32	Confección de un fractal. Serie de Cantor. [53].	58
Ilustración 33	Construcción de la curva de von Koch a) y copo de nieve de von Koch b). “Fractal geometry. Mathematical Foundations and Applications”. [52].	58
Ilustración 34	La alfombra de Sierpinski.[53].	59
Ilustración 35	a) Caso 1: relación de tamaños. b) Caso 2: Relación de cantidad.	60
Ilustración 36	Uso de fractales para estudiar materiales porosos. [3].	61
Ilustración 37	Micrografías SEM de NaCl de 4 mm y 2 mm (aproximadamente).	65

Ilustración 38	Ordenamiento posible cuando se tienen partículas de NaCl del mismo tamaño y de tamaños diferentes. [54].	66
Ilustración 39	Equipo de infiltración (izquierda), Diseño del dispositivo Solid Works (central), cuchara (derecha).	67
Ilustración 40	Horno de resistencias empleado para la fabricación de las espumas.	68
Ilustración 41	Experimentos de sinterización: a) 760 °C No hay sinterización de las partículas. b) 790°C Reblandecimiento de las partículas. c) 780°C Sinterización adecuada el NaCl. d) Imagen SEM de sinterización a 780°C.	69
Ilustración 42	Características de las probetas utilizadas para ensayos de compresión.	72
Ilustración 43	Modelo que se utilizará para las simulaciones.	74
Ilustración 44	Presión y restricciones de desplazamiento aplicadas al modelo.	76
Ilustración 45	Elemento Solid187.	77
Ilustración 46	Micrografía obtenida mediante MEB de la aleación 332 a 100x (izquierda) y MO (derecha).	80
Ilustración 47	Micrografía de la aleación de Al donde se muestran las fases ricas en Cu, a 500x	81
Ilustración 48	Micrografía de la aleación de Al a 500x donde se muestra la fase Al ₅ FeSi.	81
Ilustración 49	EDS de la aleación realizado en SEM.	82
Ilustración 50	Mapeo de la aleación de Aluminio.	84
Ilustración 51	Mapeo de las fases para conocer distribución elemental.	86
Ilustración 52	Espuma relación 1:1, vista superior, NaCl en la matriz.	87
Ilustración 53	Espuma relación 1:1, vista superior, matriz de NaCl disuelta.	87
Ilustración 54	Relación 1:1 (aprox.) en las partículas de NaCl.	88
Ilustración 55	Acercamiento a interconexión de poros en estereoscopio de la espuma relación 1:1.	88
Ilustración 56	Imágenes SEM, observación de interconexión de poros en espuma relación 1:1.	89
Ilustración 57	Espuma relación 2:1, vista superior, NaCl en la matriz.	90
Ilustración 58	Espuma relación 2:1, vista superior, matriz de NaCl disuelta.	90
Ilustración 59	Relación 2:1 (aprox.) en las partículas de NaCl.	91

Ilustración 60	Acercamiento a interconexión de poros en estereoscopio de la espuma relación 2:1.	91
Ilustración 61	Imágenes SEM, observación de interconexión de poros en espuma relación 2:1.	92
Ilustración 62	Espuma relación 4:1, vista superior, NaCl en la matriz.	93
Ilustración 63	Espuma relación 4:1, vista superior, matriz de NaCl disuelta.	93
Ilustración 64	Relación 4:1 (aprox.) en las partículas de NaCl.	94
Ilustración 65	Acercamiento a interconexión de poros en estereoscopio de la espuma relación 4:1.	94
Ilustración 66	Imágenes SEM, observación de interconexión de poros en espuma relación 4:1.	95
Ilustración 67	Diferencia entre espesores de pared en las espumas fabricadas, a) 1:1, b) 2:1, c) 4:1.	96
Ilustración 68	Diagrama esfuerzo vs deformación comparativo de las espumas.	98
Ilustración 69	Relación D/d entre partículas espaciadoras y porosidad alcanzada. [61]....	99
Ilustración 70	Relación entre fracción de partículas de mayor tamaño vs. Menor tamaño y porosidad alcanzada. [62].....	99
Ilustración 71	Modelo de espuma con relación 1:1.....	100
Ilustración 72	Modelo de espuma con relación 2:1.....	101
Ilustración 73	Modelo de espuma con relación 4:1.....	102
Ilustración 74	Gráfica comparativa de los valores de los Módulos de Young de las espumas fabricadas.....	104

Índice de tablas

Tabla 1	Clasificación de aleaciones de aluminio para fundición. [8].....	2
Tabla 2	Intervalo de Propiedades mecánicas de espumas metálicas comerciales. [18]	40
Tabla 3	Principales elementos utilizados en la discretización. [46].....	52
Tabla 4	Composición química de la aleación 332. [8]	64
Tabla 5	Modelos y características de las espumas.	75
Tabla 6	Presión aplicada a los modelos de acuerdo a su área efectiva.....	76
Tabla 7	Cantidad de nodos y elementos usados para los modelos.	77
Tabla 8	Composición química de la aleación, obtenida por EDS.	82
Tabla 9	Tabla de resultados de densidad, porosidad y espesor de pared en espumas obtenidas.....	97
Tabla 10	Características de los modelos computacionales.....	103
Tabla 11	Resultados obtenidos	105

Resumen

El estudio, análisis de propiedades y fabricación de las espumas metálicas es un tema de creciente importancia, no sólo por las ventajas que presentan este tipo de materiales para una amplia gama de aplicaciones en diseño ingenieril, sino además por la variabilidad que suelen exhibir sus propiedades mecánicas.

En esta investigación se realizó una búsqueda bibliográfica sobre las espumas metálicas en general, sus aplicaciones y procesos de fabricación, así como sobre los métodos de caracterización de sistemas porosos utilizando geometría fractal. Se profundizó en sus características, clasificaciones y el análisis del efecto de la porosidad sobre las propiedades mecánicas. También se estudió a fondo y se hizo uso del modelado y simulación mediante el Método de los Elementos Finitos. Se fabricaron espumas metálicas por el método de infiltración haciendo la adición de espaciadores (space holders) siendo partículas de NaCl las adecuadas debido a su fácil eliminación posterior, empleando diferentes geometrías fractales en estos espaciadores. Se realizaron diferentes modelos y simulaciones para determinar de manera teórica el Módulo de Young a la vez que se obtuvo este mismo por medio de un ensayo de compresión a las espumas fabricadas, y posterior a esto, se compararon los resultados encontrando que para el caso de una relación 1:1 los valores del Módulo de Young fueron 1.39 y 2.07 GPa, para el caso de relación 2:1, 0.9 y 0.8 GPa, y para el caso 4:1, 0.38 y 0.28 GPa, valor experimental y simulado respectivamente. La diferencia en los resultados se atribuye a la relación directa entre el espesor de pared de las espumas y su resistencia a la compresión, mientras que los modelos pueden llegar en su geometría a una superposición de los poros lo que puede generar cavidades mucho mayores que en las espumas reales, y de igual manera variar sus espesores de pared.

Introducción

Los materiales metálicos porosos se han venido estudiando de manera más intensa desde hace varias décadas. Como tales, son una clase avanzada de materiales de ingeniería que pueden ser producidos por diferentes métodos y en variedad de formas. Debido a esto se decidió referirse a este nuevo tipo de material como espuma metálica, siendo cualquier tipo de material metálico que contiene poros. Estos tipos de materiales presentan una interesante combinación de propiedades, tales como alta rigidez, baja densidad, aumento de absorción a la energía de impacto y una mayor tolerancia a altas temperaturas, lo cual es debido en conjunto a las propiedades de un material poroso y a las propiedades intrínsecas de un material metálico [1].

Es bien sabido que las estructuras porosas son útiles para aplicaciones tales como aislamiento, embalaje, o filtrado, pero pocos creen que pueden ser eficaces para aplicaciones como materiales estructurales [1]. Sin embargo, los materiales porosos naturales tales como el hueso y la madera, a la cual se le han optimizado sus propiedades mecánicas para cumplir con la función de un material estructural con un peso mínimo, han logrado ser materiales muy funcionales. La búsqueda del hombre para lograr un material estructural celular ha dado lugar a varias opciones. En relación a esto, los polímeros no son materiales suficientemente rígidos y los cerámicos son demasiado frágiles. La selección adecuada de metales potencialmente adecuados podría crear un material celular óptimo, ya que estos son más rígidos que los polímeros, y tienen una ductilidad alta. Además son estables a temperaturas elevadas, poseen resistencia al fuego, y son completamente reciclables. Por tal motivo es de vital importancia el estudio de la porosidad en estos materiales, así como la estimación de sus propiedades mecánicas, ya que de ellas derivarían sus posibles usos. Una forma de controlar la porosidad es la fabricación de espumas por infiltración utilizando partículas espaciadoras, que en una etapa subsiguiente se eliminan, por lo cual la porosidad dependería de su distribución.

Una forma de modificar de manera considerable la porosidad es el uso de distribuciones fractales de las partículas espaciadoras, lo cual influiría en su empaquetamiento, y por lo tanto en la porosidad resultante. Existen reportes sobre determinaciones fractales para

sistemas porosos. La geometría fractal permite estudiar fenómenos irregulares que no pueden ser caracterizados con las teorías geométricas clásicas, y fue establecido por Mandelbrot en 1982. Un fractal es un objeto que posee estructura a cualquier escala y contiene copias de sí mismo, y es muy útil para determinar diferentes cambios en fases [2]. Utilizando distribuciones fractales de tamaño de poro sería posible aumentar la porosidad y obtener espumas con propiedades mejoradas respecto a las publicadas. Este trabajo podría apoyarse en el reportado por Pérez y colaboradores [3], donde se utiliza la geometría fractal con la finalidad de estimar la resistencia de una espuma metálica.

Entre los principales métodos de fabricación de las espumas metálicas están los procesos de infiltración, sinterizado y suministro de un gas al metal en estado líquido, en donde es imprescindible estudiar el proceso de fabricación para obtener las propiedades deseadas en las espumas. Existen varios métodos para predecir estas propiedades antes de la fabricación de las espumas, entre los cuales se destaca el Método de Elementos Finitos (MEF). Indudablemente, el MEF, en el escenario del cálculo y diseño estructural, es considerado una revolución del siglo XX, el cual es utilizado para analizar las variables de influencia de la geometría de los materiales [3]. Es un método general utilizado para la evaluación de los diferentes parámetros y condiciones, sin necesidad de hacer un gran número de ensayos, sintéticamente es una técnica que sustituye el problema diferencial por otro algebraico, aproximadamente equivalente, para el cual se conocen técnicas generales de resolución. Para ello hace uso de la subdivisión de una región sobre la cual están definidas las ecuaciones en formas geométricas simples denominadas Elementos Finitos [4]. Para el análisis mediante el Método de Elementos Finitos existe una variedad de programas computacionales, pero cabe destacar la versatilidad para el estudio y modelización de estructuras el uso de ANSYS. Es un programa de simulación y aplicación general para el cálculo con Elementos Finitos, mediante el cual se pueden resolver problemas estructurales, térmicos, eléctricos, magnéticos y de mecánica de fluidos [5].

En el presente trabajo se utilizará el programa computacional ANSYS MECHANICAL Workbench 16.0 para el modelado de una espuma metálica de Al, simulando su geometría y aplicando cargas de compresión, permitiendo analizar sus propiedades mecánicas y evaluando cómo la distribución y el tamaño de los poros influye en dichas propiedades. Entre

los detalles a modificar está el porcentaje de porosidad y la relación de tamaños de los poros obtenidos, lo cual se realizará tomando en cuenta distribuciones fractales. Estos resultados se compararán con los experimentales, obtenidos mediante la infiltración de una aleación de aluminio comercial a través de partículas espaciadoras de NaCl con diferentes distribuciones fractales.

Objetivos

Objetivo general

Determinar el efecto de la distribución fractal de la porosidad sobre el comportamiento mecánico de espumas metálicas de aluminio sometidas a compresión.

Objetivos específicos

1. Analizar los diferentes tipos de espumas metálicas y sus métodos de obtención.
2. Analizar sus propiedades y diferentes aplicaciones.
3. Estudiar diferentes posibilidades de espumas de acuerdo a distribuciones fractales de la porosidad.
4. Fabricar espumas metálicas utilizando diferentes tamaños de espaciadores para obtener porosidades diferentes.
5. Crear los modelos de espumas metálicas con diferentes porcentajes de porosidad, mediante el método de elementos finitos.
6. Simular el comportamiento de las espumas metálicas aplicando fuerzas de compresión externas.
7. Estimar el efecto de la porosidad de la espuma sobre sus propiedades mecánicas.

Hipótesis

1. Es posible modificar, de manera significativa, la porosidad de una espuma metálica mediante la inclusión de distribuciones fractales de poros.
2. Es posible resolver el comportamiento mecánico de una espuma metálica con diferentes porosidades utilizando el Método de los Elementos Finitos gracias a la facilidad de este método para resolver matrices de rigidez, por lo que es posible la aplicación de herramientas numéricas para determinar el comportamiento mecánico de una espuma metálica cuando se aplican fuerzas externas, ya que éste cuenta con numerosas herramientas de simulación de cargas, esfuerzos, resistencia y restricciones de ejes coordenados.
3. Es posible modelar la geometría de una espuma metálica real mediante el programa ANSYS 16.0, por medio de las herramientas de diseño de este software.
4. La distribución e interconexión de las porosidades en una espuma metálica influye de manera significativa sobre sus propiedades mecánicas.

Justificación

Las espumas metálicas, en especial las de aluminio, son materiales que 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, poseen las ventajas propias del aluminio: metal abundante, ligero, de bajo punto de fusión, fácilmente mecanizable, excelente conductor eléctrico y térmico, magnéticamente neutro, resistente al fuego, reciclable, etc. [6].

La importancia del conocimiento de las espumas metálicas radica en sus diversas aplicaciones en industrias como la automovilística, aeroespacial y estructural principalmente, por lo cual es importante conocer el comportamiento de estos materiales dependiendo de sus procesos de fabricación. La distribución de los poros es muy importante por su efecto sobre las propiedades mecánicas de las espumas, por lo que es necesario conocer este efecto para optimizar el diseño y mejorar sus propiedades mecánicas.

Capítulo I

1. Marco teórico

1.1. Aluminio

El aluminio es uno de los metales más abundantes en el mundo, y es el tercer elemento más común en la corteza terrestre, gracias a su versatilidad se posiciona como el metal más usado después del acero. Elemento químico del 3^{er} grupo en la tabla periódica, con número atómico 13, peso atómico de 26.9815 basado en 12C. La primera muestra de aluminio que excedía el 99.99% de pureza fue obtenida por proceso electrolítico Hoopes alrededor de los 1920. En 1925, J. D. Edwards reportó algunas de las propiedades físicas y mecánicas para este grado de aluminio. [7]

1.1.1. Clasificación y sus aleaciones

Una de las clasificaciones importantes que se le da a las aleaciones de aluminio es de acuerdo a su grado de pureza, que varía desde un 99% hasta un 99.999% en donde se nombra como pureza comercial, para uso industrial (aplicaciones eléctricas) y pureza extrema. [8]. Existen otras clasificaciones, tales como aluminio para forja y aluminio para fundición, en donde la diferencia radica en los elementos aleantes que tenga la mezcla, dándole diferentes propiedades, ya sea mayor fluidez en el caso de la fundición y mayor resistencia para el caso de la forja [9][10]. En general las aleaciones son conocidas por sus prefijos, en donde los números indican elementos aleantes y grado de pureza, como se muestra en la tabla 1:

Tabla 1 Clasificación de aleaciones de aluminio para fundición. [8]

Características de las series del aluminio para fundición	
Serie	Composición
1xx.x	Composiciones sin aleantes.
2xx.x	Aleaciones en donde el aleante en mayor cantidad es Cu.
3xx.x	Aleaciones Al-Si que también contienen magnesio o cobre.
4xx.x	Aleaciones binarias Al-Si.
5xx.x	Aleaciones con contenido de Mg como mayor aleante.

6xx.x	Sin uso
7xx.x	Aleaciones en donde el mayor elemento aleante es Zn, pero es usual encontrar adiciones de Cu, Mg, Cr o Mn.
8xx.x	Aleaciones en donde el mayor elemento aleante es Sn.
9xx.x	Sin uso.

De estas series, la usada más comúnmente es la 3xx.x debido a que tiene un incremento en la fluidez gracias a la adición del Si, y al endurecimiento por envejecimiento, respuesta de la adición de cobre o magnesio. [8]

1.1.2. Aleaciones AlSiCu

Las aleaciones de aluminio con Si como principal elemento de aleación forman una clase de material con proporciones características muy especiales que los hacen aptos para un proceso de colado. Estas aleaciones tienen una amplia gama de aplicaciones en las industrias automotriz y aeroespacial debido a una excelente combinación de moldeabilidad y propiedades mecánicas, así como buena resistencia a la corrosión y resistencia al desgaste. Las adiciones de elementos de aleación menores tales como Cu y Mg mejoran las propiedades mecánicas y hacen que la aleación sea apta para un tratamiento térmico posterior [11]. La base hoy en día para la producción de motores y otras partes automotrices son las aleaciones AlSiCu, en donde los rangos de concentración van de 6-18% para el Si, así como de 1-4% para el Cu [12].

La microestructura de estas aleaciones de colada contiene dendritas α -Al como el constituyente principal, que está decorado con partículas eutécticas de Si y muchas fases intermetálicas tales como Al_2Cu , Mg_2Si , fases que soportan Fe, etc. El tamaño, la morfología y la distribución de las características microestructurales regulan las propiedades mecánicas de estas aleaciones. Cuando estas fases se exponen a temperaturas superiores a 200 °C, las fases principales de fortalecimiento de la aleación como θ -(Al_2Cu), β -(Mg_2Si) y/o Si-(Al_2CuMg) se vuelven inestables, aumentan de tamaño rápidamente y luego se disuelven,

dando lugar a la producción de una aleación que tiene una microestructura indeseable para aplicaciones de alta temperatura. [11]

Como en todas las aleaciones, existen fases que se vuelven indeseables dentro de la microestructura; en este caso existe una serie de fases intermetálicas que se han identificado en las aleaciones de aluminio basado en Si. Las fases más importantes son α -Al₁₅(Fe, Mn)₃Si₂ y β -Al₅FeSi, donde la fase α aparece como caracteres chinos o poliedros y la fase β aparece como agujas en 2-D y plaquetas en 3-D. La fase β es la fase de Fe más indeseable debido a su morfología que provoca una mayor reducción en la ductilidad. La forma más eficaz de promover la formación de la fase α en vez de la fase β más perjudicial, es la neutralización con la adición de Mn. La cantidad de Mn está relacionada con el contenido de Fe y la velocidad de enfriamiento del proceso. [11]

1.2. Antecedentes históricos de espumas metálicas

Se tiene registro de que la primera espuma metálica se fabricó en 1948 gracias a la patente de Benjamín Sosnick titulada: “Proceso para hacer una espuma con masa de metal” (B. Sosnick, Patente EE. UU. No. 2, 434,775, 1948.). Su método aprovecha la disposición de fases intermedias con diferentes puntos de fusión y de ebullición para formar un sólido lleno de poros cerrados. Los usos sugeridos para este nuevo producto aprovechaban las mejoras de la resistencia al impacto de la espuma, así como las propiedades de absorción de calor y sonido. El proceso era bastante costoso y sólo produjo cantidades pequeñas de una espuma bastante irregular; siendo tal vez este un motivo por el cual no se inició su producción en mayor escala. En 1958 se obtuvieron las primeras espumas metálicas con poro abierto. Estas espumas se fabricaron vertiendo sobre aluminio fundido partículas de sal que, una vez disueltas, daban lugar a una estructura de espuma con poros abiertos más fiable que el método de Sosnick, pero se apreció más como curiosidad científica que como material tecnológico. [13]

En 1959, United Aircraft Corporation desarrolló la patente de un método para hacer espumas, en el cual polvo metálico era mezclado con un producto formador de gas por descomposición a alta temperatura. Esta mezcla de polvos era compactada, extruida y enfriada, para obtener

un metal sólido que contenía un agente en polvo espumante. Cuando este sólido se calentaba a la temperatura de fusión del metal, el agente espumante se descomponía para soltar gas en el metal fundido, creando una espuma metálica. No obstante, enfriar la espuma era un problema, utilizándose agua fría o caliente, volviéndose un desafío la producción de espumas fiables, debido al colapso de las mismas, y a los efectos relacionados por el choque térmico dependiendo de la temperatura del agua que se utilizara. [13]

En 1963 Hardy y Peisker, patentaron un método en el cual agregaban los agentes espumantes directamente al metal semifundido mejorando la estructura (en el caso de aluminio fundido también agregaron silicio, para aumentar su viscosidad y encapsular el gas). Esto llevó a un abaratamiento de los costos de producción en comparación a la compactación de polvo. Las espumas metálicas obtenidas a partir del metal fundido han centrado el principal interés comercial. Varios centros de investigación y empresas han trabajado en métodos alternativos para producir espumas y han desarrollado con éxito varios procesos basados en la infiltración, deposición y otros sistemas, con una gama amplia de costos y calidad de espumas.

Actualmente, gran parte de la investigación de espumas se centra en las espumas de aluminio, que por sus características de baja densidad, resistencia a corrosión y bajo punto de fusión, las hacen fáciles de manipular; por otro lado, la producción de espumas de níquel, hierro, titanio, magnesio y plomo están, de momento, en fase de investigación. El mercado de las espumas metálicas está todavía limitado, debido al costo relativamente alto de producción de espumas de buena calidad. [14]

1.3. Espumas, esponjas y materiales celulares

Las estructuras sólidas de tipo espumas se encuentran de modo natural en materiales como la madera, el corcho y los huesos, o en productos elaborados desde tiempos remotos por el hombre, como el pan. En las aplicaciones de ingeniería, se emplea la denominación de “espumas” para un tipo especial de materiales que, a diferencia de los sólidos masivos, se obtienen específicamente con esta estructura celular. A lo largo del siglo pasado se han desarrollado numerosas técnicas para la obtención de espumas mediante procesos industriales, especialmente a partir de materiales poliméricos como las espumas de

poliuretano o de poliestireno, que han encontrado un extenso campo de aplicaciones. Con menor volumen de producción, también se dispone de técnicas para la obtención de espumas de cerámicos y de metales. [15]

La palabra “celda” tiene su raíz en el latín, cella: pequeño compartimiento o espacio cerrado. Estas celdas pueden agruparse dando lugar a lo que los romanos denominaban cellarium y actualmente sólidos celulares. Se entiende por sólido celular a una red o conjunto de celdas (o polígonos) con caras y/o ejes sólidos unidas entre sí formando una estructura bidimensional o tridimensional. Este tipo de materiales no es nuevo, está presente de manera muy amplia en la naturaleza. [16]

Algunos materiales celulares que aparecen constantemente en la naturaleza son por ejemplo, las esponjas o los corales como se observa en la **Ilustración 1a-c**. En esta figura se puede apreciar a escalas microscópicas la estructura del coral, y se denota la geometría fractal de la porosidad, tema principal en este trabajo y que se desarrollará más adelante.

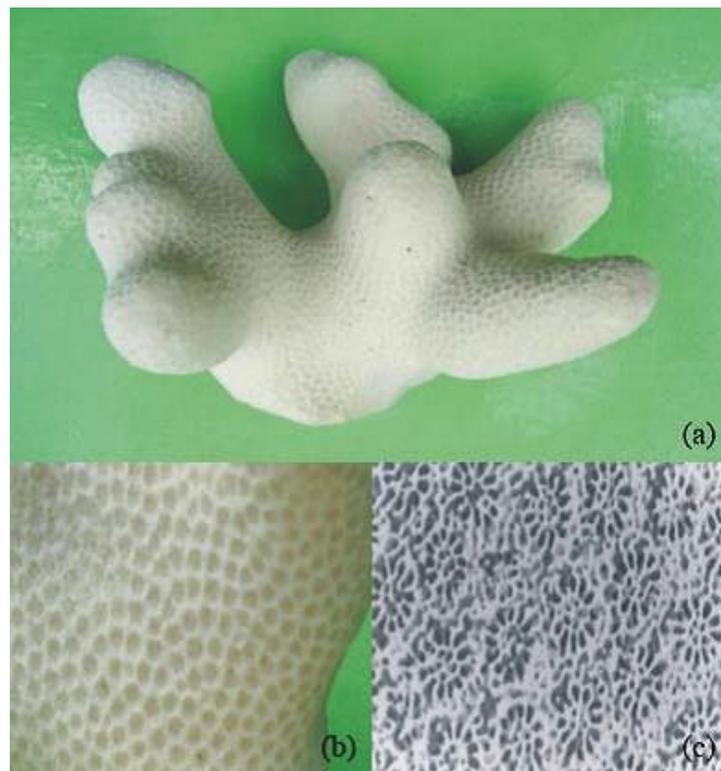
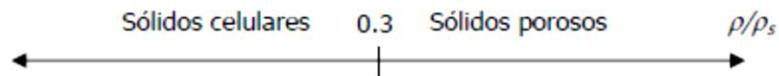


Ilustración 1 (a) Coral Porites de las costas de Cuba, (b) vista macroscópica de la estructura coralina y (c) micro morfología de dicha estructura. [16]

Estos materiales son sumamente porosos, lo que se ve reflejado en la densidad relativa (ρ), definida como ρ^*/ρ_s , donde ρ^* es la densidad del material celular y ρ_s la del material que forma el sólido macizo.

Los sólidos celulares pueden distinguirse de los sólidos porosos de acuerdo al siguiente criterio:



Y en la **Ilustración 2** se muestra la diferencia entre un sólido celular y un material poroso.

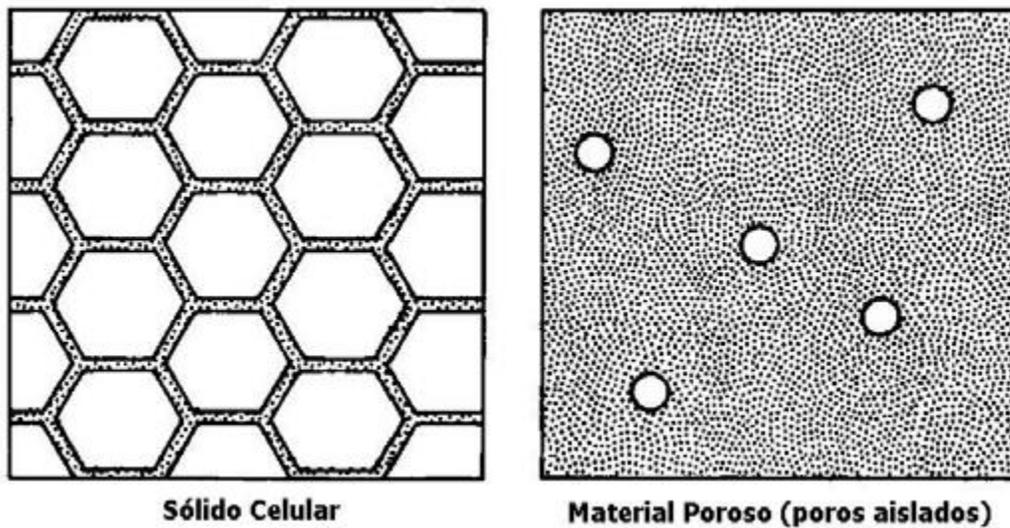


Ilustración 2 Diferencia entre material poroso y un sólido celular. [17]

La estructura “celular” puede estar constituida por celdas o poros abiertos conectados entre sí, similares a la estructura de una esponja, nombre con el que también se las define para diferenciarlas de las espumas de poros cerrados. La estructura básica de las celdas suele adoptar una morfología regular, con formas geométricas de poliedros o combinaciones de poliedros. La **Ilustración 3** presenta una imagen ilustrativa de la estructura de una espuma metálica de aluminio de poros cerrados. [15]

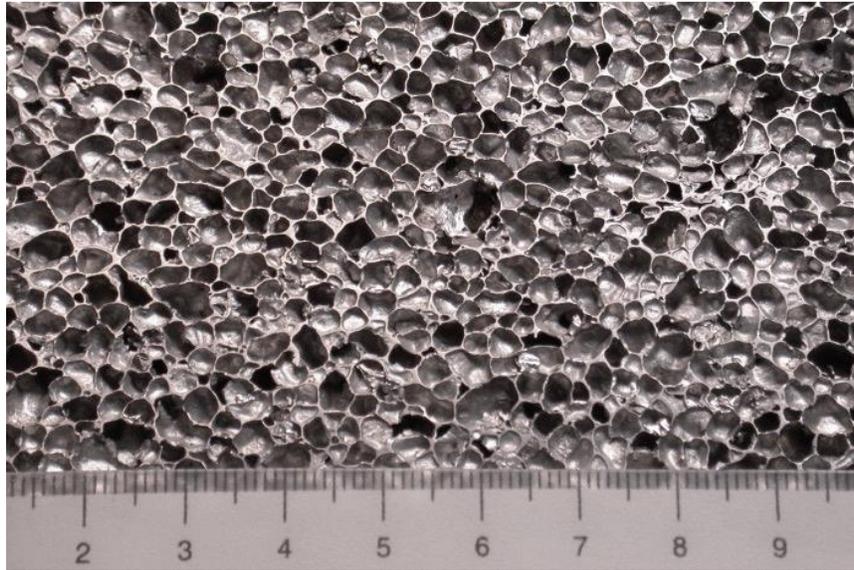
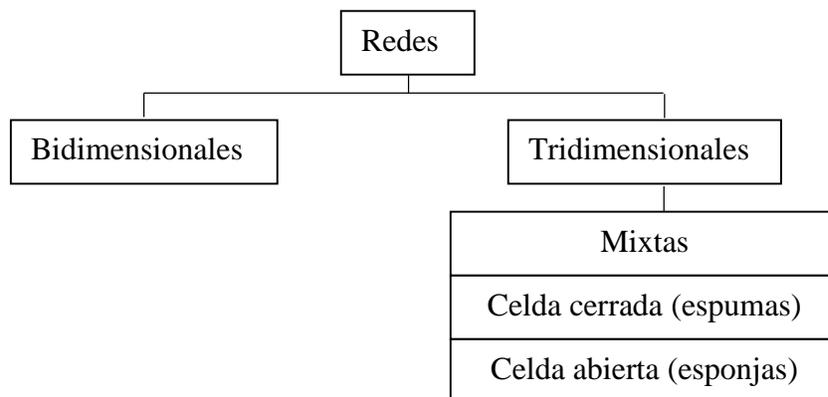


Ilustración 3 Espuma de aluminio de poro cerrado. [15]

En el caso de las espumas de poro abierto o esponjas, la estructura consiste exclusivamente en una red de bordes, que son las aristas de la figura que define la forma de cada celda, y que se conectan en nodos o vértices. Las espumas de poro cerrado presentan una estructura similar, pero existen además las caras o paredes que conectadas a los bordes, separan completamente cada poro de su vecino inmediato. [15]

En general existe una clasificación para los materiales celulares de acuerdo a como se dispongan las redes de las cuales están compuestos:



De acuerdo a lo anterior, las redes bidimensionales son aquellas en las que la disposición de los poros es de celda cerrada y solamente en los extremos se encuentra abierta, un claro ejemplo de este tipo de materiales son las celdas hexagonales de un panal de abejas, este tipo de estructuras celulares son muy utilizadas como núcleos de estructuras tipo *sándwich*. Como se muestra en la **Ilustración 4**, algunas partes automotrices hacen uso de este tipo de estructuras.

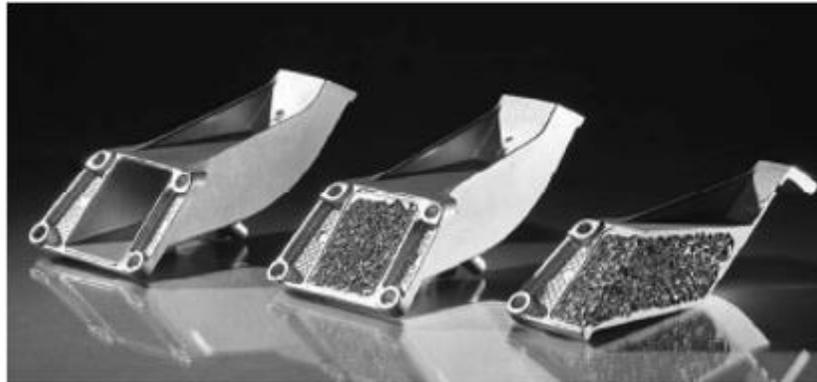


Ilustración 4 Estructura tridimensional donde la espuma es usada como núcleo.[18]

Las redes tridimensionales serán espumas o esponjas de acuerdo a que sus celdas sean cerradas o abiertas. En otros casos también materiales que cuentan con una mezcla entre ambos tipos de estructura.

Las técnicas principales para obtener espumas de aluminio de poro cerrado incluyen dos vías: la obtención de espumas a partir de metal fundido, en el que se generan burbujas por inyección de gas o por descomposición de un agente espumante, conocida como “ruta de fusión”, y la técnica conocida como ruta pulvimetalúrgica (PM) o de precursor sólido, en la cual la espuma se obtiene por fusión de un precursor sólido obtenido por mezcla y compactación de polvos de la aleación y de un agente que, por descomposición, libera gas. Esta ruta de obtención presenta muchos aspectos en común con la ruta de fusión, como la utilización de agentes espumantes y el hecho de que, finalmente, se requiere siempre el paso por el estado líquido para obtener la espuma. [15]

Por el contrario, las espumas de poro abierto suelen obtenerse a partir de un patrón sobre el que se deposita el metal, bien por colada o por otras técnicas, como electrodeposición. La

Ilustración 5a-e muestra diferentes tipos de estructuras de espumas de aluminio, incluyendo una espuma de poro abierto. [15]

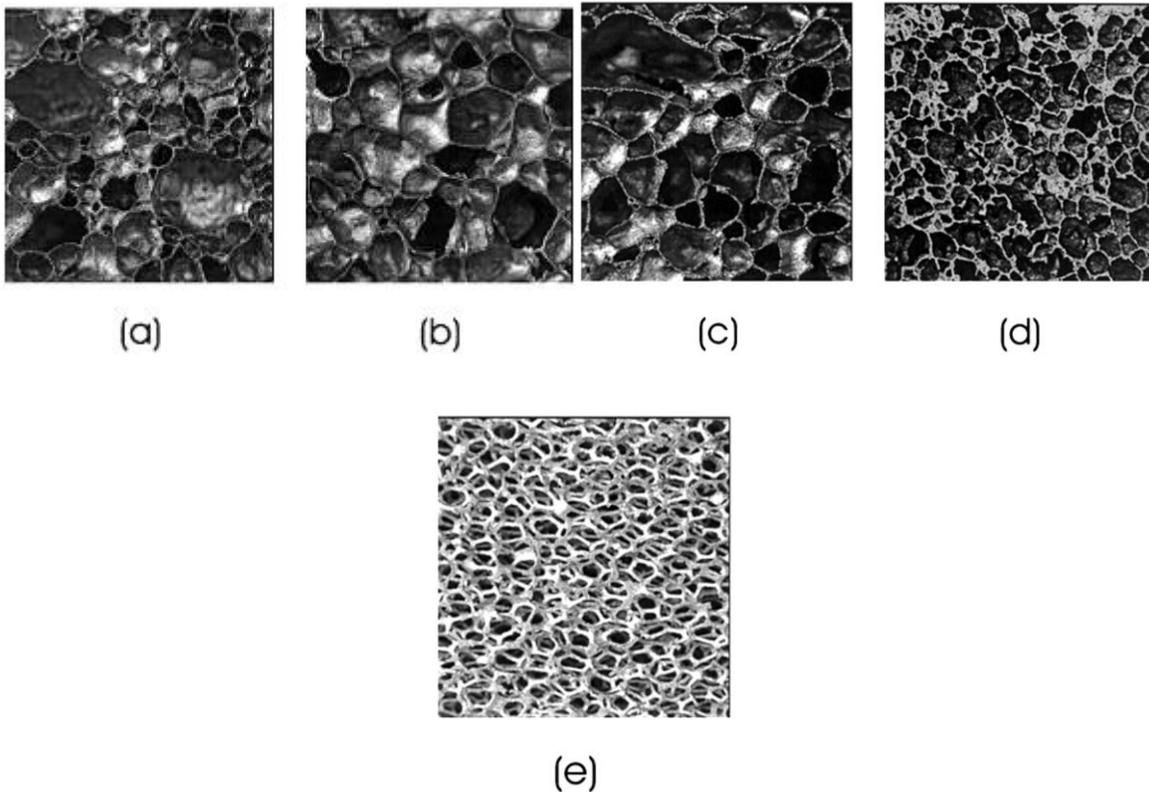


Ilustración 5 Estructura de espumas de aluminio. a) Alcan-Cymat, b) Alporas, c) Alulight, d) IFAM y e) ERG de poro abierto. [15]

En el campo científico enfocado al estudio de este tipo de materiales celulares, es imprescindible destacar el trabajo de Michael F. Ashby sobre propiedades mecánicas de los sólidos celulares, y el texto “Cellular Metals, Structure and properties” del propio Ashby que junto con Lorna Gibson, presentan una visión detallada y extensa sobre los efectos de la estructura celular en estructuras de panal y en espumas, incluyendo un capítulo dedicado específicamente a las prestaciones de estos materiales en aplicaciones relacionadas con la protección frente a impactos, aunque con muy limitadas referencias a las espumas metálicas, escasamente desarrolladas en la fecha de la primera edición (1988). [15]

1.4. Espumas metálicas

Especificando la búsqueda sobre el tema de espumas pero solamente metálicas, se encontró que estas son materiales metálicos con una morfología porosa. Pueden formar una estructura abierta de poros interconectados, similar a una esponja marina o bien una estructura de poros cerrados no conectados entre sí. A pesar de que el interés en el uso de este tipo de materiales ha ido en aumento por sus especiales características, existe confusión en lo que se refiere al término “espuma metálica”, por lo que Banhart propuso varias definiciones: [19], [20]

- Metales Celulares: el término más general, se refiere a un cuerpo metálico en el cual un gas es dispersado. La fase metálica divide espacios de celdas cerradas las cuales contienen la fase gaseosa. En un sistema ideal, las células individuales están separadas una de la otra por metal pero en realidad esto no existe.
- Metales porosos: un tipo especial de metales celulares en el que los poros están normalmente aislados uno de otros y se caracterizan por tener una superficie lisa.
- Espuma metálica (sólida): son casos especiales de metales celulares. Una espuma sólida se origina de una espuma líquida en la cual, las células son cerradas, redondas o polihedrales y están separadas una de otra por una capa delgada.
- Esponja metálica: una morfología de un metal celular en el cual las células están interconectadas. [19]

Para dar inicio a la producción de espumas metálicas se cuenta con una amplia lista para seleccionar el metal precursor; algunos de los metales más comúnmente usados son el Zinc, en gran medida el Aluminio, el Estaño, Plomo, Oro, Plata y Níquel. [19] En particular las espumas metálicas se caracterizan por tener las siguientes propiedades:

- Elevada capacidad de absorción de energía.
- Baja densidad relativa.
- Aislamiento acústico.
- Capacidad elevada para absorción de vibraciones.
- Buen nivel de aislamiento térmico.
- Elevadas temperaturas de fusión.
- Buena protección electromagnética.

- Resistencia al fuego y no desarrolla humos tóxicos.
- Reciclabilidad.
- Bajo peso específico.
- Buena maquinabilidad.

Hasta la fecha se ha sometido a estudio un amplio rango de metales y sus aleaciones para desarrollo como metal celular. Sin embargo, debido a sus excelentes propiedades de resistencia a corrosión, bajo peso específico, y sobre todo, bajo punto de fusión, el aluminio es el que muestra mayores posibilidades. Históricamente el punto de partida hacia el desarrollo de las espumas metálicas fue el aluminio y sus aleaciones, constituyendo en la actualidad el material de mayor utilización, tanto en investigación como en aplicación industrial. [14]

En las últimas décadas se ha incrementado el interés en los materiales porosos dentro del campo de la biomedicina ya que muchas de las espumas metálicas resultan ser biocompatibles con el cuerpo humano; estas espumas se caracterizan por ser de poro abierto, y se usan como implantes ortopédicos para sustituir partes de hueso o huesos completos. Otros tejidos porosos se utilizan como andamios celulares para regeneración tisular. En la **Ilustración 6** se puede observar cómo ha ido en aumento el número de publicaciones en lo que respecta a las espumas de aluminio. [15]

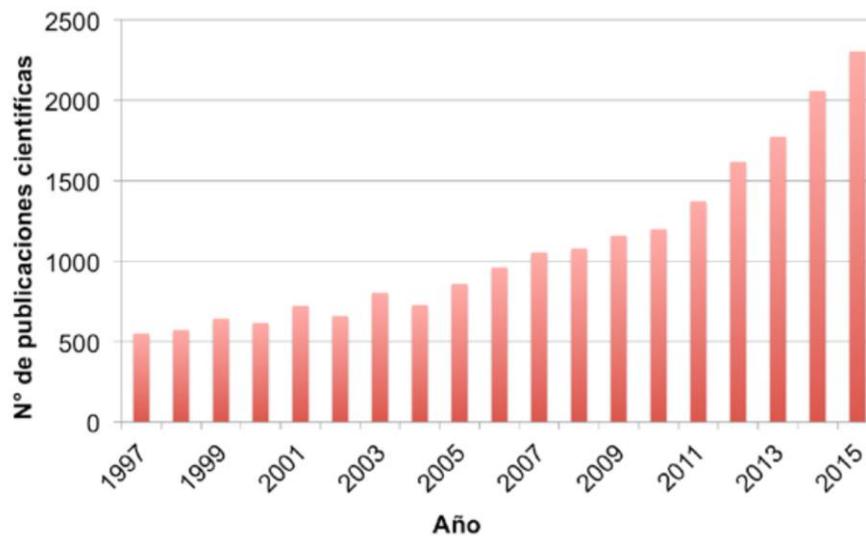


Ilustración 6 Evolución del número de publicaciones en el campo de espumas de aluminio. Fuente www.sciencedirect.com (Octubre 2015). [15]

Uno de los parámetros más importantes a la hora de caracterizar o estudiar los materiales celulares es la cantidad o fracción de gas que hay disperso dentro de la estructura, es decir, su porosidad (P). Esta se define como la fracción volumétrica de gas presente en la estructura y se calcula mediante la ecuación 1, donde ρ , ρ_s y ρ_g denotan respectivamente la densidad de la espuma, la densidad del sólido base y la densidad del gas disperso en él. Debido a la baja densidad del gas respecto a la del material base, la porosidad se puede relacionar directamente con la densidad relativa (ρ_r) de la espuma, es decir, el cociente entre la densidad de la espuma y la del sólido base. [6]

$$P = \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s - \rho_g} \approx 1 - \rho_r \dots \dots \dots (1)$$

Otro parámetro del que se habla con frecuencia, y sobre todo a la hora de planificar la fabricación de la espuma, es el grado de expansión (G). Este parámetro, que se calcula mediante la ecuación 2, indica cuantas veces se ha incrementado el volumen del material base (V_s) al introducir el gas en su interior. Está directamente relacionado con la densidad relativa que es su inverso y con la porosidad de la espuma (ecuación 1). Como ejemplo sencillo, si se fabrica una espuma con grado de expansión $G = 4$, su densidad relativa será $\rho_r = 0.25$ y su porosidad $P = 0.75$. [6]

$$G = \frac{V}{V_s} = \frac{\rho_s}{\rho} = \frac{1}{\rho_r} \dots \dots \dots (2)$$

Sin embargo, éstos no son los únicos parámetros que son importantes que se definen y con los que se trabaja con materiales celulares. También se pueden mencionar el tamaño del poro, la distribución de los poros, la morfología de las celdas, el grado de conexión entre celdas, la fracción de masa en las aristas, el espesor de las paredes, etc. [6]

1.5. Estructura celular de las espumas

1.5.1. Geometría de las celdas

La gran mayoría de las espumas, las cuales se obtienen por medio del proceso de fusión comparten ciertas características al nivel de estructura celular, e independientemente del

material que esté siendo usado para obtener la espuma, existen ciertas reglas comunes que se cumplen.

La estructura de los poliedros elementales que definen la forma de cada celda en una espuma debe cumplir la condición de que, por repetición, sea capaz de ocupar todo el espacio disponible, y esta condición se cumple para un limitado número de geometrías [21]. Plateau identificó en su tratado de geometría sólida (Plateau 1873) la forma de las celdas en las espumas como un dodecaedro rómbico. Esta conformación es capaz de rellenar todo el espacio, pero no es la forma más eficiente ya que no hace mínima la energía superficial. Kelvin propuso en 1887 el tetracaidecaedro como la celda unidad con una menor área superficial por unidad de volumen [22]. Las observaciones experimentales sobre numerosos tipos de espumas indican que la estructura real es normalmente una combinación de diferentes poliedros no regulares. Mediante simulación, Weaire y Phelan han identificado una estructura compleja que es más eficiente que la propuesta por Kelvin y que se muestra en la **Ilustración 7** [23].

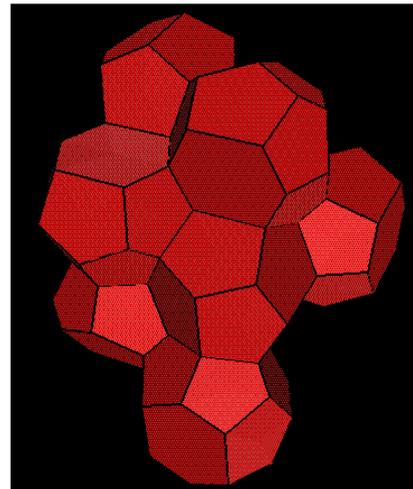
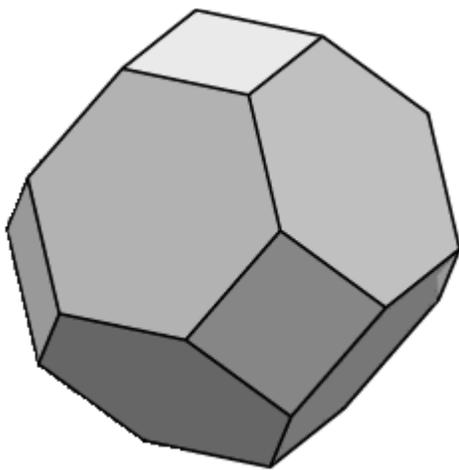


Ilustración 7 a) Tetracaidecaedro de Kelvin. Consiste en un poliedro de 14 caras: 8 hexágonos y 6 cuadrados. b) Celda de Weaire-Phelan. Consiste en 6 poliedros de 14 caras y 2 poliedros de 12 caras. [15]

Las reglas que definen la estructura de las espumas en estado líquido están gobernadas por los efectos de la tensión superficial, y fueron desarrolladas inicialmente por Plateau. Estos principios se cumplen también en todas las espumas metálicas obtenidas por fusión. [15]

Es normal que se encuentre en varias espumas líquidas la estructura descrita por Plateau, y también para algunas espumas sólidas resultantes de la solidificación de dichas espumas líquidas. Este es el caso de la mayoría de las espumas metálicas. Desde un punto de vista geométrico, la estructura celular elemental consta de vértices donde se unen los bordes, que rodean paredes y que encierran las celdas. El número de bordes que se unen en un vértice es la conectividad de bordes, Z_e (normalmente 4 en las espumas metálicas) y el número de paredes que se unen en un borde es la conectividad de paredes Z_f (normalmente 3 en las espumas metálicas). El número de vértices V , bordes B , paredes P y celdas C está relacionado por la ley de Euler (Euler 1746), que para un número importante de celdas establece que:

$$P + V - C - B = 1 \dots \dots \dots (3)$$

Esta ley se cumple en todas las espumas y representa un patrón para este tipo de estructuras.

En las espumas de poro cerrado, un parámetro adicional de interés es el modo en el que se distribuye el material entre bordes y paredes de celda. La fracción en volumen de material presente en los bordes se define por el valor ϕ , de modo que el resto del material en las paredes de las celdas sea $(1-\phi)$. La **Ilustración 8** muestra los detalles de la estructura celular típica de una espuma metálica de poro cerrado obtenida por fusión. [15]

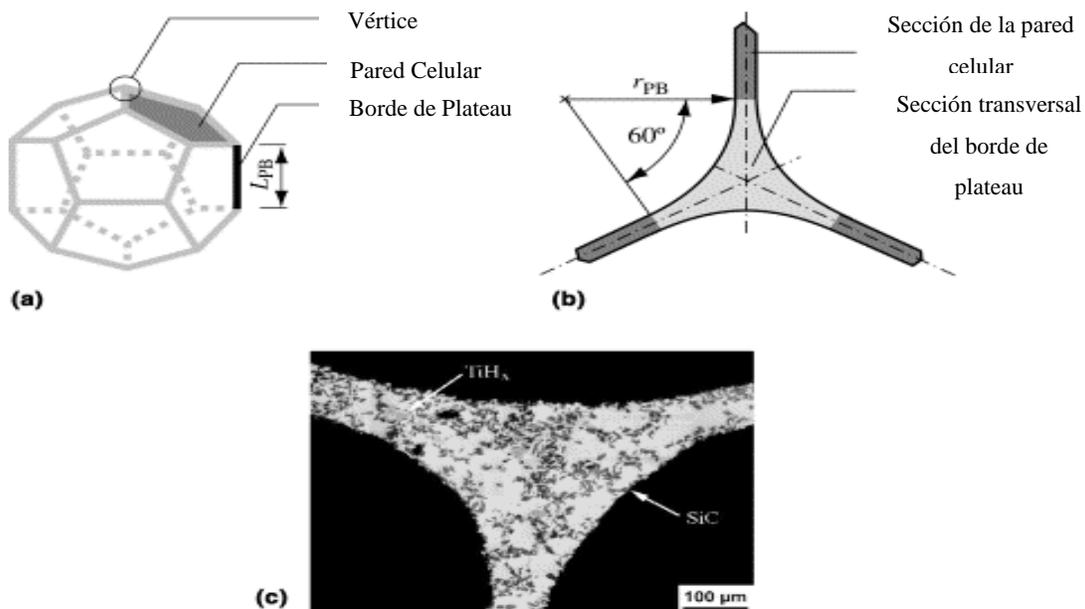


Ilustración 8 Elementos de la estructura celular en una espuma metálica de aluminio de poro cerrado. a) Celda elemental, b) Conexión de bordes y paredes, c) Micrografía de la conexión bordes-paredes en la que se identifica la naturaleza de las partículas. [15]

1.5.2. Densidad relativa de las espumas

Al momento de definir algunas de las propiedades más importantes de una espuma metálica tal como las mecánicas, eléctricas o térmicas, se toma en cuenta uno de los parámetros físicos por el cual se caracterizan a las espumas y también por el cual se diferencian del material sólido del que están hechas; ésta es su densidad relativa, ρ/ρ_s donde ρ es la densidad de la espuma, y ρ_s es la densidad del material sólido. [15]

La fracción de poros o porosidad resulta entonces igual a $(1 - \rho/\rho_s)$. Las espumas metálicas tienen una densidad relativa de entre 0.02 y 0.35 - 0.45, estando por lo tanto las porosidades entre 55 y 98 %. Cuando la porosidad es menor, el material se trata como un material poroso, en el que los poros presentan posiciones aleatorias y generan efectos de reducción de la sección neta y efectos de concentración de tensiones. La diferenciación es relevante ya que los modelos que relacionan la densidad con la estructura y con las propiedades globales de las espumas, únicamente son válidos para densidades relativas bajas, que corresponden a materiales celulares con una mesoestructura o estructura celular bien definida, en la que existen bordes y paredes. No obstante esta división dependiente del porcentaje de porosidad no es siempre tomada en cuenta. [15]

1.5.3. Anisotropía celular

Las espumas metálicas comerciales con las que se cuenta hoy en día poseen un tamaño de poro muy variable, estos tamaños generalmente varían en un rango de 1 a 10 milímetros [21]. En realidad el tamaño del poro no resulta ser lo más esencial en una espuma metálica ni lo que va a determinar sus propiedades mecánicas finales; lo que determinará dichas propiedades será la fracción de porosidad que posea la espuma. Sin embargo, otro parámetro muy importante que también define las propiedades finales de la espuma metálica es la geometría de la celda, ya que como sucede en la estructura de los materiales en su microestructura, de acuerdo a la orientación de los cristales, se generan materiales isotrópicos o anisotrópicos, y en el caso de las espumas metálicas, de igual manera, si la geometría de las celdas tuviese alguna orientación preferencial se generarían espumas con propiedades dependientes de la dirección en la cual sean medidas; esto suele suceder por ejemplo en

espumas poliméricas. La existencia de dimensiones diferentes en diferentes direcciones se define como anisotropía estructural R, y su determinación para unos ejes de referencia genéricos 1 y 2, se realiza por la relación simple $R_{12} = L_1/L_2$, donde L_1 y L_2 son las dimensiones de poro en las direcciones 1 y 2, en donde dichas direcciones son perpendiculares entre sí. [15]

1.5.4. Relaciones dimensionales estructura-densidad

Cuando se tiene una geometría de celda específica y cuando se conoce el tamaño de los poros o las longitudes de las aristas “L”, y cuando se conocen las dimensiones del espesor de paredes t_f y el espesor de los bordes t_e , es posible predecir con mucha precisión el valor de la densidad relativa de la espuma. La densidad relativa es un parámetro que es fácil de medir por varios métodos, y está relacionado directamente con la estructura de la espuma. Siempre que el espesor de la pared de la celda sea mucho menor que el tamaño de los poros (esto indicaría que se tiene una densidad relativa baja < 0.4) se cumple que la densidad relativa es directamente proporcional a la relación t/L para las espumas de poro cerrado, y en el caso de las espumas de poro abierto se cumple $(t/L)^2$. [15]

Para espumas de poro cerrado (caso ideal):

$$2. \frac{\rho}{\rho_s} = C_2 \left(\frac{t_f}{L}\right) \dots\dots\dots (4)$$

Para espumas de poro abierto:

$$3. \frac{\rho}{\rho_s} = C_1 \left(\frac{t_e}{L}\right)^2 \dots\dots\dots (5)$$

En donde t_e y t_f son el espesor del borde (para espumas de poro abierto) y de pared (para espumas de poro cerrado) respectivamente, L es el tamaño del poro y las constantes C_1 y C_2 son características de la geometría de la celda. [15]

1.6. Formación y estabilización de espumas metálicas

Hoy en día existen diversos métodos para la obtención de espumas metálicas o sólidos celulares, de igual manera existe una gran gama de materiales por medio de los cuales se pueden obtener; sin embargo aún con los recientes avances que se ha tenido en estas técnicas, hablando específicamente en el área de los metales, estos materiales tienen una gran deficiencia en su tecnología en comparación con las tecnologías para producir espumas poliméricas por ejemplo, por lo cual los mayores problemas con los que se cuenta, es el obtener espumas de estructura homogénea y con mayor problemática es el obtenerlas con una geometría y dimensiones de celda controladas, para lo cual se obtendrían propiedades mecánicas que fuesen tanto reproducibles así como predecibles antes de su fabricación. [15]

Con el avance de las diferentes técnicas de caracterización, se ha permitido el estudio de los diferentes fenómenos que ocurren durante la etapa de espumación *in situ*, con lo cual la comprensión de estos fenómenos ha sido mucho más precisa y con esto las mejoras en la tecnología para su producción ha ido perfeccionándose.

1.7. Antecedentes de técnicas de fabricación

1.7.1. Espumas de primera generación (1925-1970)

Aunque las espumas metálicas son un activo campo de investigación actual, y suelen calificarse como “materiales avanzados”, los estudios sobre su obtención y aplicaciones se remontan a la primera mitad del siglo pasado. De hecho, la primera patente que ya contemplaba la obtención de espumas de aluminio tiene origen francés y data de 1925, pero no existe constancia de que llegase a implementarse a escala industrial. A partir de los años 40, la producción de espumas metálicas, y en especial de las espumas de aluminio con potenciales aplicaciones en aeronáutica, en automoción y en el sector naval, fue objeto de varias patentes en USA hasta 1970, por parte de investigadores de las compañías Bjorksten Research Laboratories (BRL) y posteriormente Ethyl Corporation, empleando técnicas de espumado a partir de aluminio previamente fundido. El desarrollo de esta primera generación de espumas se caracterizó por su carácter comercial y estratégico, al servicio de empresas y/o

agencias estatales y en el marco de programas oficiales de carácter militar, por lo que la información disponible de dicho periodo se limita a la publicada en las patentes. [15]

Benjamin Sosnick experimentó la espumación de aluminio con mercurio como agente espumante. Una mezcla de 90% de Al y 10% de Hg, se funde en una cámara de alta presión. Una vez fundida, se elimina la presión permitiendo la vaporización del mercurio en el interior del aluminio fundido y creando de esta forma una espuma (Sosnick 1943). Entre los años 50 y 60 se desarrollaron métodos menos peligrosos, proponiendo por primera vez el uso de agentes espumantes como TiH_2 , ZrH_2 o $CaCO_3$ que generan internamente gas al descomponerse en el baño líquido. Para la obtención de espumas de aluminio, la técnica requería adiciones de hasta un 10% de hidruros, y la aplicación de enfriamientos rápidos con el fin de evitar el colapso de las espumas. [15]

1.7.2. Espumas de segunda generación (1990-2015)

A partir de 1986 hay un nuevo impulso a la producción y a la investigación sobre espumas de aluminio de poro cerrado. A finales de los años 80 aparecen también varias iniciativas por parte de compañías que producen espumas de aluminio de poro cerrado a nivel industrial. Aunque se han propuesto muchas otras técnicas de obtención de espumas de aluminio, las tres tecnologías de mayor éxito incluyen métodos optimizados, pero ya explorados en la primera etapa: dos de las técnicas de obtención son por espumado directo en el baño fundido, una de ellas mediante inyección de gas y la otra mediante adición de agentes espumantes. La tercera vía es la ruta de espumado a partir de precursores sólidos, también denominada ruta indirecta o ruta PM. [15] En la actualidad existen diversos métodos de producción de espumas metálicas. Algunos son similares a las técnicas que se utilizan para la espumación de líquidos acuosos o poliméricos, mientras que otros han sido desarrollados exclusivamente para los metales, aprovechando su capacidad de sinterización o el hecho de que pueden ser depositados electrolíticamente. Desde el punto de vista del estado en el que se encuentra el metal cuando se genera la espuma, las técnicas pueden agruparse en cuatro categorías, como se muestra en la **Ilustración 9**: metal líquido, metal sólido en forma de polvo, metal en estado vapor y metal en forma de solución de iones. [15]

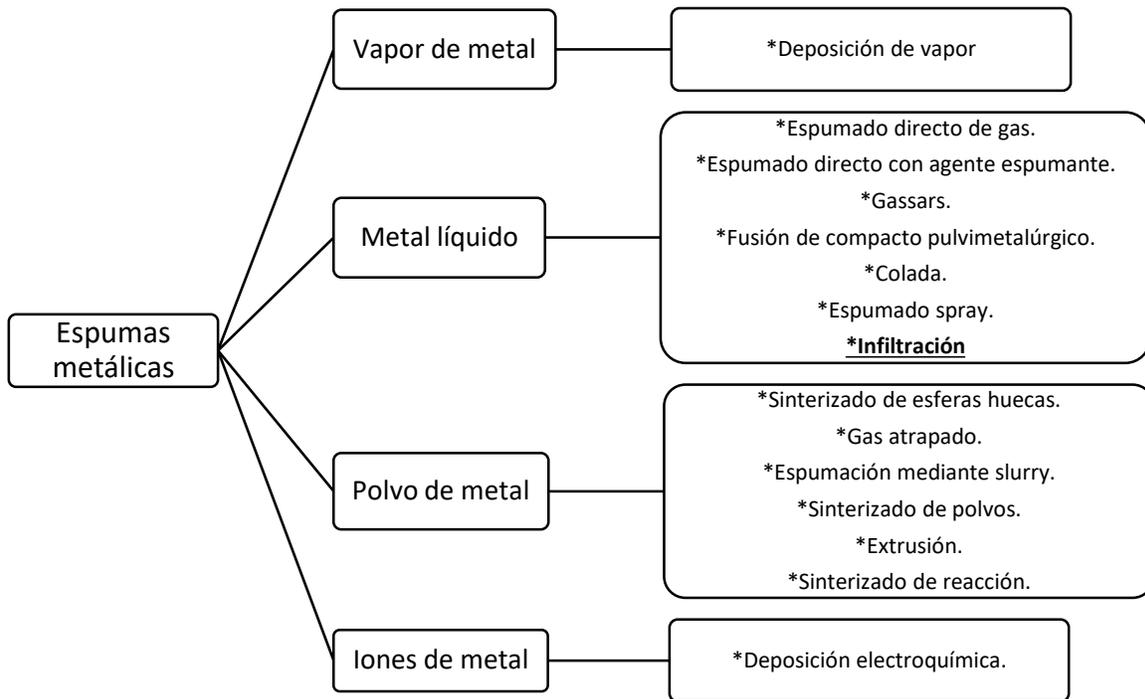


Ilustración 9 Clasificación de métodos de producción de espumas metálicas. Adaptado de (Banhart 2001). [15]

Y específicamente dentro del campo de producción de espumas por los métodos de fusión y de metalurgia de polvos utilizando preformas; este trabajo se basará en la vía líquida que se subdivide en los siguientes procesos mostrados en la **Ilustración 10**.

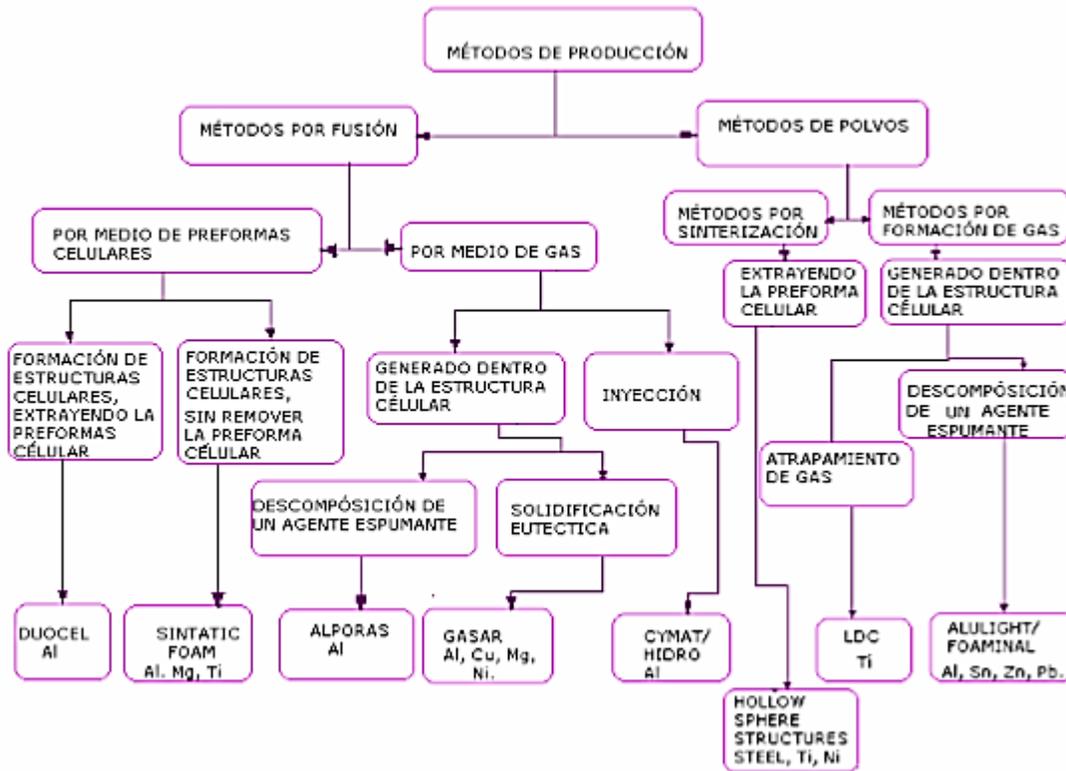


Ilustración 10 Esquema de los métodos de producción por fusión y por Metalurgia de Polvos. [24]

En donde algunos de los métodos más usados actualmente se definen enseguida:

***Proceso HYDRO/ALCAN**

El metal líquido, cuya viscosidad ha sido incrementada por la adición de partículas cerámicas (carburo de silicio, alúmina o magnesia), es espumado por la inyección de gases (aire, nitrógeno o argón) utilizando impulsores rotatorios o soplantes vibratorios, que producen una mezcla viscosa que flota en la superficie del líquido formando una masa uniforme de burbujas de gas en el líquido (**Ilustración 11**). La presencia de las partículas cerámicas en el líquido hace que la espuma sea relativamente estable. La extracción y solidificación de la espuma permite obtener planchas continuas de la longitud deseada y espesores variables, habitualmente, de 10 cm. La fracción de partículas cerámicas está en un intervalo del 10 al 20 %, con tamaños de partícula entre 5 y 20 μm . La densidad del aluminio producido está en

el intervalo de 0.07 a 0.54 gr/cm³, con tamaños de poro de 3 a 25 mm y espesores de pared de 50 a 85 µm. Los tamaños de poros y la densidad del producto se pueden modificar variando los parámetros operacionales.

Este proceso desarrollado por Alcan International y CYMAT Corporation, tiene como principales ventajas el ser una técnica de fabricación continua, por lo que pueden hacerse cantidades grandes, y es un proceso económico y relativamente sencillo. Los inconvenientes son las dificultades para controlar la dispersión de gas y el tamaño de los poros, que pueden ser muy grandes (bajas propiedades mecánicas). Además, el proceso sólo produce planchas de espuma, la superficie es irregular, necesita mezclar partículas cerámicas y no pueden obtenerse todas las aleaciones (algunas no son bastante viscosas). [13]

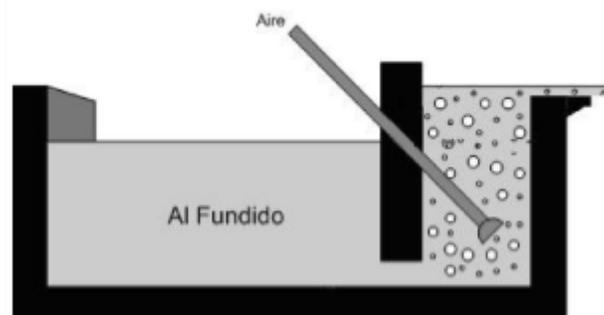


Ilustración 11 Fabricación de espuma de aluminio por adición directa de gas a la fundición con viscosidad reforzada. [13]

*Proceso Alporas

Consiste en agregar gas al metal fundido mediante un agente espumante o compuesto que, al descomponerse a una determinada temperatura, emite un gas que inicia el proceso de espumado, **Ilustración 12**. Usando un agente espumante sólido es posible dispersar el gas más uniformemente a lo largo del metal fundido, dando lugar a un mayor control sobre la localización y tamaño de los poros de forma que pueden obtenerse de tamaño más pequeño y con una distribución más uniforme. El proceso requiere aumentar la viscosidad del metal fundido para impedir que las burbujas de gas floten, se unan o escapen al exterior. Esto, puede lograrse mezclando polvos o fibras en el metal fundido. La Compañía de Alambre Shinko desarrolló el método Alporas®, mezclando aproximadamente 1.5 % de Ca o Mg en una

fundición de aluminio a 680 °C, para aumentar su viscosidad. Después de que la viscosidad alcanza el valor deseado se agrega 1.6 % de TiH_2 , el cual libera gas (hidrógeno) y titanio que entra en solución sólida. Esto provoca la espumación del aluminio fundido con porosidades entre 84 y 95 %, tamaños de poro promedio de 2 a 10 mm y densidades típicamente entre 0.18 y 0.24 g/cm³, fabricándose piezas de dimensiones 2050 ×650 ×450 mm, de un peso superior a 160 kg. Entre las ventajas del proceso Alporas se pueden señalar: un tamaño celular uniforme, con poro más pequeño y más homogéneo que la espuma Alcan; además, no requiere la adición de partículas de carburo de silicio. El proceso es fácil de hacer, pero es más costoso debido a los aditivos y no produce espumas con la geometría específica (el espumante no puede ser agitado y mezclado adecuadamente en moldes complejos). [13]

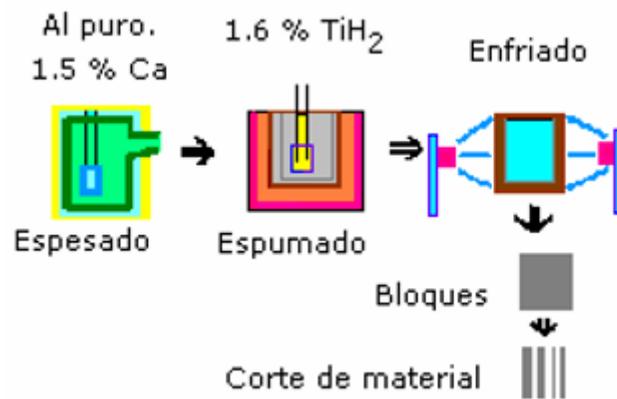


Ilustración 12 Proceso de producción de Alporas. [24]

***Proceso Formgrip (dos etapas)**

El proceso utiliza el metal fundido para producir un material espumable (precursor), donde se hace uso de hidruro de titanio que al elevar la temperatura, produce una capa de óxido de titanio en la superficie, que limita la permeabilidad al hidrógeno. El hidruro es, entonces, mezclado en el aluminio fundido (agregando las partículas de carburo de silicio para aumentar la viscosidad); la capa de óxido en las partículas del hidruro actúa como una barrera para retardar la descomposición del hidruro de titanio dentro del metal líquido durante un tiempo suficiente para permitir dispersar el hidruro de titanio dentro de la fundición. Esto, produce un precursor ligeramente poroso hecho de metal, agente espumante, y carburo de

silicio que puede ser cortado y almacenado. En un segundo paso, el precursor se coloca en un molde (de cualquier forma) y se calienta a una temperatura ligeramente superior a la temperatura de fusión de la aleación de aluminio, típicamente, a 680 °C. El hidruro de titanio se descompone, emite hidrógeno y forma una espuma que expande el precursor hasta llenar el molde. Las espumas producidas presentan una estructura homogénea y controlada. Pueden fabricarse piezas con geometría variada puesto que el precursor puede calentarse dentro de cualquier molde complejo para producir dimensiones muy exactas. La desventaja principal del proceso es la restricción de los materiales usados (en particular la necesidad de agregar partículas cerámicas o de SiC) en el metal fundido para reforzar la viscosidad, lo que aumenta el costo del proceso y hace espumas más quebradizas. [13]

*Precursor espumable producido por técnicas de metalurgia de polvos (Alulight)

Este método es utilizado por Alulight International para producir espumas de aleación de aluminio con porosidades entre 63 y 89 % y tamaños de poros del orden de milímetros (**Ilustración 13**). El proceso consiste en producir un precursor espumable resultado de mezclar partículas metálicas con un agente espumante y un elemento reforzante para aumentar la viscosidad del metal fundido. El secreto para producir un precursor conveniente es comprimir los polvos mezclados en un bloque relativamente sólido, para que cuando tenga lugar el espumado, el gas no escape del material. Esto puede lograrse por compactación de una mezcla de polvos, seguida por una extrusión en frío. Alternativamente, la mezcla de polvo puede estar compactada en caliente a una temperatura por debajo de la que provoca la descomposición del agente espumante. En un paso siguiente, el precursor se funde dentro de un molde y se calienta a la temperatura de descomposición del agente espumante. La estructura celular de la espuma producida con estos precursores es estrechamente dependiente de la temperatura, la presión, el tiempo de cocción y la aleación usada. Esta técnica se ha usado para producir espumas de aluminio, bronce y cobre, con 0.5 y 1 % de hidruro de titanio o bicarbonato sódico como agentes espumantes. La desventaja principal es su costo relativamente alto debido, principalmente, a la necesidad de producir, mezclar y manejar los polvos de metal finos. [13]

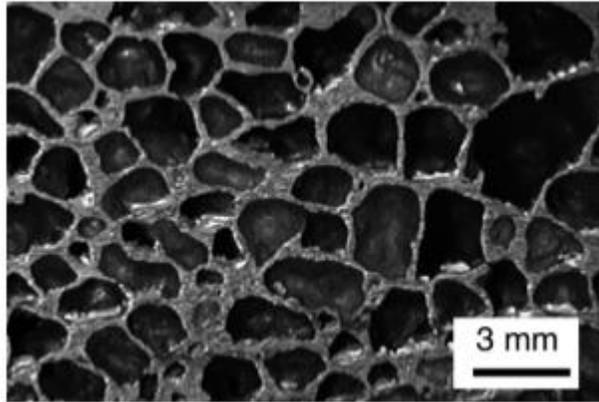


Ilustración 13 Espuma de aluminio obtenida mediante un precursor espumable producido por pulvimetalurgia (Alulight). [13]

*Proceso Gasar

Solidificación eutéctica sólido-gas. Esta técnica es utilizable en aquellos metales que, en estado líquido, formen un sistema eutéctico con el hidrógeno gaseoso (H_2). En dicha transformación eutéctica, se funde y se remueve el metal deseado en una atmósfera rica en hidrógeno a presiones superiores a 50 atm con el fin de que éste último se disuelva hasta llegar a una proporción cercana a la del eutéctico para que luego la solución líquida sea enfriada a través del punto eutéctico y el hidrógeno se separe y quede atrapado en el metal formando burbujas.

La morfología (tamaño, forma, etc.) de los poros resultantes puede variar mucho en función del contenido en hidrógeno y la presión del metal fundido, de la dirección e intensidad del removido y de la composición del propio baño. Los poros suelen ser alargados en dirección del avance de la solidificación (véase la **Ilustración 14**). El diámetro de los poros puede variar entre 10 μm y 10 mm, con unas longitudes de poro entre 100 μm y 300 mm y una porosidad entre 5% y 75%. En una misma espuma metálica, el diámetro de los poros es muy desigual debido a coalescencia de poros pequeños para formar uno mayor.

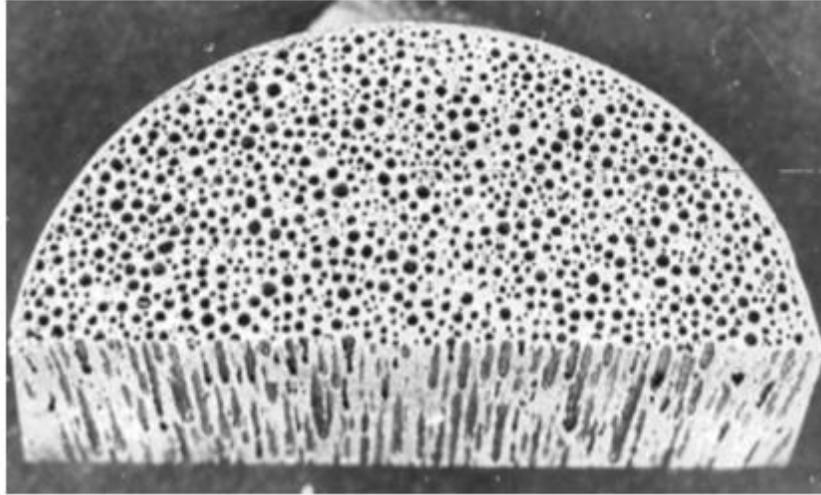


Ilustración 14 Sección de espuma metálica ‘Gasar’ con poros muy alargados. [25]

Entre las ventajas se puede mencionar su amplio espectro de tamaño medio de poros posible. Las desventajas son evidentes en cuanto a la variabilidad en la morfología de los poros, que no dan lugar a un material microscópicamente isótropo.

1.8. Método de infiltración

Debido a la importancia del proceso de fabricación de espumas por infiltración para nuestro trabajo, se abordará este tema de manera particular a continuación. El proceso de infiltración consiste en llenar un molde con un material preferentemente de bajo costo que formará los poros una vez eliminados. Entre estos materiales de sacrificio, también denominados espaciadores (space holder phase, por sus siglas en Inglés, SHP) el NaCl está entre los más usados, lo que se detallará más adelante. Estos materiales pueden ser una preforma establecida o granos, ya sea sinterizados previamente o no. Independientemente de que existen un gran número de procesos para la fabricación de espumas metálicas usando estas preformas para producir espumas con geometría de poros abiertos, algunos autores han reportado la formación de espumas metálicas altamente porosas sin el uso de tales agentes removibles para algunas aleaciones con características especiales [13].

En el caso de uso de preformas previamente sinterizadas al calentar las partículas en éstas ocurre fusión incipiente en su superficie de contacto, produciendo una unión entre ellos lo que permite mantener canales abiertos, y así se obtiene como geometría general final la del molde. En el proceso más simple, el metal fundido se vierte simplemente en la preforma para infiltrar por gravedad los canales. La estructura entera puede ser removida del molde o dejarse enfriar in-situ, y posteriormente eliminarse por procesos tales como la disolución. Al final, se obtiene una espuma con poro abierto cuyo tamaño y diseño es similar a los granos de SHP originales.

Una versión más avanzada de este proceso infiltra el metal líquido a presión por un gas inerte, donde la preforma de sal está al vacío. El uso de presión durante el paso de infiltración produce espumas con poros pequeños de hasta 50 μm . Este proceso ofrece la posibilidad adicional de usar SHP de diversos tamaños durante la producción de la preforma para producir espumas con diferentes tamaños de poro, en regiones diferentes o con una distribución controlada de tamaño de poro. El costo, también, es el más bajo porque no se utiliza metal en polvo. Se han producido espumas con un tamaño de poro entre 50 μm y 5 mm. No hay restricción en los metales o aleaciones que pueden usarse en este proceso, a no ser que reaccionen con el SHP. La calidad de las espumas producidas por este método es buena, teniendo como desventajas que el proceso es lento, difícil a escala industrial, e involucra muchos pasos. [13]

El proceso usado para infiltración consta básicamente de 5 pasos:

1. Moldeo de la preforma: Un espaciador soluble con una geometría específica y conocida es puesto 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: Después de que la preforma ha sido enfriada, el metal se posa sobre la preforma y se introduce nuevamente al horno para fundir el metal.
4. Infiltración del metal: El metal líquido es infiltrado en la preforma rígida para llenar los espacios vacíos en ella.

5. Eliminación de la preforma: Después de que el sistema preforma/metal ha sido retirado del horno para solidificar el metal, este se introduce en el solvente adecuado para eliminar la preforma, lo cual se hace comúnmente al disolver el espaciador. [26]

En este proceso existen parámetros que afectan la estructura final de la espuma producida, los cuales pueden ser asociados a:

- 1) Los materiales (morfología, composición, etc.).
- 2) Condiciones de infiltración (tiempo, temperatura y atmósfera).

Estos parámetros mencionados deben ser controlados adecuadamente para obtener las espumas con las cualidades precisas que este proceso ofrece. [27] De manera gráfica este proceso se describe en la **Ilustración 15** enseguida:

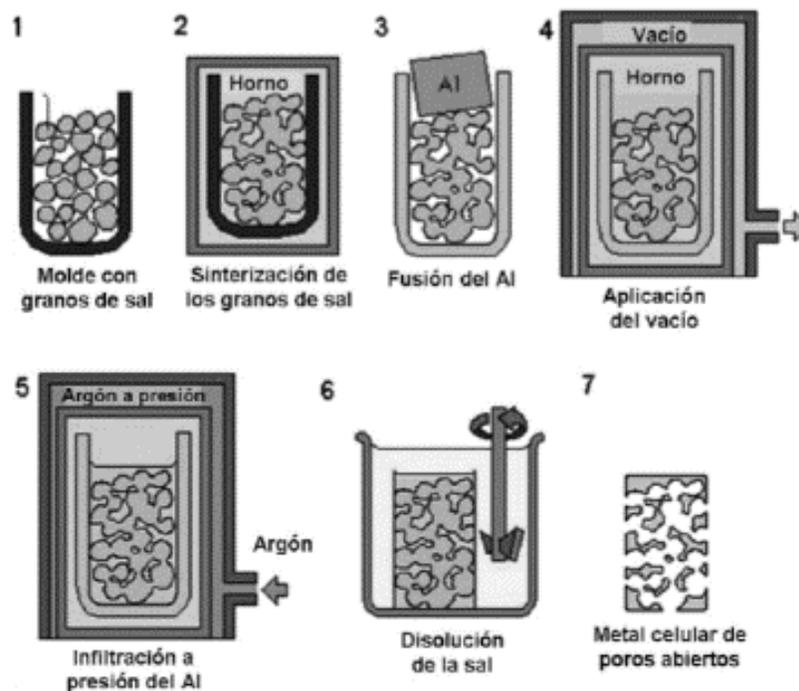


Ilustración 15 Proceso de infiltración con espaciadores de NaCl, versión avanzada del proceso. [28]

1.9. Partículas espaciadoras (Space Holders)

Las espumas pueden ser producidas colando el metal líquido sobre partículas inorgánicas e incluso orgánicas, esferas huecas de baja densidad, o de modo contrario introduciendo estas partículas al baño metálico. Cuando las partículas permanecen en el metal después del colado producen lo que es conocido como “espuma sintáctica”, y por otro lado estas pueden ser removidas por disolución en solventes o ácidos adecuados, o por tratamiento térmico. Para llevar a cabo el proceso de disolución es necesario que exista un punto de contacto entre las partículas, de otra manera quedarían partículas individuales atrapadas dentro de la espuma. [20]

Una clasificación general de los espaciadores existentes es la siguiente: [28]

- Removibles térmicamente
- Removibles por un solvente
- Esferas huecas para fabricar espumas sintácticas

Como espaciadores inorgánicos pueden ser usados Pellets de vermiculita o arcilla roja, sales solubles, pellets de arena, esferas de vidrio o esferas huecas de aluminio. Como espaciadores orgánicos son usadas esferas de polímero cuando la solidificación de la fundición es lo suficientemente rápida. Debido a la alta tensión superficial de los metales líquidos, la mojabilidad de las partículas puede volverse un problema, ya que en general los intersticios entre los gránulos no se llenan completamente de metal líquido. Esto se puede evitar creando un vacío entre los gránulos o ejerciendo presión sobre el metal líquido, ya que el llenar totalmente los huecos es requisito vital para un buen producto final. En cuanto a las sales espaciadoras, éstas son removidas por disolución en agua, los pellets de arena pueden ser removidos fácilmente si el aglomerante se descompone con temperatura, y las esferas de polímero se eliminan por pirólisis térmica. [20]

Una de las principales ventajas de hacer uso de espaciadores es el control que se tiene en la distribución del tamaño de los poros, que es dado por la distribución del tamaño de las partículas espaciadoras. Por otro lado, la porosidad máxima que puede ser alcanzada usando espaciadores es limitada, normalmente valores por debajo del 80%. [20]

1.10. Propiedades de las espumas metálicas

1.10.1. Propiedades mecánicas

Las propiedades y el comportamiento de las espumas dependen en gran parte de la porosidad existente en ellas, siendo considerados diferentes ensayos para la evaluación de sus propiedades mecánicas, en donde la resistencia a la compresión es el más ampliamente realizado. Además se realizan ensayos de tracción, ductilidad, pruebas de impacto, fatiga, dureza y resistencia a la ruptura transversal, absorción de impacto, sonido, etc. El ensayo de resistencia a la ruptura transversal requiere mucha atención, debido al carácter frágil de los materiales porosos. [29]

La porosidad en un material propicia que las propiedades mecánicas de este se degraden debido a que existe una reducción en el área efectiva de la región transversal de las piezas, y esto a su vez genera un incremento en el valor medio del esfuerzo transferido a través de los puentes de material entre los mismos poros.

En el caso de piezas en las que se desea porosidad interconectada, en la que su aplicación será para el paso de un fluido a través de ella, además de la resistencia mecánica, es requisito importante la existencia de un nivel adecuado de permeabilidad, para que un determinado fluido o sustancia pueda desplazarse adecuadamente en su interior. [29]

En lo que respecta a las propiedades de las espumas cabe destacar su extenso rango de aplicaciones a diferencia de los materiales sólidos. En la **Ilustración 16** se aprecia con más detalle esta comparación mostrando cuatro propiedades relevantes.

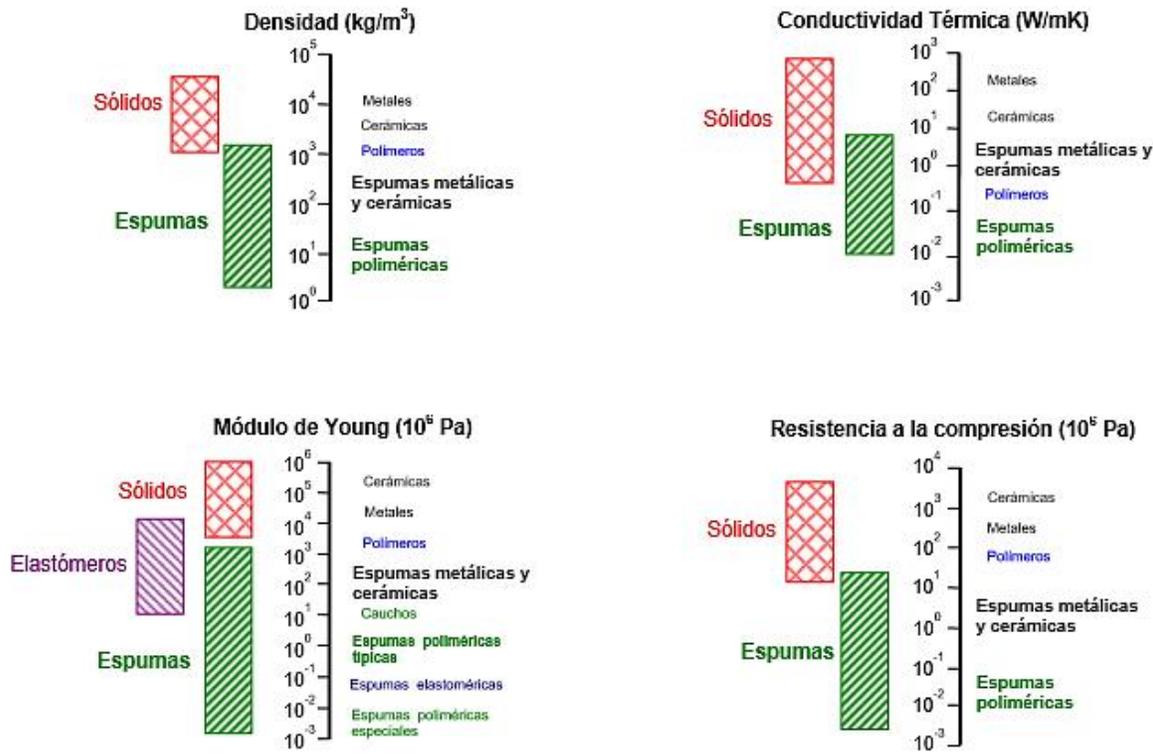


Ilustración 16 Rango de propiedades de los materiales sólidos frente a los celulares. [6]

1.10.1.1. Módulo de elasticidad

Esta propiedad depende fuertemente de la densidad, a mayor porosidad menor módulo elástico, siguiendo una función exponencial cuyo exponente es 1.6 [13], [30], [31]. En espumas de poro abierto, los límites de la celda se deforman inicialmente por flexión. El módulo de Young puede ser calculado partiendo de un análisis dimensional de la deflexión de los bordes flexionados. El módulo relativo (el de la espuma, E^* , dividido por el del sólido, E_s) es proporcional al cuadrado de la densidad relativa. [32]

$$E^*/E_s = C_1 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2 \dots\dots\dots (6)$$

Donde C_1 es una constante relacionada a la geometría de la celda.

Por otro lado, en las celdas de poro cerrado es más complicado. Cuando la espuma es cargada, existe un estiramiento en las caras planas de las celdas sumado a la flexión de los límites de las celdas, añadiendo una densidad lineal a la ecuación 7. [32]

$$E^*/E_s = C_1\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2 + C'_1\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right) \dots \dots \dots (7)$$

1.10.1.2. Respuesta tensión--deformación bajo cargas de compresión

En una gran cantidad de trabajos se han estudiado las propiedades mecánicas de las espumas metálicas, principalmente el comportamiento bajo diferentes condiciones de carga, tensión uniaxial, compresión uniaxial, estados triaxiales, indentación, flexión, cizalladura, fatiga, etc. [17], [33], [34]

En este trabajo de tesis se prestará mayor atención al comportamiento bajo cargas de compresión, que es una de las características más importantes que se aprovechan para las aplicaciones de absorción de energía, por su gran capacidad de deformación plástica. Las espumas bajo cargas de compresión pueden tener comportamientos diferentes, pudiendo comportarse de manera elastomérica, elástica-plástica o elástica-frágil [34], como se observa en la **Ilustración 17**. Todo esto dependerá de la naturaleza del material del cual esté conformada la espuma y/o del proceso por el cual se haya producido, así como de las características finales obtenidas, tales como porosidad, distribución, etc.

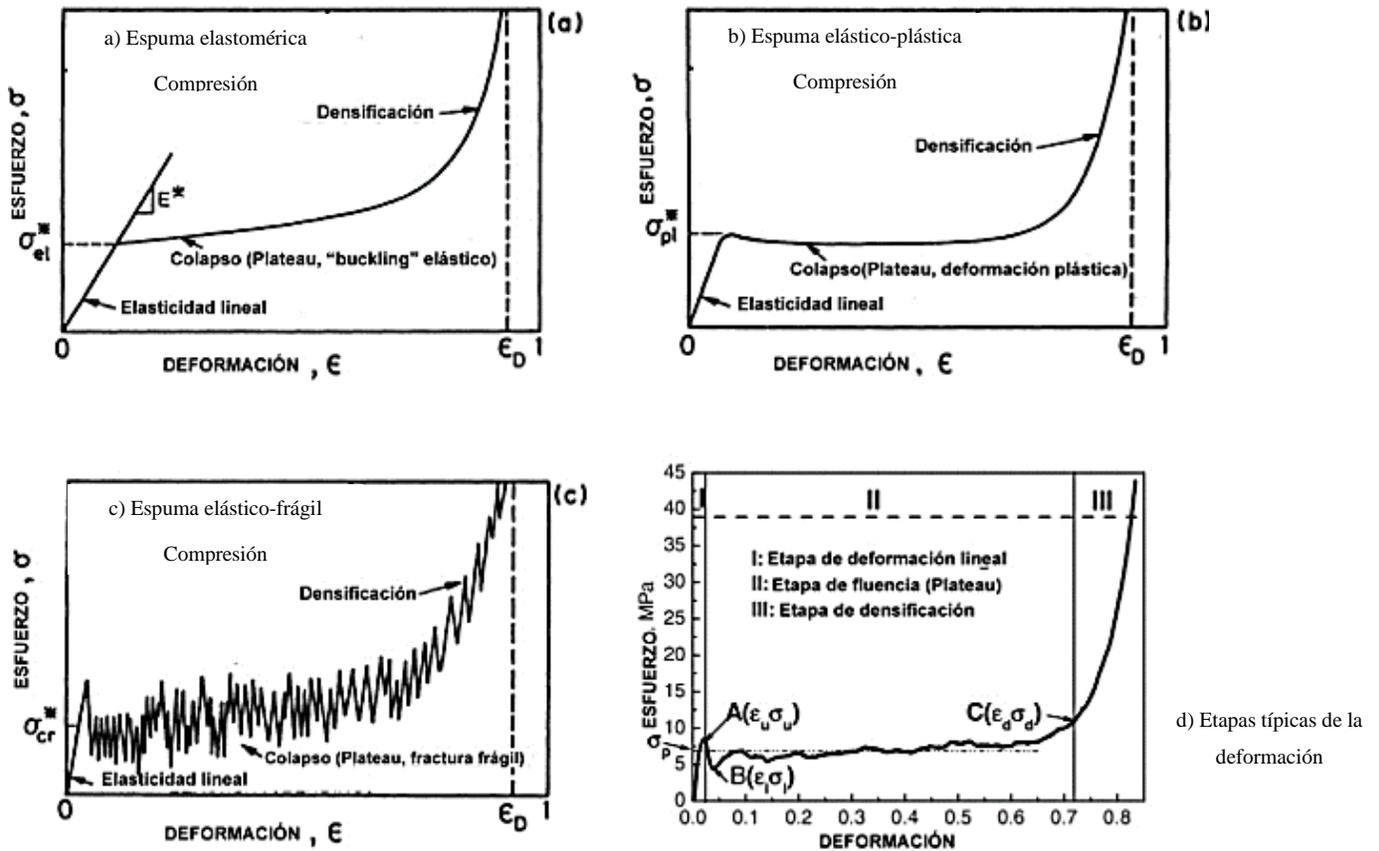


Ilustración 17 Curvas esfuerzo deformación de distintos comportamientos de un sólido celular [21].

En el caso de las espumas de metálicas generalmente se comportan como se observa en el inciso b de la **Ilustración 17**, siendo elástica-plástica. Como pudo apreciarse en la **Ilustración 17d**, y al igual que la mayoría de los casos, se dividen en tres zonas, que se describen a continuación:

I- Zona elástica lineal

Esta etapa, **Ilustración 18**, sucede a bajas deformaciones y depende del tipo de celda así como de la morfología. Durante esta etapa el mecanismo principal de deformación es la deflexión de los bordes de las celdas para espumas de poro abierto, y para espumas de poro cerrado, por un lado se encuentra la deflexión de los bordes y por otro lado también está el efecto de la extensión o compresión de las paredes o membranas, lo que incrementa la contribución de la rigidez axial de la celda al módulo elástico. [21], [34]

Para el caso en el que la celda es abierta y suponiendo que toma la forma cúbica simple, en donde el largo de los brazos es l y el espesor es t , un diagrama representativo del fenómeno sería de la siguiente manera:

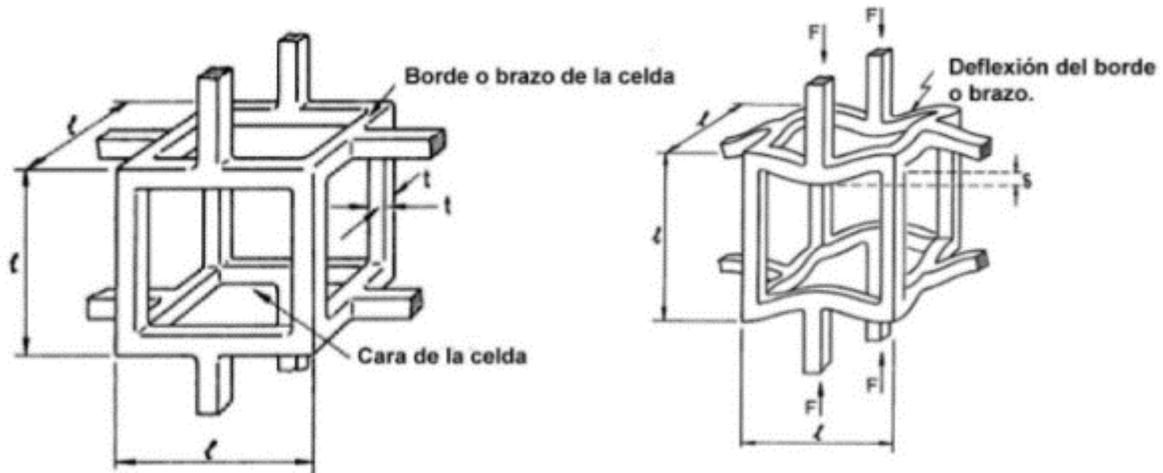


Ilustración 18 Ejemplificación de deflexión elástica en un modelo de celda cúbica, mostrándose los principales puntos donde actúan las fuerzas de compresión [21]

Cabe resaltar que el modelo de celda cúbica simple se selecciona debido a que facilita el modelado de la deflexión y también a que mediante algunas constantes de proporcionalidad hace posible extrapolar los resultados a geometrías más complejas, y así obtener aproximaciones más reales al comportamiento de las celdas ya que todas las geometrías fallan por los mismos mecanismos.

Para las celdas cerradas, **Ilustración 19**, un esquema sería de la siguiente manera, en donde se puede apreciar que ya aparece el factor de la cantidad de material que existe en las caras de la celda.

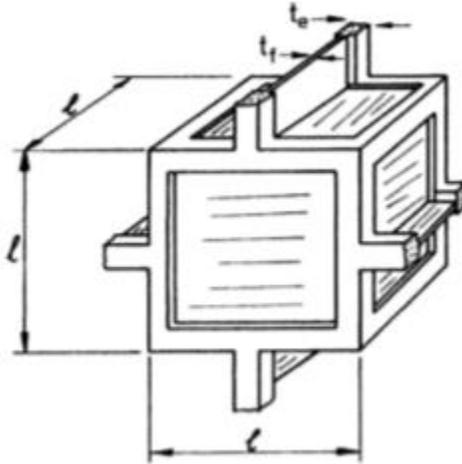


Ilustración 19 Ejemplificación del análisis de espesores, en la distribución de sólido de una celda cerrada [21].

II- Zona de Colapso a esfuerzo constante (Plateau)

Colapso elástico y colapso plástico: En las espumas el comportamiento elástico lineal solo ocurre a bajas deformaciones (alrededor de un 5%). La gran mayoría de las espumas tienen la capacidad de estirarse o comprimirse soportando altas deformaciones. En las espumas que fueron conformadas con sólidos elastoméricos, la deformación que se presenta por arriba del 5% continúa siendo elástica sin embargo ya no tiene un comportamiento lineal y ésta ocurrirá a un esfuerzo constante denominado esfuerzo de colapso elástico. El colapso plástico tiene una dependencia del tipo de celdas con las que cuenta la espuma, ya sean celdas abiertas o celdas cerradas, y también de la geometría de éstas.

Para las celdas abiertas el colapso plástico ocurre cuando el momento ejercido sobre los bordes perpendiculares a la carga excede el momento plástico total de éstos generando puntos de deflexión en los bordes perpendiculares a la carga (**Ilustración 20**).

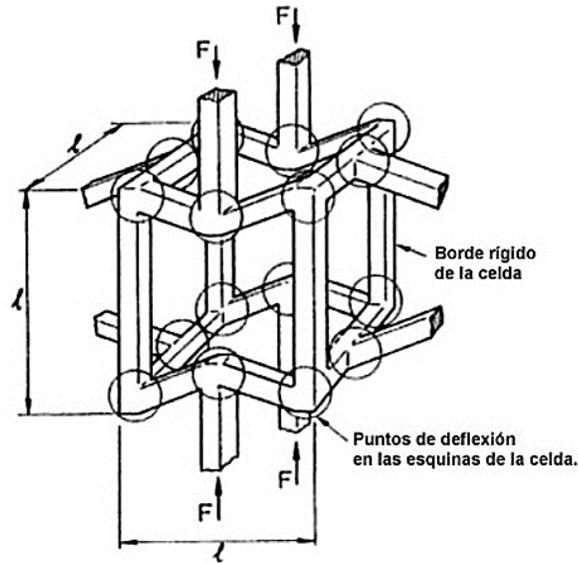


Ilustración 20 Mecanismo de “buckling” durante la deformación plástica de una celda [21].

En cambio para las celdas cerradas, **Ilustración 21**, el hecho de que exista material en las paredes propicia que exista un incremento en el esfuerzo de fluencia, debido a que durante la aplicación de una carga a compresión, a 90° de dirección de la fuerza aplicada, las paredes presentan estiramiento y el trabajo requerido para estirarlas es la razón por la que surge un incremento considerable del esfuerzo de fluencia. [21], [34]

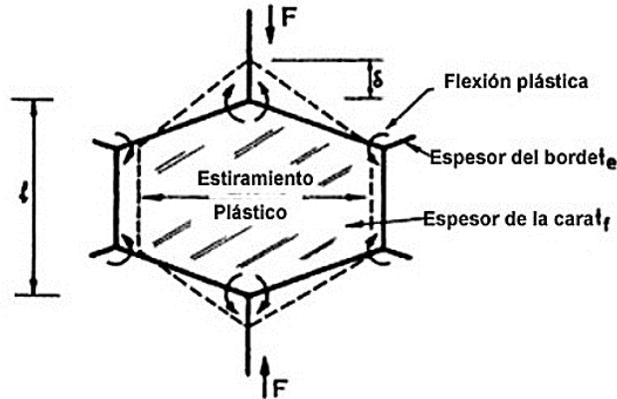


Ilustración 21 Ejemplificación de deformación de una pared de celda durante el colapso plástico en una celda tipo cerrada [21].

III- Zona de densificación

Mientras ocurre una deformación elevada durante la compresión de una espuma, las paredes opuestas de las celdas se colapsan y entran en contacto, y esto a su vez comprime al material

sólido que las constituye. Por lo anterior, la curva de esfuerzo aumenta súbitamente, de manera que la pendiente de la misma tiende a la magnitud del módulo elástico del sólido. De este modo, la densificación máxima ocurre cuando todas las celdas han colapsado y se encuentran compactadas, a una determinada deformación límite que se encuentra en función de la densidad relativa mediante la ecuación siguiente:

$$\mathcal{E}_D = 1 - 1.4 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \dots \dots \dots (8)$$

Donde \mathcal{E}_D es la deformación de densificación máxima, ρ^* es la densidad relativa y ρ_s la densidad del sólido. [21]

En varios estudios de diferentes autores se ha demostrado que el tamaño de la probeta utilizada para llevar a cabo los ensayos de compresión puede afectar los resultados; inicialmente estas observaciones se analizaron por Bastawros y Evans [35] en estudios de la respuesta plástica de espumas de poro abierto de tipo Duocel con densidad relativa 0.08 y espumas de poro cerrado de tipo Alporas de densidad relativa 0.07 mediante medidas de deformación superficial, determinando los mecanismos de deformación que gobiernan la respuesta plástica del material bajo tensiones axiales de tracción y compresión.

Los estudios del comportamiento mecánico de las espumas suelen contemplar la necesidad de utilizar como referencia muestras de un tamaño suficiente, de modo que la dimensión característica que define la sección transversal de la muestra incluya al menos unos 7 poros. Con muestras de menor tamaño se tiene el riesgo de obtener o medir propiedades mecánicas más bajas. La reciente norma ISO 13314 Mechanical Testing of Metals-Ductility Testing-Compression test for porous and cellular metals (ISO 2011) define los detalles de los ensayos mecánicos de compresión de materiales celulares, y recomienda que la dimensión característica de las muestras incluya al menos 10 poros individuales. [15]

Por otro lado, la presencia de defectos microestructurales en las probetas y en las espumas en general también tiene efectos importantes en el comportamiento de la espuma durante el ensayo. En todas las espumas metálicas, la microestructura de la aleación de la que están constituidas las paredes de la celda en celdas cerradas o en los bordes de las celdas para celdas abiertas, tiene un efecto directo en el comportamiento mecánico como en cualquier

acero o aleación. En algunos estudios se ha señalado que por ejemplo la presencia de un alto contenido de partículas cerámicas frágiles puede llegar a tener consecuencias severas en las propiedades mecánicas de una espuma. [34], [36]

En uno de esos estudios realizado por Markaki [36], se analizan las propiedades mecánicas de 3 espumas de aluminio con distinta composición en donde se va variando su contenido en magnesio y silicio y son manufacturadas con ayuda de un agente espumante (Hidruro de Titanio). Se observaron cambios en las propiedades mecánicas a compresión tales como la cantidad de energía absorbida, la rapidez de densificación, y también los mecanismos de deformación y fractura por la presencia de distintos intermetálicos y fases en el material de las paredes de celda. [34]

Por ejemplo, para una espuma fabricada con una aleación Al-12Mg-6Si, se encontró que la presencia de una red inter-dendrítica compuesta por silicio eutéctico, una fase Mg-Si y otra Mg-Al-Si-Fe en la micro-estructura produjo el incremento de la energía específica absorbida por esta espuma, presentando a su vez una tasa de densificación baja por el mayor esfuerzo requerido para deformar el material más duro y frágil de las paredes de las celdas [34], [36].

Por lo anterior, la presencia de inter-metálicos y fases en la microestructura del material sólido puede generar cambios más sustanciales que incluso los generados por la variación del tamaño de celda, geometría de la celda, entre otros. Además de las variaciones en la cantidad de energía absorbida y la densificación, la presencia de otros elementos en la microestructura puede modificar el comportamiento durante la deformación plástica (cambio de deformación por deflexión a fractura frágil de las caras) la localización de los puntos de deformación, la homogeneidad de la deformación (deformación en capas, conforme se va aplicando la carga), tamaño de la celda y cantidad de defectos estructurales (bordes o paredes de celda fracturados, heterogeneidades, celdas con elongación no uniforme, etcétera), como se observa en la **Ilustración 22** en donde se aprecian algunos defectos en una espuma de poro cerrado. [20], [34], [36], [37]

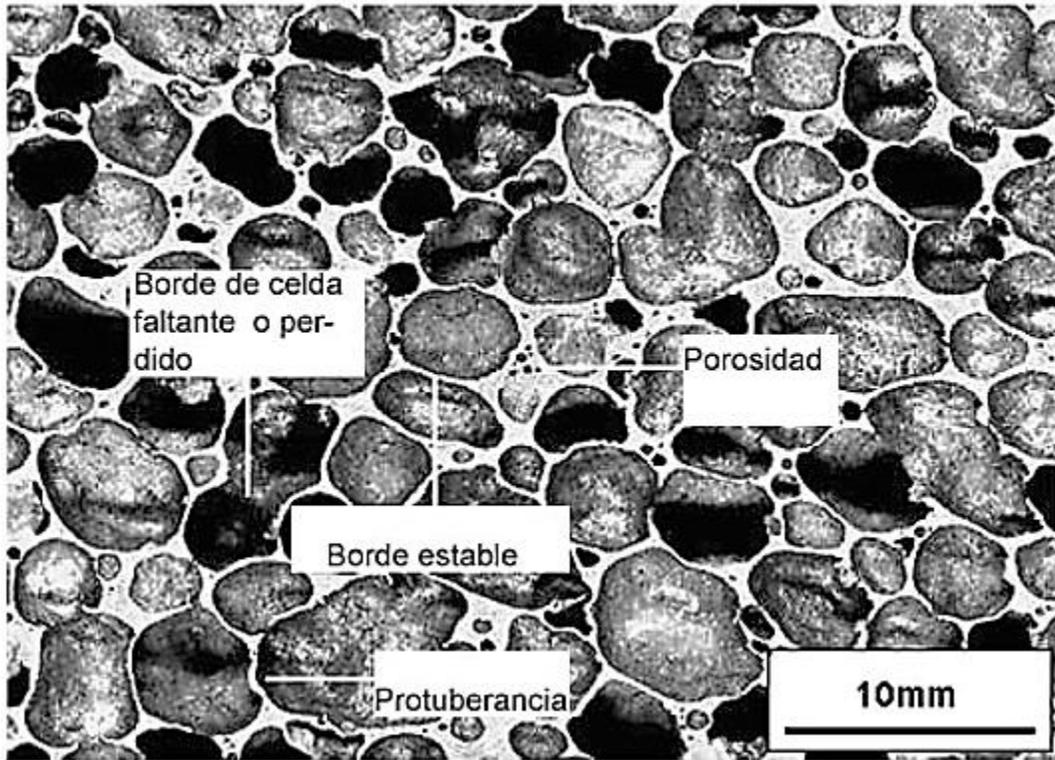


Ilustración 22 Principales defectos en una espuma metálica de aluminio, de celda tipo cerrada [37]. En la Tabla 2 se presentan de manera resumida las diferentes propiedades mecánicas de las espumas que hoy en día son comerciales, en donde como ya se ha mencionado las diferentes productoras tienen sus procesos específicos de producción.

Tabla 2 Intervalo de Propiedades mecánicas de espumas metálicas comerciales. [18]

Propiedades Mecánicas					
Espuma	Cymat	Alulight	Alporas	ERG	Inco
Material	Al – SiC	Al	Al	Al	Ni
Estructura (Tipo de celda)	Cerrada	Cerrada	Cerrada	Cerrada	Cerrada
Tamaño de celda [mm]	3.4~13.2	4.2	4.5	2.5~4.5	0.45~0.8
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
Densidad ρ [Mg/m ³]	0.07~0.56	0.3~1.0	0.2~0.25	0.16~0.25	0.26~0.37
Modulo de Young E [GPa]	0.02~2.0	1.7~12	0.4~1.0	0.06~0.3	0.4~1.0
Módulo de cortadura G [GPa]	0.001~1.0	0.6~5.2	0.3~0.35	0.02~0.1	0.17~0.37
Coefficiente de Poisson ν	0.31~0.34	0.31~0.34	0.31~0.34	0.31~0.34	0.31~0.34
Resistencia a 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	1.5~1.8	0.9~2.7	0.6~1.1
Resistencia a Tracción σ_t [MPa]	0.05~8.5	2.2~30	1.6~1.9	1.9~3.5	1.0~2.4
Módulo de Compresión vol. K [GPa]	0.02~3.2	1.8~13.0	0.9~1.2	0.06~0.3	0.4~1.0
Deformación de Compactación ϵ_D	0.6~0.9	0.4~0.8	0.7~0.82	0.8~0.9	0.9~0.94
Ductilidad ϵ_f	0.01~0.02	0.002~0.04	0.01~0.06	0.1~0.2	0.03~0.1
Dureza H [MPa]	0.05~10	2.4~35	2.0~2.2	2.0~3.5	0.6~1.0

1.10.2. Propiedades físicas

1.10.2.1. Densidad

Existen dos métodos por los cuales se puede medir la densidad de las espumas metálicas, uno de ellos es conocido como el método volumétrico, en el cual se relacionan el peso y la geometría de la muestra. Por otro lado, en el otro método, los poros de la superficie son rellenados con una resina negra que hace contraste entre los poros y las paredes de éstos, de forma que después de realizar un escaneo, la densidad puede calcularse a lo largo de una longitud sobre los ejes x y y . Este segundo método a comparación del primero, proporciona información acerca de cómo se encuentra distribuida la densidad en la muestra, observándose si en las regiones próximas a la superficie, la densidad es diferente a la densidad de la muestra en conjunto. Los valores típicos de las densidades de las espumas de aluminio se encuentran dentro del rango de $0.4 - 1.2 \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-3}$.

Por ejemplo en la siguiente **Ilustración 23** se muestra cómo se encuentra distribuida la densidad de una espuma a lo largo de los ejes x y y .

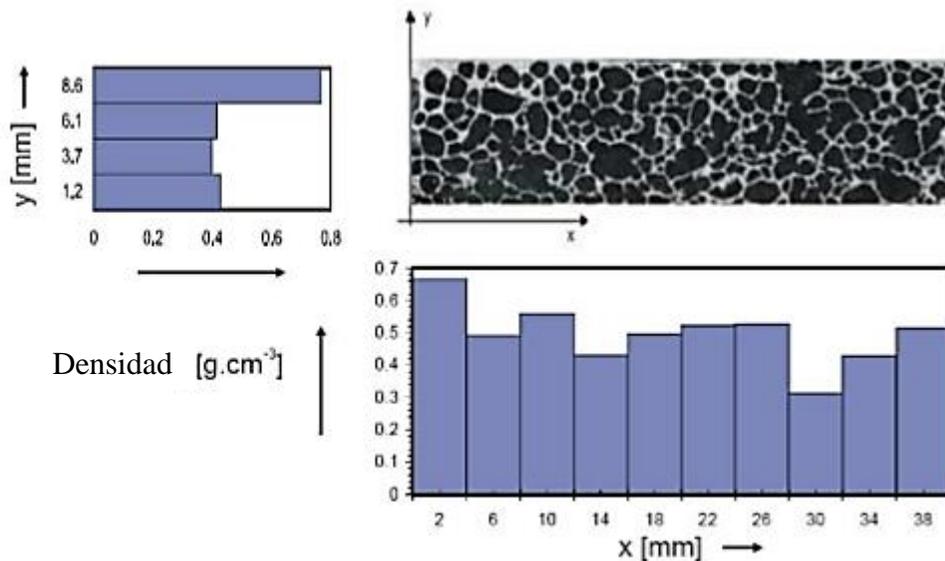


Ilustración 23 Distribución de la densidad a lo largo de x y y [31].

1.10.2.2. Absorción del sonido

Las espumas metálicas poseen la capacidad de absorber o rechazar parte de la energía sonora que les llega. La incidencia de una onda acústica en un paramento recubierto con este material, permite definir el coeficiente de absorción sonora por unidad de superficie (α) a la relación entre la energía sonora absorbida por un material y la energía sonora incidente sobre dicho material. Este coeficiente depende, además, de la naturaleza del material, de la frecuencia y del ángulo de incidencia de dicha onda acústica.

Los fabricantes de materiales suelen darlo en función de una banda de frecuencias comprendida entre 125 Hz y 4 kHz. Las espumas de metálicas, sobre todo aquellas con los poros interconectados son muy eficaces en la absorción del sonido: el sonido entrante se refleja dentro de la espuma entre los poros; la superficie del poro vibra convirtiendo el sonido en calor. Un nivel de sonido muy reducido se refleja dentro del espacio encerrado. El coeficiente de absorción es una función del espesor del material, la densidad y el tamaño del poro. La máxima absorción de sonido para las frecuencias incidentes puede ajustarse por el

tamaño del poro de la espuma (agrandando la capa de aire, α máximo cambia hacia frecuencias más bajas). La mayor absorción de energía sonora se produce para espumas con densidades en torno a 0.65 g/cm^3 [13]. La comparación de coeficientes de absorción de sonido de espumas de aluminio de poros abiertos, el aluminio puro, la fibra de vidrio y la espuma de PU se muestra en la **Ilustración 24**. [38]

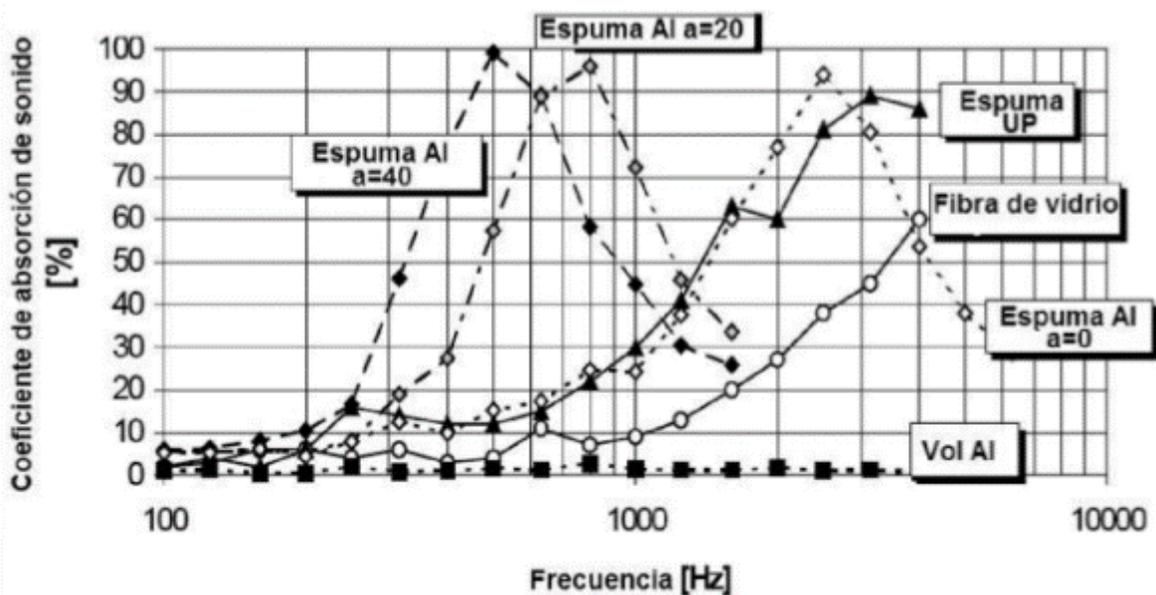


Ilustración 24 Coeficiente de absorción de sonido de diferentes espumas de aluminio de densidad 0.5 g/cm^3 con estructura de poro abierto con diferente diámetro de poro (a) en mm, comparado con aluminio sólido, espuma de PU y matriz de fibra de vidrio [38].

1.10.2.3. Conductividad térmica

Experimentalmente se ha comprobado que las espumas metálicas siguen la ley de Wieders-Franz, que establece que para los metales el cociente entre la conductividad térmica (κ) y la conductividad eléctrica (σ) es proporcional a la temperatura absoluta (T) multiplicada por la constante de proporcionalidad (L) o (número de Lorenz):

$$\frac{\kappa}{\sigma} = LT \dots\dots\dots (8)$$

A pesar de la alta conductividad térmica de los metales, la presencia de la fase gaseosa reduce considerablemente su valor en los materiales celulares. Este hecho, unido a la mayor

temperatura de fusión de los metales, convierte a los materiales celulares metálicos en excelentes aislantes térmicos de alta temperatura. Uno de los potenciales usos de esta característica es en la protección o contención de un fuego. [6]

1.11. Aplicaciones de las espumas metálicas

Entrando en el tema de las principales aplicaciones de las espumas metálicas, es importante recordar que la principal ventaja de estos materiales sobre los demás es que pueden ser más multifuncionales debido a que son más ligeros, y esto lleva a que requieran menos material para su fabricación, su gran capacidad de absorción de energía en donde dicha propiedad puede aprovecharse en varios campos como la atenuación de vibraciones, impactos, aislamiento acústico, etc., y hablando específicamente de las espumas de aluminio sobresale su alta resistencia a los químicos, su fácil mecanizado y su alta conductividad tanto eléctrica y térmica. Algunas de las aplicaciones más importantes se detallan a continuación.

1.11.1. Aplicaciones estructurales

Las aplicaciones estructurales están determinadas en base a las propiedades físicas de las espumas, como son su densidad, su capacidad de absorber energía de impacto y/o de vibraciones. Existe un amplio campo de aplicación en el área de la construcción; los edificios modernos tienden a ser más estéticos y comienzan a usar paneles ligeros, rígidos y resistentes al fuego sujetos a las paredes mediante soportes de espuma de aluminio; también las barandas en los balcones que normalmente son de estructuras muy pesadas y que se vuelven un problema en caso de incendio se están sustituyendo por espumas de aluminio [39]. Además, se está haciendo uso de espumas de poro cerrado como absorbentes de sonido en algunas autopistas de Japón para reducir en gran cantidad el ruido del tráfico y en los túneles de las líneas de ferrocarriles para reducir las ondas de choque [40]. Un buen ejemplo de su uso estético es la cafetería Baluarte en Pamplona, España, **Ilustración 25**. [41]



Ilustración 25 Cafetería Baluarte en Pamplona, España [42].

1.11.2. Industria automovilística

Hoy en día en la industria del automóvil existe una tendencia a producir vehículos cada vez más económicos, abriendo paso al desarrollo de motores más eficientes, reducción del peso del auto y mejorando o creando diseños con mejor aerodinámica para que ofrezcan menos resistencia al viento. Sin embargo mientras se trata de reducir el peso se necesita aumentar la seguridad pasiva y activa de los pasajeros, para así poder desplazar a los chasis que normalmente eran de acero, se necesitan desarrollar nuevas aleaciones más ligeras o materiales que cumplan con los requisitos de resistencia y demás que son requeridos. En cuestiones de seguridad pasiva se ha creado la necesidad de eliminar o reducir las emisiones acústicas de los vehículos por lo que se tienen que incorporar nuevos amortiguadores de sonido, cosa que las espumas metálicas pueden realizar.

Entonces su alta capacidad para absorber energía mecánica por deformación (especialmente de impacto), carácter reciclable, insensibilidad a entallas, protección contra fuego, aislamiento térmico y acústico y resistencia al calor, apropiada relación resistencia/peso y rigidez/peso, hacen que tengan aplicación en paragolpes, soportes para barras anticolidión, rieles, protección interna de ocupantes, capó o cofres de automóviles, paneles laterales y otros. La empresa Cymat fabrica “Cymat SmartMetal” que son espumas de aluminio. Este material proporciona muy buena relación en cuanto a sus propiedades: resistencia-peso, absorción de energía, aislamiento térmico y acústico, reciclabilidad y un relativo bajo coste de producción. Estas espumas son aplicadas en partes absorbentes de impacto, vigas laterales

de puertas, cajas de impacto como se puede ver en la **Ilustración 26**, cierres de partes de motor, turbinas [43].

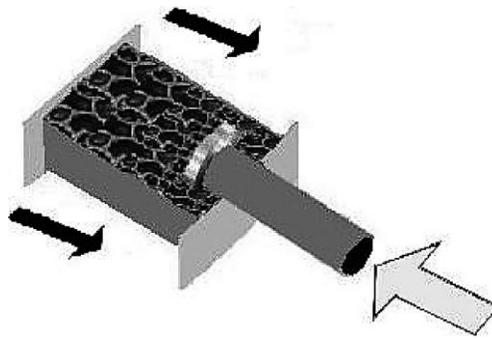


Ilustración 26 Caja de impactos Metcomb [44]

Las espumas de aluminio se están utilizando en diferentes partes de vehículos de la marca BMW y Audi, donde han supuesto un aligeramiento estructural del 30% según pruebas de BMW (**Ilustración 27**), además de reforzar la seguridad debido a los absorbentes de impacto y la mejoría del índice NVH (ruido, vibración y rigidez) [45], [46]

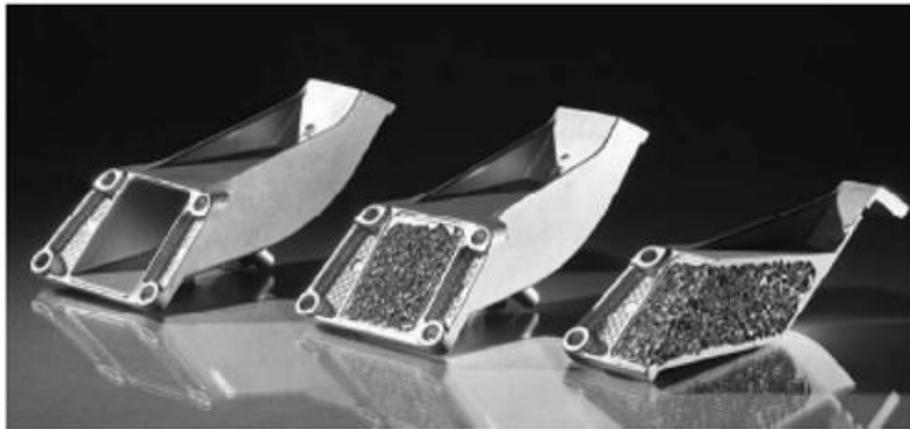


Ilustración 27 Soportes del Motor de BMW con núcleo de Espuma Metálica. [18]

1.11.3. Industria ferroviaria

La aplicación de las espumas de metálicas en especial de aluminio en los equipos ferroviarios sigue las mismas normas que en la industria de automoción en lo que se refiere a los tres campos de aplicación principales: rigidez específica, absorción de energía frente a impactos y absorción de sonido. La absorción de energía es un tema muy importante en los ferrocarriles

que discurren por áreas urbanas, en las que pueden producirse colisiones con automóviles. [18]

1.11.4. Absorción de vibraciones mecánicas

Debido a sus propiedades una gran cantidad de piezas son fabricadas de espuma, sobre todo piezas de maquinaria en donde las espumas propician que se disminuya la inercia y aumente el amortiguamiento, por ejemplo en las fresadoras o en taladros industriales, incluso en las bases de los asientos en máquinas grandes como excavadoras, volviéndolas más ergonómicas para los usuarios u operarios. Considerando que el módulo de Young de la espuma es menor que el módulo de Young del mismo metal sin espumar sucede que disminuye la frecuencia de resonancia. [14]

1.11.5. Biomateriales

Cada día se extiende más el uso de metales como prótesis o implantes. Las espumas de poro abierto de ciertos metales como el titanio, estimulan el crecimiento celular, de modo que pueden favorecer el crecimiento de hueso dentro de la estructura de la espuma, siendo totalmente biocompatible. En algunos otros casos, se utilizan espumas de magnesio para que ciertos implantes soporten la estructura a aplicar durante un periodo de tiempo suficiente como para que el hueso afectado se desarrolle completamente, donde dicho magnesio es absorbido por el organismo con posterioridad. [47]

1.11.6. Intercambiadores de calor y máquinas de frío

Las espumas de aluminio pueden utilizarse como intercambiadores de calor por su alta conductividad y para cumplir con este propósito las espumas deben tener porosidad abierta, como por ejemplo el caso de la **Ilustración 28**. Los gases o líquidos pueden recibir o ceder calor fluyendo por la espuma previamente calentada o enfriada. Debido a la porosidad abierta es posible minimizar la caída de presión. [46]



Ilustración 28 Intercambiadores de calor contruidos a base de espumas metálicas [48].

1.12. Técnicas de análisis y caracterización de las espumas metálicas

1.12.1. Microscopio óptico (metalográfico)

El microscopio óptico es un instrumento que permite observar objetos en dos dimensiones a aumentos desde aproximadamente 25x hasta 2000x. Esta técnica se caracteriza porque la imagen observada se produce por la reflexión de los haces luminosos sobre la probeta metalográfica. El microscopio es un instrumento muy útil para el metalurgista. Por eso es importante saber sacar un rendimiento óptimo de sus posibilidades. Básicamente está constituido por un dispositivo de iluminación, un vidrio plano o prisma de reflexión, el ocular y el objetivo. El aumento de la imagen observada viene dado por el producto de los aumentos del objetivo por los del ocular. Como una muestra metalográfica es opaca a la luz, la misma debe ser iluminada por luz reflejada. Un haz de luz horizontal de alguna fuente de luz es reflejado, por medio de un reflector de vidrio plano, hacia abajo a través del objetivo del microscopio sobre la superficie de la muestra. Un poco de esta luz incidente reflejada desde la superficie de la muestra se amplificará al pasar a través del sistema inferior de lentes, el objetivo, y continuará hacia arriba a través del reflector de vidrio plano; luego, una vez más lo amplificará el sistema superior de lentes, el ocular. En el laboratorio se utiliza un microscopio metalográfico marca Labomed modelo Med 400 como se muestra la **Ilustración 29.**



Ilustración 29 Microscopio metalográfico.

1.12.2. Microscopio electrónico de barrido

El microscopio electrónico de barrido (MEB o SEM por sus siglas en inglés Scanning electron microscope), es usado principalmente para determinar la forma, tamaño, distribución y topografía de las partículas estudiadas. En el MEB, los electrones interactúan con la muestra lo que resulta en la emisión de electrones o fotones desde la superficie. Una fracción de los electrones emitidos es colectada por medio de detectores para formar una imagen de la superficie [49].

Este equipo puede obtener imágenes generadas por electrones retrodispersados o bien por electrones secundarios, de acuerdo a las características de las muestras y su facilidad experimental de ser observadas. Por tal motivo se hace una breve descripción de ambos métodos de generación de imágenes MEB.

Electrones retrodispersados. Los electrones retrodispersados son electrones del haz incidente que han interactuado (colisionado) con los átomos de la muestra y han sido reflejados, su energía está muy cercana a la del haz incidente. Cuando se barren distintas zonas de la muestra, se tendrán variaciones en la intensidad de los electrones retrodispersados a un ángulo dado (ángulo de observación), y el resultado será una fotografía de la topografía superficial de la muestra. Además, la intensidad del haz retrodispersado está determinada

principalmente por la probabilidad de que un electrón sea absorbido o rebotado; entonces podemos esperar que la intensidad del haz retrodispersado aumente cuando se incremente el número atómico de los elementos que forman al sólido. Esto nos permite detectar zonas de diferente composición en el material. La orientación cristalina influye también en la probabilidad de retrodispersión de un electrón a través de la variación de la sección transversal efectiva que éste “ve” en el sólido. Por lo tanto es de esperarse que podamos ver los granos, precipitados y en general una morfología cercana a la tridimensionalidad. [49]

Electrones secundarios. Proviene del sólido y son emitidos como resultado de la excitación atómica por el haz primario y se caracterizan por tener un espectro de energías comparativamente bajo (< 50 eV) en relación al haz inicial. Pueden ser recolectados colocando una placa de potencial positivo a un lado de la muestra de manera que los electrones retrodispersados no se desvíen mucho. En realidad no todos los electrones secundarios son emitidos por el sólido, sino existen también electrones de baja energía originados por colisiones inelásticas, aunque no existe manera de distinguir los unos de los otros, por lo que todos los electrones de baja energía son clasificados como secundarios. La emisión de secundarios depende tanto de la densidad como de la topografía del sólido (y un poco de la cristalografía), por lo que podemos formar con ellos imágenes parecidas a las de electrones retrodispersados. [49]

1.13. Método de elementos finitos

Además de la caracterización de las espumas mediante diferentes métodos con la finalidad de determinar sus propiedades mecánicas, es imprescindible en muchas ocasiones contar con predicciones que faciliten el diseño, contando con datos que recreen de manera fidedigna el comportamiento de estos materiales. Hoy en día la industria ha encontrado un gran compañero de trabajo en los software de ingeniería, mejor conocidos como ingeniería asistida por computadora (CAE por sus siglas en inglés). Este tipo de software ayuda a que el uso de un material para cierta aplicación se haga más confiable, y también por otro lado tienen la gran ventaja de que con la mejora que van teniendo los modelos día con día hacen posible la predicción de las propiedades con las que contará algún material antes de producirlo de manera experimental.

El Método de Elementos Finitos (MEF) es una de las herramientas más potentes aplicables cuando es necesario realizar análisis de estructuras de cualquier tipo, que están sometidas a esfuerzos externos, sean mecánicos o térmicos, y pueden ser también estacionarios o transitorios, como es el caso de las espumas metálicas. La Teoría de la Elasticidad establece para un problema dado las relaciones matemáticas exactas en forma diferencial, y plantea su integración cerrando el problema con condiciones iniciales y de contorno para obtener las funciones que definen las variables representativas del comportamiento de la estructura [46]. El Método de los Elemento Finitos se trata de una simplificación de dichas ecuaciones, puesto que su forma diferencial se sustituye por un conjunto discreto de ecuaciones y de sus respectivas condiciones de contorno para su posterior resolución [50]. Las estructuras se clasifican en discretas o reticulares y continuas; las discretas o reticulares están conformadas por un ensamblaje de elementos bien diferenciados entre ellos y unidos en una serie de puntos concretos, de tal manera que el sistema total tiene forma de malla. La principal característica de las estructuras discretas es que su deformación puede definirse de manera exacta mediante un número finito de parámetros, como por ejemplo las deformaciones entre los puntos de unión y así el equilibrio de toda la estructura puede ser representado haciendo uso de las ecuaciones de equilibrio en las direcciones de tales deformaciones. [46]

1.13.1. Hipótesis de discretización

En una estructura discreta, la deformación está definida por un número finito de parámetros ya sean deformaciones y/o giros, que juntos conforman el vector de deformaciones Δ , y la estructura tiene tantas formas de deformarse como términos tenga dicho vector. Un medio continuo tiene infinitas formas posibles de deformarse donde cada una es independiente de la otra, ya que cada punto puede desplazarse manteniendo fijos cualquier número finito de los puntos restantes, por muy grande que sea este último. Por lo tanto la configuración deformada de la estructura no puede venir dada por un vector finito Δ como el anterior, sino que es una función vectorial \mathbf{u} , que indica cuáles son las deformaciones de cualquier punto, y que tiene tres componentes escalares [46]:

$$u = \begin{bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

Esta función es la solución de la ecuación diferencial que gobierna el problema, y si éste está bien planteado, cumplirá las condiciones de contorno impuestas, pero en principio no puede asegurarse que esta función u tenga una expresión analítica manejable, ni siquiera que pueda calcularse. Por lo tanto la función u no podrá conocerse en general. Para resolver este problema, el MEF recurre a la hipótesis de discretización, que se basa en lo siguiente:

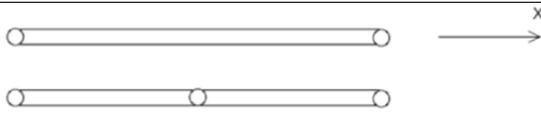
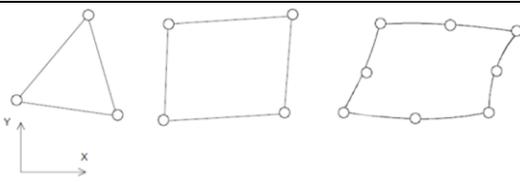
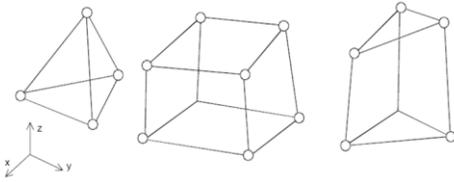
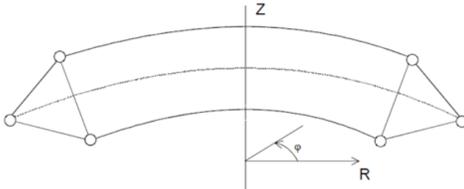
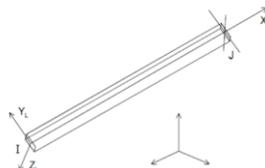
- Los Keypoints o puntos clave, son los puntos generados por un software que utiliza el método de elementos finitos, en un sistema de coordenadas definido, que permiten la generación líneas, áreas y volúmenes. La denominación del nombre Keypoint puede cambiar de acuerdo al software utilizado.
- El continuo se divide por medio de líneas o superficies imaginarias en una serie de regiones contiguas y disjuntas entre sí, de formas geométricas sencillas y normalizadas llamadas elementos finitos los cuales se unen entre sí en un número finito de puntos, llamados nudos.
- Los desplazamientos de los nodos son las incógnitas básicas del problema, y éstos determinan unívocamente la configuración deformada de la estructura. Sólo estos desplazamientos nodales se consideran independientes.
- El desplazamiento de un punto cualquiera, viene específicamente determinado por los desplazamientos de los nudos del elemento al que pertenece el punto. Para ello se definen para cada elemento, unas funciones de interpolación que permiten calcular el valor de cualquier desplazamiento interior por interpolación de los desplazamientos nodales. Estas funciones de interpolación serán de tal naturaleza que se garantice la compatibilidad de deformaciones necesaria en los contornos de unión entre los elementos.
- Las funciones de interpolación y los desplazamientos nodales definen unívocamente el estado de deformaciones unitarias en el interior del elemento. Éstas, mediante las

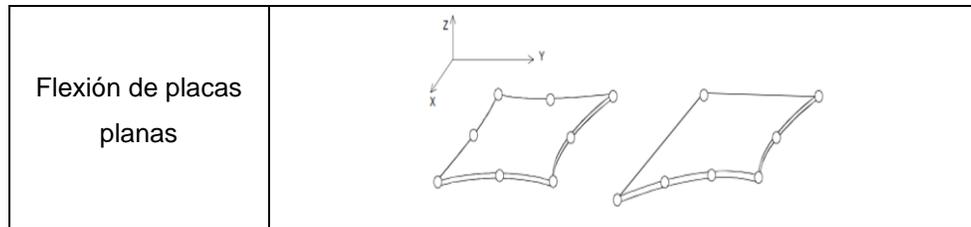
ecuaciones constitutivas del material definen el estado de tensiones en el elemento y por supuesto en sus bordes.

- Para cada elemento, existe un sistema de fuerzas concentradas en los nodos, que equilibran a las tensiones existentes en el contorno del elemento, y a las fuerzas exteriores actuantes sobre él. [46]

En la Tabla 3 se pueden apreciar algunos de los elementos utilizados para la discretización de los modelos que se basan en el MEF.

Tabla 3 Principales elementos utilizados en la discretización. [46]

Elemento	Representación
Elasticidad unidimensional	
Elasticidad bidimensional	
Elasticidad tridimensional	
Problemas axisimétricos	
Vigas	



La solución de cualquier problema utilizando el Método de los Elementos Finitos contempla los siguientes pasos:

1. Especificar la geometría. Esto puede hacerse dibujando la geometría directamente en el paquete o importando el modelo desde un modelador sólido (Solid Edge, Pro/Engineer).
2. Definir el tipo de elemento y las propiedades del material.
3. Enmallar el objeto. Consiste en dividir el objeto en pequeños elementos.
4. Aplicar las condiciones de frontera (restricciones) y las cargas externas.
5. Generar una solución.
6. Refinar la malla. El método de Elementos Finitos es un método aproximado, y en general la precisión de la solución se incrementa con el número de elementos usado. El número de elementos requerido para obtener una respuesta confiable depende del problema específico; sin embargo, es recomendable siempre incrementar el número de elementos en el objeto y observar la variación en los resultados. Este paso no siempre es necesario, pero se utiliza con la finalidad de lograr la convergencia de los resultados.
7. Post-procesamiento. Los datos obtenidos como resultado pueden visualizarse a través de gráficas o dibujos.
8. Interpretación de los resultados. Este paso es el más importante de todo el análisis, pues requiere de los conocimientos y la habilidad del ingeniero para entender e interpretar los resultados arrojados por el programa. Este paso es crítico para lograr la aplicación de los resultados en la solución de los problemas reales, o para identificar los posibles errores cometidos durante la etapa de modelación.

1.13.2. Software de simulación ANSYS

ANSYS es un software de Elementos Finitos que permite realizar tareas como:

- Construir o importar modelos de estructuras, productos, componentes o sistemas.
- Aplicar cargas al elemento creado.
- Estudiar las respuestas físicas, tales como niveles de esfuerzo, distribuciones de temperatura o campos electromagnéticos.
- Optimizar diseños existentes.
- Realizar pruebas virtuales sobre componentes en etapa de diseño.

ANSYS ofrece una interfaz gráfica sencilla de trabajo en la que alguien inexperto puede acostumbrarse de manera rápida a trabajar. Los principales módulos de ANSYS son: Multiphysics, Mechanical, Structural, Professional, Design Space, Emag (simulaciones Electromagnéticas), Paramesh (mallas adaptativas) [46].

Desde hace algunas décadas han existido diferentes aplicaciones que hacen uso del método de elementos finitos para la resolución de problemas de ingeniería, solo que al principio los análisis que se realizaban solo se hacían a fuerzas y no a desplazamientos, principalmente las industrias que hacían uso de este método ;eran la aeronáutica, automotriz, de defensa y nuclear, y se llevaban a cabo haciendo uso de supercomputadores, de los cuales no existían muchos. Hoy en día este tipo de cálculos se pueden realizar en computadoras de escritorio y se pueden realizar análisis de diferentes fenómenos a la vez, como análisis térmico y a la par un análisis estructural.

1.13.3. Uso de MEF para análisis de propiedades mecánicas de espumas

El método de los elementos finitos ha venido siendo usado para la determinación de las propiedades mecánicas de los materiales que no son homogéneos; un buen ejemplo de este tipo de materiales son los materiales compuestos en los cuales el refuerzo y la matriz son

bastante diferentes en geometría, etc., y de igual manera los materiales porosos, dentro de los cuales están las espumas metálicas. Para realizar este análisis se debe crear el modelo con la geometría de la probeta y también el porcentaje de porosidad que esta posea, posterior se realiza una simulación de un ensayo a compresión por ejemplo o cualquier otro tipo de análisis como ya se mencionó anteriormente.

Uno de los métodos para llevar a cabo una simplificación de la modelación y así reducir tiempos de cómputo es partiendo de un elemento de volumen representativo de la probeta real y realizar el modelo en menor escala. Por ejemplo, para el análisis de espumas de celda cerrada, se utilizan celdas con elementos de membrana o elementos “Shell” y los elementos “Beam” pueden ser usados a lo largo del borde de la celda. Para esto son tomados en cuenta la densidad relativa, la distribución del sólido entre las caras y los bordes de las celdas. La geometría de los elementos “Beam” es simplificada en secciones transversales circulares. [46]. Como ejemplo se puede observar en la **Ilustración 30**.

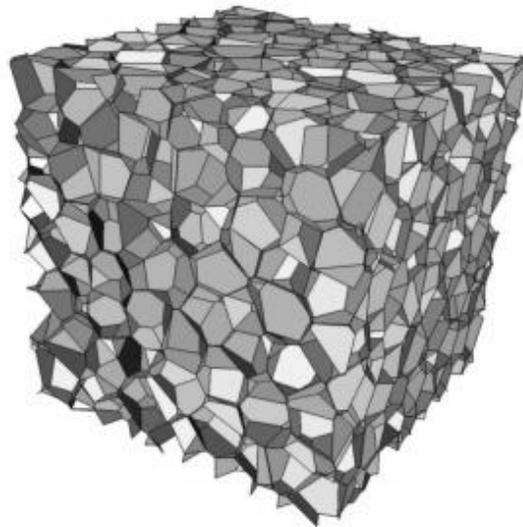


Ilustración 30 Modelo obtenido por MEF a partir de un elemento representativo del volumen de la espuma metálica. [46]

Una de las alternativas que también existen es realizar los modelos en algunos otros softwares de diseño como Solid Works, ABAQUS, etc., y después importar la geometría a ANSYS y realizar la simulación. De igual manera, al momento de realizar el modelo existen diversos modelos ya establecidos por algunos en los que se varían las geometrías o elementos usados,

como por ejemplo el modelo modificado de Drucker-Prager, o el modelo creado por Segurado y Llorca.

1.14. Fractales

La porosidad en las espumas metálicas se comporta de diferentes maneras. En algunas ocasiones los poros son de tamaño homogéneo, pero en otros casos se ha encontrado que la distribución de tamaños de poro es heterogénea, por lo cual algunas investigaciones se han centrado en el estudio de estas distribuciones desde el punto de vista fractal, lo cual se analizará a continuación.

1.14.1. Teoría de fractales

Entre 1975 y 1977 Benoît Mandelbrot elaboró la definición de fractal como un objeto geométrico generado por un proceso iterativo, cuya estructura básica se repite en diferentes escalas, es decir, que posee auto-similaridad exacta o estadística, y cuya dimensión de Hausdorff es fraccionaria o no entera, como puede apreciarse en uno de sus trabajos [51].

La fractalidad se puede entender como una de las herramientas a las que la evolución recurre para producir saltos cualitativos en la complejidad de las formas biológicas, es decir, posibilitan catástrofes o hechos extraordinarios que dan lugar a nuevas realidades más complejas, como las hojas que presentan una morfología similar a la pequeña rama de la que forman parte que, a su vez, presentan una forma similar a la rama mayor, que a su vez es similar a la forma del árbol (ver **Ilustración 31**) y sin embargo, cualitativamente no es lo mismo una hoja que viene siendo una forma “biológica simple”, que una rama o un árbol de forma “biológica compleja”. [52]



Ilustración 31 Fractalidad en las hojas de los árboles. [53]

La fractalidad puede ser lineal o no-lineal. Se denomina como formas fractales lineales a aquellas definidas por un simple cambio en la variación de sus escalas y que son, por lo tanto, idénticas en todas sus escalas hasta el infinito. Se denomina como formas fractales no-lineales a aquellas que se generan a partir de distorsiones complejas o no-lineales. La autosimilitud es entonces, exacta en las formas fractales lineales o regulares y estadística en las no-lineales o caóticas. [52]

La curva de Koch es una forma matemática fractal definida por Niels Helge von Koch en 1904. Esta curva, como se puede apreciar en la **Ilustración 32**, parte de un segmento inicial que se divide en tres partes iguales, sustituyéndose la parte central por dos segmentos de la misma medida que forman un triángulo equilátero con el segmento suprimido. Cada uno de los segmentos obtenidos de la iteración anterior se vuelve a dividir en tres partes iguales y se procede de la misma manera. Entonces, ¿Cómo se confecciona un fractal?, ¿Cómo inicia?, la respuesta es sencilla y se observa en la **Ilustración 32**. Como puede apreciarse, un fractal comienza con un iniciador, y de ahí a cierta escala se van derivando los objetos generados, en el ejemplo el primer objeto generado es de $1/3$ del iniciador, y posteriormente los siguientes objetos generados son de $1/3$ de éste y así se prosigue hasta n veces.

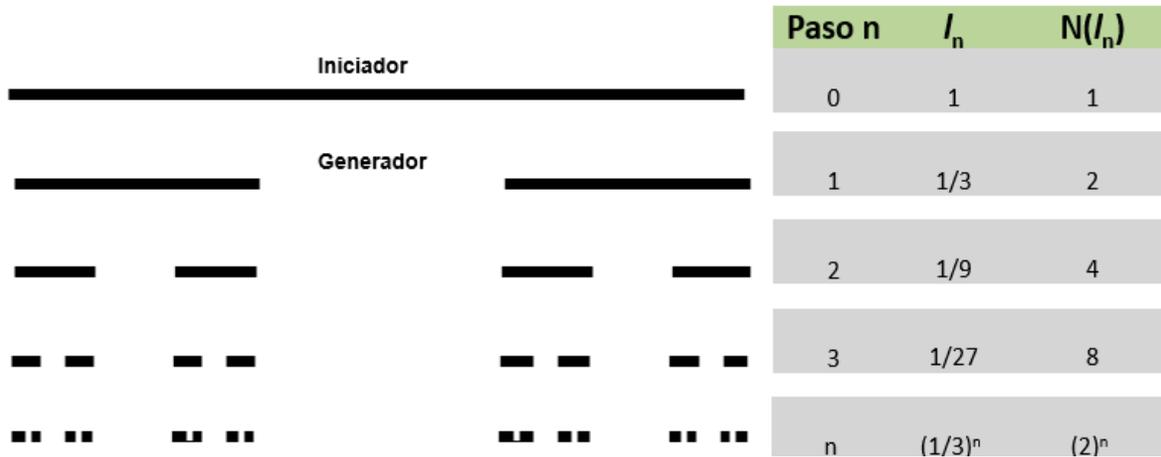


Ilustración 32 Confección de un fractal. Serie de Cantor. [53]

El Copo de nieve de Koch es otra figura fractal ideada por Koch, similar a la anterior pero a partir de los lados de un triángulo equilátero, lo cual también se observa en la **Ilustración 33**.

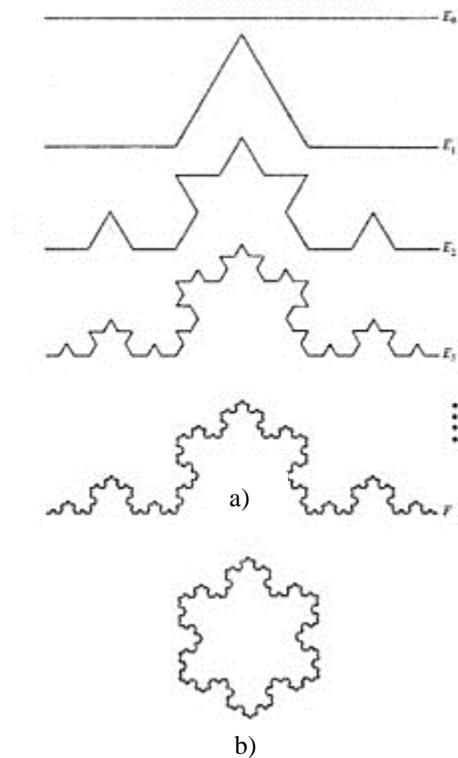


Ilustración 33 Construcción de la curva de von Koch a) y copo de nieve de von Koch b). “Fractal geometry. Mathematical Foundations and Applications”. [52]

Para ilustrar un caso que podría relacionarse con la porosidad, seleccionamos la alfombra de Sierpinski, que es un polígono fractal inventado por el matemático polaco Waclaw Sierpinski en 1915. Este se obtiene a partir de un cuadrado inicialmente sólido, éste se divide en 9 cuadrados congruentes interiores y se elimina el central, así se repite sucesivamente en cada uno de los 8 cuadrados que restan y se obtiene una alfombra como la que se observa en la **Ilustración 34**. Como puede apreciarse, a medida que el tamaño de los cuadrados disminuye su cantidad aumenta.

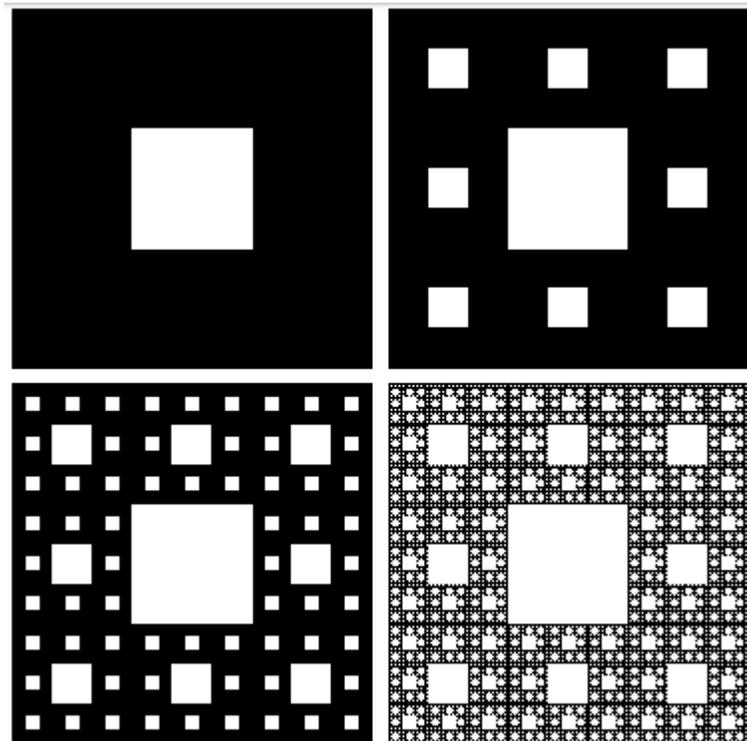


Ilustración 34 La alfombra de Sierpinski.[53]

Una de las contribuciones más significativas de la geometría fractal ha sido su capacidad para generar nuevos modelos para la forma de ciertos fenómenos naturales, tales como plantas, nubes, formaciones geológicas o fenómenos atmosféricos. El diseño del sistema esquelético-muscular de una pierna humana, por ejemplo, sigue igualmente un principio fractal, desde la estructura primaria de proteínas como la queratina y el colágeno, pasando por la subestructura de los huesos músculos, tendones y fascias, hasta la morfología de la pierna completa.

1.14.2. Medición de la dimensión fractal

La dimensión fractal es una forma de expresar cuan densa es la fractalidad en el espacio donde se encuentra esta, y así poder comparar fractales entre ellos. La dimensión fractal es importante porque puede ser medida en aproximación de manera experimental. La dimensión fractal puede encontrarse en las nubes, los árboles, las líneas costeras, las plumas, redes neuronales en el cuerpo, en el polvo en el aire en un instante de tiempo, etc.

La medición de la dimensión fractal se puede realizar por medio de varios métodos, sin embargo el más común suele ser el del método de conteo de cajas el cual consiste básicamente en llenar la superficie con una cuadrícula de cierto tamaño y contar el número de cuadros que contienen la figura, se vuelve a cuadricular reduciendo el tamaño de los cuadrados y así sucesivamente. En la práctica esto se hace con un software de análisis de imágenes y el tamaño de las cajas o cuadros se reduce hasta que se alcanza el tamaño del pixel. Posterior al conteo se aplica una ecuación que más adelante se explica a detalle.

El tener una fractalidad alta nos indica dos cosas muy importantes: 1. Que la relación entre el tamaño de los poros chicos es poca en comparación con los poros grandes y 2. Que la cantidad de poros chicos en comparación con los poros grandes es grande (**Ilustración 35**).

Esto es:

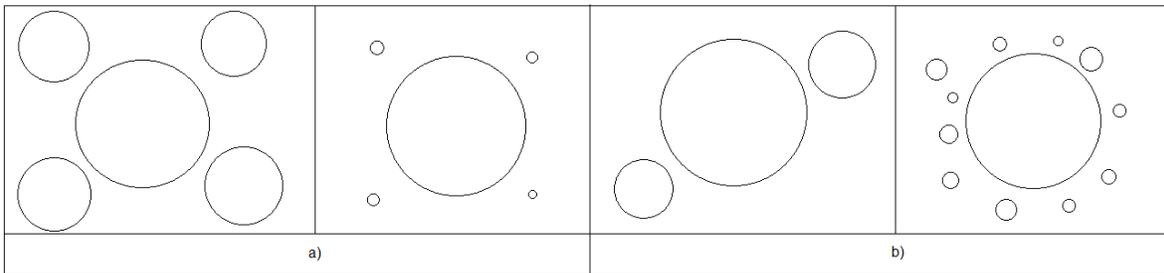


Ilustración 35 a) Caso 1: relación de tamaños. b) Caso 2: Relación de cantidad.

Por lo que en el caso a), del lado izquierdo tenemos una dimensión fractal más grande que el lado derecho de la imagen, y por el contrario en el caso b) tenemos una dimensión fractal mayor de lado derecho de la imagen.

1.14.3. Uso de mecánica fractal para análisis de sistemas porosos

En los materiales porosos es importante estudiar la relación que posee la fractalidad con la porosidad misma, en especial en las espumas metálicas debido a que la variación en el tamaño y distribución de los poros tiene efecto sobre las propiedades mecánicas de la espuma resultante. En la **Ilustración 36** se observa cómo se hace uso de la dimensión fractal en un estudio realizado, que incluye la fabricación de espumas de manera experimental, y también el diseño y análisis de elementos finitos; se puede observar el crecimiento de la dimensión fractal (D_f) conforme aumenta el número de poros de menor tamaño con respecto a los poros de mayor tamaño, corroborando lo explicado en el punto anterior. De manera intuitiva se puede deducir que la espuma con mayor porosidad tendrá propiedades mecánicas muy diferentes a la espuma más densa, debido a que las paredes entre poro y poro se encuentran muy cercanas y son delgadas para el caso c), y son más lejanas y gruesas en el caso a) por lo que ésta tendrá propiedades de resistencia a la compresión mayores. [3]

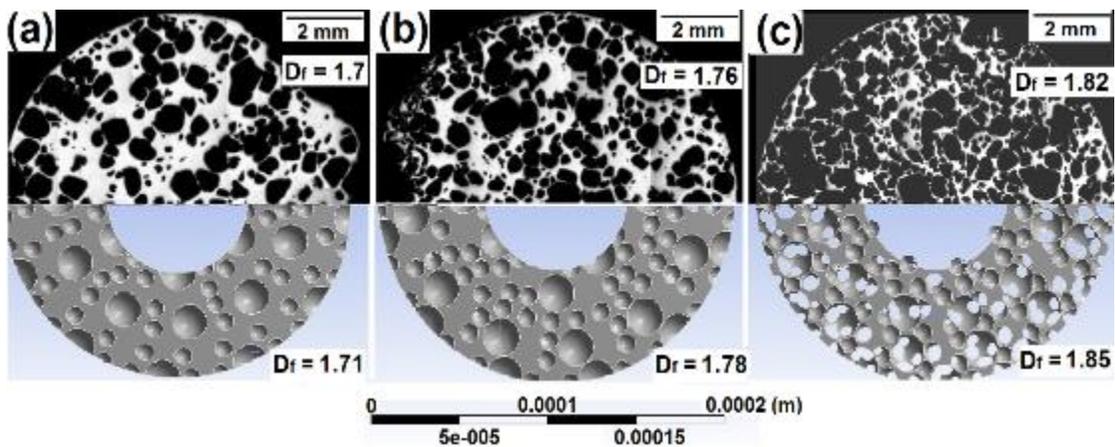


Ilustración 36 Uso de fractales para estudiar materiales porosos. [3]

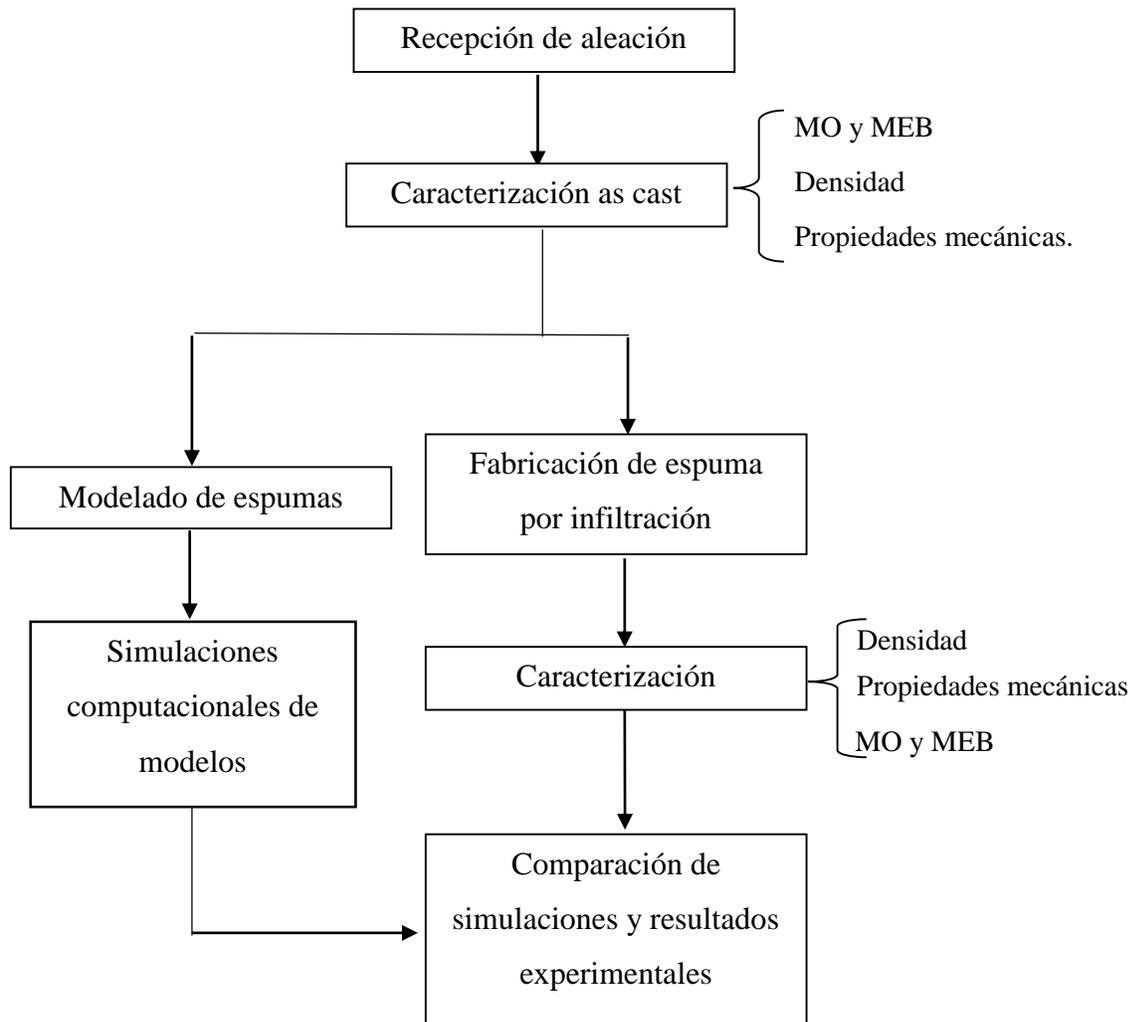
Para realizar el cálculo y obtener el valor de la D_f se hace uso de la siguiente ecuación:

$$DF = \frac{\log N}{\log n} \dots \dots \dots (11)$$

En donde N es la relación que existe del número de poros chicos, por cada poro grande, y n es la relación que existe entre el tamaño de los poros chicos con respecto a los poros grandes.

Capítulo II

El procedimiento experimental que se seguirá en el presente trabajo de investigación se resume en el siguiente diagrama:



2. Procedimiento Experimental

2.1. Materiales usados

2.1.1. Aleación de aluminio

La aleación base para la fabricación de las espumas por infiltración fue una aleación de aluminio 332, con una composición química fundamentalmente formada por Si y Cu, como puede apreciarse en la Tabla 4. Esta aleación fue adquirida de una pieza de reciclaje, y es habitualmente utilizada para la fabricación de monoblocks de automóviles. Fue seleccionada para el presente trabajo por su alto contenido de Si, lo cual aumenta la fluidez de la aleación, necesaria para el proceso de infiltración debido a que esto ayuda a que todos los espacios vacíos en la preforma se llenen. Para esta aleación, cuando se fabrican los monoblocks, habitualmente es perjudicial la presencia de poros, pero cuando se convierte en una espuma metálica sus aplicaciones pueden ampliarse, ya que los poros proporcionan propiedades con las que no cuenta la aleación compacta.

Tabla 4 Composición química de la aleación 332. [8]

Aleación	%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Ni	%Zn	%Ti
332	8.5-10.5	1.2	2.0-4.0	0.5	0.50-1.5	0.5	1.0	0.25

2.1.2. Partículas espaciadoras (Space Holders)

Se usó sal común (NaCl) de uso comercial, en dos distintas granulometrías como partículas espaciadoras para la infiltración de las aleaciones. En la **Ilustración 37** pueden observarse algunas imágenes de MEB de las partículas de sal. Se utilizarán tres casos diferentes de relación de tamaños de granos de sal:

- Caso I: relación 1:1 con granos de 4 mm de diámetro (aprox.)
- Caso II: relación 2:1 con granos de 2 y 4 mm
- Caso III: relación 4:1 con granos de 2 y 4 mm

Tomando en cuenta estas relaciones entre la cantidad de partículas y sus tamaños, las dimensiones fractales que se utilizarán serán:

- Caso I = 1
- Caso II = 1
- Caso III = 2

El caso 1 no se tomará en cuenta como fractal, pues los tamaños se asumen homogéneos. Para obtener estos tamaños y posteriormente mezclarlos, la sal fue tamizada usando estas diferentes granulometrías. Estas dimensiones son fractales debido a que las relaciones de tamaño y de cantidades de las sales son diferentes, aumentando la cantidad de partículas de menor tamaño al pasar del caso I al III.

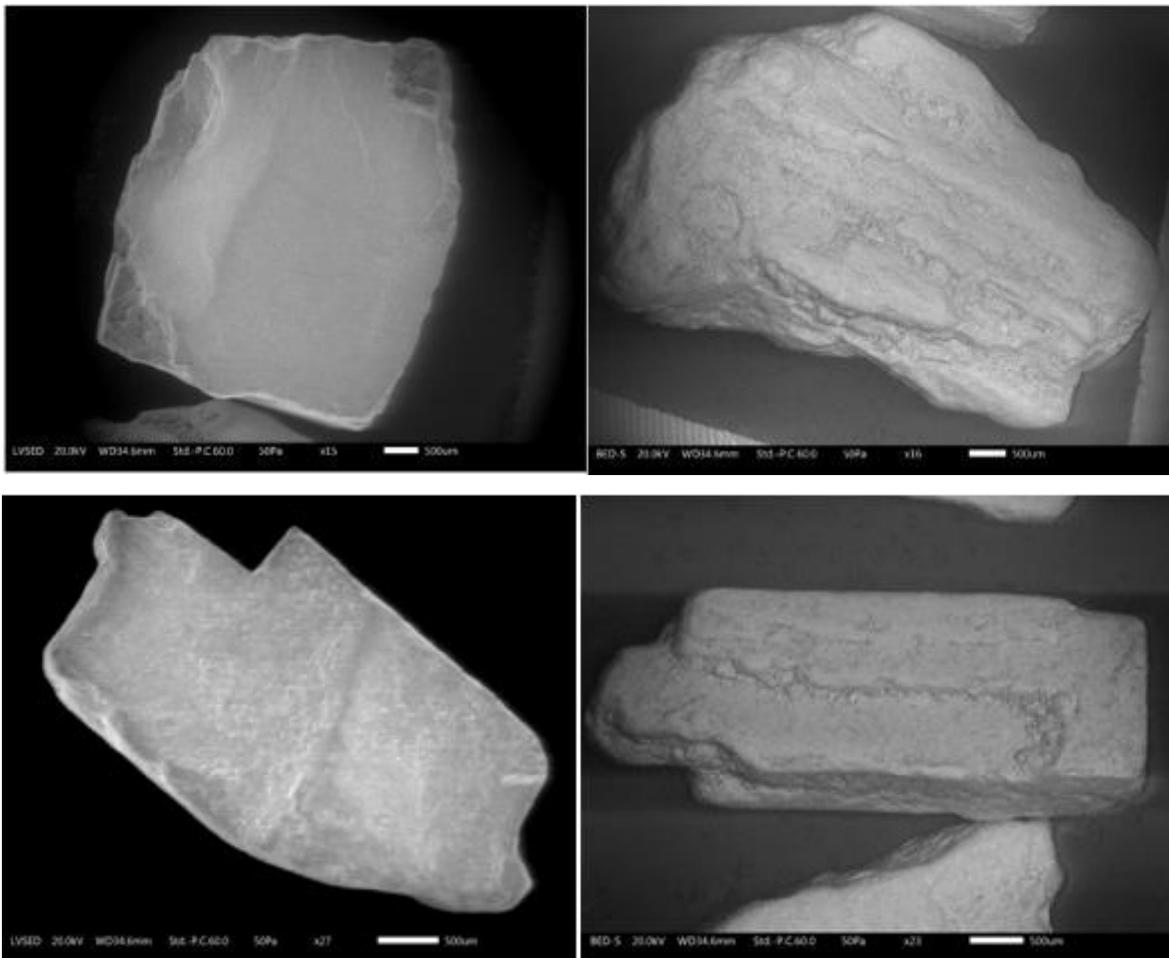


Ilustración 37 Micrografías SEM de NaCl de 4 mm y 2 mm (aproximadamente).

El uso de estas diferentes dimensiones hace posible que aunque el volumen a utilizar sea el mismo, en realidad las porosidades a obtener aumenten debido a que las partículas de sal más

pequeñas pueden llenar los espacios entre las partículas de sal mayores, dejando poco espacio para que se infiltre el aluminio, obteniéndose de esta manera mayores porosidades, como puede verse en el caso hipotético que se muestra a continuación en la **Ilustración 38**. No obstante, este aumento tiene un límite, tal y como se podrá analizar más adelante.

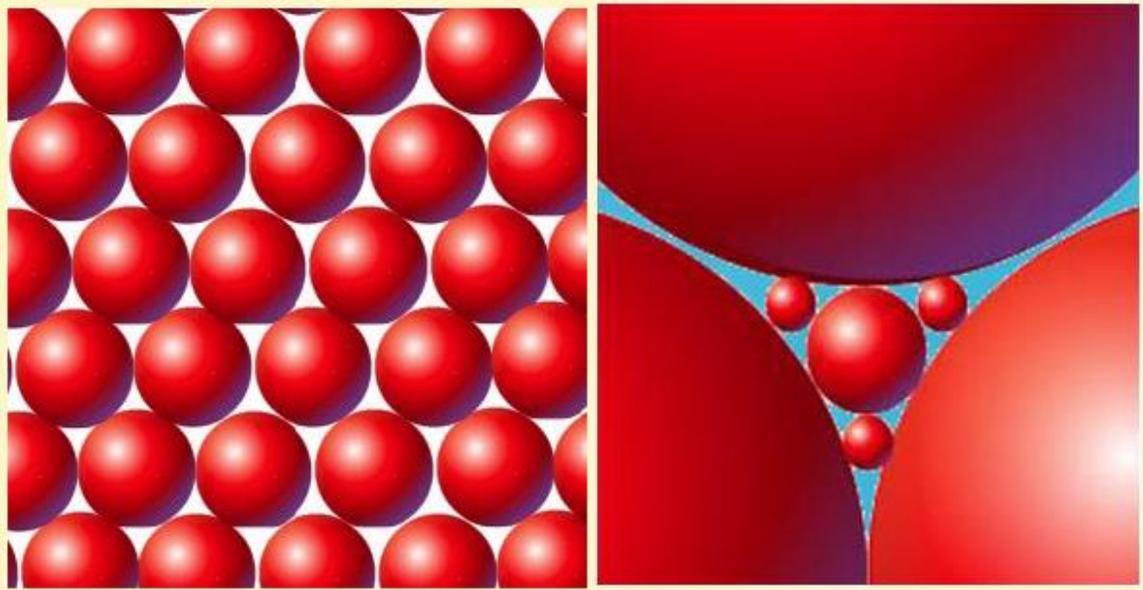


Ilustración 38 Ordenamiento posible cuando se tienen partículas de NaCl del mismo tamaño y de tamaños diferentes. [54]

2.2. Dispositivo para infiltración

Como parte de este trabajo se diseñó y fabricó un equipo para realizar el proceso de infiltración, que consiste en una cámara donde se lleva a cabo la infiltración, una boquilla de inyección de gas, un sujetador y una cuchara que sostiene al dispositivo como tal, como se muestra en la **Ilustración 39**. Más adelante se detallará su funcionamiento. Este dispositivo favorece el proceso de infiltración, ya que con él es posible fabricar las espumas con el apoyo de un horno que posea un orificio en su parte superior, donde se introduce el dispositivo; por otro lado también facilita la fabricación de espumas si se utiliza una aleación que posea muy buena fluidez, ya que permite que la etapa de infiltración se lleve a cabo por efectos de la gravedad y caso contrario si la aleación no es muy fluida se puede hacer inyección de gas para realizar la infiltración. Está construido de acero inoxidable ya que al introducirlo al

horno este acero no sufre desgaste por oxidación debido a las temperaturas que se manejan, ya que otros aceros como el galvanizado pierde sus capas de Zn por causa de la temperatura. Este dispositivo además tiene la gran ventaja de que es barata su fabricación en comparación con otros dispositivos de su tipo y resulta ser muy efectivo para obtener espumas con excelentes características como se verán a continuación.

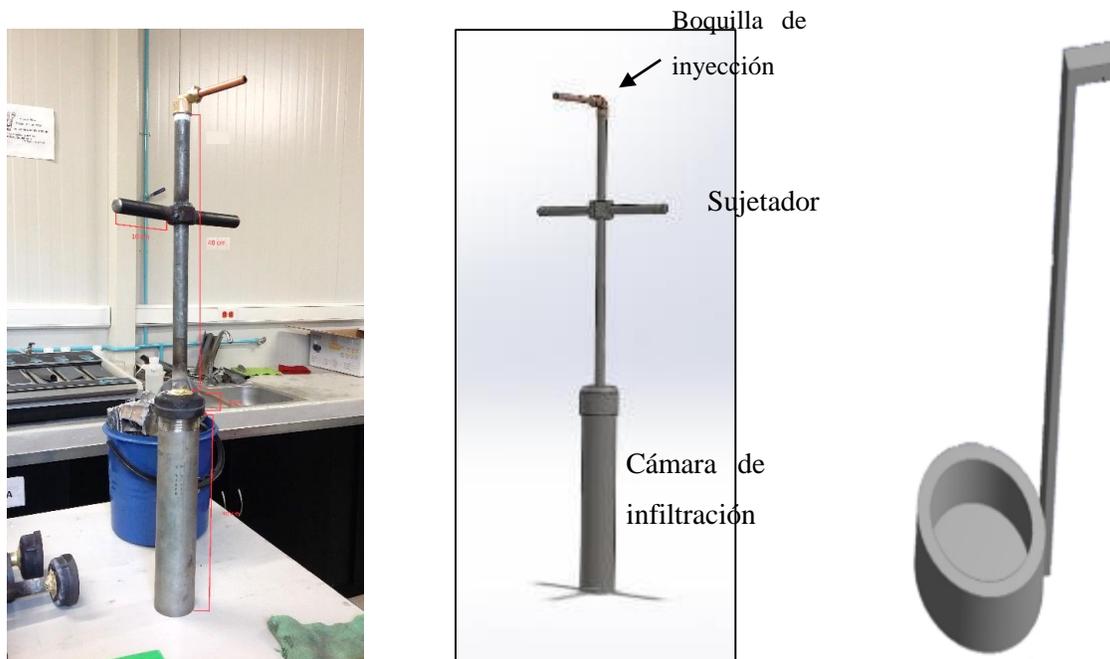


Ilustración 39 Equipo de infiltración (izquierda), Diseño del dispositivo Solid Works (central), cuchara (derecha).

El horno usado es un horno de resistencias eléctricas de marca PREFINSA (**Ilustración 40**), su temperatura máxima de operación es de 1200°C ; dicha temperatura de operación es más que suficiente ya que nuestra aleación de aluminio tiene un punto de fusión de 660°C , y en el caso de que se realice una preforma de NaCl, la temperatura incipiente de las partículas es de 780°C , lo que da la posibilidad de fabricar espumas con aleaciones de puntos de fusión en un amplio rango.



Ilustración 40 Horno de resistencias empleado para la fabricación de las espumas.

2.2.1. Fabricación de la espuma

Para la fabricación de las espumas por el método de infiltración se siguieron los siguientes pasos:

1. Preparación del dispositivo.

Primeramente a la cámara de infiltración se le limpia el interior, que no contenga polvos o material de algún uso anterior; posterior a esto se le impregna Nitruro de Boro (BN) que hace la función de antiadherente, de forma que el NaCl de la preforma y el mismo aluminio no se peguen en las paredes.

2. Preparación de la preforma

Se realizaron pruebas iniciales para sinterizar la sal y producir la preforma; las temperaturas propuestas fueron 720, 740 y 760 °C conociendo que la sal funde a 801 °C, dejando un tiempo

de permanencia de 30 min, y no se observaron resultados satisfactorios porque la sal no se adhería mediante la fusión incipiente en su superficie. Se realizó una búsqueda bibliográfica para determinar los parámetros necesarios para lograr una buena sinterización, encontrándose que en un caso realizaron pruebas a 730, 760 y 790 °C con periodos de permanencia de 6 y 12 horas [55]. Se optó por realizar los tratamientos a las mismas condiciones de 6 horas, pero a los 760 °C no se observaron resultados satisfactorios (**Ilustración 41 inciso a**)), desagrupándose la sal. A 790 °C se obtuvo un reblandecimiento de la sal (**Ilustración 41 inciso b**)), lo cual es una cuestión indeseable. Se redujo la temperatura a 780 °C con 1 hora de permanencia y se obtuvo una preforma sólida, sin granos reblandecidos y una buena interconexión de granos, como puede verse en la **Ilustración 41 inciso c) y d)**.

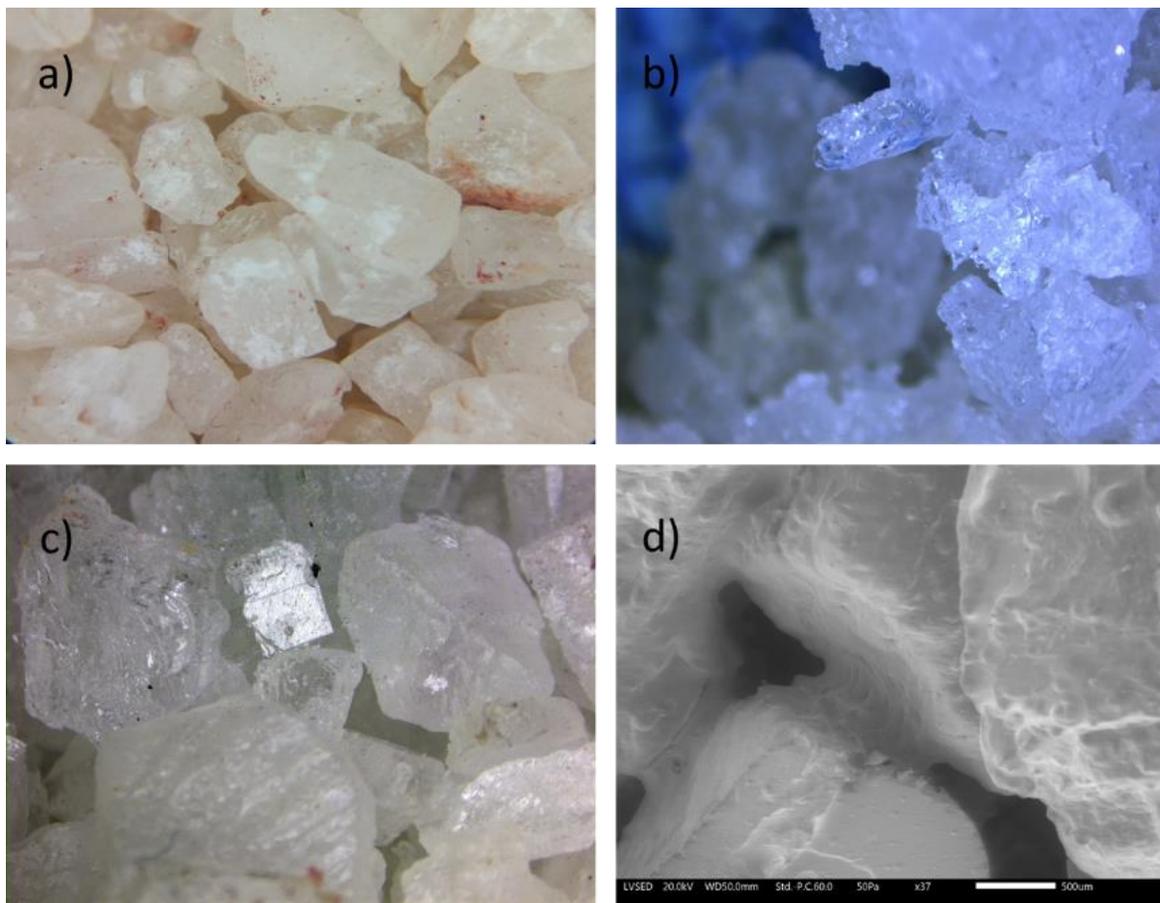


Ilustración 41 Experimentos de sinterización: a) 760 °C No hay sinterización de las partículas. b) 790°C Reblandecimiento de las partículas. c) 780°C Sinterización adecuada el NaCl. d) Imagen SEM de sinterización a 780°C.

Con lo anterior se corroboró que las condiciones adecuadas son 780 °C con una permanencia de 1 hr. Una vez determinados estos parámetros, para fabricar la espuma se procedió a añadir dentro del dispositivo para infiltración el NaCl de diferentes granulometrías, de tal manera que se ajustara a las distribuciones anteriormente mencionadas. De acuerdo a lo planeado para la fabricación de las probetas, que tienen 10 cm de altura y 5.08 cm de diámetro, se realizaron algunos cálculos para conocer la cantidad de partículas de NaCl necesarias de cada tamaño y cumplir con las relaciones propuestas. Para esto se tomó como base la cantidad de NaCl que se requiere para obtener una probeta de una altura de 10 cm, siendo en el primer caso (1:1) 265.65 gr de sal de 4 mm, a partir de esto para el caso siguiente (2:1) la altura de la probeta se dividió en 2 partes, llenándose cada mitad con la granulometría correspondiente: 5 cm con partículas de 2 mm y 5 cm con partículas de 4 mm, y para el tercer caso (4:1) se realizó de la misma manera.

Estudios posteriores demostraron que no es necesario realizar la preforma, lográndose los mismos resultados en cuanto a la infiltración y propiedades finales de la espuma para procesos sin preforma previa. En este caso solo se añadió la sal y acto seguido se procedió al paso siguiente, de fundición. No obstante, se está mencionando la investigación realizada sobre sinterizado de la sal, ya que es un resultado importante de este trabajo.

3. Fundición

Una vez que el dispositivo está introducido en el horno, conteniendo la sal y el aluminio sobre este, dentro de la cámara de infiltración, se aumentó la temperatura del horno hasta 670 °C con la finalidad de fundir el aluminio, que una vez líquido podrá infiltrarse por los canales de la preforma o partículas espaciadoras.

4. Infiltración

En esta etapa el gas (Ar) se inyectó abriendo el suministro al dispositivo. Esto hace que se presione el metal fundido para que se introduzca en la preforma. Este proceso se le llama infiltración y es el más importante ya que aquí se formará la espuma. Una vez terminado el proceso se saca el dispositivo completo del horno y se deja enfriar en aire. Una opción es no aplicar el gas, lo cual se puede realizar gracias a la elevada fluidez de esta aleación de aluminio, rica en Si.

5. Disolución de las partículas espaciadoras.

Una vez que se sinterizó la preforma de NaCl, se fundió el aluminio y se infiltró, y habiéndose enfriado, el compósito de aluminio-NaCl se sacó de la cámara de infiltración y se introdujo en agua durante aproximadamente 5 horas para disolución de las partículas de NaCl. Cabe mencionar que la sal se disuelve en un periodo de 1 hora, sin embargo para eliminar todo residuo se dejó por varias horas y así evitar la formación de salitre.

2.3. Caracterización

2.3.1. Caracterización metalográfica

Dentro de esta etapa, se realizó la caracterización mediante MO y MEB tanto de las probetas obtenidas de la aleación en estado *as-cast* y de las espumas fabricadas. Para la preparación de las muestras se incluye desbaste con lija de carburo de silicio, en sus diferentes granulometrías, de 400 a 2000 y posteriormente un proceso de pulido con alúmina con tamaño de .05 μm de partícula.

2.3.2. Microscopio Óptico (Metalográfico)

Este tipo de microscopio es importante ya que nos permite realizar una observación preliminar a grandes rasgos antes de pasar a un análisis a escalas menores. En este trabajo se utilizó un microscopio metalográfico marca Labomed modelo Med 400.

2.3.3. Microscopio Electrónico de Barrido (MEB/SEM)

Después de una caracterización preliminar en el microscopio óptico es muy útil llevar a cabo la toma de imágenes en SEM para determinar el tamaño aproximado de los poros y hacer una caracterización completa de las espumas fabricadas. En el laboratorio de la Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia (ENES) se cuenta con un microscopio marca JEOL JSM IT300LV, y fue aquí en donde se realizaron las caracterizaciones de las espumas fabricadas, las partículas de sal y de la aleación en estado *as-cast* habiendo dado la

preparación adecuada de desbaste y pulido. Este equipo cuenta con capacidad para observar muestras con electrones secundarios, electrones retrodispersados, LV-SEC Detector de electrones secundarios en el modo de bajo vacío y patina de enfriamiento de -30 a 50°C, además de 2 detectores EDS para realizar rayos X.

2.3.4. Caracterización mecánica

En la etapa de caracterización mecánica se realizaron ensayos de compresión en una máquina tipo Instron 1125-5500R con una velocidad de deformación de 0.5 mm/min, de acuerdo a la norma ASTM E9-09, "Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature". Los ensayos se realizaron utilizando probetas de 19 mm de diámetro y 15 mm de alto, como puede apreciarse en la **Ilustración 42**. Este estudio permitirá determinar el módulo de Young de las diferentes espumas, así como de la aleación en estado de colada. También se podrán analizar las diferentes etapas de la curva esfuerzo-deformación, relacionándolas con las porosidades obtenidas. El tamaño de las probetas estará dado tal que se cumpla una relación diámetro (D)/altura (h) de la siguiente manera:

$$\frac{D}{h} = 1.266 \dots \dots \dots (15)$$

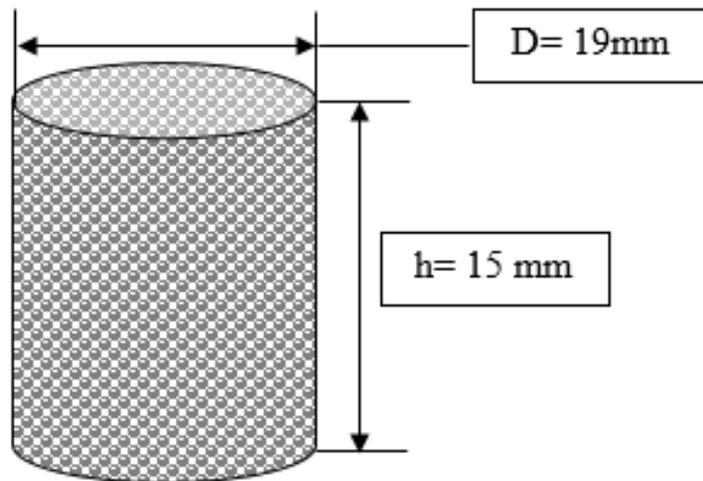


Ilustración 42 Características de las probetas utilizadas para ensayos de compresión.

2.3.5. Densidad

La densidad generalmente se calcula por la relación masa /volumen de un material, para lo cual solo es necesario medir estos parámetros y aplicarlos a la ecuación 16.

$$\rho = m/V \dots \dots \dots (16)$$

Sin embargo, debido a la irregularidad y porosidad en las piezas, las mediciones de la densidad de la aleación en estado de colada y de las espumas fabricadas se realizaron mediante el método de Arquímedes en una balanza analítica Sartorius modelo QUINTIX 124-1S en donde de acuerdo a la siguiente fórmula se realiza el cálculo de la densidad del material:

$$\rho = \left(w_a * [\rho_{fl} - 0.0012 \text{ gr/cm}^3] / F_{corr} * G \right) + 0.0012 \text{ gr/cm}^3 \dots \dots \dots (17)$$

Donde:

w_a = Peso en aire de la muestra.

w_{fl} = Peso de la muestra en alcohol o etanol.

G = w_a - w_{fl}

ρ_{fl} = Densidad del alcohol o etanol a T ambiente

Factor de corrección = 0.99988

2.4. Modelado y simulación

2.4.1. Modelos de espumas

Para la realización de los modelos computacionales se hizo uso del software ANSYS 16.0. Las espumas se modelaron con dimensiones de 20 mm de diámetro y 16 mm de altura (**Ilustración 43**), con la finalidad de replicar las probetas reales necesarias para el ensayo de compresión, siguiendo una relación diámetro/alto de 1.26 según lo observado con anterioridad para tal ensayo. De igual manera, los modelos se hicieron siguiendo las características de las espumas que se obtuvieron, con relaciones de tamaños de partículas fractales de 1:1, 2:1 y 4:1, además de los diferentes porcentajes de porosidades, las cuales se asemejan con las porosidades reales. En la Tabla 5 se aprecian estas distribuciones. Los poros fueron modelados como esferas, lo cual ha demostrado ser eficiente en otros trabajos [56]. Este modelo reducido se puede utilizar debido a que se ha encontrado que existe una

cantidad mínima de celdas unitarias a utilizarse en el modelo [3], de tal manera se cumpla que el diámetro del modelo abarca de 3 a 4 RVE (elementos representativos de volumen).

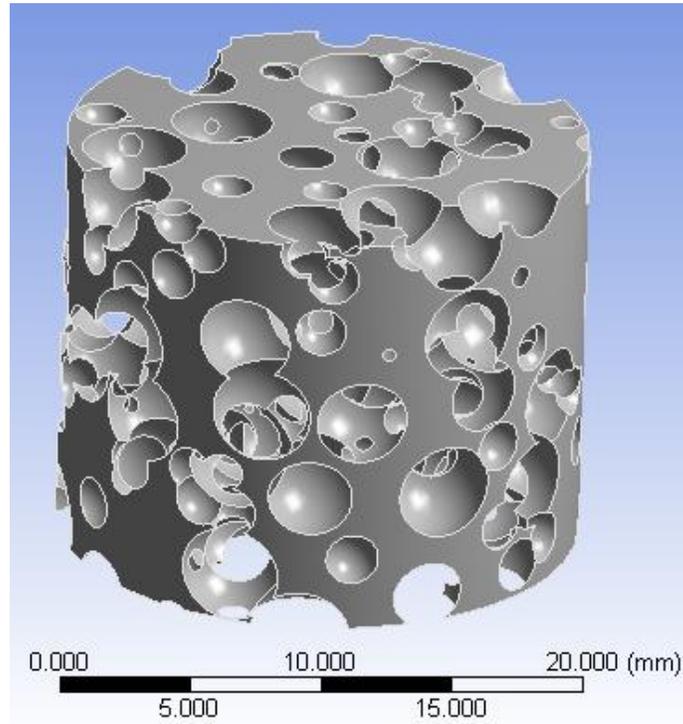
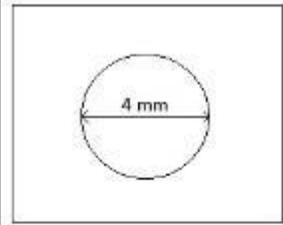
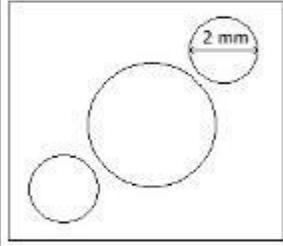
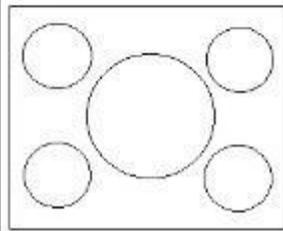


Ilustración 43 Modelo que se utilizará para las simulaciones.

Tabla 5 Modelos y características de las espumas.

	Dimensión Fractal	Porosidad	Densidad (gr/cm ³)
	1	62.59%	1.01
	1	65.92%	0.92
	2	64.81%	0.95

2.4.2. Simulación de comportamiento compresivo elástico

Los diferentes modelos de las espumas se sometieron a compresión utilizando ANSYS 16.0. Esto se realizó con la finalidad de estimar los módulos de Young de las espumas modeladas, y compararlos con los valores que se obtuvieron experimentalmente, y validar estos modelos y la relación entre las partículas espaciadoras y la porosidad obtenida. El módulo de Young utilizado en los cálculos correspondió al obtenido para las aleaciones en estado de colada.

El módulo de Young se obtuvo haciendo uso de la siguiente ecuación, en donde se aplica un desplazamiento uniaxial en el eje z en una de las caras del modelo, y en la otra se fijan restricciones al momento de realizar la simulación, que más adelante se explican.

$$E = P_z * L_0 / D_{M\acute{a}x} \dots\dots\dots (18)$$

Donde P_z es la presión aplicada sobre la cara de la probeta en dirección del eje z , L_0 es la longitud inicial de la probeta y $D_{m\acute{a}x}$ es el desplazamiento máximo de la probeta en z .

Para realizar la simulación se aplicó una carga que depende del área efectiva de cada espuma, tomándose como referencia la aplicación de una carga de 10000 Pa para la aleación en estado de colada, a la vez que se utilizó un desplazamiento igual a 0 y se restringió el movimiento de la parte inferior de la cara del cilindro, y en la cara superior del cilindro se dejó el desplazamiento libre especificando que todos los elementos de esa cara se mueven como un conjunto como se observa en la **Ilustración 44**.

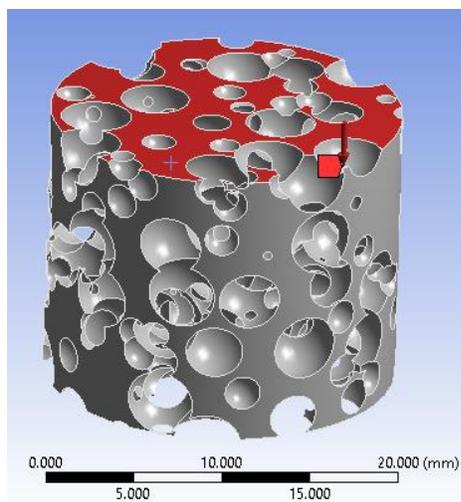


Ilustración 44 Presión y restricciones de desplazamiento aplicadas al modelo.

Las cargas aplicadas se observan en la tabla 6.

Tabla 6 Presión aplicada a los modelos de acuerdo a su área efectiva.

Relaciones	Porosidad de modelo MEF (%)	Área efectiva (mm ²)	Presión aplicada (Pa)
1:1	63.12	123.27	3923.80
2:1	66.13	146.26	4655.60
4:1	65.84	75.504	2403.36

Para cada uno de los modelos empleados se necesitaron cantidades diferentes de nodos así como elementos, tal como se puede observar en la tabla 7, y en la **Ilustración 45** se puede observar el tipo de elemento que es usado por el software.

Tabla 7 Cantidad de nodos y elementos usados para los modelos.

Modelo	Tipo de elemento	Cantidad de elementos	Cantidad de nodos
1:1	Solid187	29837	58656
2:1	Solid187	53954	105018
4:1	Solid187	71904	139698

El elemento SOLID187 es un elemento 3-D de 10 nodos de orden superior. Posee un comportamiento de desplazamiento cuadrático y es muy adecuado para modelar mallas irregulares, tal como los modelos de las espumas.

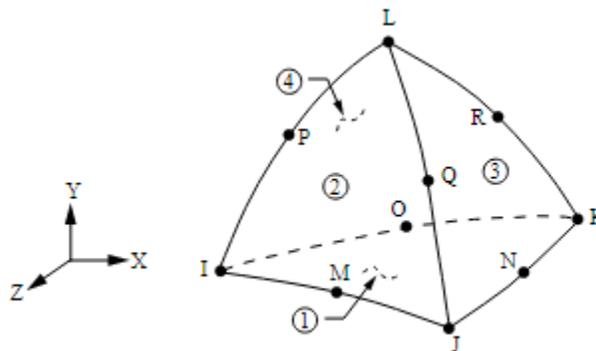


Ilustración 45 Elemento Solid187.

2.4.3. Modelos a usar para comparación

Los resultados experimentales se compararán con los obtenidos mediante el MEF, así como con otros modelos, que en este caso serán los modelos de Zhu et. al, Warren y Kraynik's y el modelo de Gan et. al, modelos ya establecidos en la literatura [57].

- **Modelo de Zhu et al.** [33]

$$E = \frac{1.009 E_s \rho^2}{1 + 1.514 \rho^2} \dots \dots \dots (19)$$

- **Modelo de Warren y Kraynik's.** [58]

$$E = \frac{E_s \rho^2 (11 + 4\rho)}{(10 + 31\rho + 4\rho^2)} \dots \dots \dots (20)$$

- **Modelo de Gan et al. [56]**

$$E = \frac{E_s \rho^2}{1+6\rho} \dots\dots\dots (21)$$

Donde E_s es el módulo de Young del aluminio, y ρ es la densidad relativa de la espuma, que como se había mencionado, es la relación entre la densidad de la espuma y el material sólido que forma la espuma. Estos modelos generalmente sobreestiman el módulo de Young debido a que solo toman en cuenta la porosidad, no toman en cuenta aspectos tan relevantes como el tamaño de poro, el tamaño de la pared, entre otros aspectos. Por tal motivo se cree que utilizando el MEF los valores de E sean más cercanos a los valores experimentales, lo cual es gracias a su capacidad de modelación, replicando de manera más exacta la porosidad real, no solo en porcentaje, sino en tamaño y distribución.

Capítulo

III

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización microscópica de la aleación

En la etapa de caracterización de las probetas se comenzó con el estudio de la aleación en el estado en el que se recibió, como se muestra enseguida. Primeramente se muestra la microestructura de la aleación mediante MEB, utilizando electrones retrodispersados, como se aprecia en la **Ilustración 46 (izquierda)**. Como puede observarse está formada por α -Al y segundas fases de color claro, las cuales corresponden a fases ricas en Cu, como se analizará más adelante; de igual manera con la imagen de microscopio óptico que se encuentra de lado derecho se observa la fase eutéctica Al-Si que no se aprecia en el MEB.

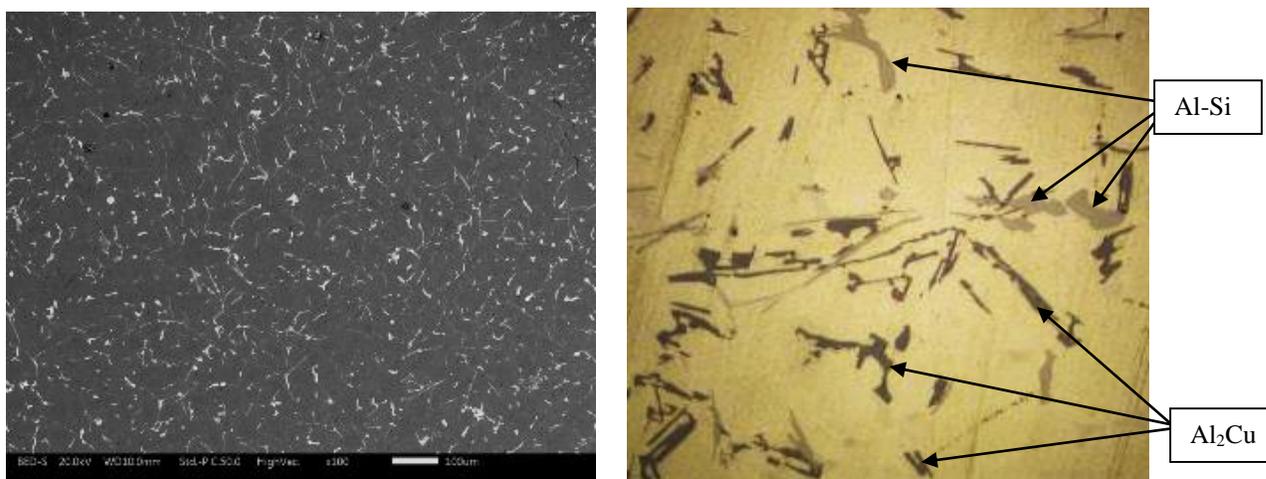


Ilustración 46 Micrografía obtenida mediante MEB de la aleación 332 a 100x (izquierda) y MO (derecha).

Para un análisis más detallado de esta aleación las muestras se observaron a mayores aumentos. Esto permitió observar dos fases distintas; primeramente se aprecian las fases ricas en Cu en las **Ilustraciones 47 y 48**. En el primer caso corresponden a fases Al_2Cu en forma de bloques (**Ilustración 47**), mientras que en el segundo caso corresponde a fases Al_5FeSi . Estas fases son características de estas aleaciones (**Ilustración 48**).

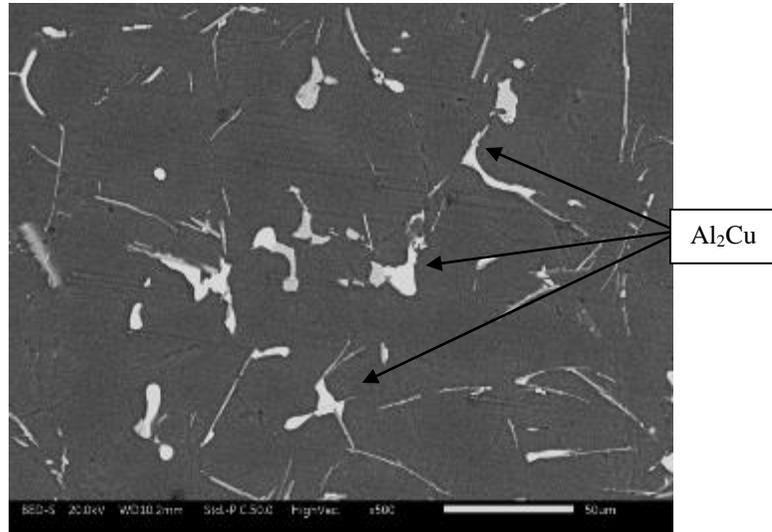


Ilustración 47 Micrografía de la aleación de Al donde se muestran las fases ricas en Cu, a 500x

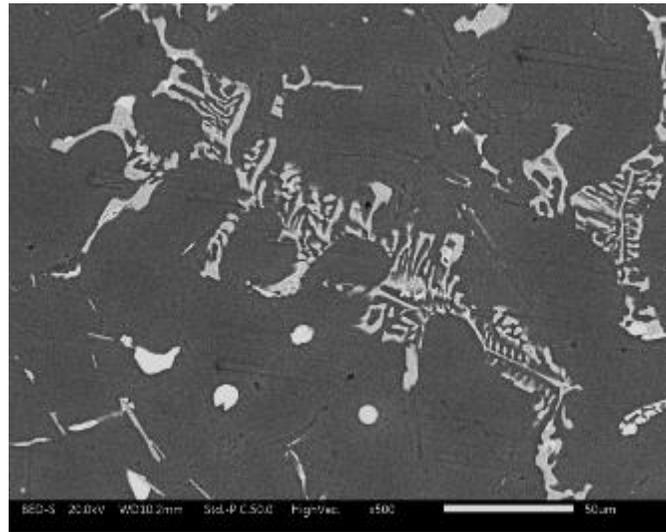


Ilustración 48 Micrografía de la aleación de Al a 500x donde se muestra la fase Al_5FeSi .

La distribución elemental se muestra en el siguiente análisis EDS y los siguientes mapeos realizados en el microscopio electrónico de barrido. En la **Ilustración 49** se observa un análisis en la región de la **Ilustración 46**, en el que se muestra la composición química de la aleación, donde se corrobora que si está entre los rangos de las composiciones obtenidas de la norma ASM mostrada en el capítulo II.

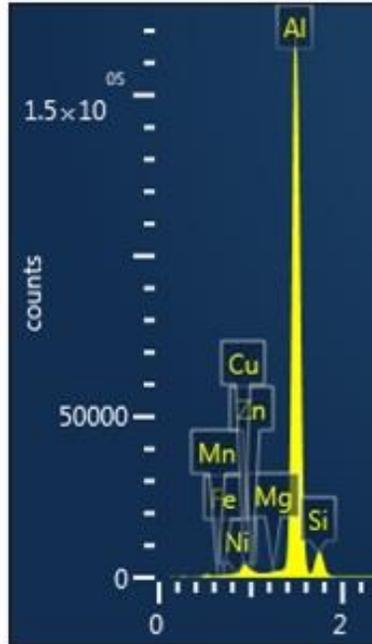


Ilustración 49 EDS de la aleación realizado en SEM.

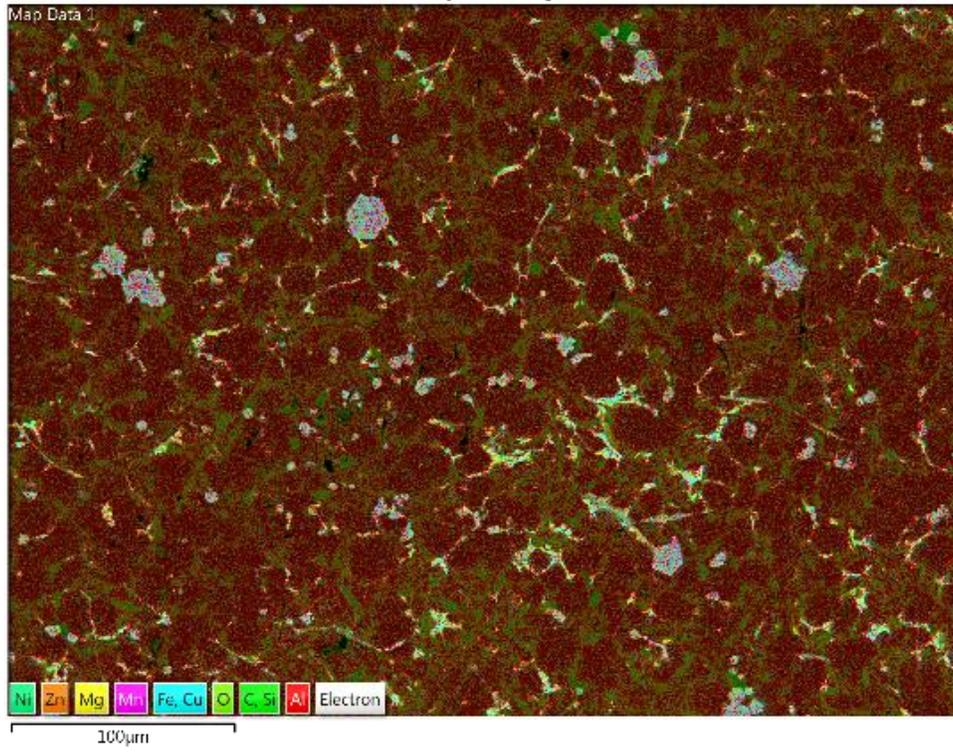
La tabla 8 muestra los porcentajes en peso obtenidos del EDS:

Tabla 8 Composición química de la aleación, obtenida por EDS.

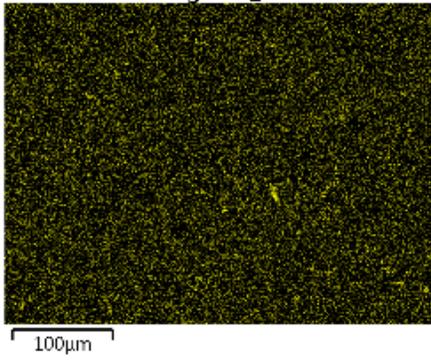
Elemento	Mg	Al	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Sn	Total
%Peso	0.01	83.37	10.21	0.13	0.1	0.95	1.15	0.01	3.25	0.81	0.01	100
%Atómico	0.01	86.8	10.21	0.08	0.06	0.48	0.58	0.01	1.43	0.35	0	100

Con la finalidad de demostrar la presencia de las fases anteriormente mencionadas enseguida se muestran algunos mapeos de la aleación y de las diferentes fases secundarias que se encuentran en ella, observándose la distribución elemental. En la **Ilustración 50** se observa el mapeo a bajos aumentos, destacándose la ubicación de los principales elementos (Al, Si, Cu, Fe, Mn y Mg). Estos elementos están distribuidos en todo el material, y existen algunas concentraciones en algunas de las fases.

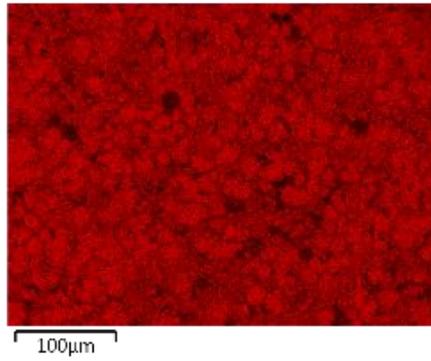
EDS Layered Image 1



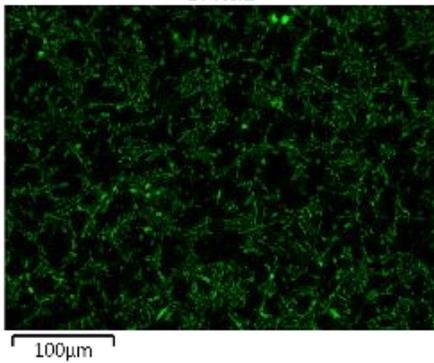
Mg Kα1_2



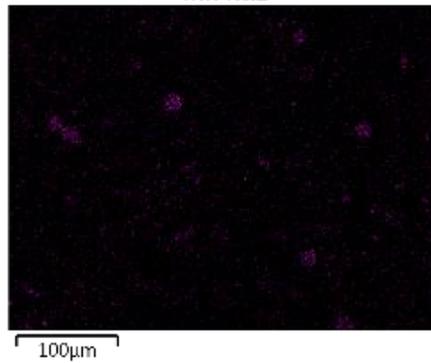
Al Kα1



Si Kα1



Mn Kα1



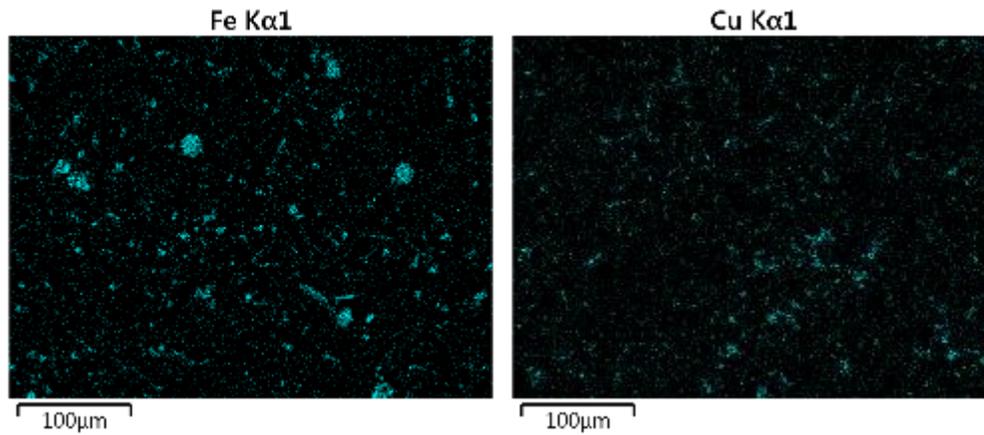
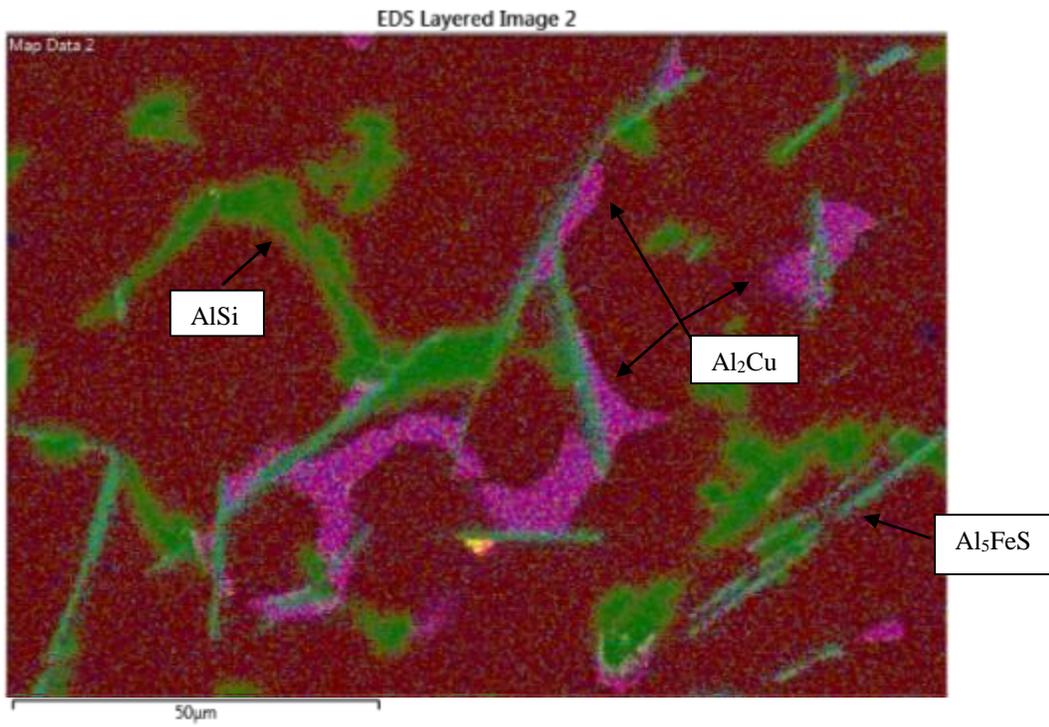
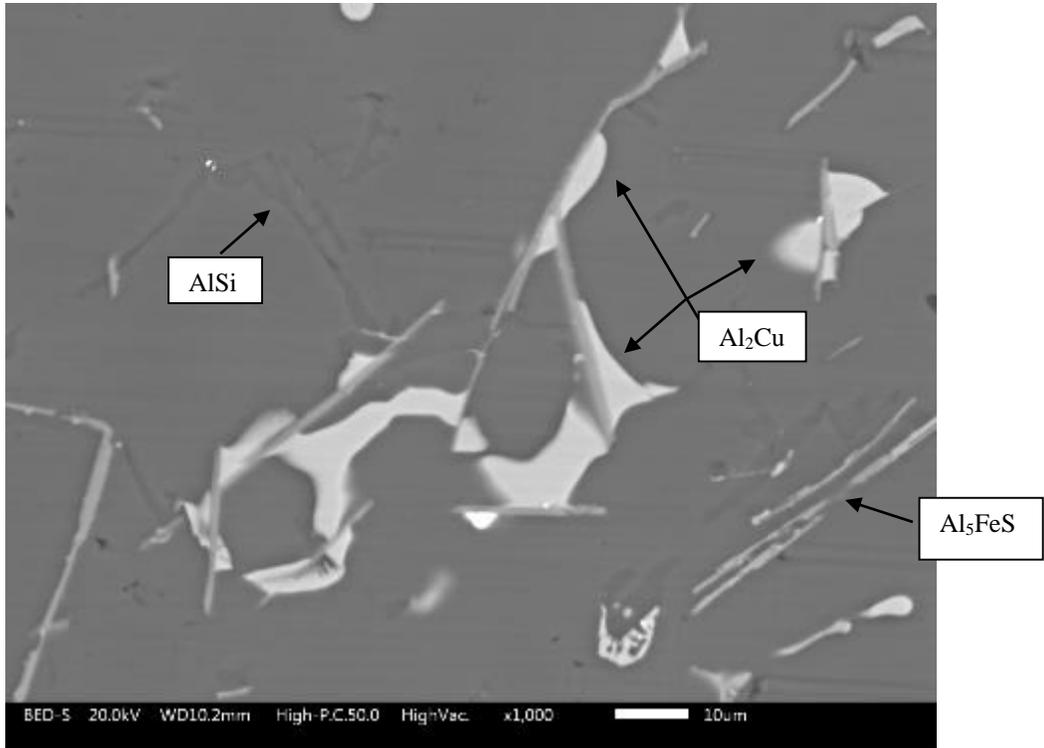


Ilustración 50 Mapeo de la aleación de Aluminio.

Para un mejor análisis de las fases se muestran mapeos a mayores aumentos. En la **Ilustración 51** se observa que la matriz está compuesta de aluminio, y las fases secundarias de silicio, hierro y cobre en donde forman compuestos entre ellos, donde la fase secundaria dominante es Al_5FeSi ; esto se corrobora con lo que observó Musa y Bariş en su trabajo [59]. Los elementos se encuentran distribuidos homogéneamente.



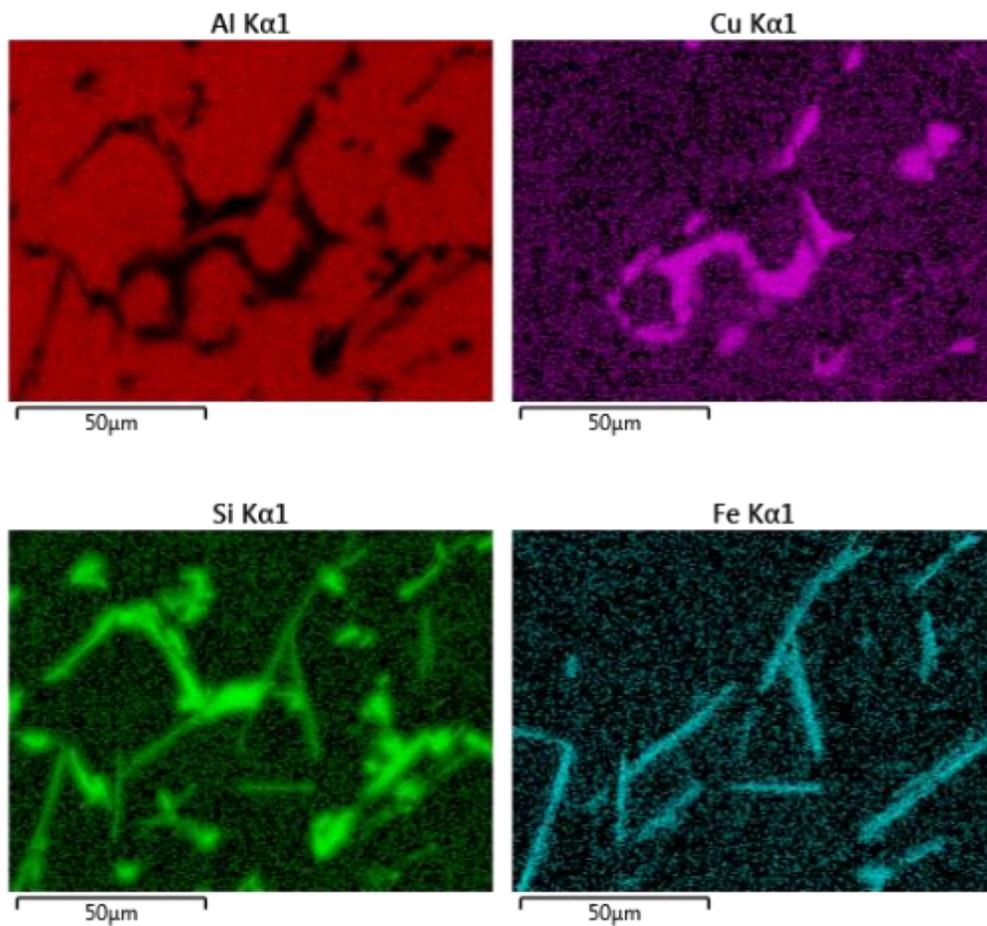


Ilustración 51 Mapeo de las fases para conocer distribución elemental.

3.1.1. Caracterización óptica de las espumas obtenidas

Se fabricaron espumas con las tres diferentes características propuestas en la parte experimental, en donde el proceso de producción se realizó bajo las mismas condiciones, obteniéndose lo siguiente:

3.1.1.1. Espumas con relación 1:1

Las espumas fabricadas con esta relación de tamaño (granos de 4 mm) poseen una estructura de poros interconectados, y una distribución homogénea entre los tamaños de los poros, como se aprecia en la **Ilustraciones 52 y 53**.



Ilustración 52 Espuma relación 1:1, vista superior, NaCl en la matriz.

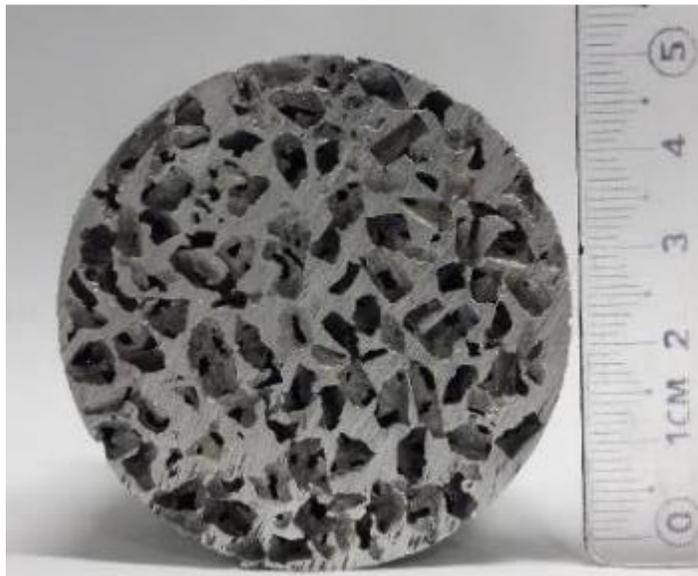


Ilustración 53 Espuma relación 1:1, vista superior, matriz de NaCl disuelta.

En la **Ilustración 54** se observa la relación existente (1:1) entre los granos de 4 mm con los que se fabricó la espuma.

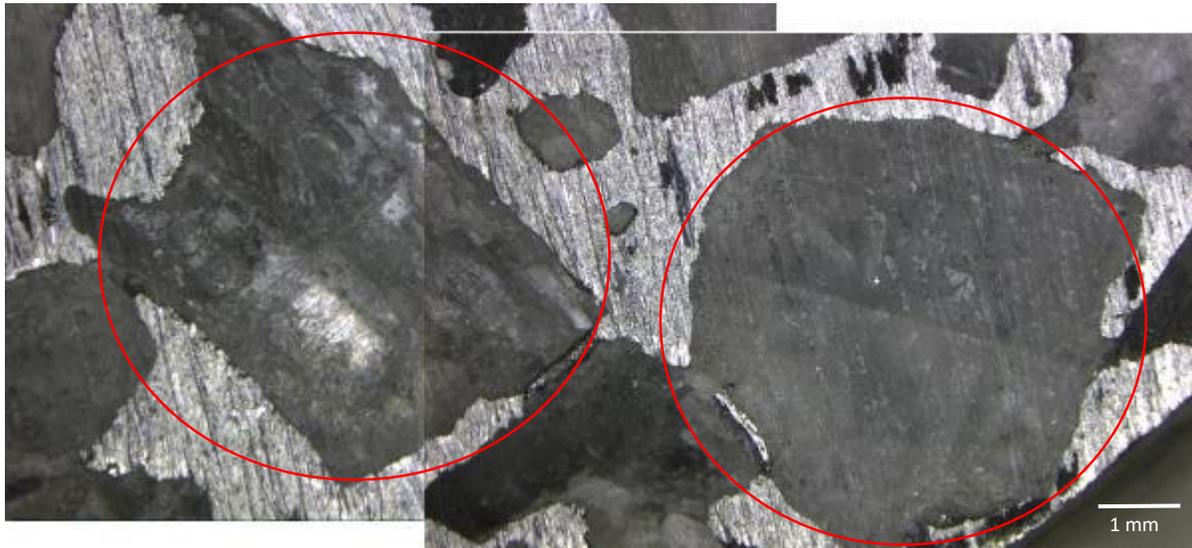


Ilustración 54 Relación 1:1 (aprox.) en las partículas de NaCl.

En la **Ilustración 55** se puede ver que efectivamente existe una interconexión en los poros creados por los espaciadores (NaCl).

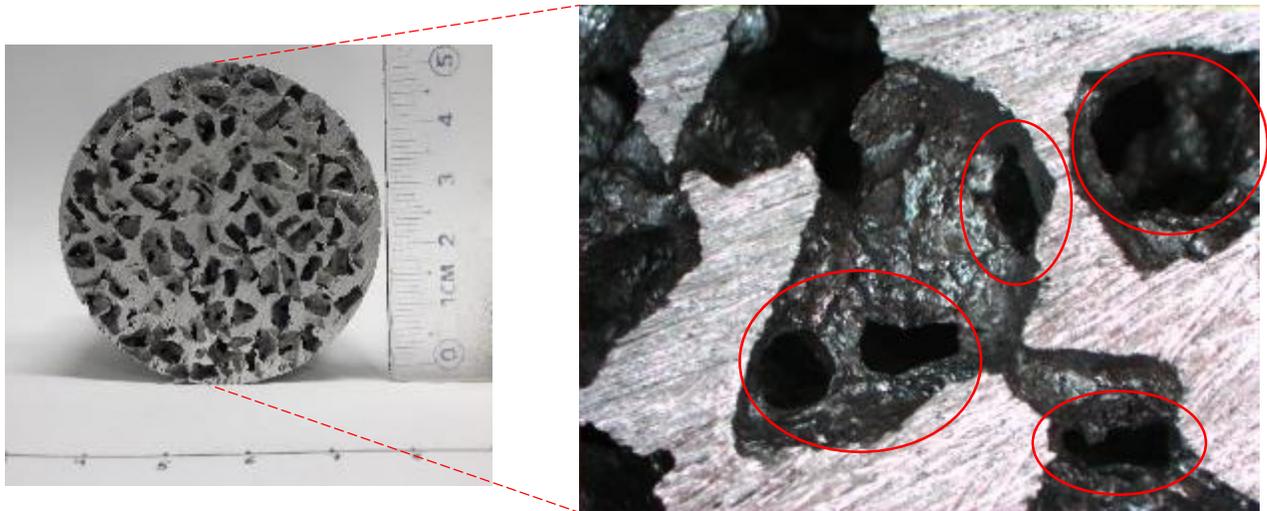


Ilustración 55 Acercamiento a interconexión de poros en estereoscopio de la espuma relación 1:1.

En las imágenes de SEM (**Ilustración 56**) se pueden apreciar con más detalle las interconexiones de los poros así como también el espesor de pared, y tamaño de los poros.

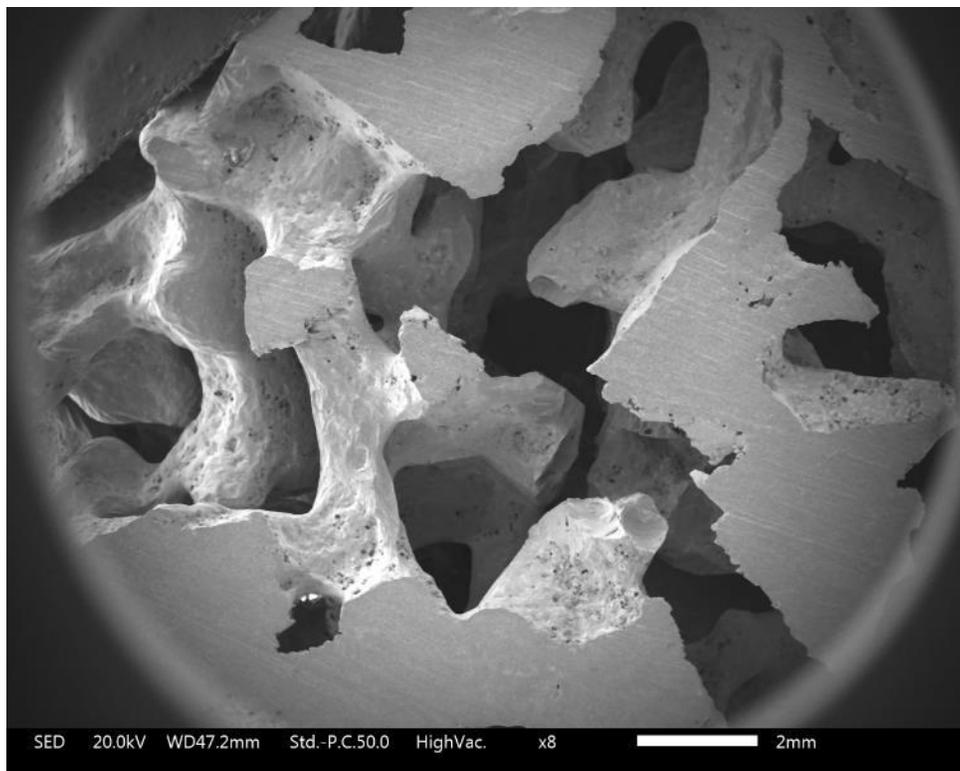
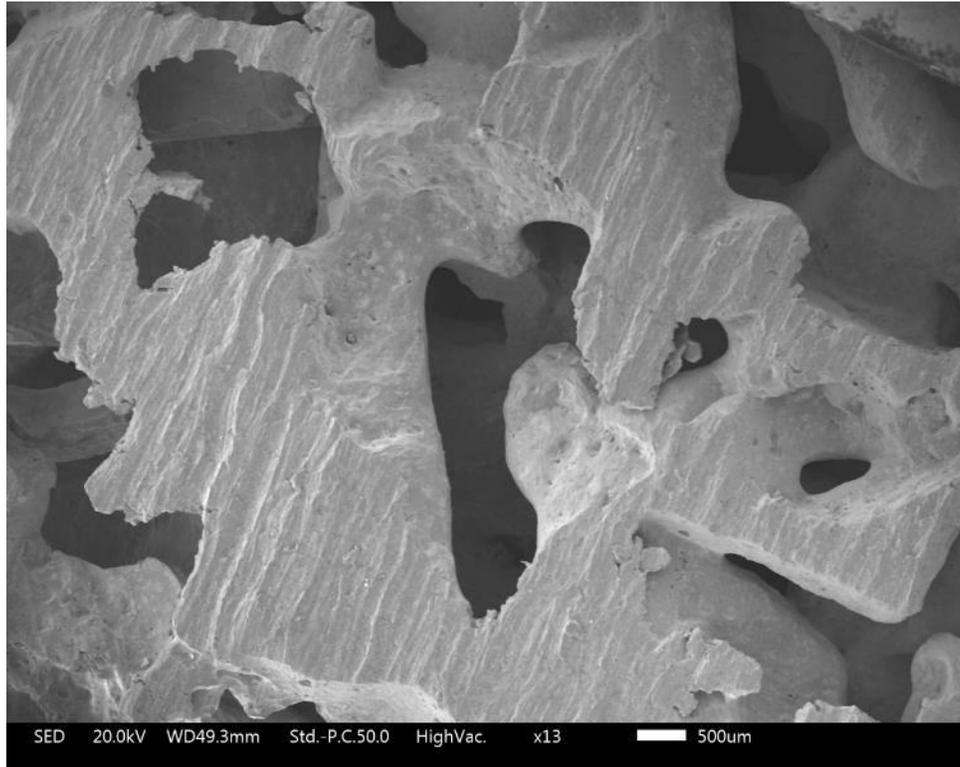


Ilustración 56 Imágenes SEM, observación de interconexión de poros en espuma relación 1:1.

3.1.1.2. Espumas con relación 2:1

En las espumas con relación 2:1 se aprecia ya una diferenciación en cuanto al tamaño de los poros y la cantidad en comparación con la espuma anterior, debido a la inserción del tamaño de partícula de 2 mm, tal como se observa en las **Ilustraciones 57 y 58**.



Ilustración 57 Espuma relación 2:1, vista superior, NaCl en la matriz.

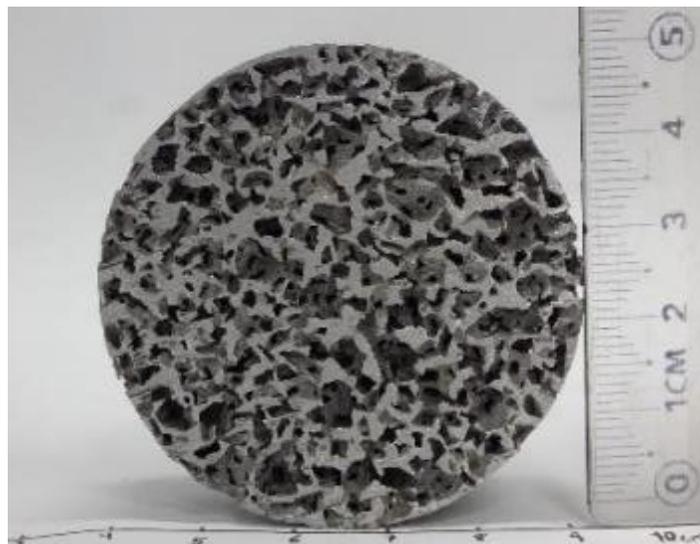


Ilustración 58 Espuma relación 2:1, vista superior, matriz de NaCl disuelta.

En la **Ilustración 58** se observa la relación existente (2:1) entre los granos de 4 y 2 mm con los que se fabricó la espuma.

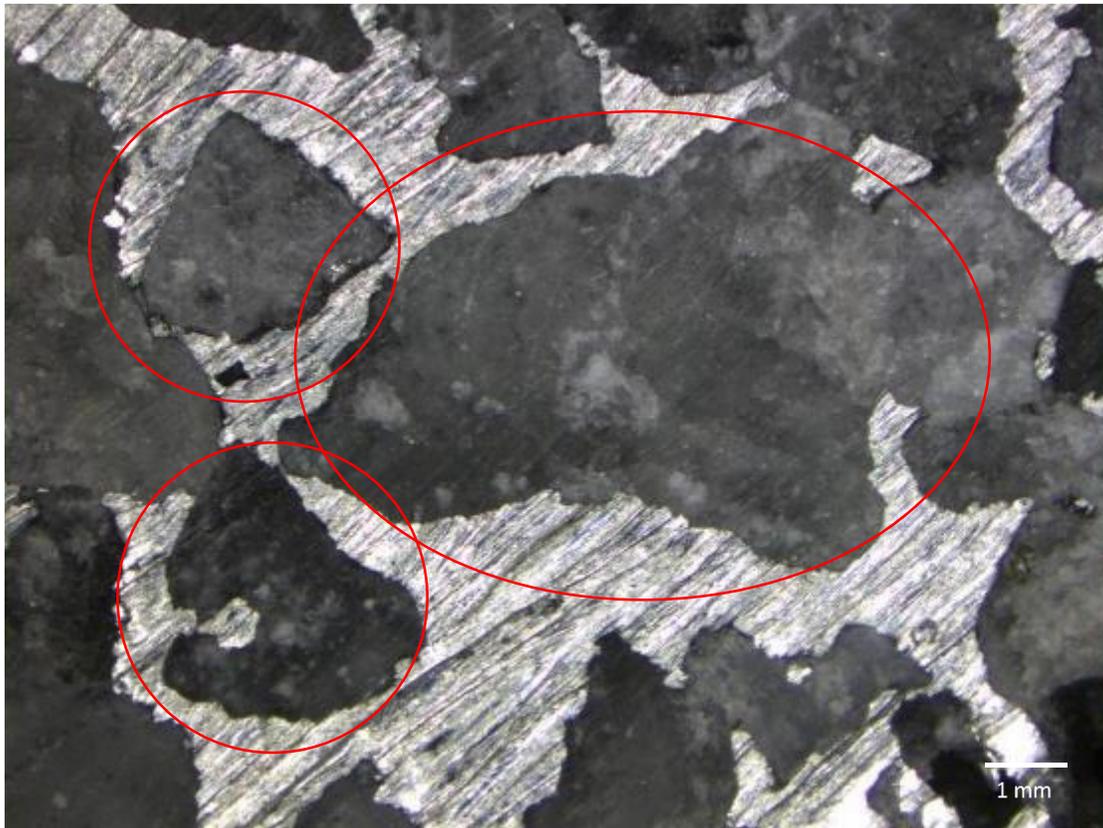


Ilustración 59 Relación 2:1 (aprox.) en las partículas de NaCl.

En la **Ilustración 60** se puede ver que efectivamente existe una interconexión en los poros creados por los espaciadores (NaCl).

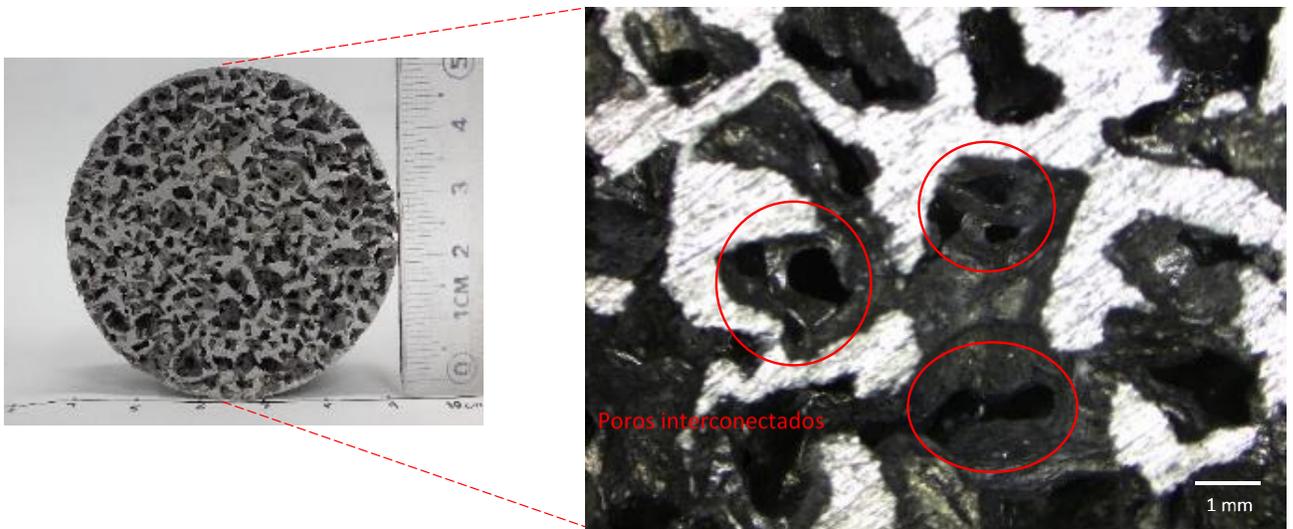


Ilustración 60 Acercamiento a interconexión de poros en estereoscopio de la espuma relación 2:1.

En las imágenes de SEM (**Ilustración 61**) se pueden apreciar con más detalle las interconexiones de los poros así como también el espesor de pared, y tamaño de los poros.

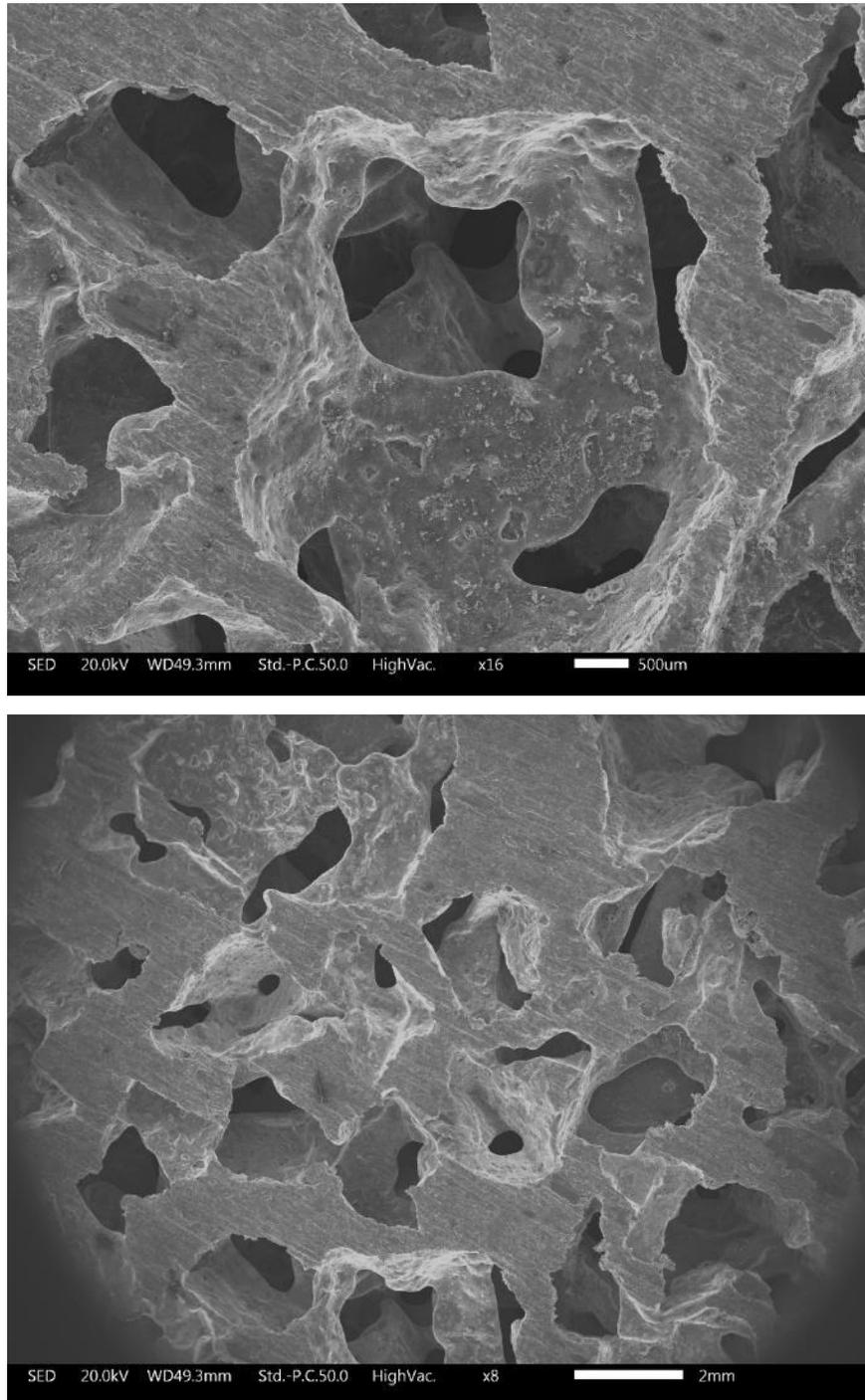


Ilustración 61 Imágenes SEM, observación de interconexión de poros en espuma relación 2:1.

3.1.1.3. Espumas con relación 4:1

Esta es la última relación fabricada y se aprecia de mayor manera la cantidad de poros generados y su tamaño, comparándola con las dos espumas anteriores, ya que al aumentar la cantidad de granos de 2 mm y disminuir la cantidad de granos de 4 mm era de esperarse este resultado (**Ilustraciones 62 y 63**).



Ilustración 62 Espuma relación 4:1, vista superior, NaCl en la matriz.



Ilustración 63 Espuma relación 4:1, vista superior, matriz de NaCl disuelta.

En la **Ilustración 64** se observa la relación existente (4:1) entre los granos de 4 y 2 mm con los que se fabricó la espuma.

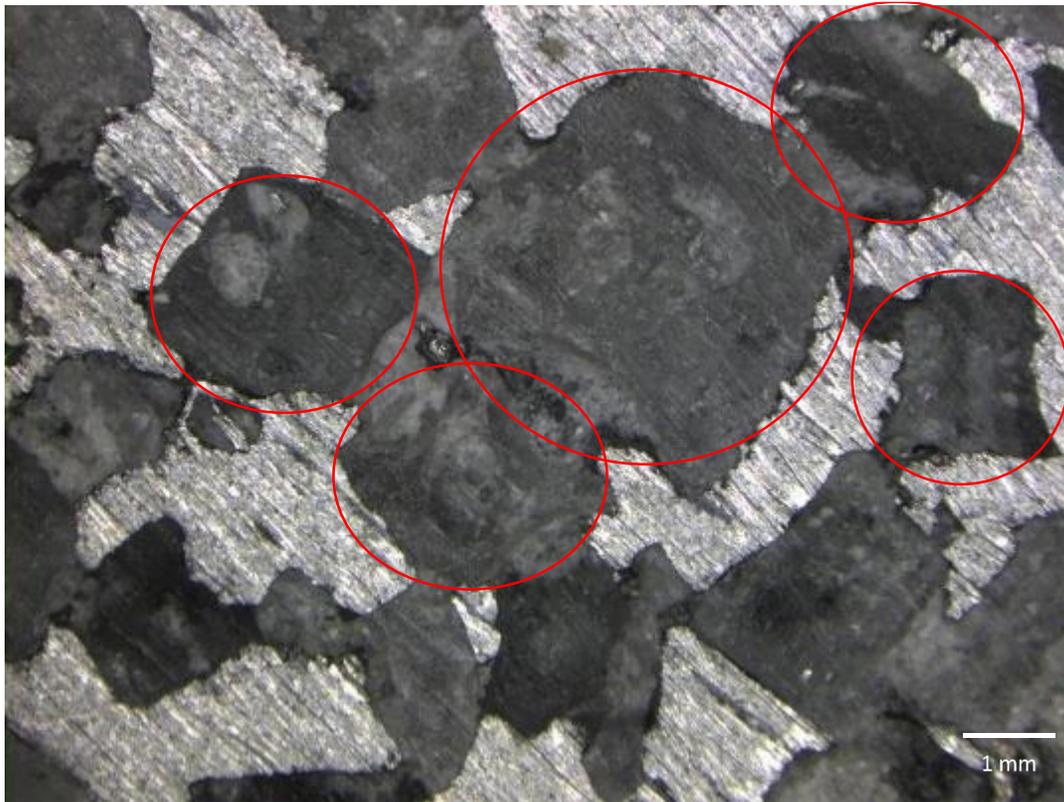


Ilustración 64 Relación 4:1 (aprox.) en las partículas de NaCl.

En la **Ilustración 65** se puede ver que efectivamente existe una interconexión en los poros creados por los espaciadores (NaCl).

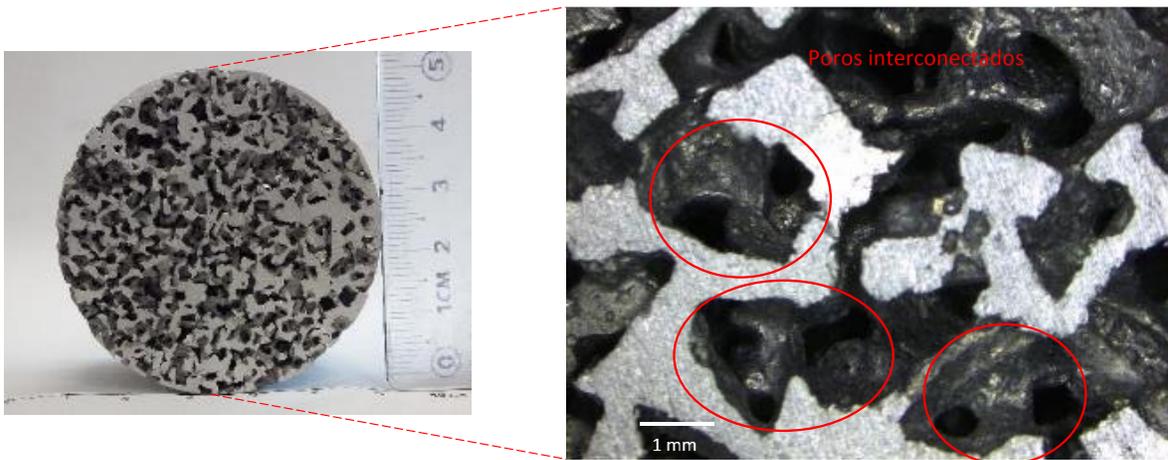


Ilustración 65 Acercamiento a interconexión de poros en estereoscopio de la espuma relación 4:1.

En las imágenes de SEM (**Ilustración 66**) se pueden apreciar con más detalle las interconexiones de los poros así como también el espesor de pared, y tamaño de los poros.

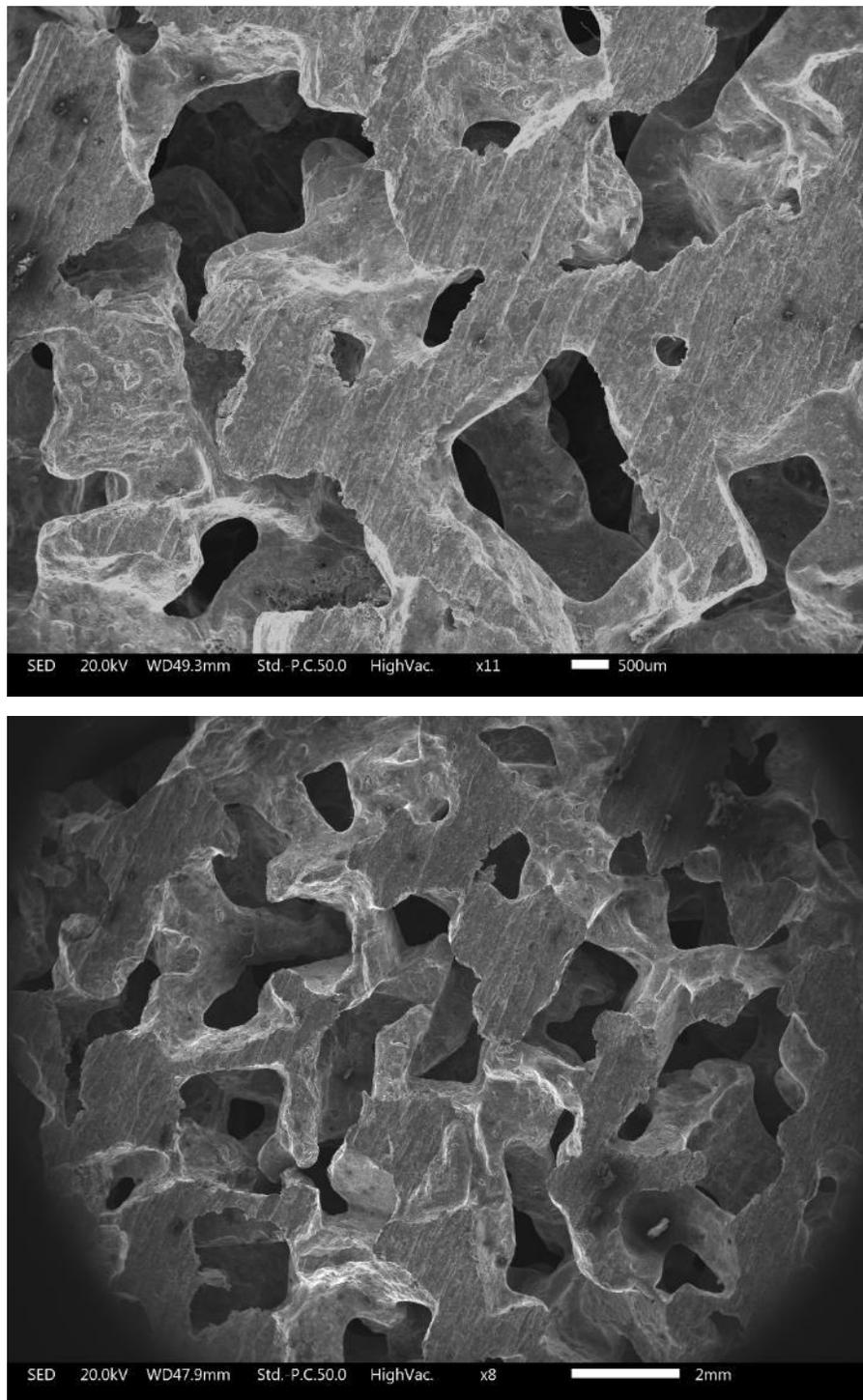


Ilustración 66 Imágenes SEM, observación de interconexión de poros en espuma relación 4:1.

3.1.2. Comparación de las espumas

Al realizar una comparación entre las espumas (**Ilustración 67**) se pueden notar características importantes tal como el número de poros y el espesor de pared, se observa el número de poros aumenta y a la vez el espesor de la pared disminuye, el cambio más notable es naturalmente los casos extremo, el inciso a) que es la relación 1:1 resalta sobre el inciso c) que es la relación 4:1.

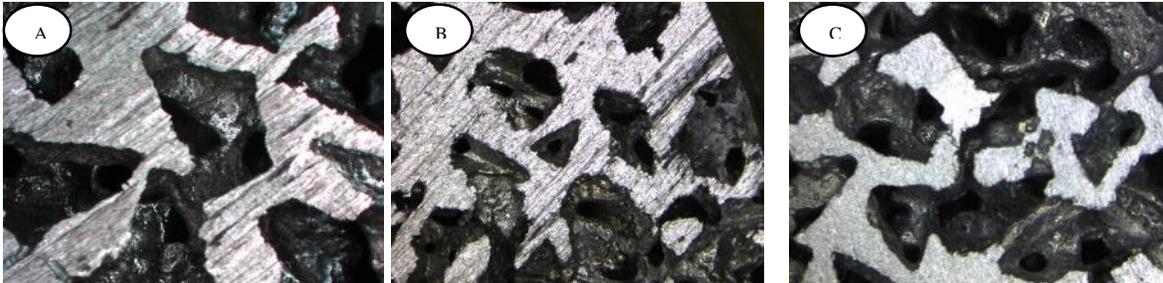


Ilustración 67 Diferencia entre espesores de pared en las espumas fabricadas, a) 1:1, b) 2:1, c) 4:1.

En la **Tabla 9** se hace un análisis de los resultados obtenidos de las espumas fabricadas en donde se hace la comparación entre los diferentes parámetros medidos. Se puede notar que en las mediciones llevadas a cabo no se aprecia mucha diferencia entre la densidad y la porosidad al usar diferentes tipos de relaciones de cantidades de partículas. Sin embargo en el espesor de pared se ve un cambio considerable que se verá en los resultados de las propiedades mecánicas. Estos valores obtenidos y mostrados en la tabla 8 son valores parecidos a los reportados en otros trabajos [3][60][36], sin embargo dichos trabajos no se enfocan en el espesor de pared o se centran en espumas de poro cerrado, cosa que en este trabajo observamos en nuestras espumas de poro abierto y que atribuimos una relación directa con las propiedades mecánicas finales de las espumas. También podemos deducir que se puede modificar haciendo cambios en las relaciones de tamaño entre las partículas espaciadoras y en los tamaños de las mismas.

Tabla 9 Tabla de resultados de densidad, porosidad y espesor de pared en espumas obtenidas.

Relación de tamaño	Densidad ρ (gr/cm ³)	Porosidad (%)	Espesor de pared (mm)
1:1	1.01	62.59	2
2:1	0.92	65.92	1.63
4:1	0.95	64.81	1.24

3.2. Caracterización mecánica de las espumas obtenidas

Posterior a la caracterización óptica y microscópica de las espumas se llevaron a cabo los ensayos de compresión a las probetas, las cuales fueron de geometría cilíndrica con dimensiones de 19 mm de diámetro y 15 mm de altura, de acuerdo a lo planteado en la parte experimental. Los resultados obtenidos se muestran en la **Ilustración 68**; en la gráfica se encuentran representados los resultados del ensayo de compresión de las 3 espumas, apreciándose las diferentes etapas del ensayo: **i)** inicio de compresión, **ii)** densificación de la espuma y **iii)** colapso total de las paredes, en donde se observa que la que posee propiedades mecánicas más bajas es la espuma con una relación de 4:1 en los tamaños de partícula de NaCl, y por lo tanto en la porosidad. Los valores de módulo de Young para estas espumas fueron para el caso 1:1 un módulo de 1.39 GPa, para el caso 2:1 un módulo de 0.9 GPa, y para el caso 4:1 un valor de 0.38 GPa, mientras que los valores de resistencia a la cedencia fueron 0.0126 GPa para el primer caso, 0.0136 GPa para el segundo y 0.0072 GPa para el tercero, mientras que los valores para los cuales comienza la densificación fueron 0.0236 GPa para el primer caso, 0.0165 GPa para el segundo caso y 0.016 GPa para el tercer caso.

En la **Ilustración 68** se observan algunos picos en la parte media de las curvas en las espumas con relación 1:1 y 2:1, que representan densificación de los poros, sin embargo no es densificación total, sino parcial, por eso la curva continua y la espuma no se compacta de manera súbita.

Estos resultados muestran el importante efecto no solo de la porosidad, sino de la distribución de los poros, lo cual a su vez originó que disminuyeran los tamaños de las paredes, reduciendo así las propiedades mecánicas de las espumas, resultado que se buscaba obtener.

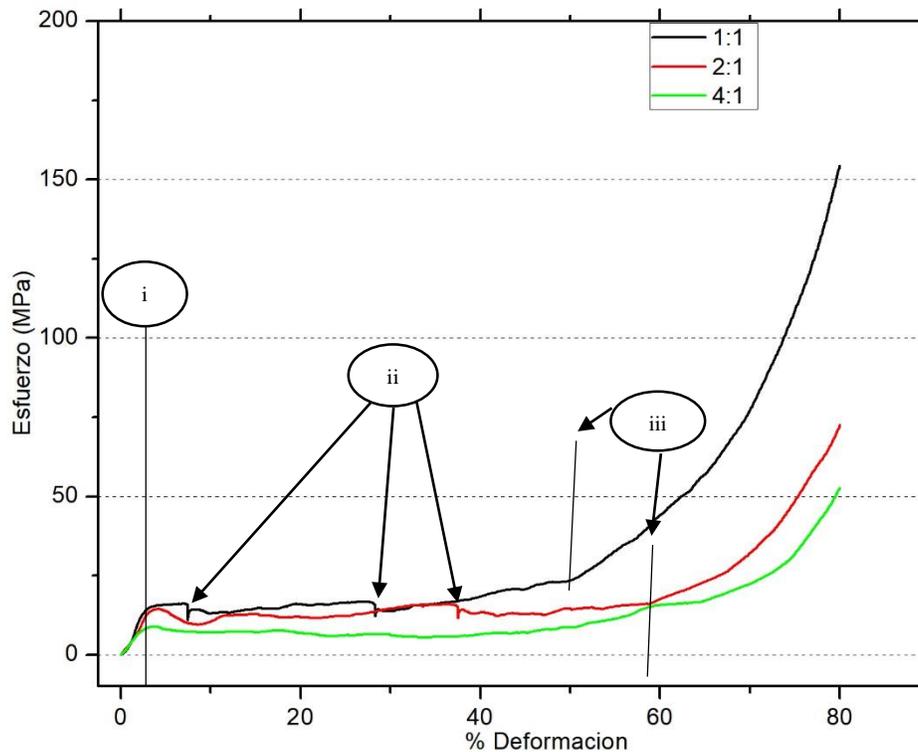


Ilustración 68 Diagrama esfuerzo vs deformación comparativo de las espumas.

Como se observó en la tabla 9, no se tuvo un aumento considerable en la porosidad entre las 3 espumas fabricadas, esto es debido a que al hacer un aumento en la cantidad de partículas de sal (NaCl) pero no en su tamaño, no es posible lograr una porosidad mayor, esto se puede explicar en las siguientes dos imágenes; en la **Ilustración 69** se puede ver que si la relación entre tamaños es corta (eje x), en este trabajo es 1 y 2, la porosidad que se puede lograr ronda entre 62 y 65%; por otro lado, en la **Ilustración 70** se nota que en esa misma relación de tamaños (curva negra), aunque se aumentase la cantidad de partículas los puntos a lo largo de la curva no tienen diferencia notable, caso contrario a si la relación tuviera valores de 5 o 10 como se observa, corroborándose que lo obtenido experimentalmente es acertado de acuerdo a los estudios realizados por otros equipos de trabajo [61], [62].

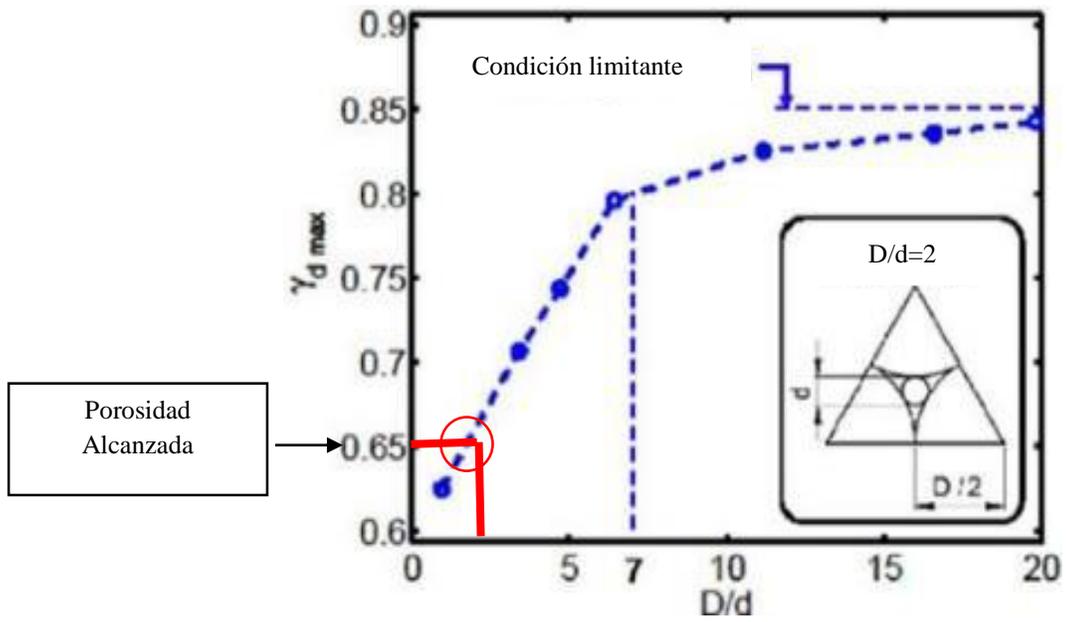


Ilustración 69 Relación D/d entre partículas espaciadoras y porosidad alcanzada. [61]

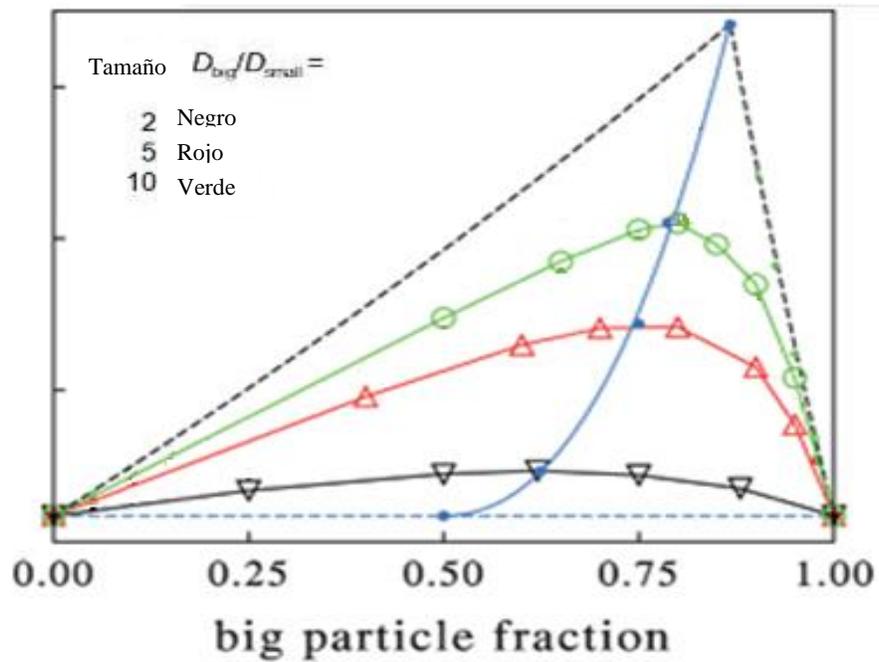


Ilustración 70 Relación entre fracción de partículas de mayor tamaño vs. Menor tamaño y porosidad alcanzada. [62]

3.3. Modelos y simulación

Enseguida se muestran las características de los modelos que fueron usados en ANSYS:

3.3.1. Modelo 1:1

En la **Ilustración 71** se observa el modelo de las espumas para una relación de tamaños de poros de 1:1. Asimismo se ve el mallado utilizado y la respuesta obtenida después de aplicar un esfuerzo para lograr una deformación. Es de destacar que la deformación alcanzada fue la correcta, siendo aplicada homogéneamente en la cara superior, lo cual se logró al establecer las condiciones necesarias en esta superficie.

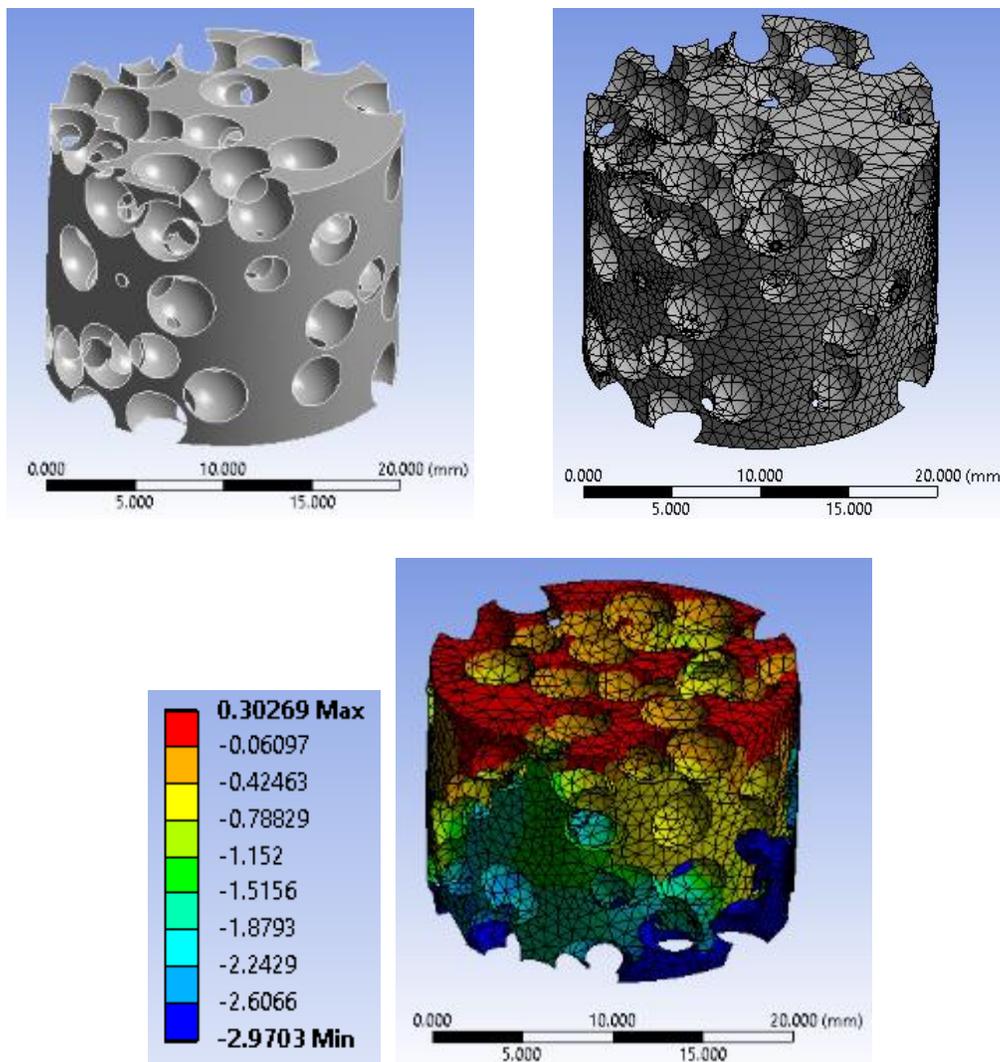


Ilustración 71 Modelo de espuma con relación 1:1.

3.3.2. Modelo 2:1

Para el caso de las espumas con porosidad 2:1 se observan igualmente los modelos en la **Ilustración 72**, donde se aprecian los dos tamaños de poros diferentes. Asimismo el comportamiento de la deformación es similar al caso anterior.

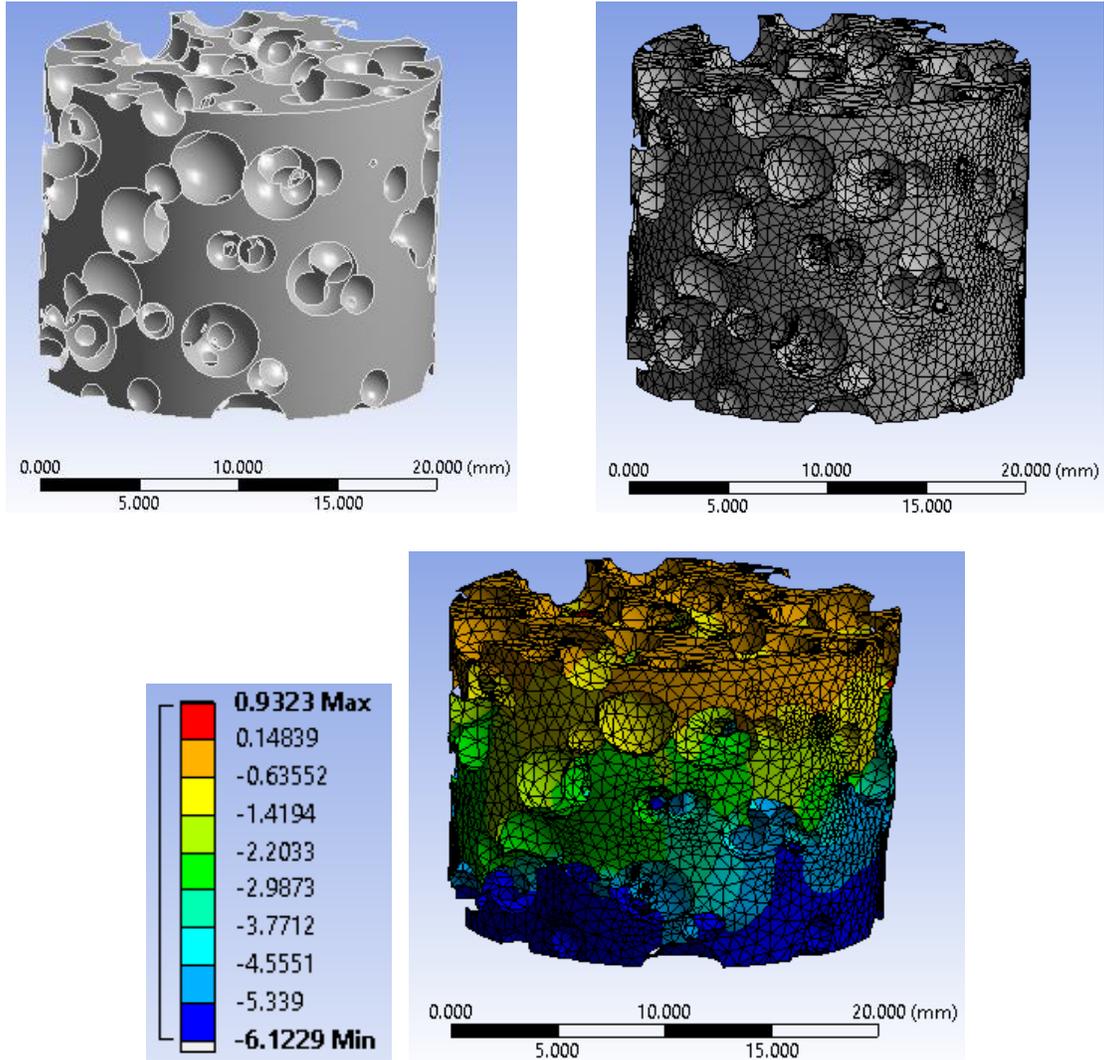


Ilustración 72 Modelo de espuma con relación 2:1.

3.3.3. Modelo 4:1

Para el caso de las espumas con porosidad 4:1 (**Ilustración 73**) los resultados obtenidos igualmente se corresponden con lo esperado, destacándose los dos tamaños de poros diferentes. Asimismo el comportamiento de la deformación es similar a los casos anteriores.

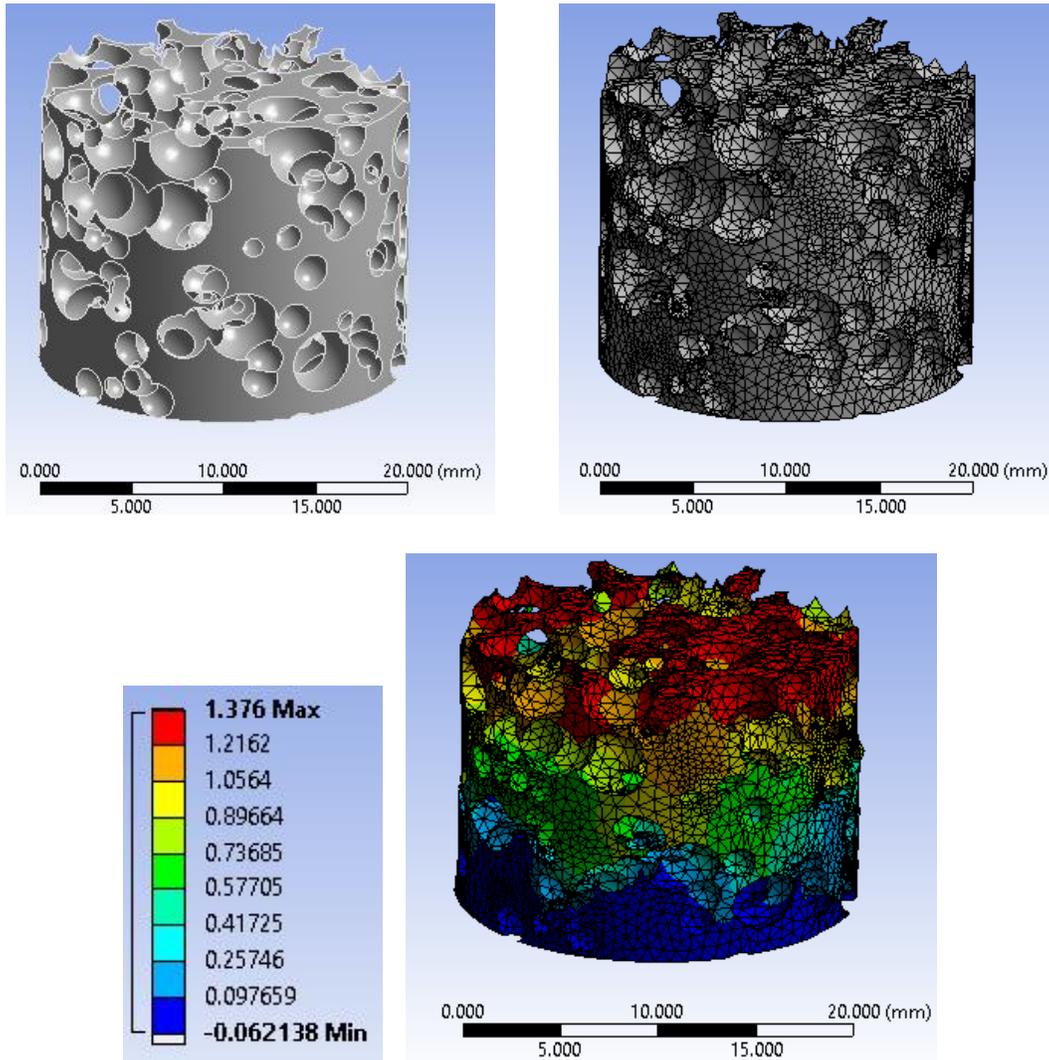


Ilustración 73 Modelo de espuma con relación 4:1.

Los resultados de las simulaciones mostraron que las espumas poseen un comportamiento de acuerdo a lo esperado, ya que correspondiendo a lo visto en la Tabla 9, con la disminución del espesor de pared se obtuvo una disminución notable en el módulo de Young. En la tabla 10 se resumen los parámetros de los modelos para cada caso de espuma:

Tabla 10 Características de los modelos computacionales.

	1:1	2:1	4:1
Porosidad (%)	63.12	66.13	65.84
Área efectiva (mm²)	123.27	146.26	75.504
Desplazamiento máximo (mm)	0.30269	0.9323	1.376
Presión ejercida (Pa)	3923.80	4655.60	2403.36
Espesor de pared (mm)	2	1.63	1.24
Módulo de Young MEF (GPa)	<u>2.07</u>	<u>0.80</u>	<u>0.28</u>

Estos resultados concuerdan también si se hace la predicción usando algunos modelos estudiados [57], en donde en este caso los resultados son más altos, resaltando que los modelos teóricos siempre dan valores sobreestimados.

3.4. Comparación de resultados experimentales con simulación computacional

Finalmente, al realizar la comparación de los resultados obtenidos en la simulación con los datos experimentales se puede validar que los modelos diseñados concuerdan de muy buena manera con los resultados experimentales, lo que se aprecia en la **Ilustración 74**. Por otro lado, la mayor diferencia se nota al comparar con los otros modelos, sin embargo se debe tener en consideración que los modelos siempre sobreestiman los resultados ya que no contemplan muchos de los parámetros que tienen afectación en los resultados experimentales, como se mencionó con anterioridad.

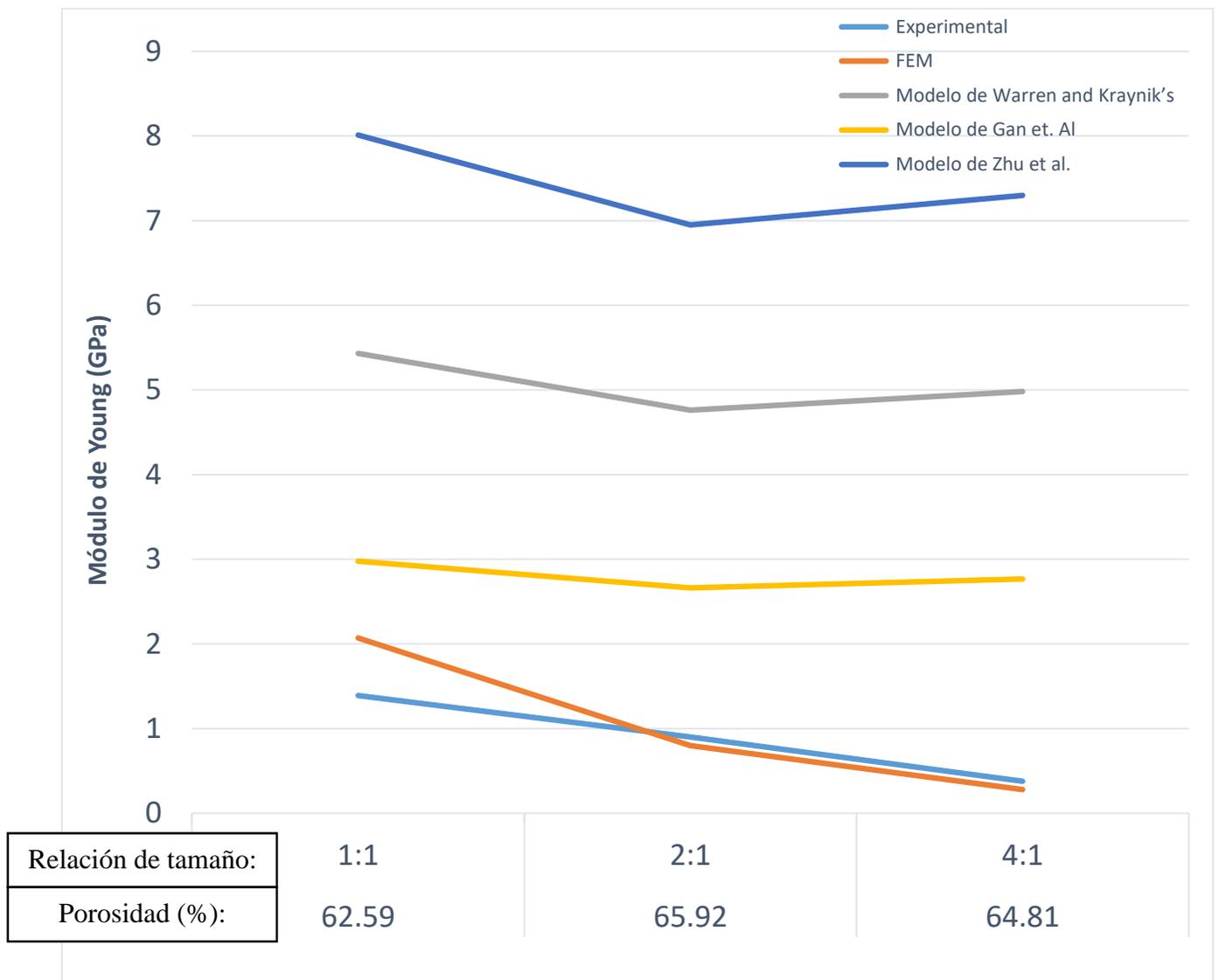


Ilustración 74 Gráfica comparativa de los valores de los Módulos de Young de las espumas fabricadas.

Finalmente en la tabla 11 se puede hacer análisis de todas las características de las espumas. Como se observa, la fractalidad en las partículas de NaCl no tuvo influencia en el resultado final de la porosidad, sin embargo en el espesor de pared sí, y el espesor de pared tiene una afectación directa en el módulo de Young, esto debido a que conforme el grosor de la pared de la celda se disminuye, el esfuerzo requerido para hacer que este se colapse es menor.

Tabla 11 Resultados obtenidos

Relación	Porosidad Real (%)	Porosidad de Modelo MEF (%)	Espesor de pared (mm)	Módulo de Young Experimental (GPa)
1:1	62.59	63.12	2	1.39
2:1	65.92	66.13	1.63	0.9
4:1	64.81	65.84	1.24	0.38

Conclusiones

Después del estudio comparativo de espumas fabricadas con porosidades diferentes, tomando en cuenta las relaciones de tamaño de poro, se llegó a las siguientes conclusiones:

- I. Para lograr un aumento en la porosidad de una espuma, es necesario tener una relación entre tamaños de partícula notable y de igual manera una relación de cantidad considerable, sin embargo para lograr esto se debe encontrar un método adecuado para realizar la mezcla de dichas partículas de manera que se distribuyan homogéneamente.
- II. El dispositivo diseñado y fabricado para realizar el proceso de infiltración funcionó de manera excelente para fabricar espumas metálicas utilizando sal como preforma y la aleación de aluminio 332.
- III. De acuerdo al tipo de aleación que se emplee para la fabricación de una espuma metálica, ésta dictará si en el proceso se requerirá la inyección de gas para llevar a cabo la infiltración o si puede ahorrarse este paso, al ser lo suficientemente fluida como para infiltrar una preforma por gravedad.
- IV. En el procesamiento de fabricación de espumas metálicas por infiltración, seguido de la disolución de las partículas espaciadoras, el tamaño y distribución de los poros dependerá de las partículas espaciadoras utilizadas.
- V. La modificación en las cantidades relativas de partículas de diferentes tamaños originó un incremento pequeño en la porosidad, disminuyendo la densidad de las espumas. No obstante, el cambio más importante fue en la disminución significativa del espesor de pared de la celda.
- VI. El espesor de pared entre las celdas tiene relación directa con el módulo de Young de la espuma, siendo que entre menor sea este espesor, de igual manera será bajo el valor del módulo de Young. Este comportamiento hace que las propiedades mecánicas en compresión de las espumas bajen.
- VII. El método de elementos finitos es un método que logra predecir con buena precisión el comportamiento mecánico de las espumas volviéndose una excelente herramienta antes de llegar a la etapa experimental.

Recomendaciones

- Utilizar una relación de tamaño mayor entre las partículas para alcanzar mayor porosidad, e incluir la mezcla de más de 2 tamaños para estudiar si se logra alcanzar una porosidad mayor.
- Lograr un mejor control en la etapa del mezclado de las partículas para evitar que algunas se fracturen y generen diferentes tamaños cuando la mezcla sea de un solo tamaño.
- Realizar mejoras de diseño en el dispositivo, como la implementación de una tapa inferior para tener un mejor control al finalizar la etapa de infiltración y evitar derrames de material.
- Buscar la colaboración más efectiva con las instituciones educativas y centros de investigación locales para lograr una colaboración más fluida en cuanto a equipos especializados.

Bibliografía

- [1] B. K. Hans-Peter Degischer, *Handbook of Cellular Metals*. Weinheim, FRG: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2002.
- [2] P. Diego and P. Giampiero, “Tourmaline nodules from Capo Bianco aplite (Elba Island, Italy): An example of diffusion limited aggregation growth in a magmatic system,” *Contrib. to Mineral. Petrol.*, vol. 153, no. 5, pp. 493–508, 2007.
- [3] L. Pérez, C. Aguilar, S. Lascano, D. Domancic, and I. Alfonso, “Simplified fractal FEA model for the estimation of the Young’s modulus of Ti foams obtained by powder metallurgy,” *Mater. Des.*, vol. 83, pp. 276–283, 2015.
- [4] [Www.frbb.utn.edu.ar/utec/9/n03.html](http://www.frbb.utn.edu.ar/utec/9/n03.html). Junio, 2016.
- [5] P. A. Moreno and A. S. Pérez, *Método De Los Elementos Finitos: Introducción A Ansys*, 1ª Edición. Universidad de Sevilla, 1999.
- [6] J. L. Nebreda, “Optimización de la estructura celular en espumas de aluminio,” Universidad de Valladolid, 2014.
- [7] Hatch J.E., *Aluminum Properties and Physical Metallurgy*. 1984.
- [8] G. E. Totten and D. S. MacKenzie, “Handbook of Aluminum, volume 1, Physical Metallurgy and Processes,” *Physical Metallurgy and Processes*, vol. 1. pp. 33–37, 2003.
- [9] <https://mipsa.com.mx/dotnetnuke/Sabias-que/Clasificacion-de-aluminio>. Noviembre 2016.
- [10] J. G. Kaufman and E. L. Rooy, *Aluminum Alloy Castings: Properties , Processes , and Applications*. 2004.
- [11] M. Zaman, *Al-Si Cast Alloys - Microstructure and Mechanical Properties at Ambient and Elevated Temperature Al-Si Cast Alloys - Microstructure and Mechanical Properties at Ambient and Elevated Temperature*, no. 7. 2015.
- [12] J. Hirsch, G. Gottstein, and B. Skrotzki, *Aluminium Alloys : Their Physical and Mechanical Properties*. Wiley-VCH Verlag GmbH, 2008.
- [13] J. A. Gutiérrez-Vázquez and J. Oñoro, “Aluminium foams. Manufacture, properties and applications,” *Rev. Metal.*, vol. 44, no. 5, Oct. 2008.
- [14] A. Calle Fernandez, “Estudio del comportamiento mecánico de las espumas pulvimetalúrgicas de aluminio,” Escuela Técnica Superior De Ingenieros De Minas, 2012.
- [15] B. Cárcel González, “Efectos de la estructura celular sobre el comportamiento mecánico de espumas de aluminio de poro cerrado obtenidas por fusión. Aplicación en absorbedores de energía,” Universidad Politécnica de Valencia, 2015.

- [16] J. Jarillo, “Modelización del comportamiento mecánico de una espuma metálica,” Universidad Carlos III de Madrid, 2009.
- [17] I. A. Irausquín Castro, “Caracterización mecánica de espumas metálicas y su aplicación en sistemas de absorción de energía,” Universidad Carlos III de Madrid, 2012.
- [18] I. Torres Vela, “Desarrollo y análisis de un modelo numérico para el estudio de elementos tubulares sometidos al impacto,” Universidad Carlos III de Madrid, 2011.
- [19] O. E. Ochoa de Jesus, “Obtención y propiedades de espumas metálicas base ZINALCO,” Instituto Politecnico Nacional, 2008.
- [20] J. Banhart, “Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams,” *Progress in Materials Science*, vol. 46, no. 6. pp. 559–632, 2001.
- [21] L. J. Gibson and M. F. Ashby, *Cellular Solids, structure and properties*. 1997.
- [22] W. Sir Thoon, “On the division of space with minimum partitional area,” *Acta Math.*, vol. 11, no. 1, pp. 121–134, 1887.
- [23] D. Weaire and R. Phelan, “A Counter example to Kelvin Conjecture on Minimal-Surfaces,” *Philos. Mag. Lett.*, vol. 69, no. 2, pp. 107–110, 1994.
- [24] F. Díaz del Castillo Rodríguez, “Laboratorio de Tecnología de Materiales, Espumas Metálicas,” Cuatitlan, 2009.
- [25] J. Banhart and J. Baumeister, “Production Methods for Metallic Foams,” *MRS Proc.*, vol. 521, p. 121, 1998.
- [26] 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.
- [27] J. H. Cadena *et al.*, “Production of al foams using the SDP method: Processing parameters and introduction of a new sintering device,” *J. Min. Metall. Sect. B Metall.*, vol. 52, no. 1, pp. 47–52, 2016.
- [28] A. Chouhan, “Synthesis and Characterization of Ti-foam Using NaCl as Space Holder,” National Institute of Technology, 2015.
- [29] A. Z. Diaz Mendoza and R. V. Ulloa Figueroa, “Desarrollo de un proceso pulvimetalúrgico para la fabricación de metales porosos base titanio, plata, níquel y aluminio y evaluación de sus propiedades mecánicas.,” Universidad Industrial Santander, 2005.
- [30] “Espumas Metálicas, equilibrio y cinética de sólidos,” Universidad Complutense de Madrid, 2008.
- [31] F. Šimančík, J. Jerz, J. Kováčik, and P. Minár, “Aluminium foam - A new light-weight structural material,” *Kov. Mater.*, vol. 35, no. 4, pp. 265–277, 1997.

- [32] L. J. Gibson, “Mechanical Behavior of Metallic Foams,” *Annu. Rev. Mater. Res.*, vol. 30, no. 1, pp. 191–227, 2000.
- [33] H. X. Zhu, J. F. Knott, and N. J. Mills, “Analysis of the elastic properties of open-cell foams with tetrakaidecahedral cells,” *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 45, no. 3, pp. 319–343, 1997.
- [34] O. D. Molina Ramírez, “Caracterización microestructural y mecánica de espumas metálicas de aluminio fabricadas por un nuevo proceso de infiltración,” Universidad Nacional Autónoma de México, 2015.
- [35] A. Bastawros and A. G. Evans, “Deformation heterogeneity in cellular Al alloys,” *Adv. Eng. Mater.*, vol. 2, no. 4, pp. 210–214, 2000.
- [36] A. E. Markaki and T. W. Clyne, “The effect of cell wall microstructure on the deformation and fracture of aluminium-based foams,” *Acta Mater.*, vol. 49, no. 9, pp. 1677–1686, 2001.
- [37] U. Ramamurty and A. Paul, “Variability in mechanical properties of a metal foam,” *Acta Mater.*, vol. 52, no. 4, pp. 869–876, 2004.
- [38] F. Simancik, H. P. Degischer, and H. Wörz, “Foamed aluminium-Light structural and insulation material,” Milan, Italia, 1995.
- [39] A. F. Giamei, “Symposium on Metal Foams, Fraunhofer EEUU,” 1997, pp. 63–78.
- [40] T. J. Lu and C. Chen, “Thermal transport and fire retardance properties of cellular aluminum alloys,” *Acta Mater.*, vol. 47, no. 5, pp. 1469–1485, 1999.
- [41] P. Sánchez Pérez, “Simulación numérica de la respuesta dinámica a compresión de tubos de aluminio rellenos de espuma metálica,” Universidad Carlos III de Madrid, 2011.
- [42] [Http://espumadealuminiosistemasconstructivos.blogspot.mx/2015_05_01_archive.html](http://espumadealuminiosistemasconstructivos.blogspot.mx/2015_05_01_archive.html), Octubre 2016.
- [43] [Http://www.cymat.com/](http://www.cymat.com/), Febrero 2017.
- [44] [Www.metcomb.com](http://www.metcomb.com), Noviembre 2016.
- [45] L. M. Niebylski and R. J. Fanning, “Metal Foams as Energy Absorbers for Automobile Bumpers,” 1972.
- [46] J. H. Ramírez, “Estimación del comportamiento a la compresión de espumas metálicas con diferentes grados de porosidades,” Universidad Autónoma del Carmen, 2014.
- [47] L. P. Lefebvre, J. Banhart, and D. C. Dunand, “Porous metals and metallic foams: Current status and recent developments,” *Adv. Eng. Mater.*, vol. 10, no. 9, pp. 775–787, 2008.
- [48] [Http://www.ergaerospace.com](http://www.ergaerospace.com), “Erg Materials And Aerospace Corp.” Noviembre 2016.

- [49] M. de L. Mondragón Sánchez, “Curso de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).” Morelia, Michoacán, 2009.
- [50] A. M. Rodríguez, “Simulación mediante el método de los elementos finitos de una estructura metálica,” Universidad Carlos III de Madrid, 2010.
- [51] B. B. Mandelbrot, D. E. Passoja, and A. J. Paullay, “Fractal character of fracture surfaces of metals,” *Nature*, vol. 308, pp. 721–722, 1984.
- [52] J. J. Fontana Cabezas, “El diseño estructural en las formas complejas de la arquitectura reciente,” Universidad de Alicante, 2012.
- [53] J. Martínez Aroza, “Arte Fractal I,” *Revista digital de publicación matemática*, Granada, Dec-2005.
- [54] “<http://firstrays.com/free-information/potting-mounting-displaying/particle-packing/>.” Agosto 2017.
- [55] R. Njoku and A. Kennedy, “Effects of sintering temperature on the density and porosity of sodium chloride preforms for open celled aluminium foam manufacturing,” *Niger. J. Technol.*, vol. 32, no. 1, pp. 117–122, 2013.
- [56] Y. X. Gan, C. Chen, and Y. P. Shen, “Three-dimensional modeling of the mechanical property of linearly elastic open cell foams,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 42, no. 26, pp. 6628–6642, 2005.
- [57] J. H. Cadena, I. Alfonso, J. H. Ramírez, V. Rodríguez-Iglesias, I. A. Figueroa, and C. Aguilar, “Improvement of FEA estimations for compression behavior of Mg foams based on experimental observations,” *Comput. Mater. Sci.*, vol. 91, pp. 359–363, 2014.
- [58] W. E. Warren and A. M. Kraynik, “The linear elastic properties of open-cell foams,” *J. Appl. Mech.*, vol. 55, no. 2, pp. 341–346, 1988.
- [59] M. Göğebakan and B. Avar, “Structural evolutions of the mechanically alloyed Al70Cu20Fe10 powders,” *Pramana*, vol. 77, no. 4, pp. 735–747, Oct. 2011.
- [60] E. Andrews, W. Sanders, and L. J. Gibson, “Compressive and tensile behaviour of aluminum foams,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 270, no. 2, pp. 113–124, 1999.
- [61] C. S. Chang, J. Y. Wang, and L. Ge, “Modeling of minimum void ratio for sand-silt mixtures,” *Eng. Geol.*, vol. 196, pp. 293–304, 2015.
- [62] R. Groot and S. Stoyanov, “Close packing density and fracture strength of adsorbed polydisperse particle layers,” *Soft Matter*, vol. 7, no. 10, p. 4750, 2011.