



# **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

POSGRADO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES

## **"Obtención, caracterización y modelado de espumas de aluminio reforzadas, fabricadas mediante infiltración"**

PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
**Doctor en Ciencia e Ingeniería de Materiales**

PRESENTA:  
**M. C. Juan Carlos Carranza García**

**TUTOR PRINCIPAL:**

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

**MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:**

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

**Dr. José Reyes Gasga**  
Instituto de Física-UNAM

**Morelia, Michoacán, septiembre del 2023.**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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 Humanidades, Ciencias y Tecnología, por la beca que me otorgó durante mis estudios de doctorado.

Agradezco el apoyo financiero de los proyectos de la UNAM PAPIIT IN117316 "Obtención mediante procesamiento en estado sólido de espumas de aleaciones de aluminio para aplicaciones automotrices", y PAPIIT IN102322 "Efecto de la combinación porosidad-reforzante sobre las propiedades mecánicas de espumas metálicas compuestas".

Al Dr. Ismeli Alfonso López por su orientación, apoyo y amistad durante todos estos años de estudios de posgrado.

Al Dr. Ignacio Figueroa Vargas y el Dr. José Reyes Gasga 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 y análisis de imágenes en Microscopio Electrónico de Barrido, así como por su amistad y disponibilidad para enseñarme las técnicas de análisis.

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, 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 mi novia, esposa y amiga Cristian Mitchell Trejo Hurtado por su cariño, compañía y ánimos durante todo este tiempo... mi motor.

A toda mi familia.

## Resumen

Las espumas metálicas, y en concreto las de aluminio, son un tipo de material que ha despertado un gran interés en los últimos años por su excelente combinación de características. 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, fácilmente fundible y mecanizable, excelente conductor eléctrico y térmico, magnéticamente neutro, resistente al fuego, reciclable, etc.

Desde mediados del siglo pasado existe un marcado interés de la comunidad científica y técnica en la búsqueda, caracterización y validación de materiales compuestos (composites), que globalmente deben poseer propiedades superiores a las de los materiales constituyentes por separado: la matriz y los materiales de refuerzo. Entre estos materiales compuestos se destacan los de matriz metálica MMCs (Metal Matrix Composites) y muy particularmente los composites de matriz de aluminio AMCs (Aluminum Matrix Composites), lo cual se debe, por una parte, a sus excelentes propiedades mecánicas y tribológicas, y por otra, a que el aluminio es un metal ligero. De esta forma, con él pueden obtenerse composites apreciablemente livianos, pero que al mismo tiempo soportan cargas y esfuerzos relativamente altos.

Debido a estas importantes características y al amplio rango de aplicaciones que pueden tener ambos materiales, en esta investigación se propone mejorar la resistencia mecánica de espumas de aluminio reforzando la matriz con esferas de alúmina e hidróxido de aluminio, con la finalidad de al mismo tiempo analizar la eficacia de estos reforzantes. Para llevar esto a cabo, se realizó una búsqueda bibliográfica sobre las espumas metálicas en general, sus aplicaciones y procesos de fabricación. Se profundizó en sus características, clasificaciones y el análisis del efecto de la porosidad sobre sus propiedades mecánicas, y el efecto sobre las propiedades mecánicas de reforzar estos materiales. También se estudió a fondo y se hizo uso del modelado y simulación mediante el Método de los Elementos Finitos para predecir las propiedades de las espumas compuestas, y validar los modelos comparando resultados experimentales con simulaciones. Se fabricaron espumas metálicas por el método de infiltración adicionando diferentes cantidades de reforzantes y espaciadores (space holders -

SH), siendo usadas partículas de NaCl debido a su temperatura de fusión superior al aluminio y su fácil eliminación posterior por disolución en agua. Estas relaciones fueron 80% NaCl-20% refuerzo, 65% NaCl-35% refuerzo y 50% NaCl-50% refuerzo. Los resultados mostraron que fue posible obtener espumas de Al reforzadas sin defectos, con porosidades interconectadas, y diferentes propiedades mecánicas. Estas propiedades dependieron de la relación entre el porcentaje de porosidad y de reforzantes, así como de la presencia de interfaces entre el reforzante y la matriz de Al. Los valores de módulo de Young para las espumas con alúmina como refuerzo fueron de 0.58, 0.59 y 0.77 GPa mientras que para el hidróxido de aluminio los valores fueron mayores, de 0.60, 0.93 y 1.53 GPa para las relaciones 80% NaCl-20% refuerzo, 65% NaCl-35% refuerzo y 50% NaCl-50% refuerzo, respectivamente. Las curvas de compresión de estos materiales también mostraron resultados similares, con un mejor comportamiento para el caso del reforzamiento con el hidróxido. Estos resultados se atribuyen a la existencia de una interface creada en el caso del hidróxido de aluminio, permitiendo una fuerte unión matriz-reforzante. La ausencia de esta interface cuando se utilizó la alúmina como reforzante provocó falta de unión y fallo catastrófico de la espuma para valores menores de deformación. Estas espumas se pudieron modelar exitosamente utilizando el MEF, incluyendo la presencia o ausencia de las interfaces. Esto llevó a simulaciones con valores cercanos a los obtenidos experimentalmente: 1.07, 1.08 y 1.31 GPa para el caso de la alúmina y 1.10, 1.34 y 1.53 GPa para el hidróxido de aluminio, demostrando la validez de los modelos.

# Índice

<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>Objetivos</b> .....	<b>3</b>
Objetivo General .....	3
Objetivos específicos.....	3
<b>Hipótesis</b> .....	<b>4</b>
<b>Justificación</b> .....	<b>5</b>
<b>Capítulo I</b> .....	<b>6</b>
<b>1. Marco Teórico</b> .....	<b>7</b>
1.1. Aluminio .....	7
1.1.1. Clasificación y sus aleaciones .....	7
1.1.2. Aleaciones AlSiCu.....	9
1.2. Espumas, esponjas y materiales celulares .....	10
1.3. Espumas metálicas .....	14
1.3.1. Antecedentes históricos de las espumas metálicas .....	17
1.3.1.1. Densidad relativa de las espumas .....	18
1.3.2. Formación y estabilización de espumas metálicas .....	18
1.3.3. Antecedentes de técnicas de fabricación .....	19
1.3.3.1. Espumas de primera generación (1925-1970) .....	19
1.3.3.2. Espumas de segunda generación (1990-2015).....	20
1.3.3.3. Espumas Metálicas Compuestas .....	21
1.4. Materiales compuestos .....	23
1.4.1. Propiedades de los materiales compuestos .....	25
1.4.1.1. Propiedades mecánicas de materiales compuestos .....	26
1.4.1.1.1. Módulo de elasticidad .....	26
1.4.1.1.2. Límite elástico .....	27

1.4.1.1.3.	Endurecimiento .....	27
1.4.1.1.4.	Resistencia a la tracción .....	28
1.4.1.1.5.	Fractura .....	28
1.4.2.	Materiales compuestos reforzados con partículas .....	28
1.4.3.	Materiales compuestos de matriz metálica (MMCs) .....	29
1.4.3.1.	Antecedentes históricos de los MMCs.....	29
1.4.4.	Materiales compuestos de matriz de aluminio (AMCs) .....	31
1.4.4.1.	Métodos de fabricación de materiales compuestos de matriz de aluminio .....	32
1.4.4.1.1.	Método de infiltración.....	34
1.4.5.	Materiales compuestos con matriz de aluminio con refuerzo cerámico .....	36
1.4.5.1.	Efecto de los refuerzos cerámicos sobre el comportamiento de la matriz de aluminio.....	37
1.4.6.	Materiales reforzantes usados para la fabricación de espumas metálicas con matriz metálica .....	38
1.4.6.1.	Alúmina ( $Al_2O_3$ ) .....	39
1.4.6.2.	Hidróxido de aluminio ( $Al(OH)_3$ ).....	40
1.4.7.	Partículas espaciadoras (Space Holders) .....	41
1.4.7.1.	Cloruro de sodio (NaCl) .....	42
1.4.8.	Mojabilidad matriz/reforzante .....	42
1.5.	Propiedades de las espumas metálicas convencionales y compuestas....	44
1.5.1.	Propiedades mecánicas .....	44
1.5.1.1.	Módulo de elasticidad.....	46
1.5.1.1.1.	Respuesta tensión-deformación bajo cargas de compresión	47
1.5.2.	Propiedades físicas.....	49

1.5.2.1.	Densidad .....	49
1.5.2.2.	Absorción del sonido .....	49
1.6.	Aplicaciones de las espumas metálicas .....	50
1.6.1.	Aplicaciones estructurales .....	52
1.6.2.	Industria automotriz.....	52
1.6.3.	Industria aeroespacial .....	53
1.6.4.	Industria naval .....	54
1.6.5.	Industria ferroviaria .....	55
1.6.6.	Absorción de vibraciones mecánicas.....	55
1.6.7.	Biomateriales .....	55
1.7.	Técnicas de análisis y caracterización de espumas metálicas .....	56
1.7.1.	Caracterización estructural .....	56
1.7.2.	Determinación de la densidad.....	56
1.7.3.	Microscopía óptica y electrónica de barrido.....	57
1.7.4.	Prueba de compresión uniaxial.....	58
1.8.	Métodos de elementos finitos (MEF).....	58
1.8.1.	Hipótesis de discretización .....	59
1.8.2.	Software de simulación ANSYS 18.1 .....	62
1.8.3.	Uso de MEF para análisis de propiedades mecánicas de espumas y materiales compuestos.....	63
<b>Capítulo II</b>	.....	<b>65</b>
<b>2.</b>	<b>Procedimiento experimental.....</b>	<b>67</b>
2.1.	Materiales usados .....	67
2.1.1.	Partículas espaciadoras .....	67
2.1.2.	Partículas reforzantes.....	69

2.2.	Dispositivo para infiltración.....	70
2.3.	Fabricación de las espumas.....	73
2.4.	Caracterización.....	77
2.4.1.	Caracterización metalográfica .....	77
2.4.1.1.	Microscopio óptico .....	77
2.4.1.2.	Microscopio electrónico de barrido .....	77
2.4.1.3.	Difracción de Rayos-X (DRX) .....	78
2.4.2.	Caracterización mecánica .....	78
2.4.3.	Medición de densidad.....	78
2.5.	Modelado y simulación.....	79
2.5.1.	Modelos de espumas.....	79
2.5.1.1.	Generación de modelos de espumas compuestas en Digimat.....	80
2.5.1.2.	Extracción de espumas cilíndricas en SolidWorks .....	85
2.5.1.3.	Modelo final de las espumas en ANSYS 18.1 .....	86
2.5.2.	Simulación de comportamiento compresivo elástico .....	87
2.5.2.1.	Condiciones de contorno .....	88
2.5.2.2.	Mallado .....	93
2.5.3.	Modelos matemáticos comparativos.....	94
Capítulo III.....		95
<b>3.</b>	<b>Resultados y discusión.....</b>	<b>96</b>
3.1.	Caracterización microscópica de la aleación .....	96
3.1.1.	Análisis por difracción de rayos X (DRX) .....	106
3.2.	Caracterización óptica de las espumas obtenidas.....	107
3.2.1.	Espumas con relación 50% NaCl-50% refuerzo .....	107
3.2.2.	Espumas con relación 65% NaCl-35% refuerzo .....	108

3.2.3.	Espumas con relación 80% NaCl-20% refuerzo .....	110
3.3.	Estudio de la interface creada entre el material reforzante y la matriz .	111
3.3.1.	Espumas con relación 50% NaCl-50% Refuerzo .....	111
3.3.2.	Análisis mediante EDS de la interface .....	118
3.3.3.	Espumas con relación 65% NaCl-35% Refuerzo .....	119
3.3.4.	Espumas con relación 80% NaCl-20% Refuerzo .....	126
3.4.	Análisis de la interface .....	132
3.5.	Comparación física de las espumas.....	135
3.6.	Caracterización mecánica de las espumas obtenidas .....	137
3.7.	Modelos y simulación .....	139
3.7.1.	Espumas con relación 50% NaCl-50% refuerzo .....	140
3.7.2.	Espumas con relación 65% NaCl-35% refuerzo .....	141
3.7.3.	Espumas con relación 80% NaCl-20% refuerzo .....	142
3.8.	Comparación de resultados experimentales, simulaciones computacionales y modelos teóricos .....	143
<b>Capítulo IV</b>	.....	<b>149</b>
<b>Conclusiones</b>	.....	<b>150</b>
<b>Recomendaciones</b>	.....	<b>152</b>
<b>Bibliografía</b>	.....	<b>153</b>
<b>Publicaciones derivadas del presente trabajo de tesis:</b>	.....	<b>166</b>

## Índice de Figuras

Figura 1 Clasificación de las aleaciones de aluminio de acuerdo con sus elementos de aleación y tratamientos post-fabricación. [12].....	9
Figura 2 Ejemplos de materiales celulares que difieren en el elemento que constituye la matriz sólida. a) Polietileno, b) Aluminio, c) Cerámica, d) Madera, e) Hueso y f) Pan. [15] .....	11
Figura 3 Diferencia entre material poroso y un sólido celular. [18].....	12
Figura 4 Estructura tridimensional donde la espuma es usada como núcleo. [19].....	13
Figura 5 Diferentes tipos de estructura en espumas de aluminio. A) Porosidad cerrada, B) Porosidad mixta y C) Porosidad abierta. [21].....	13
Figura 6 Tipos de materiales de dos fases, una dispersa en la otra, en función del estado en que se encuentre cada una de ellas. [15] .....	14
Figura 7 Clasificación de métodos de producción de espumas metálicas. Adaptado de (Banhart 2001). [20] .....	21
Figura 8 Clasificación de los materiales compuestos de acuerdo con el tipo de reforzante. [33] .....	23
Figura 9 A- reforzante y matriz en un material compuesto, B- Diferentes tipos de materiales reforzantes. [34].....	24
Figura 10 Gráfico de las propiedades obtenidas en la curva esfuerzo deformación de la combinación de dos materiales diferentes al formar un compuesto. [31].....	25
Figura 11 Proceso de infiltración con espaciadores de NaCl. [44].....	36
Figura 12 Ángulo de contacto entre una gota de líquido y un sustrato sólido. [47] .....	43
Figura 13 Curvas esfuerzo deformación de distintos comportamientos de un sólido celular. [71] .....	48
Figura 14 Aplicaciones de metales celulares agrupadas de acuerdo con el grado de apertura requerido y al tipo de aplicación, funcional o estructural. [73] .....	51
Figura 15 Cafetería Baluarte en Pamplona, España, con paneles de espumas metálicas. [77] .....	52

Figura 16 Principales aplicaciones automotrices en el ámbito estructural de las espumas metálicas. [78].....	53
Figura 17 Compuestos aplicados en el fuselaje de un Dreamliner 787. [79] .....	54
Figura 18 Modelos obtenido por MEF a partir de un elemento representativo del volumen de la espuma metálica convencional (izquierda), de un material compuesto reforzado por fibras cortas (centro), y para una espuma compuesta reforzada con partículas (derecha). [87], [88].....	64
Figura 19 A) Micrografía obtenida mediante SEM de una partícula de NaCl. B) Análisis de imagen para tamaño de partícula e histograma de frecuencias de tamaños de partículas de NaCl. ....	68
Figura 20 A) Esferas de alúmina (izquierda) y de hidróxido de aluminio (derecha). B) histogramas de frecuencias de tamaños de esferas de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (abajo izquierda), y de Al(OH) <sub>3</sub> (abajo derecha). ....	69
Figura 21 Arreglo hipotético del acomodo de las partículas dentro del compuesto.....	70
Figura 22 Diseño de dispositivo usado para el proceso de infiltración. A) Modelo y B) dispositivo real fabricado.....	71
Figura 23 Arreglo del dispositivo dentro del horno. Se observa el aditamento para la inyección de gas y así forzar la infiltración. A) Modelo, y B) arreglo experimental real.	72
Figura 24 Modificación realizada al dispositivo de fabricación de las espumas: A) partes, B) ensamblado. ....	73
Figura 25 Espumas con defectos debidos a las condiciones de procesamiento.....	75
Figura 26 Propiedades mecánicas usadas para la generación de los modelos en Digimat. . .....	82
Figura 27 Configuración del comportamiento que tendrá cada componente del modelo dentro de la geometría.....	84
Figura 28 Configuración del RVE. ....	84

Figura 29 Modelado de espumas compuestas usando Digimat. De izquierda a derecha: Espuma con A) 50% NaCl-50% Refuerzo, B) 65% NaCl -35% Refuerzo y C) 80% NaCl -20% Refuerzo. ....	85
Figura 30 Obtención de la probeta cilíndrica a partir del cubo generado en Digimat. ....	86
Figura 31 Modelos finales de las espumas generadas en ANSYS 18.1. Espuma con A) 50% NaCl-50% Refuerzo, B) 65% NaCl -35% Refuerzo y C) 80% NaCl -20% Refuerzo. ....	87
Figura 32 Soporte fijo aplicado a la cara inferior. ....	88
Figura 33 Condición de desplazamiento remoto. ....	89
Figura 34 Presión aplicada en la cara superior de la espuma. ....	90
Figura 35 Solución seleccionada para la obtención de los resultados. ....	91
Figura 36 Elemento Solid187. ....	92
Figura 37 Ventana de módulo estructural del software ANSYS 18.1 WORKBENCH. .	93
Figura 38 Parámetros de mallado usados.....	93
Figura 39 Micrografías de la aleación 332 obtenidas mediante SEM (izquierda) y MO (derecha). ....	96
Figura 40 Micrografía de la aleación de Al donde se muestran las fases ricas en Cu, a 500x. ....	97
Figura 41 Micrografía de la aleación de Al, donde se muestra la fase Al-Si-Fe-Mn. ....	97
Figura 42 EDS de la aleación realizado en SEM. ....	98
Figura 43 Mapeo químico elemental por EDS de la aleación de aluminio en estado de colada. ....	100
Figura 44 Mapeo químico elemental por EDS para conocer su distribución elemental.....	103
Figura 45 Mapeo químico elemental por EDS de la fase cuaternaria AlSiFeMn.....	105
Figura 46 Difractograma de la aleación base.....	106

Figura 47 Espuma fabricada con una relación 50% NaCl - 50% Al(OH) <sub>3</sub> (izquierda); y espuma fabricada con una relación 50% NaCl - 50% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (derecha).....	107
Figura 48 Ubicación de las partículas reforzantes dentro de la matriz metálica, hidróxido de aluminio (izquierda), alúmina (derecha).....	108
Figura 49 Espuma fabricada con una relación 65% NaCl - 35% Al(OH) <sub>3</sub> (izquierda). Espuma fabricada con una relación 65% NaCl - 35% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (derecha).....	109
Figura 50 Ubicación de las partículas reforzantes dentro de la matriz metálica. Hidróxido de aluminio (izquierda), alúmina (derecha).....	109
Figura 51 Espuma fabricada con una relación 80% NaCl - 20% Al(OH) <sub>3</sub> (izquierda). Espuma fabricada con una relación 80% NaCl - 20% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (derecha).....	110
Figura 52 Ubicación de las partículas reforzantes dentro de la matriz metálica. Hidróxido de aluminio (izquierda), alúmina (derecha).....	111
Figura 53 Mapeo químico elemental por EDS de la espuma 50% NaCl - 50% Al(OH) <sub>3</sub> ... ..	113
Figura 54 Mapeo químico elemental por EDS de la espuma 50% NaCl - 50% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .	115
Figura 55 Linescan obtenido por EDS sobre la espuma 50% NaCl - 50% Al(OH) <sub>3</sub> , zona de interface entre refuerzo y matriz. ....	116
Figura 56 Linescan obtenido por EDS sobre la espuma 50% NaCl - 50% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , zona de interface entre refuerzo y matriz. ....	117
Figura 57 Imagen obtenida mediante SEM, y EDS realizados a la zona de interface en los puntos 1 y 2.....	119
Figura 58 Mapeo químico elemental por EDS de la espuma 65% NaCl - 35% Al(OH) <sub>3</sub> ... ..	121
Figura 59 Mapeo químico elemental por EDS de la espuma 65% NaCl - 35% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .	123
Figura 60 Linescan obtenido por EDS sobre la espuma 65% NaCl - 35% Al(OH) <sub>3</sub> , zona de interface entre refuerzo y matriz. ....	124
Figura 61 Linescan obtenido por EDS sobre la espuma 65% NaCl - 35% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , zona de interface entre refuerzo y matriz. ....	125

Figura 62 Mapeo químico elemental por EDS de la espuma 80% NaCl - 20% Al(OH) <sub>3</sub> ...	127
Figura 63 Mapeo químico elemental por EDS de la espuma 80% NaCl - 20% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .	129
Figura 64 Linescan obtenido por EDS sobre la espuma 80% NaCl - 20% Al(OH) <sub>3</sub> , zona de interface entre refuerzo y matriz. ....	130
Figura 65 Linescan obtenido por EDS sobre la espuma 80% NaCl - 20% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , zona de interface entre refuerzo y matriz. ....	131
Figura 66 Estructura cristalina de la $\alpha$ -alúmina. [101] .....	132
Figura 67 Estructura cristalina del Al(OH) <sub>3</sub> . [102] .....	133
Figura 68 DRX realizados a la espuma reforzada con Al(OH) <sub>3</sub> , donde se muestra la presencia de picos de SiO <sub>2</sub> (flechas) en la interface.....	134
Figura 69 Comparación entre espumas: A y B: 50% NaCl – 50% refuerzo, C y D: 65% NaCl – 35% refuerzo y E y F: 80% NaCl – 20% refuerzo, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (derecha) y Al(OH) <sub>3</sub> (izquierda) respectivamente. ....	136
Figura 70 Curvas esfuerzo - deformación de las espumas fabricadas usando Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> como reforzante. ....	138
Figura 71 Curvas esfuerzo - deformación de las espumas fabricadas usando Al(OH) <sub>3</sub> como reforzante. ....	138
Figura 72 Modelo de espumas con relación 50% NaCl - 50% refuerzo, su mallado y la respuesta al esfuerzo de compresión.....	140
Figura 73 Modelo de espumas con relación 65% NaCl - 35% refuerzo, su mallado y la respuesta al esfuerzo de compresión.....	141
Figura 74 Modelo de espumas con relación 80% NaCl - 20% refuerzo, su mallado y la respuesta al esfuerzo de compresión.....	142
Figura 75 Gráfico de comparación entre los diferentes valores de porosidad obtenidos. ...	143
Figura 76 Valores de densidad obtenidos. ....	144
Figura 77 Módulo de Young de modelos matemáticos, simulados y experimentales...	145

Figura 78 Modelación de interfaces con mallado A) coherente y B) incoherente.....	146
Figura 79 Grafico de porosidad (eje y de la izquierda) vs módulo de Young (GPa) vs espesor de pared de celda (mm) (eje y de la derecha). .....	146
Figura 80 Comparativa de propiedades mecánicas de las espumas fabricadas en este trabajo y espumas de otros autores. [105].....	147

## Índice de Tablas

Tabla 1 Clasificación de las aleaciones de aluminio para fundición. [12].....	8
Tabla 2 Principales elementos utilizados en la discretización en ANSYS 18.1. [87] .....	61
Tabla 3 Composición química de la aleación 332 usada, en % en peso. [89] .....	67
Tabla 4 Ensayos realizados para encontrar los parámetros de fabricación de las espumas y los resultados que arrojaron. ....	74
Tabla 5 Parámetros para la creación de los modelos en Digimat. ....	81
Tabla 6 Presión aplicada a los modelos de acuerdo con su área efectiva. ....	90
Tabla 7 Cantidad de nodos y elementos usados para los modelos. ....	91
Tabla 8 Composición química de la aleación, obtenida por EDS.....	98
Tabla 9 Principales características físicas de las espumas fabricadas. ....	137
Tabla 10 Comparación de propiedades mecánicas entre las espumas fabricadas. ....	139
Tabla 11 Comparativa de resistencia a la cedencia de las espumas fabricadas en este trabajo y espumas de otros autores. ....	148

## Introducción

El desarrollo de compuestos de matriz metálica y materiales porosos es de gran importancia en el progreso para la aplicación de metales y aleaciones. La creación de nuevos materiales ligeros se ha vuelto de gran importancia durante la última década, de hecho, siendo extremadamente deseables para varias aplicaciones estructurales y funcionales en múltiples ramas de la industria. [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 [2]. Sin embargo, los materiales porosos naturales 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, destacándose las espumas metálicas, que son estables a temperaturas elevadas, poseen resistencia al fuego, y son completamente reciclables. Además, presentan elevada resistencia comparadas con las espumas poliméricas. Por tal motivo es de vital importancia el estudio de la porosidad en estos materiales, así como la estimación de sus propiedades mecánicas. 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. Si la parte sólida o matriz de estos materiales porosos se refuerza con materiales cerámicos duros, de elevada rigidez y módulo elástico, es posible preservar la baja densidad aumentando la resistencia. Estos materiales, conocidos como Espumas metálicas compuestas (Composite Metal Foams por sus siglas en inglés, CMF), pueden ampliar las aplicaciones tanto de los materiales porosos como de los compuestos de matriz metálica (MMC).

Dentro de este ramo de los materiales compuestos, sobresalen los de matriz de aluminio (AMCs), ya que presentan ventajas debido a su baja densidad con elevada resistencia [3]. La búsqueda de opciones económicas en el desarrollo de estos materiales fue un problema de interés científico-técnico en el pasado [4], [5] y lo es en la actualidad [6], [7]. Por esto se opta por buscar materiales de refuerzo que puedan aportar buenas características y que a su vez no eleven los costos de producción, de modo que sea viable la fabricación del compuesto.

Este tipo de compuestos han sido estudiados ampliamente por sus propiedades bajo compresión en la literatura reciente, utilizándose principalmente partículas de alúmina y SiC en diversas aleaciones de aluminio, incluyendo A356, 6061 y 7075. A la combinación de una espuma metálica en la que los poros están ocupados por gas y un material reforzante se conoce como espuma de aluminio compuesta, las cuales poseen una mayor resistencia y rigidez comparadas con las espumas convencionales, con valores similares de densidad. [8]

Entre los principales métodos de fabricación de las espumas metálicas están los procesos de infiltración, sinterizado de polvos 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. Los materiales compuestos pueden fabricarse utilizando procesos similares, sobresaliendo la infiltración. Existen varios métodos para predecir las propiedades de estos materiales antes de su fabricación de las espumas, entre los cuales se destaca el Método de Elementos Finitos (MEF). 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 [9]. Para el análisis mediante el Método de Elementos Finitos existe una variedad de programas computacionales, pero cabe destacar la versatilidad para el estudio y modelación de estructuras el uso de ANSYS 18.1. 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 [10].

Tomando en cuenta lo anterior, la presente investigación se enfocará en la obtención de espumas de aluminio compuestas, utilizando diferentes relaciones entre las partículas espaciadoras y las reforzantes, que resulten en diferentes porosidades, densidades y propiedades mecánicas. Se modificará el reforzante con la finalidad de analizar la unión entre estos y la matriz de Al. Dentro del trabajo de investigación también se persigue utilizar el MEF para el modelado de los materiales, y la simulación de su comportamiento a la compresión.

# Objetivos

## Objetivo General

Obtener espumas de aluminio compuestas con elevada porosidad, conteniendo esferas de alúmina o hidróxido de aluminio dentro de la matriz metálica que sirvan como material de refuerzo, permitiendo un aumento en la resistencia mecánica de dichas espumas preservando bajas densidades.

## Objetivos específicos

1. Analizar los diferentes procesos de obtención de espumas metálicas y materiales compuestos, sus particularidades y propiedades resultantes.
2. Fabricar mediante infiltración espumas metálicas compuestas de Al utilizando materiales reforzantes y espaciadores sólidos.
3. Caracterizar las espumas reforzadas obtenidas.
4. Analizar el efecto de la inclusión de partículas reforzantes sobre la porosidad y su distribución.
5. Analizar la interface matriz-reforzante.
6. Analizar el efecto de la combinación porosidad-reforzante sobre las propiedades de las espumas obtenidas.
7. Modelar mediante el método de elementos finitos espumas metálicas compuestas.
8. Simular el comportamiento de las espumas metálicas aplicando fuerzas de compresión externas.
9. Comparar los resultados experimentales con los estimados mediante elementos finitos.

## **Hipótesis**

La incorporación de esferas de alúmina o hidróxido de aluminio como material de refuerzo en espumas metálicas de aluminio mejora significativamente las propiedades mecánicas de las espumas compuestas resultantes, incluyendo la resistencia a la compresión y la rigidez. Estas espumas compuestas son más resistentes que las espumas metálicas de aluminio sin refuerzo.

Los modelos matemáticos y las simulaciones por medio del MEF predicen de manera efectiva las propiedades mecánicas de las espumas metálicas de aluminio reforzadas, lo que permite una mayor comprensión y optimización del diseño de estos materiales

## **Justificación**

El desarrollo de investigación y un trabajo de tesis sobre espumas metálicas de aluminio con refuerzo de esferas de alúmina e hidróxido de aluminio se debe a la necesidad existente de desarrollar materiales compuestos que ofrezcan una mayor resistencia, sin aumentar significativamente su peso. Estos materiales tienen propiedades únicas que los hacen ideales para su uso en diferentes aplicaciones, tales como la industria aeroespacial, automotriz, construcción y de dispositivos médicos.

Además, la investigación sobre espumas metálicas de aluminio compuestas es un campo en constante evolución, y aún hay mucho que aprender sobre sus propiedades y aplicaciones. Por lo tanto, el presente trabajo podría ayudar a avanzar en la comprensión de estos materiales y proporcionar nuevas ideas y descubrimientos que puedan ser útiles para futuros desarrollos.

Otra razón para profundizar en este campo es su importancia ambiental ya que estos materiales son reciclables y tienen una larga vida útil, lo que puede contribuir a la sostenibilidad ambiental. Además, al utilizar materiales más resistentes y duraderos, se pueden reducir los costos y los impactos ambientales asociados con la producción, el transporte y la eliminación de los materiales utilizados en la construcción y fabricación de productos.

En resumen, el desarrollo de este proyecto puede justificarse por su potencial aplicación en diferentes campos, la importancia de la investigación en un campo en desarrollo, su relevancia ambiental y la necesidad de desarrollar nuevos materiales compuestos que sean más resistentes, duraderos y sostenibles.

# Capítulo I

# **1. Marco Teórico**

## **1.1. Aluminio**

El aluminio es un metal con excelentes características, resistente, durable, flexible, ligero, resistente a la corrosión y reciclable. Es el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre y representa cerca del 7.3% en masa de ésta. Existe en la naturaleza en diversas combinaciones muy estables con otros elementos, especialmente formando silicatos y óxidos. Se ha convertido en el segundo metal más utilizado después del hierro. El aluminio es un material extraordinariamente versátil debido a la gama de formas que puede tomar en función del proceso de manufactura utilizado, ya sea por fundición, forja, laminación, extrusión o pulvimetalurgia, entre otros. Además de la variedad de acabados superficiales disponibles, como son los diferentes recubrimientos, entre ellos los diversos tipos de anodizado y pulido. La resistencia que presenta, combinada con su baja densidad, lo hacen un material ideal para aplicaciones como transporte aéreo, marítimo o terrestre, y en el envasado de diferentes productos, principalmente alimentos y bebidas. [11]

### **1.1.1. Clasificación y sus aleaciones**

Entre las características más llamativas del aluminio está su versatilidad. La gama de propiedades físicas y mecánicas que se pueden desarrollar, desde aluminio refinado de alta pureza hasta las aleaciones más complejas, es notable. Se reconocen comúnmente más de trescientas composiciones de sus aleaciones. Estas se clasifican de diversas maneras según su composición y propiedades. La clasificación más utilizada es su diferenciación en aleaciones para forja, y aleaciones para fundición, siendo estas últimas en las que nos enfocaremos. Estas aleaciones son de gran importancia ya que gracias a su composición química poseen propiedades que les permiten ser aptas para una gran variedad de aplicaciones.

Se clasifican de acuerdo con el o los elementos principales de aleación, como puede apreciarse en la Tabla 1, donde se utilizan 3 dígitos, seguidos de un punto.

Tabla 1 Clasificación de las aleaciones de aluminio para fundición. [12]

Serie	Designación	Aleante principal
100.0	1xx.x	99% al menos de aluminio
200.0	2xx.x	Cobre (Cu)
300.0	3xx.x	Silicio (Si) con cobre (Cu) o Magnesio (Mg)
400.0	4xx.x	Silicio (Si)
500.0	5xx.x	Magnesio (Mg)
600.0	6xx.x	Serie poco usual
700.0	7xx.x	Zinc (Zn)
800.0	8xx.x	Estaño (Sn)

Algunas de estas aleaciones son:

- Aluminio-Silicio: la aleación de aluminio-silicio más comúnmente utilizada para fundición es la serie 380, que contiene entre el 8 y el 10% de silicio. Esta aleación es fácil de fundir, tiene buena fluidez y produce piezas con alta resistencia mecánica.
- Aluminio-Cobre: la serie 200 es una aleación de aluminio-cobre que tiene una alta resistencia mecánica, buena resistencia a la corrosión y una excelente estabilidad dimensional.
- Aluminio-Magnesio: la serie 500 es una aleación de aluminio-magnesio que tiene una excelente resistencia a la corrosión y una alta resistencia mecánica, lo que la hace ideal para aplicaciones en la industria automotriz.
- Aluminio-Silicio-Magnesio: la serie 600 es una aleación de aluminio-silicio-magnesio que tiene una excelente resistencia a la corrosión y una alta resistencia mecánica, lo que la hace ideal para aplicaciones en la industria de la construcción y en equipos marinos. [12]

De manera general, las clasificaciones de las aleaciones de aluminio de acuerdo con sus elementos aleantes y sus procesamientos post-fabricación, se resumen en la Figura 1. Se puede apreciar que a varias de estas aleaciones se le realizan tratamientos térmicos para aumentar sus propiedades mecánicas, mientras que otras son endurecidas por trabajado. Las

aleaciones con alto contenido de Si facilitan su fundición por la fluidez que imparte este elemento químico a las aleaciones.

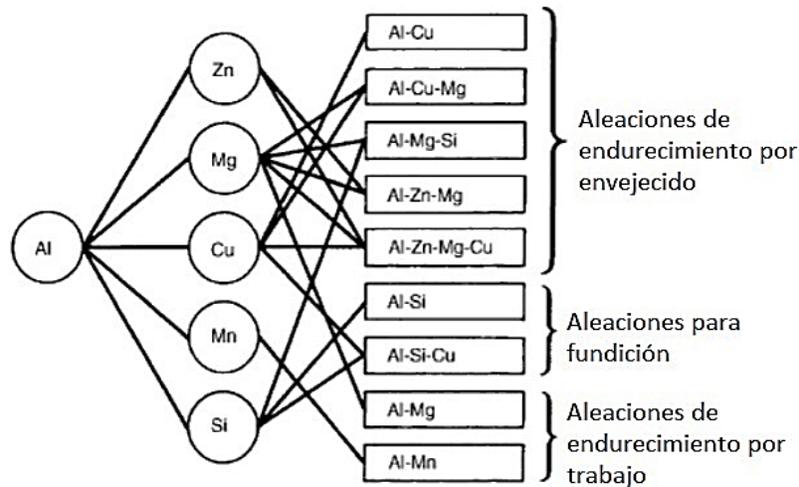


Figura 1 Clasificación de las aleaciones de aluminio de acuerdo con sus elementos de aleación y tratamientos post-fabricación. [12]

Entre las aleaciones anteriormente presentadas sobresalen las aleaciones ricas en Si, muy utilizadas en la fabricación de piezas complejas fundidas. Debido a que la infiltración es un proceso que necesita una aleación con elevada fluidez, es que a continuación se detallarán algunas características de las aleaciones Al-Si-Cu, utilizada en el presente trabajo de tesis.

### 1.1.2. Aleaciones AlSiCu

Las aleaciones de aluminio con Si como principal elemento de aleación forman un sistema con características muy especiales, que las hacen aptas para procesos 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 tales como Cu y Mg mejoran las propiedades mecánicas, y hacen que la aleación sea apta para un tratamiento térmico posterior [13]. La base hoy en día para la producción de

motores y otras partes automotrices son las aleaciones AlSiCu, donde los rangos de concentración van de 6-18% para el Si, así como de 1-4% para el Cu [14].

La microestructura de estas aleaciones de colada contiene dendritas  $\alpha$ -Al como el constituyente principal, con partículas eutécticas de Si y varias fases intermetálicas, tales como Al<sub>2</sub>Cu, Mg<sub>2</sub>Si, fases ricas en Mn y en Fe, etc. Su tamaño, morfología y distribución regulan las propiedades mecánicas de estas aleaciones. Cuando estas fases se exponen a temperaturas superiores a 200 °C, las fases principales de reforzamiento tales como  $\theta$ - (Al<sub>2</sub>Cu),  $\beta$ -(Mg<sub>2</sub>Si) y/o Si- (Al<sub>2</sub>CuMg) 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. [13] Algunas fases indeseables presentes en esta aleación, y que no contribuyen a su reforzamiento, son  $\alpha$ -Al<sub>15</sub>(Fe, Mn)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> y  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi. La fase  $\alpha$  aparece como caracteres chinos o poliedros, y la fase  $\beta$  aparece como agujas en 2-D y plaquetas en 3-D. La fase  $\beta$  es la fase de Fe más indeseable debido a su morfología, que provoca la mayor reducción en la ductilidad. La forma más eficaz de promover la formación de la fase  $\alpha$  en vez de la fase  $\beta$  más perjudicial, es la neutralización con la adición de Mn. La cantidad de Mn requerida está relacionada con el contenido de Fe y la velocidad de enfriamiento del proceso. [13]

Las aleaciones de aluminio han encontrado nuevas aplicaciones gracias al desarrollo de nuevos procesos de fabricación y materiales híbridos o discontinuos. Discontinuidades tales como porosidades o reforzantes han originado aplicaciones donde las aleaciones de aluminio monolíticas no compiten. Algunos de estos materiales son las espumas metálicas, los materiales compuestos, y sus combinaciones para formar espumas metálicas compuestas. Como introducción a estos materiales comenzaremos mostrando particularidades relacionadas con las espumas metálicas.

## **1.2. Espumas, esponjas y materiales celulares**

Las estructuras sólidas de tipo espumas se encuentran de modo natural en materiales como la madera, las esponjas, corales, el corcho y los huesos, o en productos elaborados desde tiempos remotos por el hombre, como el pan (Figura 2).

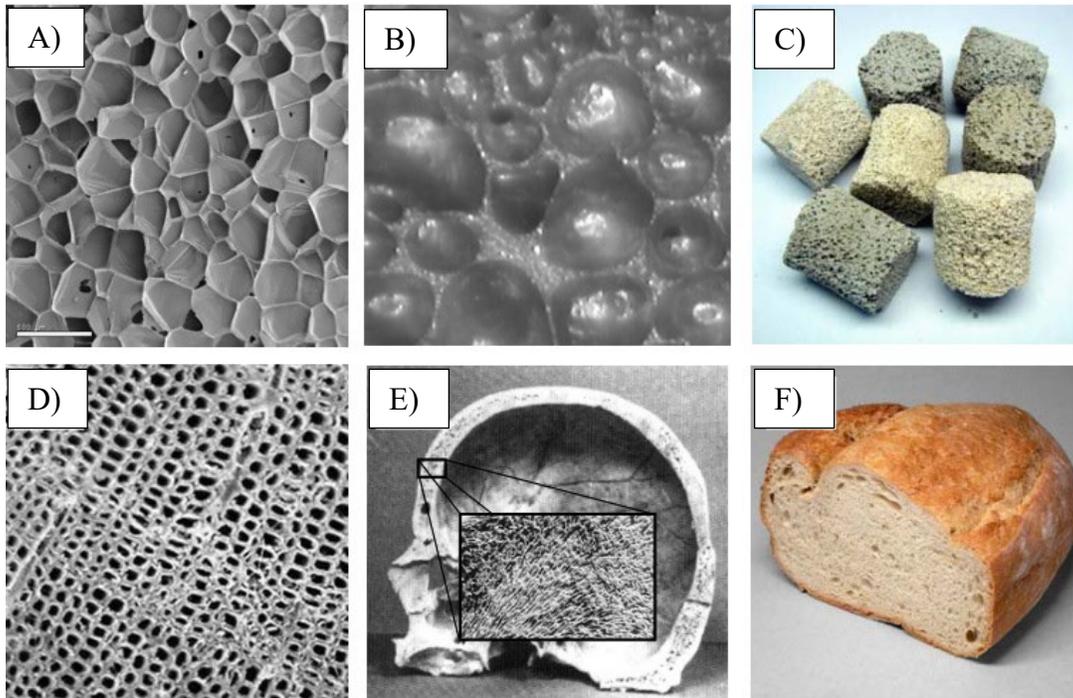


Figura 2 Ejemplos de materiales celulares que difieren en el elemento que constituye la matriz sólida. a) Polietileno, b) Aluminio, c) Cerámica, d) Madera, e) Hueso y f) Pan. [15]

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. 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] A lo largo del siglo pasado se desarrollaron 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. [17]

Estos materiales son altamente porosos, lo que se ve reflejado en la densidad relativa ( $\rho$ ), definida como  $\rho^*/\rho_s$ , donde  $\rho^*$  es la densidad del material celular y  $\rho_s$  la del material que

forma el sólido macizo. Los sólidos celulares pueden distinguirse de los sólidos porosos de acuerdo con un límite de 0.3 para el valor de densidad relativa. Tomando esto en cuenta, la diferencia entre un sólido celular y un material poroso radica en la porosidad, su porcentaje y distribución, lo cual puede entenderse mejor con las imágenes de la Figura 3.

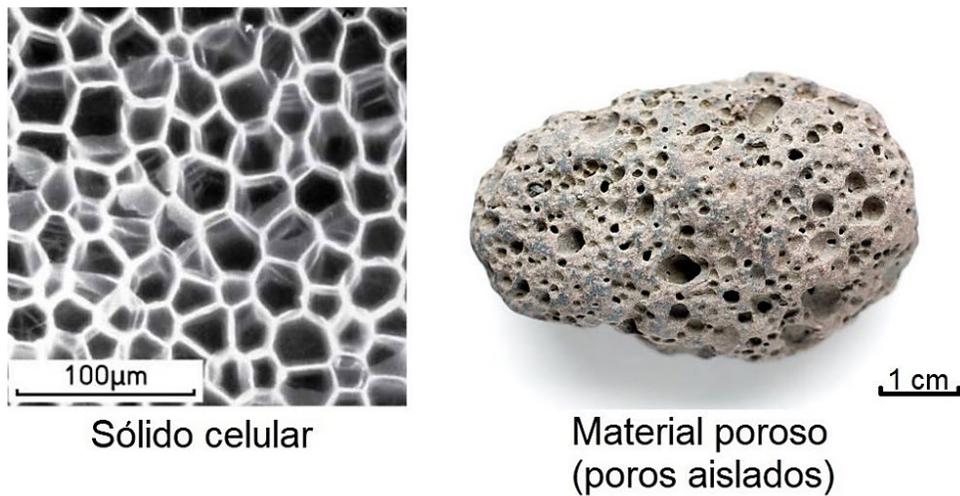


Figura 3 Diferencia entre material poroso y un sólido celular. [18]

En general, existe una clasificación para los materiales celulares de acuerdo a cómo se dispongan las redes de las cuales están compuestos, pudiendo ser bi o tridimensionales. Las redes bidimensionales son aquellas en las que la disposición de los poros es de celda cerrada y solamente en los extremos se encuentran abiertas. Un claro ejemplo de este tipo de materiales son las celdas hexagonales de un panal de abejas, y son muy utilizadas como núcleos de estructuras tipo sándwich. Por otro lado, las redes tridimensionales pueden estar constituida por celdas o poros abiertos o cerrados, conectados o no entre sí. Son utilizados en diferentes tipos de materiales y son isotrópicos. Como se muestra en la Figura 4, algunas partes automotrices hacen uso de este tipo de estructuras.

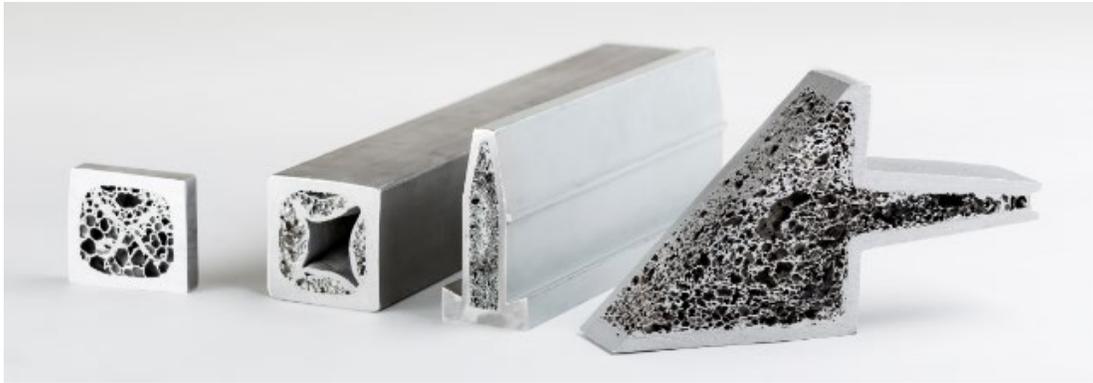


Figura 4 Estructura tridimensional donde la espuma es usada como núcleo. [19]

De acuerdo con la aplicación deseada, se pueden utilizar estructuras tridimensionales de poro cerrado o abierto. También existen materiales que cuentan con una mezcla entre ambos tipos de estructuras. 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. [17] 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 Figura 5 muestra diferentes tipos de estructuras de espumas de aluminio, fabricadas por diferentes métodos. [20]

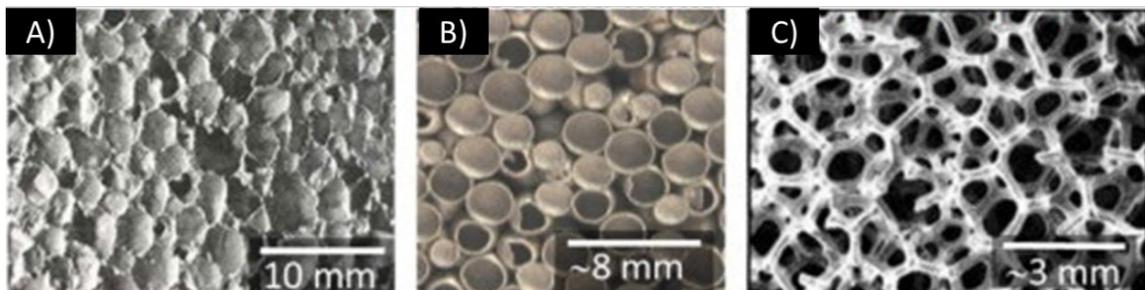


Figura 5 Diferentes tipos de estructura en espumas de aluminio. A) Porosidad cerrada, B) Porosidad mixta y C) Porosidad abierta. [21]

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). [17]

### 1.3. Espumas metálicas

El primer punto por considerar es que no todos los materiales metálicos celulares reciben el nombre de espuma metálica. En general, un material celular posee como característica fundamental el hecho de tener una fase dispersada dentro de otra. En la Figura 6 se muestran todos los posibles tipos de materiales formados por una fase dispersada dentro de otra, sea cual sea su estado: líquido, gaseoso o sólido.

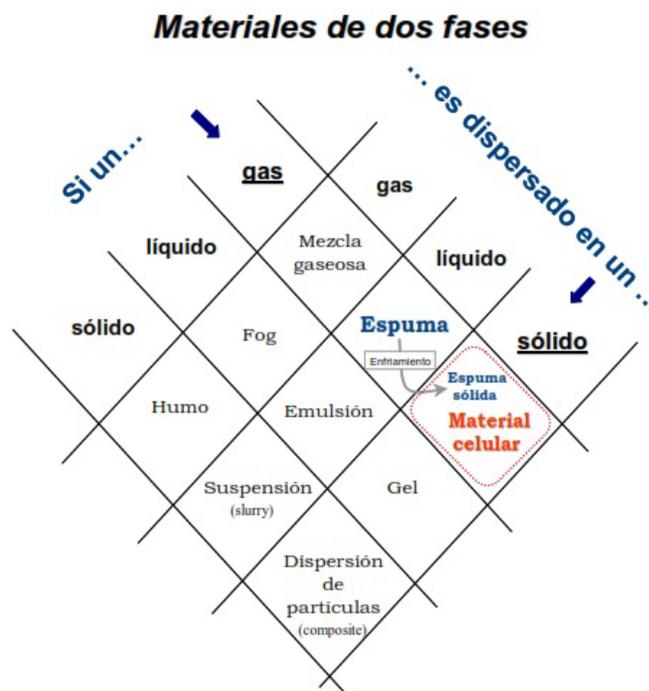


Figura 6 Tipos de materiales de dos fases, una dispersa en la otra, en función del estado en que se encuentre cada una de ellas. [15]

De acuerdo con el concepto mostrado en la figura anterior, se puede definir a la espuma de aluminio como un caso particular de material celular metálico, que se ha obtenido a partir de solidificar un gas dispersado en aluminio líquido. Esta definición es sin tomar en cuenta que existen otros medios para obtener un material celular que no tiene que ser forzosamente a través de un gas dispersado en un material líquido. Las espumas 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: [22], [23]

- 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. [22]

Para iniciar la producción de espumas metálicas, se cuenta con una amplia lista para seleccionar el metal precursor, siendo los más comúnmente usados el zinc, aluminio, estaño, cobre, titanio, plomo, oro, plata y níquel. 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 la 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 fueron el aluminio y sus aleaciones, constituyendo en la actualidad el material de mayor uso, tanto en investigación como industrialmente. [24] 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.

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  $\rho$ ,  $\rho_s$  y  $\rho_g$  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 ( $\rho_r$ ) de la espuma, es decir, el cociente entre la densidad de la espuma y la del sólido base. [15]

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

Para su estudio 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., que también resultan ser características que ayudan a conformar las propiedades finales de la espuma.

### **1.3.1. Antecedentes históricos de las espumas metálicas**

Se tiene registro de que la primera espuma metálica se fabricó en 1948 gracias a la patente de Benjamín Sosnik titulada: “Proceso para hacer una espuma con masa de metal” (B. Sosnik, 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 Sosnik, pero se apreció más como curiosidad científica que como material tecnológico. [25]

En 1959, United Aircraft Corporation desarrolló la patente de un método para fabricar 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, volviéndose un desafío la producción de espumas fiables debido al colapso de éstas, y a los efectos relacionados por el choque térmico dependiendo de la temperatura del agua que se utilizara. [25]

En 1963 Hardy y Peisker [26], 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.

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. [24]

#### **1.3.1.1. Densidad relativa de las espumas**

Al momento de definir algunas de las propiedades más importantes de una espuma metálica tales como las propiedades mecánicas, eléctricas o térmicas, se toma en cuenta uno de los parámetros físicos por el cual se caracterizan las espumas y también por el cual se diferencian del material sólido del que están hechas; ésta es su densidad relativa,  $\rho/\rho_s$  donde  $\rho$  es la densidad de la espuma, y  $\rho_s$  es la densidad del material sólido. 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 0.45, y porosidades en un rango 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. [17], [20]

#### **1.3.2. 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. [17] Con el avance de las diferentes técnicas de caracterización se ha permitido el estudio de los fenómenos que ocurren durante la etapa de espumado *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.

### **1.3.3. Antecedentes de técnicas de fabricación**

#### **1.3.3.1. 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. [17]

Benjamin Sosnick experimentó el espumado 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. [20]

### **1.3.3.2. Espumas de segunda generación (1990-2015)**

A partir de 1986 hay un nuevo impulso a la producción e 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. [17]. En la actualidad existen diversos métodos de producción de espumas metálicas. Algunos son similares a las técnicas que se utilizan para el espumado 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 Figura 7: metal líquido, metal sólido en forma de polvo, metal en estado vapor y metal en forma de solución de iones. [12]

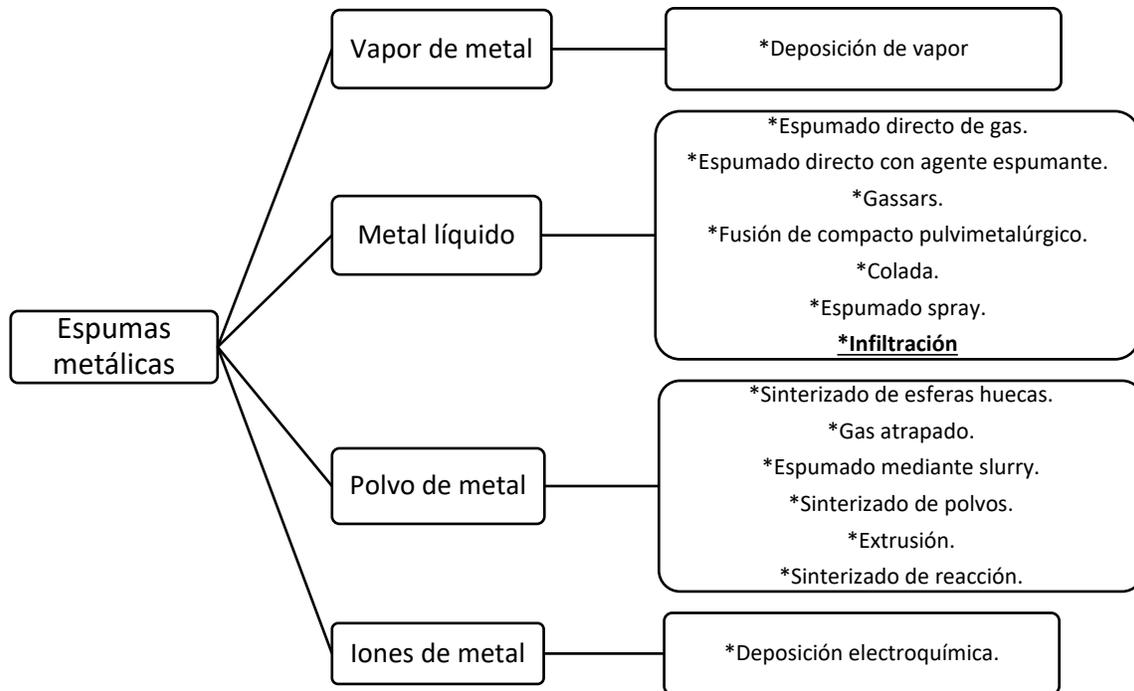


Figura 7 Clasificación de métodos de producción de espumas metálicas. Adaptado de (Banhart 2001). [20]

A causa de que el presente trabajo de tesis se enfoca al uso de preformas para obtener la porosidad después de su eliminación, y sobre todo al proceso de infiltración, es que nos enfocaremos en él. El proceso de infiltración destaca entre los mostrados anteriormente. Con él puede fabricarse tanto espumas metálicas como materiales compuestos o sus combinaciones. Debido a que son un caso particular de las espumas metálicas, y objetivo de este trabajo de tesis, a continuación, se expondrán las particularidades de las espumas metálicas compuestas, mostrando a estos materiales como una mezcla de una espuma convencional y un material compuesto, que igualmente serán analizados aquí.

### 1.3.3.3. Espumas Metálicas Compuestas

Como ya se ha mencionado, las diferentes propiedades que poseen las espumas metálicas han permitido su uso en aplicaciones ingenieriles funcionales y estructurales. Las espumas metálicas de celda abierta son ampliamente utilizadas como intercambiadores de calor, filtros, electrodos, y amortiguadores, aprovechando sus ventajas como elevada área

superficial específica y sus elevadas conductividades térmicas y eléctricas. Por otro lado, las espumas de celda cerrada, en particular las espumas de aleación de aluminio, se han utilizado en ingeniería en aplicaciones estructurales (por ejemplo, automotriz, aeroespacial, equipo industrial y construcción de edificios) que requieren estructuras livianas con alta relación resistencia-peso y rigidez-peso, elevada capacidad de absorción de energía de impacto y/o con una buena amortiguación de ruidos y vibraciones. [2], [27]

Recientemente, se han realizado grandes esfuerzos para fabricar espumas metálicas de alta resistencia. La mayoría de las ideas han surgido a partir de la investigación que se ha llevado a cabo para fabricar metales sólidos de alta resistencia [28], [29]. Una estrategia para fortalecer las aleaciones de Al es agregar elementos de aleación (por ejemplo, Si, Mg, Cu o Zn) para promover su endurecimiento mediante mecanismos tales como la solución sólida o la precipitación. Otra estrategia es incorporar elementos de refuerzo de tamaño micro y nano en la matriz para mejorar el rendimiento. Algunos ejemplos son partículas o fibras cerámicas tales como carburo de tungsteno (WC), óxido de silicio (SiO<sub>2</sub>), etc. Más recientemente, ha habido un interés creciente en la exploración de materiales de carbono como agentes de refuerzo para aleaciones metálicas. [30]

Las micropartículas de cerámica se utilizaron por primera vez en el campo de las espumas metálicas para promover la estabilidad de la espuma líquida y evitar la formación de tamaños de poro no uniformes. Las partículas cerámicas migran preferentemente a la interface líquido/gas y estabilizan las burbujas, mientras aumentan la viscosidad de la masa fundida. Además, evitan el drenaje del metal líquido y la coalescencia de las burbujas, que son causas comunes de estructuras no uniformes en las espumas. La migración preferencial de las partículas a las interfaces líquido/gas está principalmente relacionada con las diferencias en las tensiones superficiales entre las partículas sólidas y el metal fundido y la escasa mojabilidad que presentan. En este sentido, las partículas cerámicas en las espumas metálicas juegan un papel estabilizador similar al de los tensoactivos en muchos otros sistemas de espuma (emulsiones, espumas líquidas acuosas, etc.). [30] A continuación, se presentarán algunas particularidades de los materiales compuestos, que nos permitirán conocer mejor el papel de un reforzante dentro de una espuma metálica.

## 1.4. Materiales compuestos

Un material compuesto es un sistema de materiales formado por una mezcla o combinación debidamente dispuesta de dos o más micro o macroconstituyentes con una interface que los separa, que difieren en forma y composición química y son esencialmente insolubles entre sí. [31]. El estudio de estos materiales ha traído consigo un sinnúmero de aplicaciones debido a su comportamiento, principalmente mecánico, frente a otros materiales, ya que se ha podido demostrar que es posible combinar materiales que como resultado disminuyan su densidad y aumenten considerablemente su resistencia, entre otras propiedades. [32]

Estos materiales poseen dos componentes principales que son: la matriz y el refuerzo. La matriz de un material compuesto es el componente o la fase continua, tiende a ser dúctil y a tener algunas propiedades más bajas que las del refuerzo, como el coeficiente de expansión térmica o la conductividad eléctrica. El refuerzo, además de esto, está caracterizado por ser el material de más resistencia y baja densidad entre los dos, esta última hace que no sea fácil de manipular por sí mismo y requiera de una matriz o un material un poco más denso y sólido para mejorar estas propiedades [32]. Existen tres tipos principales de matrices: Orgánica (OMC) o polimérica (PMC) por sus siglas en inglés, Cerámica (CMC) y Metálica (MMC), y un sinnúmero de refuerzos para cada una de las matrices. En la Figura 8 se aprecia una clasificación de los materiales compuestos en base a sus reforzantes.

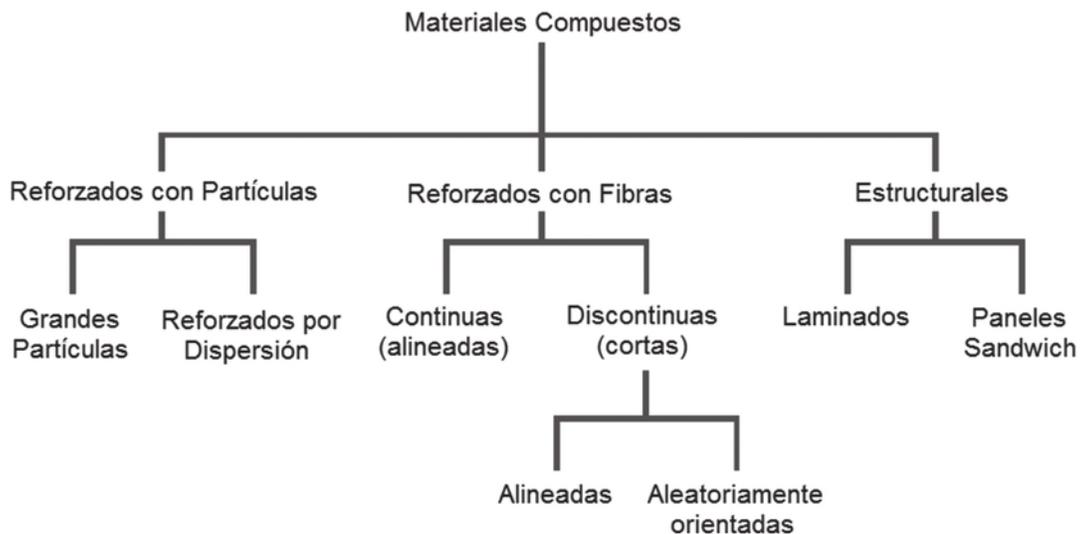
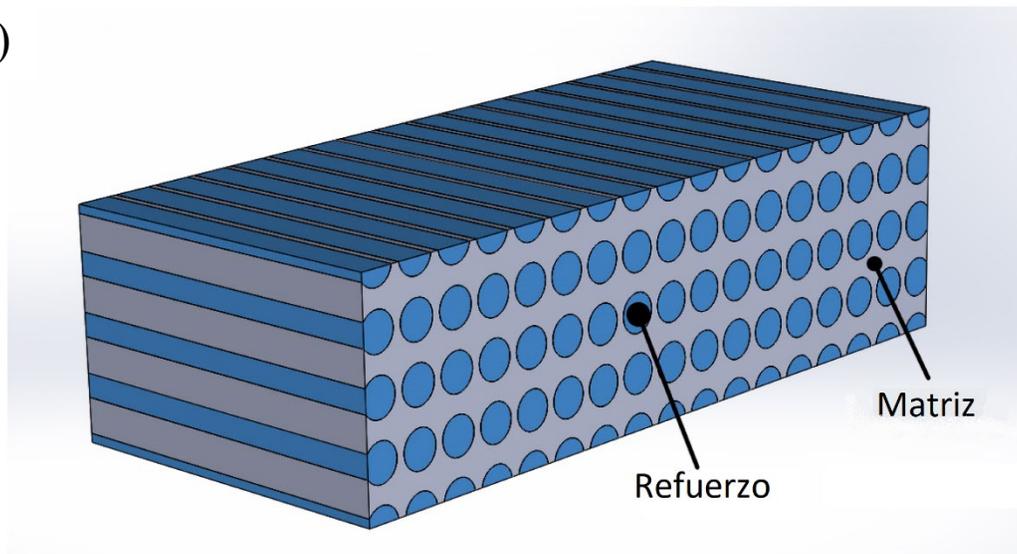


Figura 8 Clasificación de los materiales compuestos de acuerdo con el tipo de reforzante. [33]

Una de las características principales de todos los materiales compuestos es que, en cada uno de ellos, se pueden distinguir sus dos componentes de manera clara: la matriz y el refuerzo, esto debido a que la matriz es la fase continua y el reforzante es la fase dispersa o discontinua en el material, tal como se aprecia en la Figura 9A. En la Figura 9B podemos ver diferentes tipos de materiales reforzantes.

A)



B)

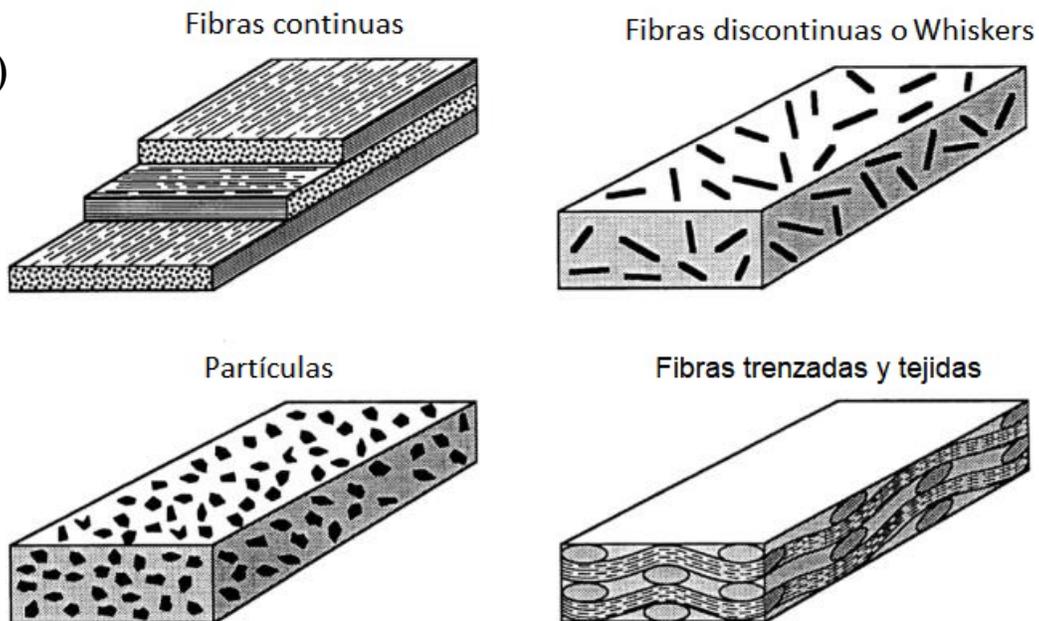


Figura 9 A- reforzante y matriz en un material compuesto, B- Diferentes tipos de materiales reforzantes. [34]

### 1.4.1. Propiedades de los materiales compuestos

Dado que los materiales compuestos están formados por 2 tipos de materiales distintos, las propiedades del material resultante son una combinación de alguna manera de las propiedades de cada uno de los dos componentes (Figura 10). Las propiedades del material compuesto estarán determinadas por las propiedades del reforzante, de la matriz, por la relación entre la cantidad de reforzante y de la matriz (la fracción en volumen de reforzante), y por la geometría y orientación del reforzante dentro del compuesto.

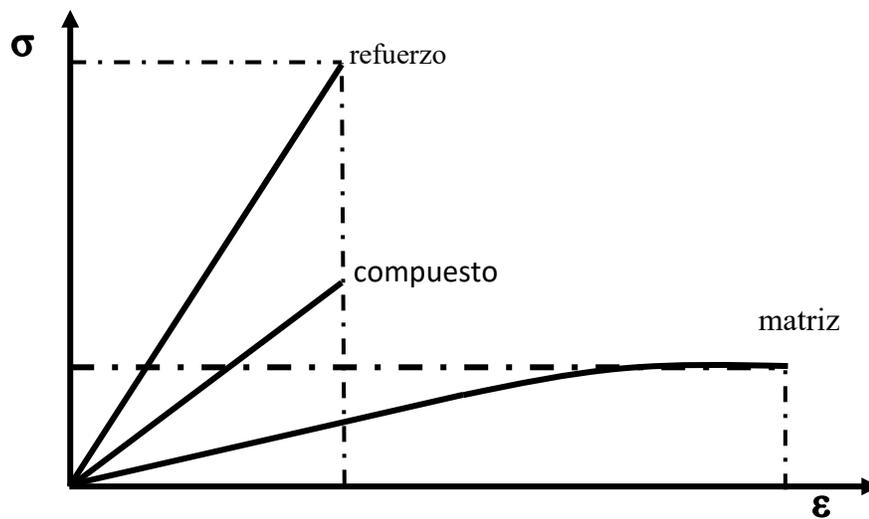


Figura 10 Gráfico de las propiedades obtenidas en la curva esfuerzo deformación de la combinación de dos materiales diferentes al formar un compuesto. [31]

Bajo condiciones ideales, el compuesto exhibe un límite superior de propiedades mecánicas y físicas definida por la regla de las mezclas:

$$P_c = \sum f_1 P_1 + f_2 P_2 + \dots + f_n P_n, \dots \dots \dots (2)$$

Donde  $P_c$  es una propiedad del compuesto;  $P_1, P_2, \dots, P_n$  son los valores de las propiedades de cada uno de los constituyentes dentro del compuesto y  $f_1, f_2, \dots, f_n$  son las fracciones volumétricas de cada constituyente. De manera más sencilla puede expresarse:

$$P_c = f_m P_m + f_r P_r \dots\dots\dots (3)$$

Donde  $P_m, P_r, f_m, f_r$ , son propiedad y fracción volumétrica de matriz y reforzante respectivamente. Combinando matrices y refuerzos que exhiban propiedades adecuadas, se pueden obtener cambios importantes en resistencia, módulo elástico, tenacidad a la fractura, densidad, etc. La clave para el control de estas propiedades depende en parte del éxito en la adecuada selección del material reforzante. Una de las tendencias más seguidas en la fabricación de compuestos de matriz metálica es bajar el coste, que generalmente se consigue a costa de sacrificar el nivel de las propiedades. [35]

### **1.4.1.1. Propiedades mecánicas de materiales compuestos**

#### **1.4.1.1.1. Módulo de elasticidad**

Los refuerzos cerámicos discontinuos de alto modulo elástico, añadidos a matrices metálicas, producen un aumento en la rigidez del compuesto. La orientación preferente del reforzante en el compuesto también provoca un aumento de la rigidez en la dirección de alineamiento. El módulo de elasticidad no aumenta de forma lineal en función de la fracción de volumen de refuerzo, como en el caso de alineamiento uniaxial de refuerzos continuos. Su incremento estará regido por el grado de alineamiento y la orientación de las fibras en la dirección en la que se realice ensayo. [35]

#### **1.4.1.1.2. Límite elástico**

La adición de refuerzos discontinuos en valores del 5 % o más en la matriz, produce un aumento del límite elástico en una gran variedad de aleaciones de aluminio. En algunos casos, se pueden obtener pequeños aumentos en el límite elástico por la combinación del tipo de refuerzo y la elección adecuada de la matriz. El tamaño que posean las partículas juega un rol muy importante en el límite elástico. En general, refuerzos de pequeños tamaños propician altos valores en esta propiedad (por ejemplo, adiciones de partículas de 3  $\mu\text{m}$  pueden aumentar el límite elástico en 60-70 MPa cuando se comparan con refuerzos de 25  $\mu\text{m}$ ). Los principales factores que contribuyen al aumento del límite elástico son:

- Tensiones térmicas residuales: se originan debido a la diferente contracción térmica de la matriz y del refuerzo. Bajo la aplicación de una carga exterior se producen tensiones localizadas que disminuyen el límite elástico efectivo del material. Se pueden utilizar muchos procesos para disminuir este efecto de tensiones térmicas en la matriz, como por ejemplo la relajación y formación de precipitados ( $\theta\text{-CuAl}_2$ ), que producen cambios en el volumen y de esta forma compensan las tensiones internas residuales.
- Mecanismos de refuerzo de la matriz: este efecto se refiere, principalmente, a las variaciones microestructurales relacionadas con el afino de tamaño de grano y aumento de la densidad de dislocaciones que se producen en el material. El control de estas variables depende de la vía de fabricación, del tamaño y fracción en volumen de las partículas de refuerzo. [35]

#### **1.4.1.1.3. Endurecimiento**

El comportamiento mecánico de los MMCs viene caracterizado por los elevados valores de la velocidad de endurecimiento tras el límite elástico. Esto se explica microestructuralmente en términos de transferencia de carga entre la matriz y el refuerzo. Se ha observado que esta velocidad aumenta con la relación longitud-diámetro de las partículas de refuerzo, lo que parece indicar la existencia de una transferencia de carga más efectiva para esta morfología. [35]

#### **1.4.1.1.4. Resistencia a la tracción**

La resistencia a la tracción de materiales compuestos de matriz metálica reforzados con partículas depende de la relación entre dimensiones, fracción de volumen y distribución del refuerzo en la aleación base, los tratamientos térmicos y de la unión refuerzo-matriz. Se puede alcanzar un mayor aumento de resistencia mediante la reducción del tamaño de las partículas, llegando a un incremento de un 10 %, cuando comparamos partículas de 3 y 23  $\mu\text{m}$  de tamaño. En contrapartida, con el aumento de resistencia tenemos una reducción de la ductilidad, principalmente cuando superamos el 10 % de cantidad de refuerzo. Un tamaño más pequeño del refuerzo favorece la ductilidad.

#### **1.4.1.1.5. Fractura**

El examen de las superficies de fractura revela fractura dúctil de la matriz en la interface fibra-matriz y fractura frágil del refuerzo. Para los refuerzos con partículas, el control de los factores de fractura es más complejo. La tenacidad a la fractura decrece con el aumento de la fracción de volumen de partículas, lo que ocurre de igual manera con fibras cortas.

### **1.4.2. Materiales compuestos reforzados con partículas**

Los materiales compuestos reforzados con partículas se subdividen en reforzados con partículas grandes y en reforzados consolidados por dispersión. Esta distinción se fundamenta en el mecanismo de consolidación o de reforzamiento. El término "grande" se utiliza para indicar que las interacciones matriz-partícula no se pueden describir a nivel atómico o molecular, sino mediante la mecánica continua. En la mayoría de los materiales compuestos la fase dispersa es más dura y resistente que la matriz y las partículas de refuerzo tienden a restringir el movimiento de la matriz en las proximidades de cada partícula. En esencia, la matriz transfiere parte del esfuerzo aplicado a las partículas, las cuales soportan una parte de la carga. El grado de reforzamiento o de mejora del comportamiento mecánico depende de la fuerza de cohesión en la interfaz matriz-partícula.

El reforzamiento es tanto más efectivo cuanto más pequeñas sean las partículas y cuanto mejor distribuidas estén en la matriz. Además, la fracción de volumen de las dos fases influye en el comportamiento; las propiedades mecánicas aumentan al incrementarse el contenido de partículas. Las partículas de los materiales compuestos consolidados por dispersión normalmente son pequeñas, los diámetros tienen de 10 a 100 nm. Las interacciones matriz-partícula que conducen a la consolidación ocurren a nivel atómico o molecular. Mientras la matriz soporta la mayor parte de la carga aplicada, las pequeñas partículas dispersas dificultan o impiden el desplazamiento de dislocaciones. De este modo se restringe la deformación plástica de tal manera que aumenta el límite elástico, la resistencia a la tracción y la dureza. [36]

### **1.4.3. Materiales compuestos de matriz metálica (MMCs)**

Bajo el concepto de material compuesto de matriz metálica MMC por sus siglas en inglés, pueden incluirse dos grandes familias de materiales: aquellos materiales que su función es para aplicaciones de corte y desgaste (carburos cementados, aceros reforzados con carburos, etc.) y aquellos materiales de alta rigidez, resistencia y módulo específico, normalmente destinados para aplicaciones estructurales en la industria automotriz o aeronáutica. Este primer grupo de materiales abrasivos se basa en matrices que poseen metales de transición como el Co, Fe, Ni, etc., y el segundo se basa en aleaciones ligeras base Al, Ti, y Mg. A pesar de que ambas familias entran en la clasificación de MMCs, en la literatura comúnmente se considera como tales a los materiales pertenecientes a la segunda familia, mientras que a los materiales de este grupo se les conoce como “metales duros”.

Los MMCs forman un grupo de materiales de los más estudiados en las últimas dos décadas. Una de las causas por la que se desarrollaron los materiales compuestos es la obtención de propiedades imposibles de conseguir con un material monolítico.

#### **1.4.3.1. Antecedentes históricos de los MMCs**

Aunque el concepto de MMC es relativamente moderno, se pueden encontrar ejemplos de MMC incluso en las más antiguas civilizaciones. A modo de ejemplo, se puede citar el

hallazgo en Cayonu (Turquía) de lanzas de cobre que datan aproximadamente del año 7000 A.C. fabricadas por un proceso de laminación y forja sucesiva que genera una microestructura constituida por un elevado número de inclusiones no metálicas alargadas. [37]

Sin embargo, el concepto moderno del MMC surgió más recientemente. En primer lugar, se desarrollaron materiales compuestos de matriz polimérica, coincidiendo con el gran impulso de materiales más ligeros y resistentes para industrias como la aeroespacial, la del transporte, la de la energía y la de construcción civil. En los años 50's y 60's, se comenzó a experimentar con otro tipo de matrices, entre ellas las metálicas. Por lo tanto, entre los años 50's y a principios de los años 60's se realizó el primer esfuerzo por desarrollar MMC. La motivación inicial en ese tiempo fue ampliar de forma dramática la eficiencia estructural de los materiales metálicos mientras se conservaban sus ventajas, así como su inercia química, alta resistencia al corte y buena retención de propiedades aún a elevadas temperaturas. En primer lugar, se desarrolló la tecnología de endurecimiento por dispersión que trata, al igual que el endurecimiento por precipitación, de impedir el movimiento de las dislocaciones mediante la incorporación a la matriz de una segunda fase de muy pequeño tamaño. [38]

En los años 60's, surgió un gran interés por los MMC reforzados con fibras resistentes en matrices de cobre y aluminio, principalmente. El primer MMC que se desarrolló fue el sistema Al-B con refuerzo continuo. Fue también el primero que se aplicó en la industria, específicamente en la lanzadera espacial estadounidense (Space Shuttle). La estructura principal del fuselaje central de este vehículo espacial está formada por 243 tubos de sección circular realizados de compuesto Al-B, lográndose con ello la reducción en peso del 44% respecto al diseño original basado en elementos extruidos de aluminio. [32]

A principios de los años 70's la recesión produjo una reducción en el presupuesto de investigación y desarrollo de los MMC, lo que trajo consigo el final de esta fase. A finales de los 70's, los esfuerzos se renovaron en este tipo de materiales reforzados con fibras discontinuas empleando SiC, por lo que nuevamente se llegó a una era de interés en los MMC reforzados tanto con fibras continuas como discontinuas. Se demuestra entonces que los MMC tales como el Al/SiC/XXw (matriz/refuerzo/% en volumen w=whiskers) pueden ser competitivos en cuanto a propiedades con sus competidores de fibra larga. En ese momento,

el elevado precio de las fibras de SiC frenó su aplicación, pero la puesta a punto de un proceso de fabricación de fibras cortas de carburo de silicio por pirólisis de la cáscara de arroz hizo que fuera posible fabricarlo a escala industrial. Este abaratamiento impulsó la investigación sobre este tipo de MMC. [37]

En los años 80's, las aleaciones de aluminio con refuerzo de SiC fueron objeto de muchos programas de desarrollo por parte tanto de la industria como de los gobiernos, sobre todo en relación con sus aplicaciones aeroespaciales. En 1985, se consiguió optimizar las propiedades, superando a las que poseían otros materiales utilizados para estas aplicaciones en aquel momento. En 1986, se comercializaron por primera vez y actualmente existe ya en el mercado una amplia gama de composiciones y porcentajes de refuerzo adecuados para distintas aplicaciones. [38]

A principios de los años 90's, la fuerza aérea de los Estados Unidos destinó un programa de investigación para mantener una tecnología de MMC encaminada a la industria aeroespacial, que dio como resultado diversas marcas militares y comerciales, principalmente con interés en el aluminio reforzado con fibras discontinuas. Durante el año de 1999, el mercado de los MMC para el manejo térmico y empaquetamiento electrónico fue 5 veces mayor que el aeroespacial. [32]

#### **1.4.4. Materiales compuestos de matriz de aluminio (AMCs)**

Ya hace mucho tiempo que la mayoría de MMCs, tanto en investigación y desarrollo como en varias aplicaciones industriales, son base aluminio y sus aleaciones, y esto se debe a que el aluminio es ligero, que es el primer requisito en la mayor parte de las aplicaciones de los MMCs actuales. Adicionalmente, es barato en comparación con otros metales ligeros, como el titanio y el magnesio. También se debe a que las aleaciones de aluminio convencionales se utilizan en grandes cantidades, en un gran número de aplicaciones, desde la industria de automoción y aeronáutica, hasta en ocio y recreo. [35] Su excelente resistencia, ductilidad y comportamiento frente a la corrosión ya son bien conocidos y pueden modificarse para satisfacer los requisitos de muchas aplicaciones distintas. Entre las aleaciones de aluminio, las aleaciones endurecibles por precipitación son de especial interés. La más importante y

reciente incorporación a estas aleaciones son las aleaciones de Al-Li. El particular efecto del litio es que cuando se alea con aluminio, simultáneamente decrece la densidad y aumenta el módulo de elasticidad de la aleación. Por lo tanto, no sorprende que la industria aeroespacial esté interesada en los compuestos de matriz Al-Li. Aunque la fabricación de compuestos de matriz de aluminio reforzado con fibras continuas es bastante compleja y cara, es utilizada en algunas aplicaciones.

Otra tendencia en la investigación de AMC's es el desarrollo de técnicas más baratas, especialmente para refuerzos discontinuos. El elevado consumo de aluminio monolítico permite el desarrollo de tecnologías eficientes y viables económicamente. Muchas de estas tecnologías se pueden aplicar perfectamente en la producción de AMC's. Los procesos convencionales en estado líquido, como es el caso procesos de fundición y de metalurgia de polvos, se utilizan para la obtención de AMC's reforzados con partículas.

Las partículas de carburo de silicio (SiC) son uno de los refuerzos discontinuos más comúnmente utilizados en AMC's a pesar de que la densidad del SiC es ligeramente mayor que la del aluminio. Este alto interés se debe a su bajo precio, al hecho de poseer una buena gama disponible y de proporcionar al compuesto alta resistencia y módulo elástico. El aumento de la resistencia al desgaste es también un tema para considerar. Otro tipo de refuerzo utilizado en AMC es la alúmina, en comparación con el SiC es mucho más inerte y también más resistente a la corrosión y conveniente para fabricación y uso a elevadas temperaturas. No obstante, existe un problema inherente a la falta de mojabilidad de la alúmina por el aluminio fundido, presentando poca o nula unión entre ellos, lo cual disminuye las propiedades mecánicas. Para resolver este problema la matriz puede alearse y el refuerzo puede ser recubierto con algún otro material. [35]

#### **1.4.4.1. Métodos de fabricación de materiales compuestos de matriz de aluminio**

Según lo descrito anteriormente, las características y propiedades de los materiales compuestos en general dependen de las propiedades de la matriz, del tipo de refuerzo empleado, su distribución, y del método de producción empleado. Los métodos de

fabricación a escala industrial de los AMC's se pueden clasificar en dos grandes grupos al igual que los procesos para fabricar espumas metálicas:

- Procesos de fabricación en estado líquido
- Procesos de fabricación en estado sólido

Los procesos de fabricación en estado líquido consisten en incorporar el material de refuerzo en la matriz metálica cuando ésta se encuentra en estado líquido, posterior a lo cual se procede a la solidificación del material. El propósito final es obtener un compuesto con un elevado nivel de propiedades mecánicas, y para lograr esto se requiere de un buen enlace entre el refuerzo, y la matriz líquida, para lo cual es necesario que el metal líquido moje al refuerzo como se mencionó anteriormente en el apartado de las propiedades de los materiales compuestos. Sin embargo, no todos los refuerzos presentan una buena mojabilidad con el aluminio y se hace necesario mejorar la mojabilidad de este componente, lo que se consigue recubriéndolo con determinadas sustancias, o modificando variables en el proceso de fabricación. [39], [40].

Por otro lado, el proceso por ruta en estado sólido es el medio en el que se forman como resultado de la unión del metal de la matriz y el refuerzo, o componente disperso, debido a la difusión mutua que se produce entre ellos, en estado sólido, a temperatura elevada y baja presión.

A pesar de que existen otros criterios de clasificación de los procedimientos de fabricación de los compuestos de matriz metálica en cualquier variante de clasificación, la fabricación de estos materiales habitualmente implica métodos físicos como proyección térmica, pulvimetalurgia, aleación mecánica, colada convencional, bajo presión o por infiltración, junto a métodos químicos como el de obtención de las partículas de refuerzo in situ. Cada uno de estos procedimientos tiene sus ventajas e inconvenientes. Sin embargo, la vía pulvimetalúrgica presenta, generalmente, mejores propiedades, en términos de mayor resistencia de los compuestos, que las obtenidas por otros métodos, y a unos costos de fabricación aceptables. [40], [41]

La técnica de procesamiento por infiltración es un caso en el que se pueden fabricar tanto espumas como materiales compuestos, y sus combinaciones, con la diferencia de que para

un material compuesto la infiltración se realiza sobre reforzantes en lugar de utilizarse partículas espaciadoras, que posteriormente son eliminadas para generar la porosidad.

#### **1.4.4.1.1. Método de infiltración**

El proceso de infiltración consiste, como lo dice su nombre, en infiltrar metal fundido sobre una preforma, llenando los espacios que quedan en ella. Este proceso puede utilizarse tanto para la fabricación de materiales compuestos como de espumas metálicas, o la combinación de ellos para formar espumas metálicas compuestas. En el caso de los materiales compuestos, la preforma está formada por el reforzante, mientras que para fabricar espumas es necesario llenar el lugar a infiltrar con un material preferentemente de bajo costo que formará los poros una vez eliminado. 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 aislados, ya sea unidos entre ellos por algún proceso como el de sinterizado o completamente separados. 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 [25].

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 ellas que permite mantener canales abiertos, y así se obtiene como geometría general final de la espuma la geometría de dicha preforma. En el proceso más simple, el metal fundido se vierte simplemente sobre 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, dónde la preforma de sal está al vacío. El uso de presión durante el paso de infiltración

produce espumas con poros pequeños de hasta 50  $\mu\text{m}$ . 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  $\mu\text{m}$  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. [25]

El proceso usado para infiltración consta básicamente de 5 pasos, que se explicarán a continuación para el caso de la fabricación de un material compuesto Al-NaCl, que al final se convierte en una espuma metálica por la disolución de las partículas espaciadoras:

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 de partículas interconectadas.
3. Fundición del metal: El metal se coloca sobre la preforma y se funde.
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, este se introduce en el solvente adecuado para eliminar la preforma, lo cual se hace comúnmente al disolver el espaciador. [42]

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 [43]. De manera gráfica este proceso se describe en la Figura 11.

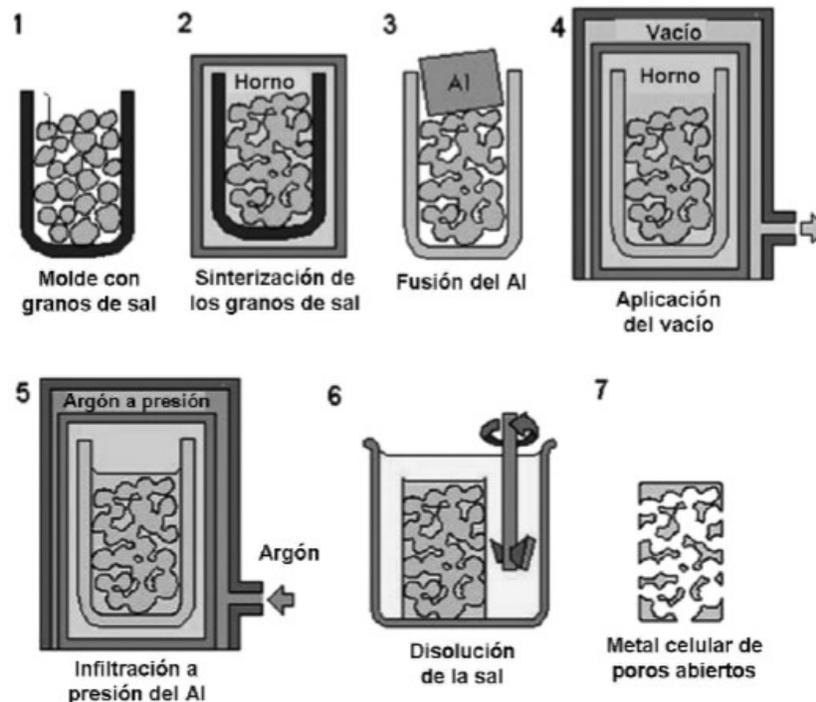


Figura 11 Proceso de infiltración con espaciadores de NaCl. [44]

#### 1.4.5. Materiales compuestos con matriz de aluminio con refuerzo cerámico

Los cerámicos son los materiales más usados como refuerzo en el aluminio y sus aleaciones para ofrecer propiedades superiores. De hecho, aluminio puro reforzado con 60% de fibras continuas de alúmina puede producir un módulo elástico mejorado de 70 GPa a 240 GPa con una disminución en el coeficiente de expansión térmica de  $24 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  a  $7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . La aleación Al-9Si reforzada con 20% en volumen de SiC tiene una resistencia al desgaste equivalente mejor que la que posee una fundición gris. [3].

#### **1.4.5.1. Efecto de los refuerzos cerámicos sobre el comportamiento de la matriz de aluminio.**

La presencia de un contenido volumétrico relativamente grande, por ejemplo, más del 10%, de refuerzo cerámico independientemente de la geometría: partícula, fibra corta o fibra larga, influye profundamente en el comportamiento de la matriz de aluminio en las AMC's durante el proceso de manufactura, tratamiento térmico y el subsecuente uso en servicio. Estos efectos pueden ser tanto intrínsecos como extrínsecos:

- Los efectos intrínsecos de los refuerzos cerámicos sobre el comportamiento de los AMC incluyen cambios microestructurales, tensiones térmicas y características de tratamiento térmico, todos los cuales alteran o expanden significativamente los límites de propiedades físicas y mecánicas de las aleaciones de aluminio. La fase cerámica puede actuar como una barrera para la difusión del calor y el soluto, catalizar la nucleación heterogénea de la fase de cristalización de la masa fundida, restringir la convección del fluido e inducir inestabilidades morfológicas en la interfaz sólido-líquido, por lo tanto, el comportamiento de solidificación de las aleaciones de aluminio cambia. La aleación de aluminio tiene un coeficiente de expansión térmica mayor que el de la cerámica, lo que lleva a una tensión de compresión residual en la fase cerámica y a un esfuerzo de tensión residual dentro de la fase metálica debido a la rápida velocidad de contracción de la fase metálica comparada con la fase cerámica durante el enfriamiento al finalizar el proceso. [3], [45]
- Las características de endurecimiento por envejecimiento de las aleaciones de aluminio pueden modificarse mediante la adición de refuerzos cerámicos, y la modificación depende de la composición del metal, el tamaño, la morfología y la fracción de volumen del refuerzo, y el método de procesamiento del material compuesto. Estos cambios en las características de endurecimiento por envejecimiento de las aleaciones de aluminio se deben en parte al aumento de la densidad de dislocaciones debido al gran desajuste en el coeficiente de expansión térmica de la cerámica y la aleación de aluminio discutida anteriormente. [3], [45]
- Se han encontrado efectos extrínsecos del refuerzo cerámico sobre el compuesto de matriz de aluminio en algunos casos particulares, por ejemplo, la incorporación de SiC en la matriz de aleación de aluminio mejora la resistencia al desgaste por deslizamiento del

material compuesto, que se atribuye al efecto intrínseco de SiC. Además, se ha encontrado una capa lubricante adherente que se forma en la superficie de los discos de freno de AMC, mejorando aún más la resistencia al desgaste cuando se desliza contra la pastilla de freno. La formación de esta capa lubricante, que consiste en una mezcla de óxidos, se debe a la transferencia de materiales desde la pastilla de freno al disco de AMC, la transferencia es causada principalmente por el SiC que se extruye fuera de la superficie del AMC. [3].

Los AMC reforzados con cerámica ahora tienen un historial probado como materiales exitosos de "alta tecnología" en una gran variedad de aplicaciones. Pueden proporcionar beneficios de rendimiento, por ejemplo, vida útil de los componentes y productividad mejorada, beneficios económicos, como ahorro de energía o menores costos de mantenimiento, y beneficios ambientales, tales como menores niveles de ruido y menos emisiones al aire. Los AMC, con varios tipos de refuerzos y producidos por diferentes métodos de procesamiento, han encontrado su camino en muchas aplicaciones prácticas [46]. Sin embargo, para intensificar el uso ingenieril de los AMC se deben superar varios desafíos, entre los cuales están: [47]

- Comprender a fondo la ciencia subyacente del procesamiento de los AMC.
- Desarrollar AMC basados en las matrices de diversas aleaciones de aluminio.
- Desarrollar herramientas menos costosas para maquinar y cortar AMC.
- Desarrollar tecnología de reciclaje para los AMC.

#### **1.4.6. Materiales reforzantes usados para la fabricación de espumas metálicas con matriz metálica**

Dentro de los primeros materiales reforzantes que se utilizaron para la fabricación de espumas compuestas se encuentran las microesferas de ceniza. Estas son subproductos de las centrales térmicas de combustibles fósiles y, por lo tanto, son materiales baratos y se encuentran disponibles en grandes cantidades. No obstante, poseen una desventaja, su estructura, forma y propiedades mecánicas no son homogéneas y poseen una gran dispersión. Distintos tipos de materiales han sido investigados en donde entre los más comunes se

encuentran las esferas cerámicas, ya sean sólidas o huecas. De entre todas las características que se deben considerar a la hora de seleccionar un material de refuerzo, sobresalen una elevada resistencia, un bajo costo, y una buena unión con la matriz, entre otros aspectos. Existen dos factores con más peso para determinar si un material puede usarse como refuerzo en la fabricación de espumas compuestas: 1) en el caso de que sea una esfera hueca, debe asegurarse que la superficie sea sólida (o esté cerrada) para así impedir que el metal líquido rellene el interior durante el proceso de infiltración, de otro modo no se lograría la reducción en densidad; y 2) la densidad de este material debería ser lo más baja posible ya que de otra manera la densidad de la espuma resultante sería elevada. [48] Dadas estas características, enseguida se describen los dos materiales de refuerzo seleccionados para este trabajo.

#### **1.4.6.1. Alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )**

Este material presenta elevadas estabilidades química y térmica, alta dureza, relativamente buenas resistencias mecánica y al desgaste, buenas propiedades de aislamiento eléctrico con una conductividad térmica relativamente alta en comparación con otros materiales cerámicos y una tenacidad a la fractura relativamente baja. [49] Esto, combinado con su disponibilidad en abundancia ha hecho al óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), o alúmina, atractiva para aplicaciones ingenieriles. La gran mayoría de su uso tradicional es en aplicaciones refractarias. La alúmina se presenta en diferentes formas alotrópicas, aunque a la forma más común de alúmina cristalina se conoce como corindón ( $\alpha$ -alúmina). Esta variedad posee una estructura cristalina interna donde los iones de oxígeno están empaquetados en un arreglo de celda hexagonal (CHP) con iones de aluminio ocupando 2/3 partes de los sitios octaédricos. Su temperatura de fusión es de 2040 °C. [50]. La alúmina también es un refuerzo atractivo para las aleaciones de aluminio debido a la inercia química entre los dos materiales y su resistencia a la oxidación. Se ha reportado una degradación limitada durante la fabricación del compuesto a elevadas temperaturas y también a elevadas temperaturas de servicio. Sin embargo, existe un problema en la mojabilidad significativamente pobre de la alúmina por aluminio. [46], [47] De manera general, las propiedades para una alúmina con una pureza de 99.5% son: módulo elástico de 375 GPa, módulo de corte de 152 GPa, relación de Poisson 0.22, resistencia a la compresión 2600 MPa, y dureza de 1440 kg/mm<sup>2</sup>.

#### 1.4.6.2. Hidróxido de aluminio ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ )

El hidróxido de aluminio,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , se puede encontrar en la naturaleza como gibbsita, doyleita, nordstrandita y bayerita. Es un polvo blanco, cristalino fino, no higroscópico, con solubilidades en agua y disolventes orgánicos muy bajas. En el ámbito médico, se utiliza como agente antiácido en farmacéutica debido a su capacidad para neutralizar ácidos gástricos. En ingeniería ambiental, se emplea en procesos de coagulación y floculación para la purificación de agua, facilitando la remoción de partículas y contaminantes suspendidos. En el campo de la química de materiales, el hidróxido de aluminio se utiliza como precursor en la síntesis de alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), que es un material cerámico con aplicaciones en catálisis y en la fabricación de componentes electrónicos. Asimismo, uno de los usos más notables es su rol como retardante de llama en materiales poliméricos. Cuando se expone al calor, el hidróxido de aluminio se descompone para liberar moléculas de agua, lo que ayuda a enfriar el material y reducir la propagación del fuego. [51], [52]

Desde el punto de vista de la reología, este compuesto también se emplea como agente espesante en la formulación de productos cosméticos y farmacéuticos. Su capacidad para formar geles a diferentes concentraciones lo hace útil en el diseño de sistemas de liberación controlada de fármacos. Finalmente, en investigaciones científicas, el hidróxido de aluminio se estudia como un potencial adsorbente para la remoción de iones metálicos y compuestos orgánicos en soluciones acuosas, gracias a su alta área superficial y capacidad de interacción química.

Sus propiedades mecánicas son: módulo elástico 60 GPa y dureza de 15-20 Rockwell C, para el resto de sus propiedades no hay datos ampliamente disponibles ya que no es un material comúnmente utilizado en aplicaciones estructurales. Gracias a su estructura, presenta elevada mojabilidad con el aluminio fundido.

Debido a que las partículas espaciadoras utilizadas para fabricar una espuma metálica son un caso particular de reforzante, a continuación, se analizarán algunas de sus características.

#### **1.4.7. 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 huecas 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 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. [23]. Una clasificación general de los espaciadores existentes es la siguiente: [44]

- 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.

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%, todo dependiendo del tamaño de partícula que se esté usando. [23]

El cloruro de sodio (NaCl) está entre los espaciadores más utilizados, y debido a que se empleará en el presente trabajo es que a continuación se ahondará en sus especificaciones.

#### **1.4.7.1. Cloruro de sodio (NaCl)**

Una de las partículas espaciadoras más frecuentemente usadas es la sal común (NaCl), ya que posee numerosas ventajas: es libre de toxicidad, bajo costo y rápida disolución en agua, lo que la convierte en una sustancia preferible en la mayoría de las aplicaciones, tiene una densidad de  $2.165 \text{ g/cm}^3$ , un punto de fusión de  $801 \text{ }^\circ\text{C}$  y un punto de ebullición de  $1465 \text{ }^\circ\text{C}$ . La desventaja de su uso está asociada con cualquier signo de corrosión que pueda ocurrir si no se elimina por completo de la matriz [53]. Por otro lado, si la sal se usa para aplicaciones en bio-implantes y si queda algo de NaCl en la espuma después de la eliminación de la preforma, el material no sería tóxico, lo que presenta una ventaja para este espaciador.

La mojabilidad reforzante-matriz, así como la ocurrencia o no de reacciones interfaciales, son fenómenos que afectan las propiedades de los materiales compuestos resultantes, lo cual se analiza a continuación.

#### **1.4.8. Mojabilidad matriz/reforzante**

Un parámetro importante con respecto a la interfaz que se produce entre el refuerzo y la matriz es la mojabilidad que posee dicho refuerzo por parte de la matriz fundida. El concepto de mojabilidad se refiere a la capacidad que posee un líquido para extenderse sobre un sustrato sólido. Una buena mojabilidad es una condición necesaria pero no suficiente para una unión fuerte entre matriz y reforzante. Es necesaria una buena mojabilidad incluso para que exista una unión puramente mecánica o una unión débil de Van Der Waals. De lo contrario es posible que se puedan generar vacíos en la interfaz entre refuerzo y matriz, situación indeseable, ya que pueden ser sitios potenciales de inicio de falla dentro del material. Comúnmente, el ángulo de contacto es medido depositando una gota de líquido sobre una superficie plana de un sustrato sólido. El ángulo  $\theta$  puede medirse directamente con un goniómetro o calcularse usando relaciones trigonométricas simples que involucran

dimensiones de caída. De manera teórica se puede usar la siguiente expresión, llamada ecuación de Young [54]:

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos \theta \dots \dots \dots (4)$$

Donde  $\theta$  es el ángulo de contacto y  $\gamma$  es la energía superficial por unidad de área. En términos muy generales, un ángulo de contacto de  $0^\circ$  indica una mojabilidad perfecta, mientras que un ángulo de contacto de  $180^\circ$  indica que no hay mojabilidad (Figura 12).

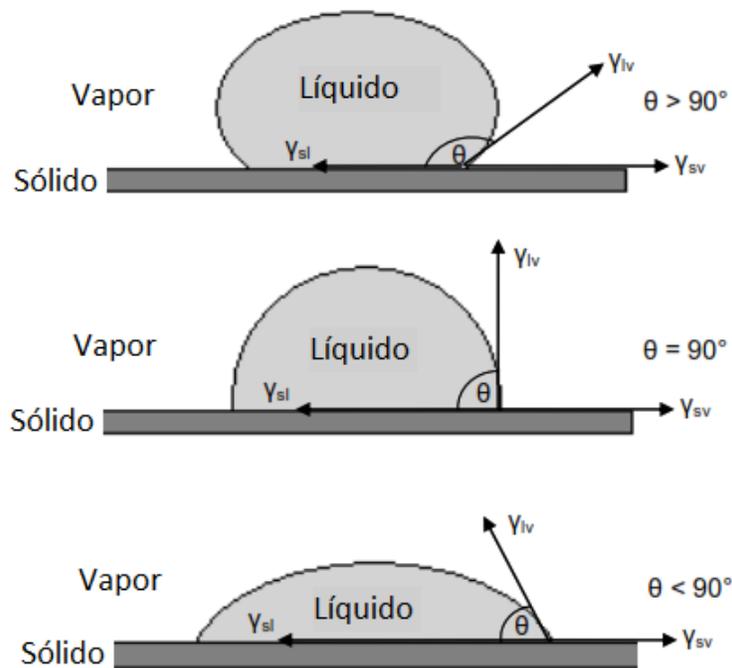


Figura 12 Ángulo de contacto entre una gota de líquido y un sustrato sólido. [47]

Usualmente, los refuerzos cerámicos son rechazados por el metal líquido por no poseer mojabilidad o por un ángulo de contacto elevado. Sin embargo, bajo algunas circunstancias la mojabilidad de un cerámico sólido por un metal fundido puede ser mejorada haciendo una pequeña adición de aleante a la composición de la matriz. Un ejemplo de esto es la adición

de litio al aluminio para mejorar la mojabilidad de las fibras de alúmina. [55], [56] Entender estos mecanismos de mojabilidad entre el aluminio fundido y los materiales cerámicos es de gran importancia para la fabricación de materiales compuestos, ya que esta mojabilidad juega un papel importante en el proceso de infiltración que se discutirá más adelante. Existen diversos reportes [57]–[60] de investigadores que han estudiado el ángulo de contacto entre el aluminio y alúmina sólida, sin embargo, los resultados son muy variados, aunque todos coinciden en que a temperaturas por debajo de 700 °C la mojabilidad es mínima con ángulos >90°. [61]

## **1.5. Propiedades de las espumas metálicas convencionales y compuestas**

### **1.5.1. 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. [62]

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. [62] En lo que respecta a las propiedades de las espumas cabe destacar su extenso rango de aplicaciones a diferencia de los materiales sólidos. En general, las espumas metálicas de aluminio compuestas y las espumas metálicas de aluminio convencionales

tienen algunas similitudes en términos de sus propiedades mecánicas, pero también poseen algunas diferencias importantes:

- Las espumas metálicas de aluminio compuestas suelen tener una mayor resistencia y rigidez en comparación con las convencionales, esto se debe a que las espumas compuestas tienen una estructura de celda más compleja y una distribución más uniforme de las propiedades mecánicas a través del material. Además de que la adición de un material de refuerzo puede mejorar la resistencia a la tracción y la resistencia al impacto de la espuma.
- Por otro lado, las espumas metálicas de aluminio convencionales suelen tener una mayor capacidad de absorción de energía y una mayor resistencia a la deformación permanente. Además, las espumas metálicas de aluminio convencionales son generalmente más fáciles de procesar y fabricar en comparación con las espumas metálicas de aluminio compuestas.

Finalmente, para el caso específico de este trabajo, las espumas metálicas de aluminio con reforzantes cerámicos son materiales que al combinar las propiedades mecánicas del aluminio con las de las cerámicas pueden poseer propiedades mecánicas como las siguientes:

1. Alta resistencia a la compresión: las espumas metálicas de aluminio con reforzantes cerámicos pueden tener una alta resistencia a la compresión debido a la rigidez y la dureza de los materiales cerámicos que se utilizan como refuerzos.
2. Baja densidad: una de las ventajas de las espumas metálicas es que tienen una baja densidad. Al agregar reforzantes cerámicos, la densidad puede ser un poco mayor que la de las espumas de aluminio, pero seguirá siendo baja en comparación con otros materiales.
3. Buena resistencia a la fatiga: las espumas metálicas de aluminio con reforzantes cerámicos pueden tener una buena resistencia a la fatiga debido a la capacidad de los materiales cerámicos para soportar altas cargas cíclicas.
4. Buena resistencia al impacto: debido a la capacidad de las cerámicas para absorber energía en el impacto, las espumas metálicas con reforzantes cerámicos pueden tener una buena resistencia al impacto.

5. Buena resistencia a la corrosión: el aluminio es un material que tiene una buena resistencia a la corrosión y, al agregar reforzantes cerámicos, se puede mejorar aún más la resistencia a la corrosión de las espumas.

En resumen, estos materiales tienen diferentes propiedades mecánicas que pueden ser adecuadas para diferentes aplicaciones. Las espumas metálicas de aluminio compuestas son más fuertes y rígidas, mientras que las espumas metálicas de aluminio convencionales tienen una mayor capacidad de absorción de impactos y son más fáciles de procesar [63]–[65]. A continuación, se analizarán más detalladamente algunas de las propiedades de estos materiales.

#### 1.5.1.1. 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 [25], [66], [67]. 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. [63]

$$E^*/E_s = C_1 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2 \dots\dots\dots (5)$$

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 6. [63]

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

Es importante destacar que las propiedades de la parte sólida en el caso de una espuma metálica reforzada estarían dictadas por el material compuesto resultante, por lo que el módulo de elasticidad que se utilizaría en este caso sería como el anteriormente descrito por la regla de las mezclas.

**1.5.1.1.1. 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. [68]–[70]. 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 [70], como se observa en la Figura 13. 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.

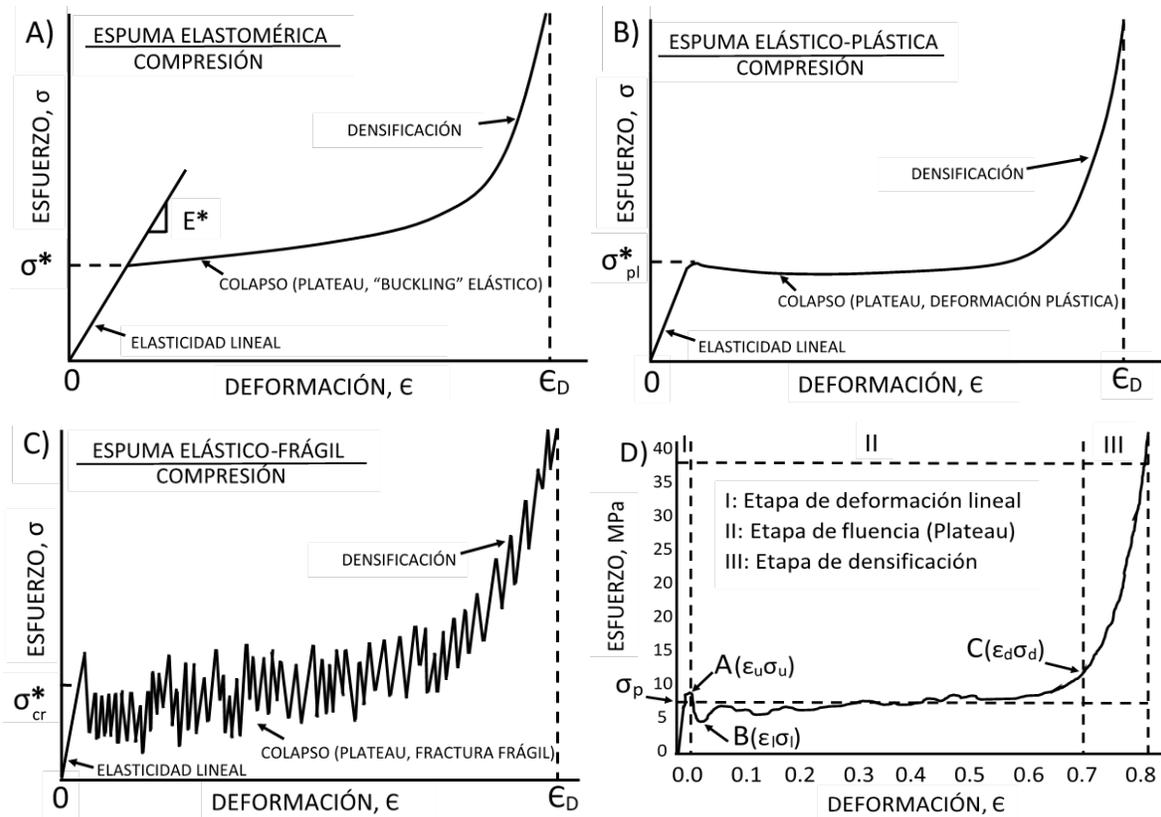


Figura 13 Curvas esfuerzo deformación de distintos comportamientos de un sólido celular. [71]

En el caso de las espumas de metálicas generalmente se comportan como se observa en el inciso B de la Figura 13, siendo elástica-plástica. Como pudo apreciarse en la Figura 13D, y al igual que la mayoría de los casos, se dividen en tres zonas: 1) la elástica lineal: en esta etapa, que ocurre a bajas deformaciones, el mecanismo de deformación depende del tipo de celda y la morfología. Para espumas de poro abierto, la deflexión de los bordes de las celdas es el mecanismo principal, mientras que, en espumas de poro cerrado, la deflexión de los bordes y la extensión o compresión de las paredes o membranas contribuyen a la rigidez axial y al módulo elástico., 2) el plateau o zona de colapso: el comportamiento elástico lineal en espumas ocurre solo a bajas deformaciones. Las espumas elastoméricas tienen un esfuerzo de colapso elástico no lineal. El colapso plástico depende del tipo de celda y geometría. En celdas abiertas, ocurre cuando el momento ejercido excede el momento plástico total. En celdas cerradas, el incremento en el esfuerzo de fluencia se debe al estiramiento de las paredes durante la compresión. y 3) la 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 esta 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

## **1.5.2. Propiedades físicas**

### **1.5.2.1. 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  $0.4 - 1.2 \text{ g cm}^{-3}$ .

### **1.5.2.2. 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 ( $\alpha$ ) 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 metálicas, sobre todo aquéllas 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,  $\alpha$  máximo cambia hacia frecuencias más bajas). La mayor absorción de energía sonora se produce para espumas con densidades en torno a  $0.65 \text{ g/cm}^3$  [25] [72].

### **1.6. Aplicaciones de las espumas metálicas**

Como bien se ha venido definiendo, las espumas metálicas convencionales y las espumas metálicas reforzadas son dos tipos diferentes de materiales que se utilizan en una variedad de aplicaciones debido a sus propiedades únicas. Las espumas metálicas convencionales son materiales porosos hechos de metal que tienen una estructura celular abierta y debido a su estructura, tienen una baja densidad y alta superficie específica, lo que los hace ideales para su uso en aplicaciones como aislamiento térmico, absorción de impactos y reducción de vibraciones. Sin embargo, las espumas metálicas convencionales también tienen algunas limitaciones en cuanto a su resistencia mecánica y rigidez.

Por otro lado, las espumas metálicas reforzadas son una variante mejorada de las espumas metálicas convencionales. Están diseñadas con una estructura celular más resistente y un refuerzo adicional, como fibras o partículas, que aumentan significativamente su resistencia mecánica y rigidez. Esto hace que las espumas metálicas reforzadas sean adecuadas para aplicaciones que requieren alta resistencia y rigidez, como en la fabricación de piezas estructurales para la industria aeroespacial y automotriz.

En resumen, la principal diferencia entre las espumas metálicas convencionales y las espumas metálicas reforzadas radica en su resistencia mecánica y rigidez. Mientras que las espumas metálicas convencionales son ideales para aplicaciones que requieren aislamiento térmico y reducción de vibraciones, las espumas metálicas reforzadas son más adecuadas para aplicaciones que requieren elevada resistencia y rigidez. [3], [28]

En general, el rango de aplicaciones de las espumas metálicas está aumentando y lo que hace que un material poroso o una espuma metálica sea adecuada para una aplicación determinada es bajo diferentes condiciones que se enlistan a continuación:

- **Composición:** Si requerimos la adición de material reforzante a la microestructura o si la aleación es suficiente para proveer las adecuadas propiedades.
- **Morfología:** tipo de porosidad requerida, abierta o cerrada, cantidad de porosidad, tamaño de poro deseado, área superficial interna total requerida.
- **Metalurgia:** Metal, aleación o estado microestructural requerido.
- **Procesado:** Posibilidad de dar la forma geométrica a la espuma, solido celular o producir compuestos entre la espuma y el material con que se encuentre en unión.
- **Economía:** Costos de producción, rentabilidad para producción en volumen.

Existen diferentes grados de “apertura” en la porosidad y esto va de la mano con la aplicación, el rango va desde “completamente cerrada” para estructuras de carga a “muy abierta” para un alto flujo de fluidos, en la Figura 14 se muestra de manera gráfica el rango de porosidad vs posibles aplicaciones de las espumas metálicas. [73]

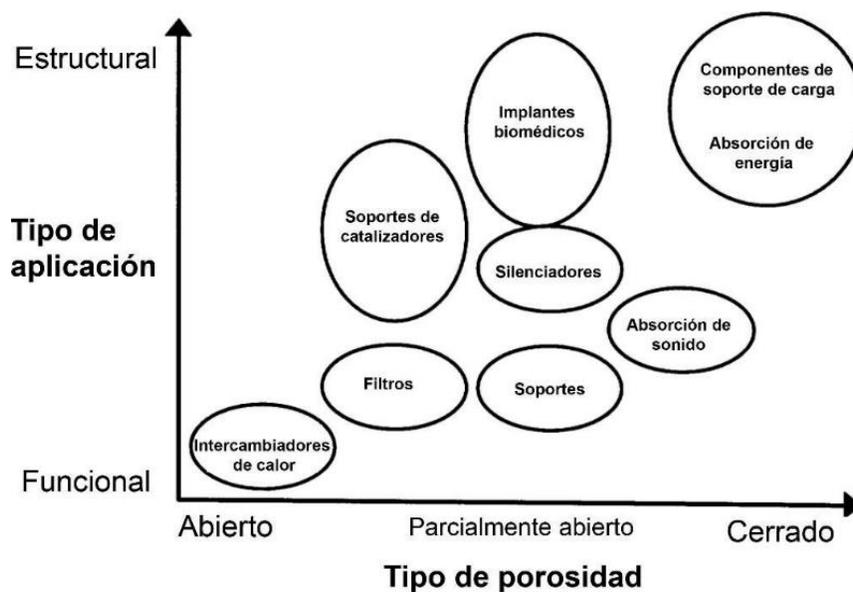


Figura 14 Aplicaciones de metales celulares agrupadas de acuerdo con el grado de apertura requerido y al tipo de aplicación, funcional o estructural. [73]

### 1.6.1. 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 [74]. 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 [75]. Un buen ejemplo de su uso estético es la cafetería Baluarte en Pamplona, España, Figura 15. [76]



Figura 15 Cafetería Baluarte en Pamplona, España, con paneles de espumas metálicas. [77]

### 1.6.2. Industria automotriz

El requisito para la seguridad de los automóviles ha aumentado debido al mayor peso en muchos componentes, sin embargo, hay algunas disputas basadas en que la importancia es disminuir el consumo de combustible y las reducciones de peso de los vehículos. Además, en Japón y en los países europeos, se exigen vehículos con un peso reducido y esta reducción no debe afectar el área de pasajeros. La forma inicial era hacer un nuevo motor compacto o reducir el tamaño de otras partes estructurales para mantener la comodidad de los pasajeros,

pero crea otros problemas como la disipación de calor en la parte del motor o incluso el disminuir la seguridad al reducir la longitud de las partes estructurales en las zonas de choque. Por último, la solicitud de reducir las emisiones acústicas de los vehículos a iniciado una nueva demanda para los amortiguadores o absorbedores de sonido. Todos estos componentes automotrices en los que se han visto cambios por espumas metálicas podemos observarlos en la Figura 16. [73]

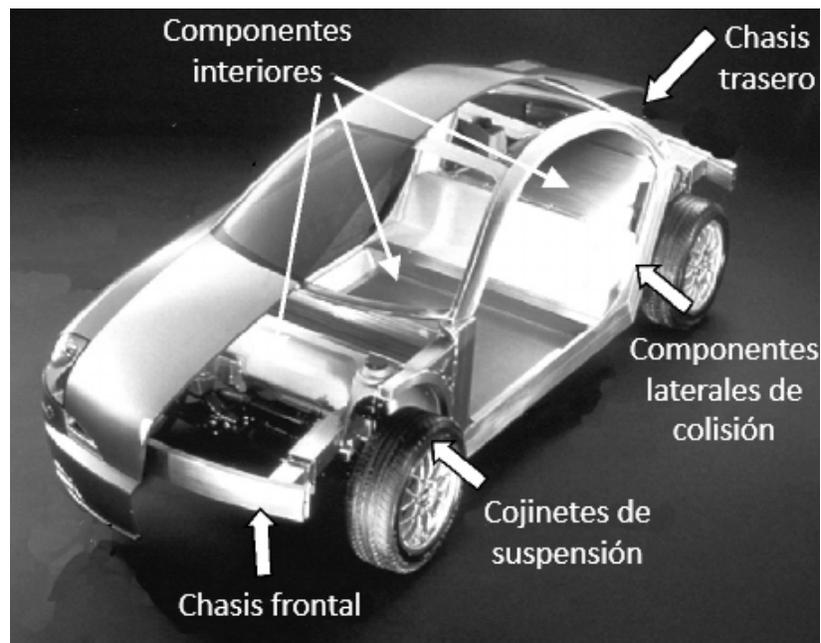


Figura 16 Principales aplicaciones automotrices en el ámbito estructural de las espumas metálicas. [78]

### 1.6.3. Industria aeroespacial

El objetivo principal de los materiales a emplearse en la industria aeroespacial es reducir el peso manteniendo la misma o superior resistencia que los metales normales. En esta industria, las estructuras de panal de abeja de alto precio han sido reemplazadas por paneles de espuma metálica o láminas de aluminio espumado con bajo costo y mayor rendimiento. Una gran ventaja de este tipo de material son sus características mecánicas isotrópicas y la posibilidad de hacer las estructuras compuestas sin usar ningún tipo de unión adhesiva. Como ejemplo, la compañía aeroespacial gigante Boeing, ha considerado la utilización de espuma metálica

para algunos de los componentes de sus aeronaves, especialmente la producida por la técnica de atrapamiento de gas para la fabricación del Dreamliner 787 (Figura 17).

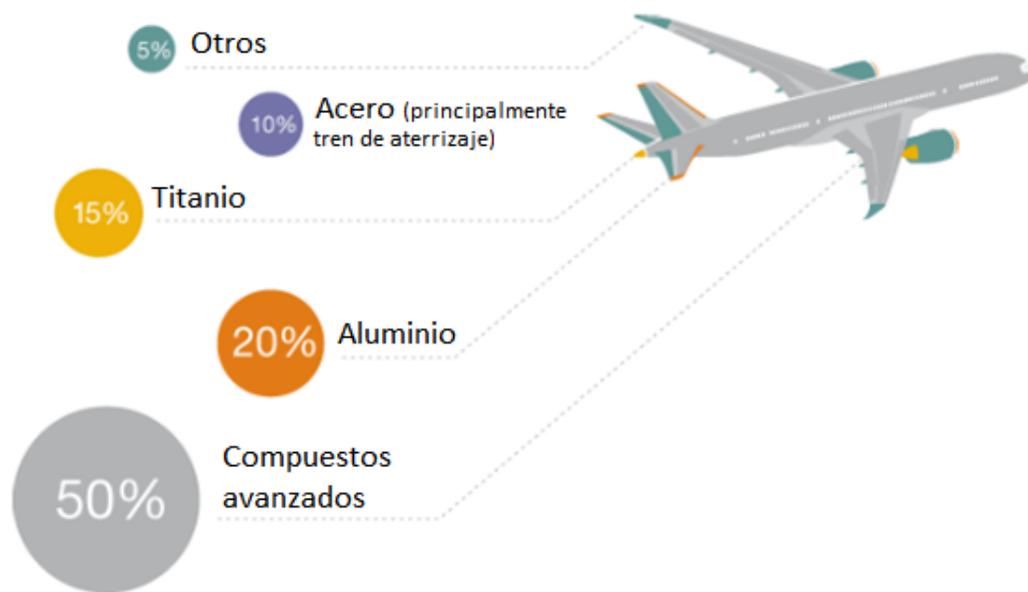


Figura 17 Compuestos aplicados en el fuselaje de un Dreamliner 787. [79]

#### 1.6.4. Industria naval

Los componentes y estructuras livianos también son muy importantes en la construcción de barcos, los grandes paneles de espuma de aluminio en particular, con núcleos de aluminio, se utilizan en los modernos barcos de pasajeros que se construyen a partir de láminas y extrusiones de aluminio. Para aplicaciones de construcción de barcos, la forma en que se unen los diferentes elementos es una cuestión importante para la vida útil de la nave. Los mamparos estructurales, los casilleros pirotécnicos, las plataformas de elevadores y las plataformas de antenas son otros componentes en los cuales los materiales celulares se aplican en cuestiones navales. [73]

### **1.6.5. 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. [80]

### **1.6.6. 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. [24]

### **1.6.7. 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 [81].

## **1.7. Técnicas de análisis y caracterización de espumas metálicas**

Dentro el campo de los materiales porosos es de vital importancia conocer el tamaño y geometría de los poros, ya que, junto con las propiedades del material denso, estas características son las que influyen directamente en las propiedades finales de la espuma. Para poder realizar una buena caracterización ya sea mecánica o microestructural, las probetas deben ser seccionadas y preparadas según el ensayo que se deba realizar. Para disminuir lo más posible el daño a las espumas al momento del corte se puede hacer uso de una sierra con disco de diamante o una máquina de descarga eléctrica [82].

### **1.7.1. Caracterización estructural**

La estructura abarca todo lo que se refiere a la distribución en tres dimensiones de la fase sólida dentro de la espuma, y al tratarse de un arreglo complejo, se utilizan normalmente ciertos parámetros medibles para poder estudiarla. Estos parámetros pueden incluir la densidad y el tamaño de poro, aunque la técnica a usar dependerá del tipo de porosidad (porosidad abierta o cerrada), en el caso de porosidad abierta, se podría imaginar al metal poroso más parecido a un arreglo de elementos tipo ligamentos (o bordes de Plateau) delgados y regulares, en lugar de poros aislados. En este caso, los parámetros más importantes no son los de los poros, sino los relativos a los ligamentos, tales como: la longitud de ligamento, el diámetro del ligamento y la forma de la sección transversal. [23]

En muchas ocasiones las estructuras de las espumas son muy irregulares y con arreglo aleatorio, y esto puede perjudicar los resultados de las pruebas si las muestras no son de tamaño representativo. Mientras las muestras sean más grandes, las variaciones se podrán ir haciendo más pequeñas hasta que los resultados sean lo más reales posibles.

### **1.7.2. Determinación de la densidad**

Para una espuma que presenta una forma regular la manera en la que se determina la densidad es bastante sencilla y común, se mide la masa y se calcula el volumen a partir de las dimensiones de la probeta y se aplica la fórmula general de la densidad:  $\rho = \text{masa} / \text{volumen}$ .

En otras ocasiones donde las espumas tienen geometría muy irregular que dificulta el cálculo del volumen se opta por el método de Arquímedes para el cálculo de la densidad, este método refiere que el volumen de un fluido desplazado por un objeto es igual al volumen del mismo objeto. [27]

### **1.7.3. Microscopía óptica y electrónica de barrido**

Los diferentes tipos de técnicas de microscopía, óptica y electrónica de barrido (SEM por sus siglas en inglés) son herramientas muy importantes en cualquier aspecto de la metalurgia, para la microscopía óptica, la preparación de las muestras de espuma sigue los mismos pasos usados para los materiales densos: el corte, el desbaste y pulido, y el montaje de la muestra en el equipo microscópico. La microscopía óptica se ha utilizado para revelar muchos aspectos de la estructura de las espumas, por ejemplo: con bajas ampliaciones se ha examinado la forma de poro, a escala más pequeña se pueden observar características en el metal incluyendo la presencia de defectos, por ejemplo, óxidos, y para examinar o cuantificar la microestructura, o para caracterizar los recubrimientos superficiales. Para SEM, la preparación de la muestra es mucho más fácil, puesto que la espuma metálica ya es conductora y no hay necesidad de aplicarle algún recubrimiento de oro o carbono. Se puede lograr obtener imágenes de alta resolución, imágenes con menor resolución, pero mayor contraste para obtener la topografía de superficie, y además realizar un análisis EDS (espectroscopia de energía dispersiva de rayos X) para conocer el contenido y distribución química elemental, se utilizan comúnmente ambas técnicas para obtener información sobre la composición elemental de una muestra a nivel microscópico. El SEM-EDS funciona al emitir un haz de electrones sobre la muestra, lo que produce rayos X característicos de la interacción de los electrones con los átomos de la muestra. Estos rayos X son luego detectados y analizados para identificar los elementos presentes en la muestra y determinar su concentración. [83].

#### **1.7.4. Prueba de compresión uniaxial**

En los ensayos de compresión uniaxial, los extremos superior e inferior de la muestra se encuentran en contacto con las placas de carga, y los lados en cambio están libres. Las paredes de poros ubicados en las caras laterales de la muestra son obviamente menos limitadas que las de la mayoría de la muestra y contribuyen menos a la rigidez y resistencia. Como resultado, el valor medido del módulo de Young y la resistencia a la compresión aumenta con una relación creciente entre el tamaño de la muestra al del tamaño de la celda. Como regla general, los efectos de frontera se hacen insignificantes, si la relación del tamaño de la muestra con el tamaño de la celda es mayor que aproximadamente 7. Las pruebas de compresión uniaxial en espumas se realizan mejor en muestras cilíndricas con una relación de altura a espesor superior a 1.5. [84]

#### **1.8. Métodos de elementos finitos (MEF)**

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 softwares 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 MEF es una técnica numérica utilizada para resolver problemas de ingeniería y física, y consiste en discretizar un dominio continuo en elementos finitos, de manera que se pueda aproximar la solución a través de ecuaciones matemáticas.

El MEF se divide en tres pasos principales: discretización, formulación matemática y solución del sistema de ecuaciones. En el primer paso, se divide el dominio continuo en elementos finitos, que son formas geométricas simples (triángulos, cuadriláteros, tetraedros,

hexaedros, etc.) que se ajustan al contorno del problema. Luego, se establecen las condiciones de contorno, que son las restricciones que se imponen al sistema en los bordes del dominio.

En el segundo paso, se define una formulación matemática para cada elemento finito, que relaciona las variables desconocidas (como la temperatura, la tensión, la velocidad, etc.) con las conocidas (como las condiciones de contorno y las propiedades del material). Esta formulación matemática se expresa en forma de ecuaciones, que se combinan para obtener un sistema de ecuaciones global para todo el dominio.

Finalmente, en el tercer paso se resuelve el sistema de ecuaciones global, utilizando técnicas numéricas. Las soluciones numéricas arrojan una solución aproximada de la solución real del problema, y se evalúa su precisión a través de técnicas de verificación y validación.

El MEF es una herramienta muy poderosa para resolver problemas de ingeniería y física que no tienen solución analítica, o que requieren un alto grado de complejidad para su resolución. Su aplicación se extiende a áreas como la mecánica de sólidos, la mecánica de fluidos, la transferencia de calor, el electromagnetismo, entre otras. [85], [86]

### **1.8.1. 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  $\Delta$ , 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  $\Delta$  como el anterior, sino que es una función vectorial  $u$ , que indica cuáles son las deformaciones de cualquier punto, y que tiene tres componentes escalares [87]:

$$u = \begin{bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (7)$$

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 permite la generación de líneas, áreas y volúmenes. La denominación del nombre Keypoint puede cambiar de acuerdo con el 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 nodos.
- 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.

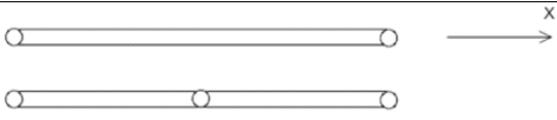
- Para cada elemento, existe un sistema de fuerzas concentradas en los nodos, que equilibran a las tensiones existentes en el contorno del elemento, y a las fuerzas exteriores actuantes sobre él. [87]

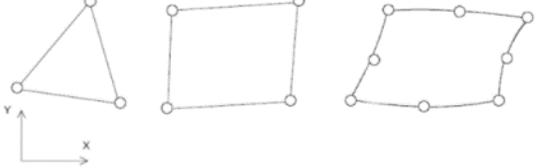
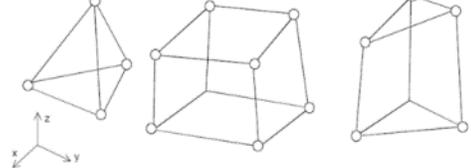
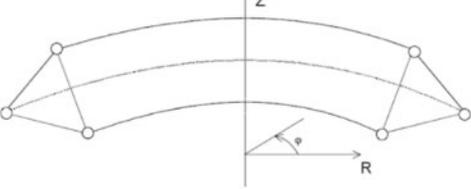
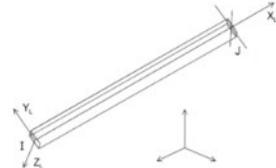
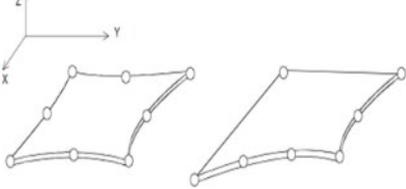
La solución de cualquier problema utilizando el Método de los Elementos Finitos contempla los siguientes pasos:

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.
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.

En la Tabla 2 se aprecian algunos elementos utilizados para la discretización.

Tabla 2 Principales elementos utilizados en la discretización en ANSYS 18.1. [87]

Elemento	Representación
Elasticidad unidimensional	

<p>Elasticidad bidimensional</p>	
<p>Elasticidad tridimensional</p>	
<p>Problemas axisimétricos</p>	
<p>Vigas</p>	
<p>Flexión de placas planas</p>	

### 1.8.2. Software de simulación ANSYS 18.1

ANSYS 18.1 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 18.1 ofrece una interfaz gráfica sencilla de trabajo en la que alguien inexperto puede acostumbrarse de manera rápida a trabajar. Los principales módulos de ANSYS 18.1 son: Multiphysics, Mechanical, Structural, Professional, Design Space, Emag (simulaciones Electromagnéticas), Paramesh (mallas adaptativas). 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 analizando diferentes fenómenos a la vez, como análisis térmico y a la par un análisis estructural. [87]

### **1.8.3. Uso de MEF para análisis de propiedades mecánicas de espumas y materiales compuestos**

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. [87]. Como ejemplo se puede observar en la Figura 18, se tienen 3 diferentes elementos

representativos de volumen usados para la modelación de espumas metálicas convencionales y espumas compuestas.

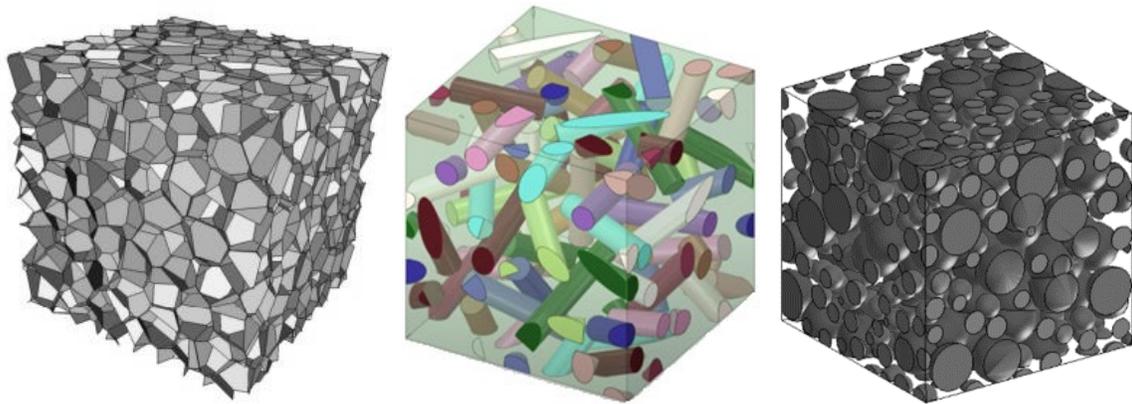
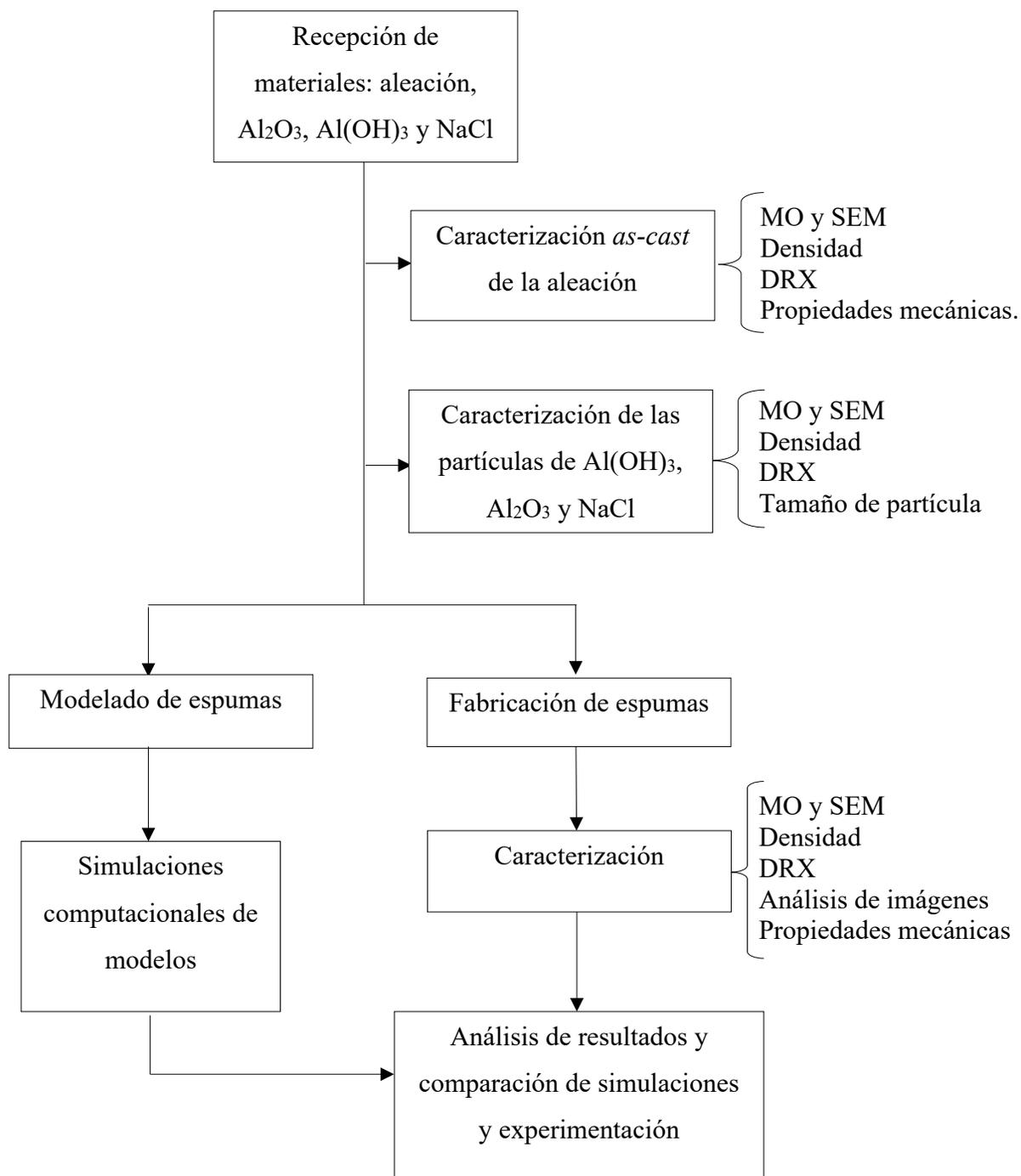


Figura 18 Modelos obtenidos por MEF a partir de un elemento representativo del volumen de la espuma metálica convencional (izquierda), de un material compuesto reforzado por fibras cortas (centro), y para una espuma compuesta reforzada con partículas (derecha).  
[87], [88]

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 18.1 y realizar la simulación.

# 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

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 3. 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. Esta composición química fue comprobada realizando análisis mediante EDS cuando se analizó la microestructura.

Tabla 3 Composición química de la aleación 332 usada, en % en peso. [89]

Elemento	Al	Si	Cu	Zn	Fe	Mn	Sn
%	83.7	10.7	3.6	0.8	0.7	0.4	0.1

#### 2.1.1. Partículas espaciadoras

Se usó sal común (NaCl) de uso comercial como partícula espaciadora en una granulometría controlada para la infiltración de la aleación. En la Figura 19A puede observarse una imagen de SEM de las partículas de sal mencionadas, y en la 19B se muestra un conteo por medio de análisis de imagen de las partículas usadas para la fabricación de las espumas, la granulometría de estas partículas tiene un tamaño promedio de 4.36  $\mu\text{m}$  y una desviación estándar de 0.37.

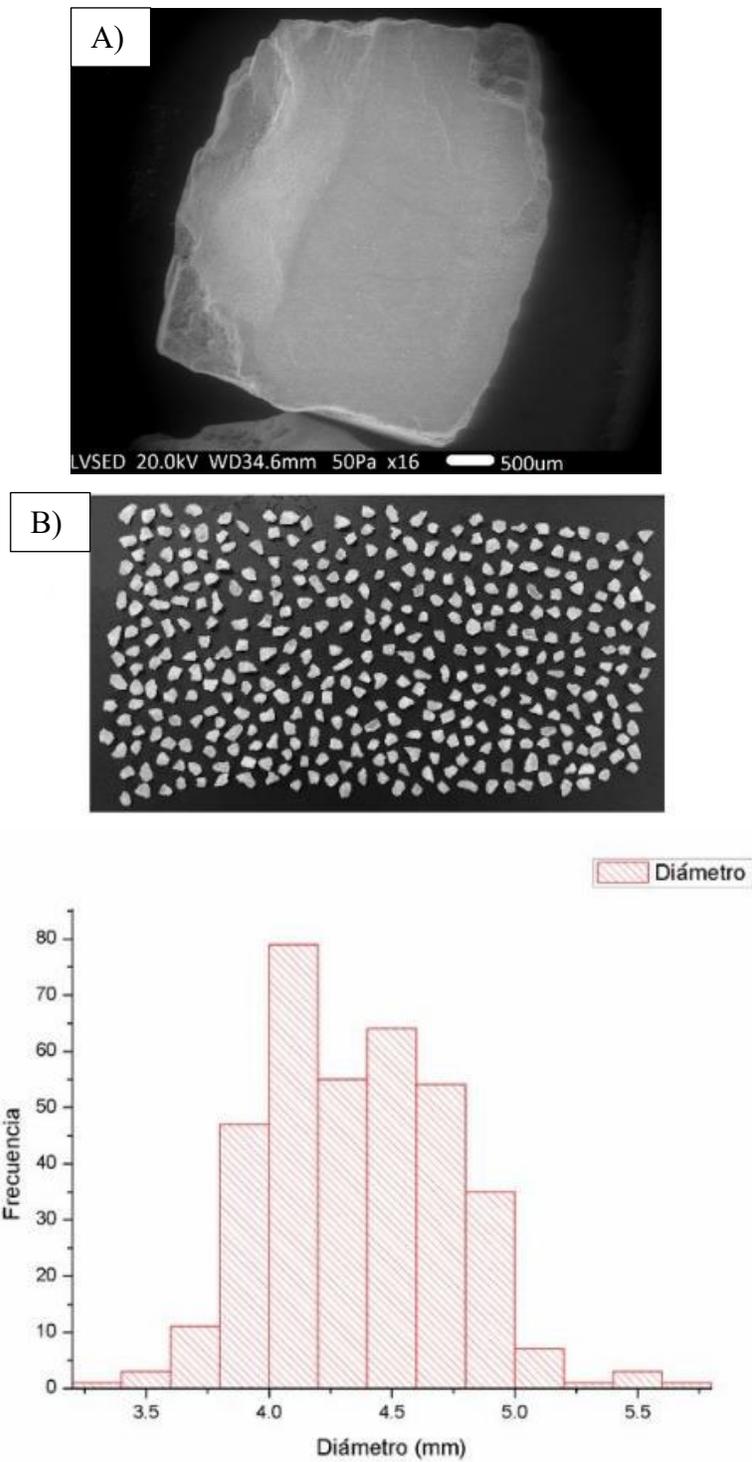


Figura 19 A) Micrografía obtenida mediante SEM de una partícula de NaCl. B) Análisis de imagen para tamaño de partícula e histograma de frecuencias de tamaños de partículas de NaCl.

### 2.1.2. Partículas reforzantes

Como se comentó anteriormente, las partículas de NaCl son de 4-4.5 mm aproximadamente de diámetro. Tomando esto en cuenta se seleccionaron esferas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  de 2-2.5 mm de diámetro como materiales reforzantes, lo cual se aprecia en la Figura 20A, respectivamente. Estos materiales fueron adquiridos de CS Ceramic para el caso de la alúmina y Alfa Aesar para el hidróxido de aluminio. El objetivo de este tamaño es que las esferas se ubiquen en las paredes por las que el aluminio infiltra la sal y así sirva como refuerzo para dichas paredes ante presiones de colapso. En la Figura 20B también se aprecian los histogramas de frecuencias obtenidos a partir del conteo realizado mediante análisis de imagen.

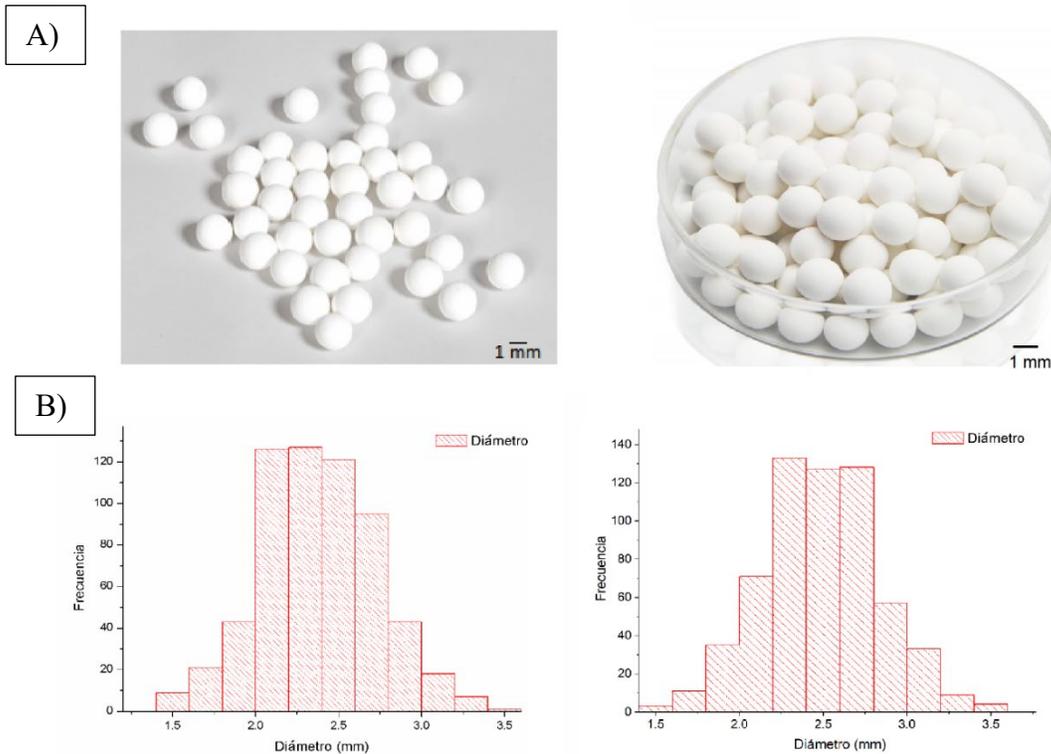


Figura 20 A) Esferas de alúmina (izquierda) y de hidróxido de aluminio (derecha). B) histogramas de frecuencias de tamaños de esferas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (abajo izquierda), y de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  (abajo derecha).

En la Figura 21 se aprecian los arreglos hipotéticos del acomodo de las partículas que se originaría al mezclar ambos materiales. Como se observa, las partículas reforzantes se ubicarían en las paredes entre los poros.

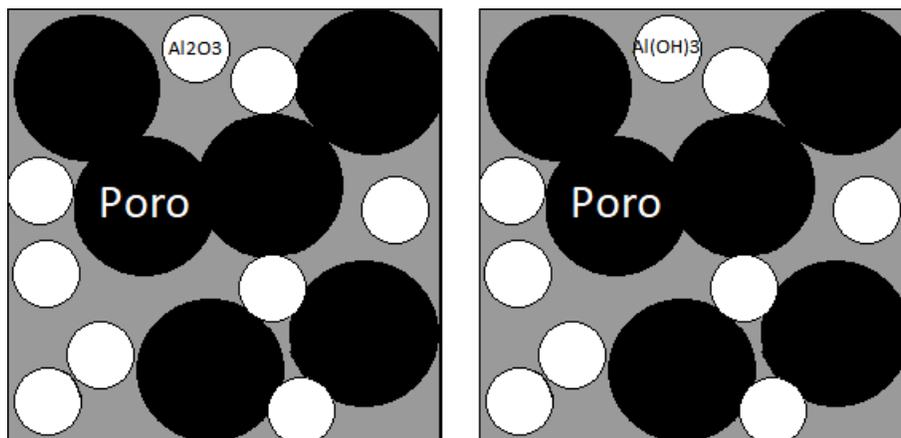


Figura 21 Arreglo hipotético del acomodo de las partículas dentro del compuesto.

## 2.2. Dispositivo para infiltración

El equipo para realizar el proceso de infiltración es un desarrollo propio del equipo de trabajo del IIM-Unidad Morelia, el cual se encuentra bajo registro de patente con el número MX/E/2017/061896, cuyos inventores somos Ismeli Alfonso, Ignacio Figueroa y Juan Carlos Carranza y cuya metodología de uso se encuentra publicada en uno de nuestros trabajos, [90]. Las dimensiones y parte de este dispositivo se muestran en las Figuras 22 A y B, respectivamente, y consiste en una cámara donde se lleva a cabo la infiltración (1 en Figura 23B), una tapa (2) que cuenta con un tubo para el transporte de gas (3), sistema de manejo (4), y boquilla de inyección de gas (5). Para sujetar el dispositivo y evitar que se salga el material dentro de la cámara de infiltración, el dispositivo cuenta con una cuchara (7) y un sujetador (8) unido a la cuchara y para manipular el dispositivo.

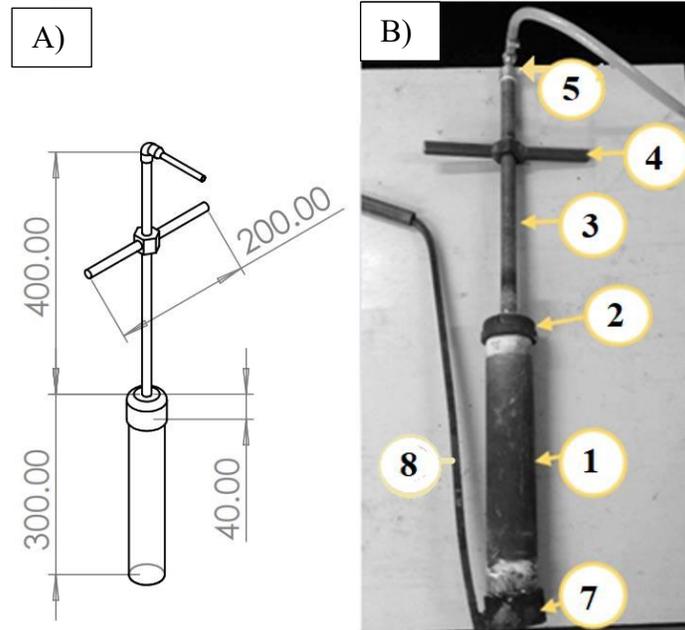


Figura 22 Diseño de dispositivo usado para el proceso de infiltración. A) Modelo y B) dispositivo real fabricado.

Este dispositivo favorece el proceso de infiltración, ya que con él es posible fabricar las espumas de manera sencilla con el apoyo de un horno que posea un orificio en su parte superior, donde se introduce el dispositivo, como se observa en la Figura 23A. La fabricación de espumas se facilita 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 gravedad. De lo contrario se procede a la inyección de gas para promover la infiltración. El dispositivo está construido de acero inoxidable 304L, ya que al introducirlo al horno este acero no sufre desgaste por oxidación debido a las temperaturas de proceso. El horno usado para introducir el dispositivo es un horno de resistencias eléctricas de marca PREFINSA (Figura 23B), con temperatura máxima de operación de 1200 °C.

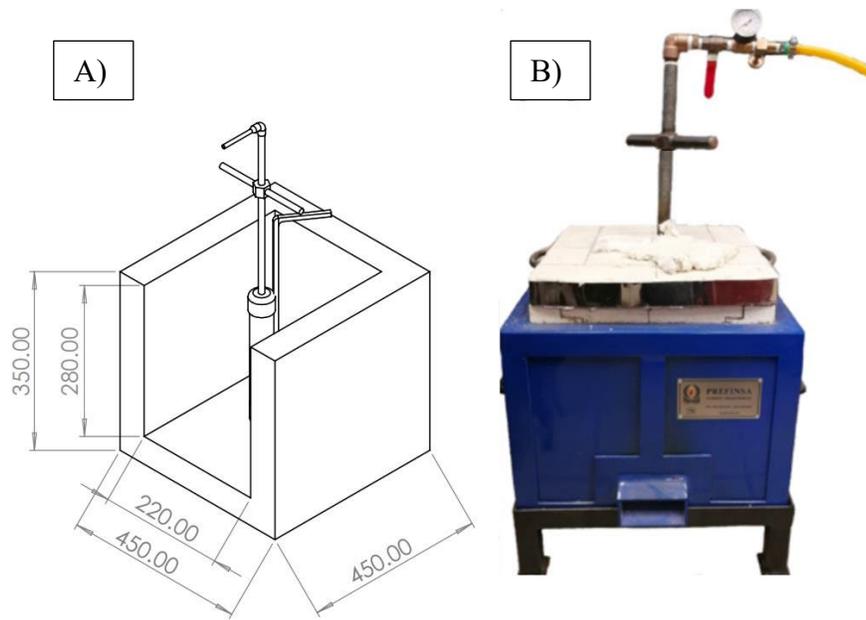


Figura 23 Arreglo del dispositivo dentro del horno. Se observa el aditamento para la inyección de gas y así forzar la infiltración. A) Modelo, y B) arreglo experimental real.

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. Una característica importante que resaltar es una modificación que se le realizó al equipo con el fin de facilitar el procedimiento de extracción de las espumas, el cual en ocasiones se complicaba aun teniendo nitruro de boro como material antiadherente. Dicho cambio fue cortar la cámara de infiltración por la mitad de tal manera que se tienen 2 partes, y puede apreciarse en la Figura 24. Durante el inicio de la fabricación de las espumas la cámara se sujeta con un par de abrazaderas, de manera que pueda contener todo el material dentro de ella. Una vez realizado el proceso de infiltración se retiran las abrazaderas y la cámara se abre pudiendo extraer la espuma con mayor facilidad y evitando cualquier tipo de deformación por el esfuerzo físico al intentar extraerla cuando la cámara era una sola pieza.



Figura 24 Modificación realizada al dispositivo de fabricación de las espumas: A) partes, B) ensamblado.

### 2.3.Fabricación de las espumas

Para poder llevar a cabo la fabricación de las espumas se llevaron a cabo una serie de pruebas para poder determinar las condiciones idóneas de producción. Aunque existe mucha información en la literatura sobre los procesos de fabricación de espumas metálicas de aluminio por el método de infiltración, la diferencia en esta ocasión fue el dispositivo usado, que como se mencionó es un desarrollo de nuestro equipo de trabajo. Las pruebas llevadas a cabo consistieron en el uso de un rango de temperaturas y tiempos para poner a prueba la capacidad de infiltración de la aleación. Los rangos de temperatura usados fueron 670 °C, 700 °C y 730 °C, mientras que los tiempos de proceso van de 10 minutos hasta 30 minutos de permanencia dentro del dispositivo. En principio, como la aleación se clasifica como aleación para fundición, no sería necesario el uso de una presión de gas externa para forzar la infiltración. Después de realizadas estas pruebas, se pudo comprobar que en algunos casos no ocurría la infiltración de manera correcta, lo cual se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4 Ensayos realizados para encontrar los parámetros de fabricación de las espumas y los resultados que arrojaron.

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Resultado
670	10	No infiltra
670	20	infiltración incompleta
670	30	infiltración completa
700	10	infiltración incompleta
700	20	infiltración completa
700	30	infiltración completa
730	10	infiltración completa
730	20	infiltración completa
730	30	infiltración completa

Habiendo encontrado las condiciones óptimas a partir de las cuales fue posible el proceso de infiltración (670 °C por 30 min), se estableció el procedimiento para la manufactura de las espumas. Tratando de reducir el tiempo de proceso de infiltración se inyectó argón (a pesar de no ser necesario) a un flujo de 30 ft<sup>3</sup>/h por un periodo aproximado de 30 segundos propiciando una infiltración completa. Esto para evitar falta de infiltración, como podrá observarse más adelante.

Durante la determinación de las condiciones idóneas para el proceso de fabricación se llevaron a cabo pruebas de acuerdo con la Tabla 4 mostrada anteriormente, tal como podemos observar en la Figura 25, en el inciso A es un ejemplo de una espuma en donde existió una infiltración incompleta debido a que se perdió material por la base del dispositivo, y el inciso B representa una espuma en donde la infiltración no se llevó a cabo.

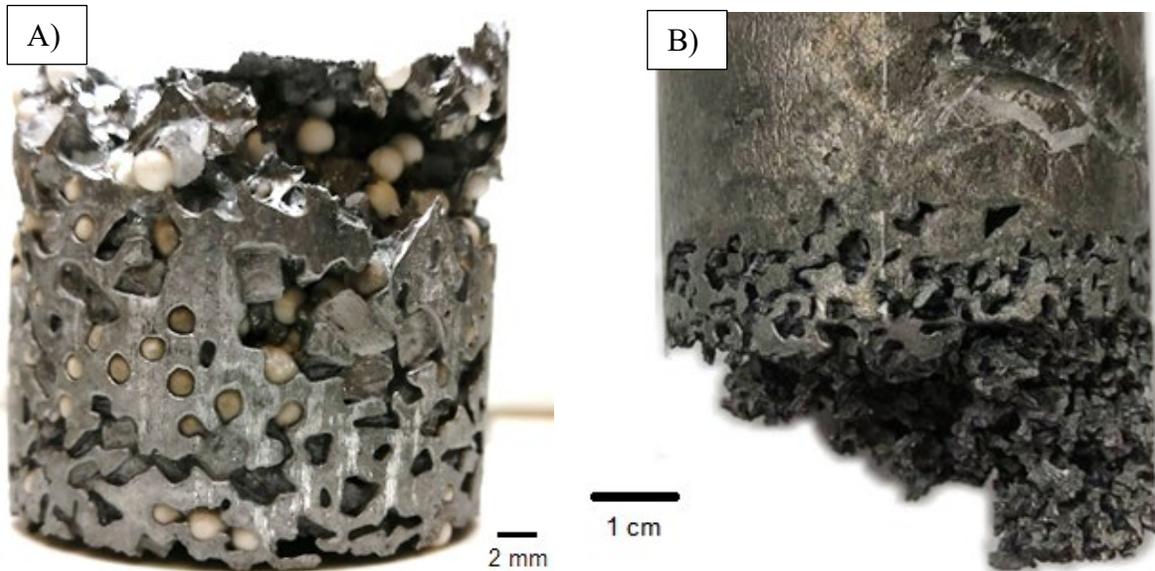


Figura 25 Espumas con defectos debidos a las condiciones de procesamiento.

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

- 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.

- Preparación del material espaciador y el material de refuerzo

Para formar la matriz compuesta (preforma a infiltrar) se realizó la mezcla de las partículas espaciadoras (NaCl) y del material reforzante ( $Al_2O_3$  o  $Al(OH)_3$ , según sea el caso). Anterior a todo esto, ambos materiales fueron tamizados como se ha mencionado previamente con el fin de obtener las partículas con los tamaños deseados. Una vez que se obtuvieron los tamaños adecuados, se realizó el vaciado de los materiales dentro de la cámara para infiltración, para que éstos tuvieran un acomodo aleatorio dentro del cuerpo de la preforma.

De acuerdo con 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 y material de refuerzo 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 esto:

- Relación 50% NaCl-50% refuerzo: 132.82 g de partículas espaciadoras y 132.82 g de material reforzante.
- Relación 65% NaCl-35% refuerzo: 172.67 g de partículas espaciadoras y 92.98 g de material reforzante.
- Relación 80% NaCl-20% refuerzo: 212.52 g de partículas espaciadoras y 53.13 g de material reforzante.

- Fundición

Una vez que el dispositivo está dentro del horno, conteniendo la matriz compuesta y el aluminio sobre ésta 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.

- Infiltración

Posterior a la llegada del horno a la temperatura deseada, el aluminio tarda aproximadamente 20 minutos en fundir completamente. En este punto el gas (Ar) se inyecta ajustando el flujo y abriendo el suministro hacia el dispositivo, esto hace que se force al metal fundido para que se introduzca en la preforma. A 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.

- Disolución de las partículas espaciadoras.

Una vez que se fundió el aluminio y se infiltró, y habiéndose enfriado, el compuesto de aluminio-NaCl-refuerzo se extrajo de la cámara de infiltración y se introdujo en agua durante aproximadamente 5 horas para promover la 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.

## **2.4. Caracterización**

### **2.4.1. Caracterización metalográfica**

Como parte de esta etapa, se realizó la caracterización mediante MO y SEM tanto de las probetas obtenidas de la aleación en estado as-cast como de las espumas compuestas fabricadas por infiltración. 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 partícula de 0.05  $\mu\text{m}$ .

#### **2.4.1.1. Microscopio óptico**

Este tipo de microscopio es importante ya que nos permite realizar una observación preliminar antes de pasar a un análisis a escalas mayores. En este trabajo se utilizó un microscopio metalográfico marca Labomed modelo Med 400 para el análisis microestructural de los materiales.

#### **2.4.1.2. Microscopio electrónico de barrido**

Después de una caracterización preliminar en el microscopio óptico es muy útil llevar a cabo la toma de imágenes en SEM, ya sea para completar la identificación de fases como para analizar posibles interfaces y otros fenómenos. Este estudio se realizó en el laboratorio de microscopía (LAMIC) de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad Morelia de la UNAM, donde se cuenta con un microscopio marca JEOL JSM IT300LV. Este equipo cuenta con capacidad para observar muestras con electrones secundarios operado a 20kV, retrodispersados, y análisis mediante EDS por medio de un equipo marca OXFORD EDS X-MAX. La técnica de EDS es muy útil, ya que permite el análisis composicional de los materiales.

### 2.4.1.3. Difracción de Rayos-X (DRX)

Se utilizó Difracción de Rayos-X (DRX) con la finalidad de analizar la aleación matriz, las partículas reforzantes y las espumas compuestas resultantes. Esto con la finalidad de estudiar posibles modificaciones microestructurales y reacciones interfaciales. Este estudio se realizó utilizando un difractómetro Bruker D8 Advance XRD, operado a 30 kV y 25 mA, con radiación  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$ ).

### 2.4.2. 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 con la norma ASTM E9-09, "Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature". Los ensayos se realizaron utilizando probetas de 30 mm de diámetro y 25 mm de alto, sumado a la norma, las dimensiones de estas probetas y modelos está basada en varios estudios realizados que demuestran que un cilindro con una relación de aspecto  $D / h = 1$  podrá resistir cargas más altas que un cilindro con una relación de aspecto de 2 [91]. 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) = 1.2.

### 2.4.3. Medición de 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 8.

$$\rho = m/V \dots \dots \dots (8)$$

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

$$\rho = \left( w_a * \left[ \rho_{fl} - 0.0012 \frac{g}{cm^3} \right] / F_{corr} * G \right) + 0.0012 \frac{g}{cm^3} \dots \dots \dots (9)$$

Donde:

$w_a$  = Peso en aire de la muestra.

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

$G = w_a - w_{fl}$

$\rho_{fl}$  = Densidad del etanol a T ambiente

## 2.5. Modelado y simulación

### 2.5.1. Modelos de espumas

En esta sección se describe la metodología para la realización del estudio mediante el método FEM utilizando el software ANSYS 18.1. Para esto, se realizan una serie de simulaciones de ensayos de compresión sobre espumas de matriz de Aluminio reforzadas con las esferas de alúmina o hidróxido con las porosidades propuestas anteriormente. Comenzando con la selección de las propiedades mecánicas de los respectivos materiales, se definen las condiciones de contorno apropiadas para la realización del ensayo de compresión y finalmente, utilizando los datos obtenidos, se determina el módulo de Young de las diferentes probetas.

Para la realización de los modelos computacionales se hizo uso de los programas (software) Digimat versión 2017.0, SolidWorks versión 2022 y ANSYS 18.1. Las espumas se modelaron con dimensiones de 30 mm de diámetro y 25 mm de altura, con la finalidad de replicar las probetas reales necesarias para el ensayo de compresión, siguiendo una relación

diámetro/alto de 1.2 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 cantidad de 50%-50%, 65%-35% y 80%-20% de NaCl-refuerzo, respectivamente. Los poros fueron modelados como esferas, lo cual ha demostrado ser eficiente en otros trabajos [92]. Para asegurar resultados confiables todas las geometrías cumplen la restricción propuesta por S.K. Sebsadji y colaboradores [93] y L. Perez y colaboradores [94], donde se concluye que el valor representativo de volumen (RVE) de todas las geometrías debe ser tener valores entre 2.4 a 3.7 como mínimo para garantizar simulaciones numéricas confiables. El valor representativo de volumen se define por:

$$RVE = \frac{D_{probeta}}{d_{refuerzo}} \dots\dots\dots (10)$$

Dicha relación da un resultado de 15, por lo que las dimensiones son válidas para el modelado. Incluso la relación con la celda (poros) es suficiente, pues ese valor da como resultado 7.5. Esto garantiza que el tamaño seleccionado de RVE se encuentre dentro de la región a partir de la cual los valores de las simulaciones sean constantes sin importar el tamaño del RVE (convergencia).

**2.5.1.1. Generación de modelos de espumas compuestas en Digimat**

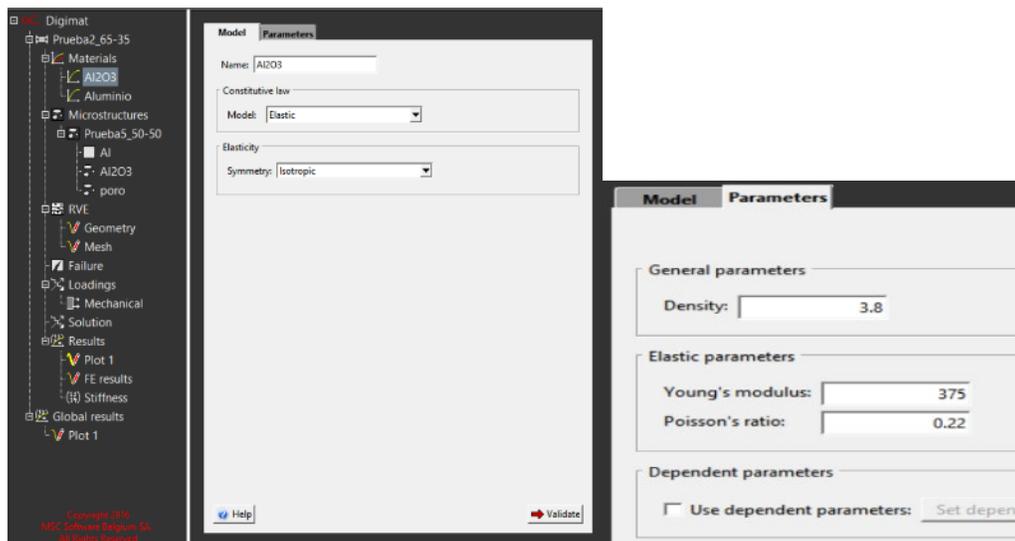
Para la creación de los modelos se parte de generar las geometrías de los materiales compuestos haciendo uso del software Digimat, ya que este programa resulta bastante útil para crear modelos de esta naturaleza y es sencillo de programar. La única limitante que posee esta herramienta es que se generan modelos cúbicos y en este trabajo se usan modelos cilíndricos para replicar las espumas reales. Para solucionar dicho problema, se extrae el cilindro haciendo uso de otro software que se detalla en el siguiente apartado. El proceso para generar las geometrías se detalla enseguida:

Se crean los materiales que conformarán el modelo en el apartado especial "Materials", donde se pueden configurar las propiedades mecánicas de cada componente. Para esto se siguieron los parámetros mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5 Parámetros para la creación de los modelos en Digimat.

	Fracción volumétrica poros (%)	Fracción volumétrica refuerzo (%)	Tamaño poro (mm)	Tamaño refuerzo (mm)
<b>50% NaCl-50% refuerzo</b>	32.5	32.5	4	2
<b>65% NaCl-35% refuerzo</b>	42.25	22.75	4	2
<b>80% NaCl-20% refuerzo</b>	52	13	4	2

Las configuraciones usadas para los modelos de la alúmina, el hidróxido y la matriz se muestran en la Figura 26.



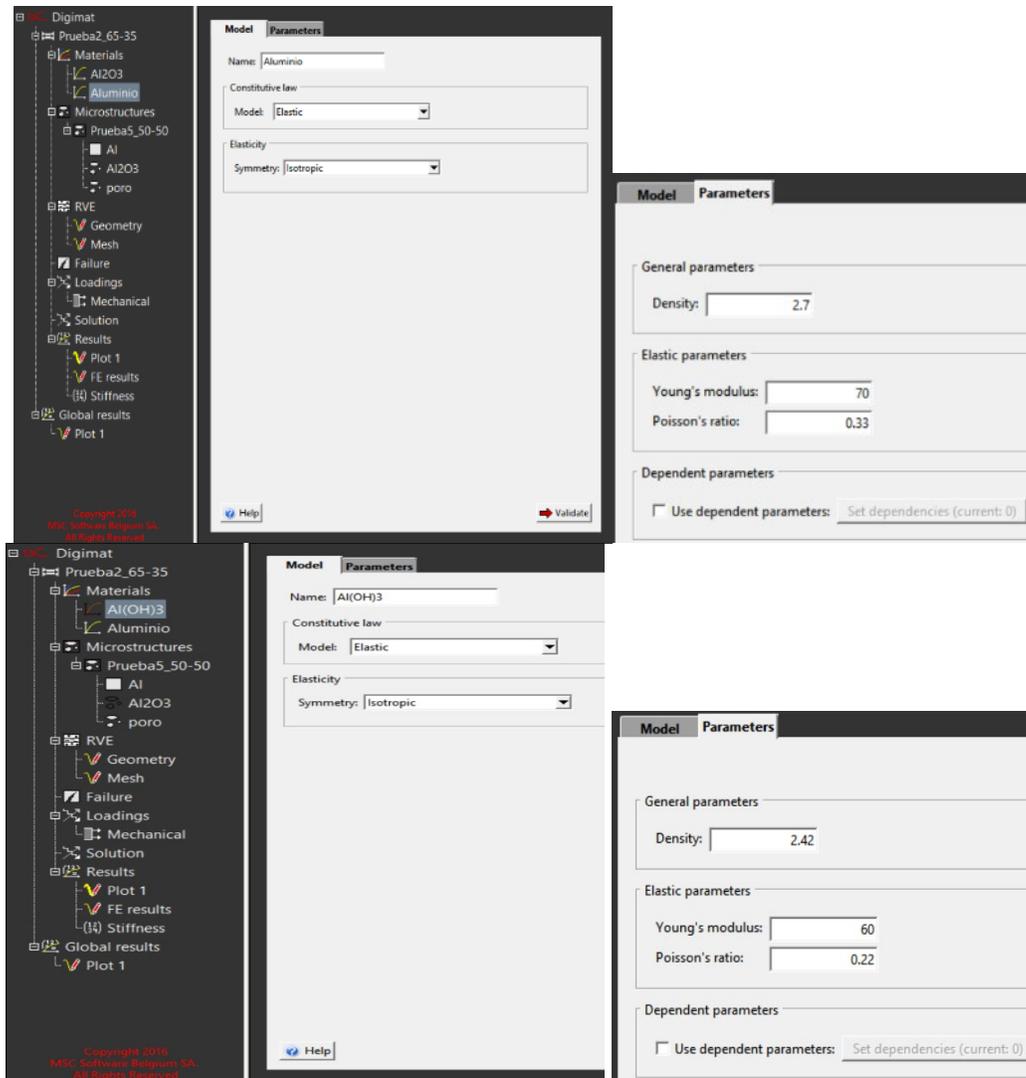


Figura 26 Propiedades mecánicas usadas para la generación de los modelos en Digimat.

Una vez creados los materiales, se procede a la creación de las microestructuras. En este apartado se configura el comportamiento que tendrá cada uno de los materiales dentro de la geometría, en nuestro caso se configura como sigue: El aluminio es matriz, la alúmina y el hidróxido de aluminio serán una inclusión y finalmente los poros se configuran como espacios vacíos, esta configuración se observa en la Figura 27. Sumado a esta configuración, se agregan las características de cada elemento, como lo es la cantidad de elementos que requerimos se encuentren dentro de nuestro RVE, así como los tamaños de cada elemento.

**Digmat**

- Prueba2\_65-35
  - Materials
    - Al2O3
    - Aluminio
  - Microstructures
    - Prueba5\_50-50
      - Al
      - Al2O3
      - poro
  - RVE
    - Geometry
    - Mesh
    - Failure
  - Loadings
  - Mechanical
  - Solution
  - Results
    - Plot 1
    - FE results
    - Stiffness
  - Global results
    - Plot 1

**Type**

Microstructure name: Prueba5\_50-50  
 Phase name: Al

Phase type

- Matrix
- Inclusion
- Void
- Continuous fiber
- Yarn
- Strand

Phase material

Material: Aluminio

**Digmat**

- Prueba2\_65-35
  - Materials
    - Al2O3
    - Aluminio
  - Microstructures
    - Prueba5\_50-50
      - Al
      - Al2O3
      - poro
  - RVE
    - Geometry
    - Mesh
    - Failure
  - Loadings
  - Mechanical
  - Solution
  - Results
    - Plot 1
    - FE results
    - Stiffness
  - Global results
    - Plot 1

**Type**   **Parameters**   **Advanced parameters**

Microstructure name: Prueba5\_50-50  
 Phase name: Al2O3

Phase type

- Matrix
- Inclusion
- Void
- Continuous fiber
- Yarn
- Strand

Surface treatment

Interface behavior: Perfectly bonded  
 Interface property:   
 Inter-phase: Continuum material

Phase material

Material: Al2O3

**Type**   **Parameters**   **Advanced parameters**

Phase fraction

- Volume fraction: 0.3255 [0,1]
- Mass fraction: 0.645126 [0,1]

Phase definition

Define phase by:  Number of inclusions: 30  
 Inclusion size and aspect ratio  
 Inclusion size and diameter

Shape parameter

Inclusion shape: **Elipsoid**  
 Inclusion CAD file:

Aspect ratio: 1 ]0,∞[  
 Diameter: 2

Size

- Fixed: 2
- Distribution: Uniform

**Digmat**

- Prueba2\_65-35
  - Materials
    - Al2O3
    - Aluminio
  - Microstructures
    - Prueba5\_50-50
      - Al
      - Al2O3
      - poro
  - RVE
    - Geometry
    - Mesh
    - Failure
  - Loadings
  - Mechanical
  - Solution
  - Results
    - Plot 1
    - FE results
    - Stiffness
  - Global results
    - Plot 1

**Type**   **Parameters**   **Advanced parameters**

Microstructure name: Prueba5\_50-50  
 Phase name: poro

Phase type

- Matrix
- Inclusion
- Void
- Continuous fiber
- Yarn
- Strand

Surface treatment

Interface behavior: Perfectly bonded  
 Interface property:   
 Inter-phase: Continuum material

Phase material

Material: Al2O3

**Type**   **Parameters**   **Advanced parameters**

Phase fraction

- Volume fraction: 0.3255 [0,1]
- Mass fraction: 0 [0,1]

Phase definition

Define phase by:  Number of inclusions: 30  
 Inclusion size and aspect ratio  
 Inclusion size and diameter

Shape parameter

Inclusion shape: **Elipsoid**  
 Inclusion CAD file:

Aspect ratio: 1 ]0,∞[  
 Diameter: 4

Size

- Fixed: 4
- Distribution: Uniform

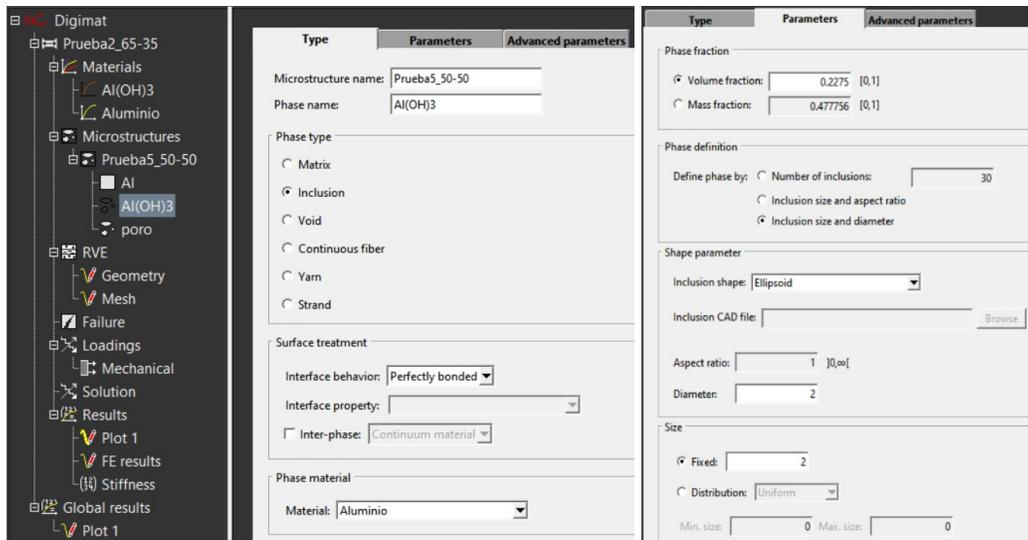


Figura 27 Configuración del comportamiento que tendrá cada componente del modelo dentro de la geometría.

Posterior a la creación de los materiales y las fases presentes, se configura el RVE dándole las dimensiones deseadas. En nuestro caso se mantuvo la configuración en automático para que el software dimensione el modelo de acuerdo con las características ingresadas, lo cual se aprecia en la Figura 28.

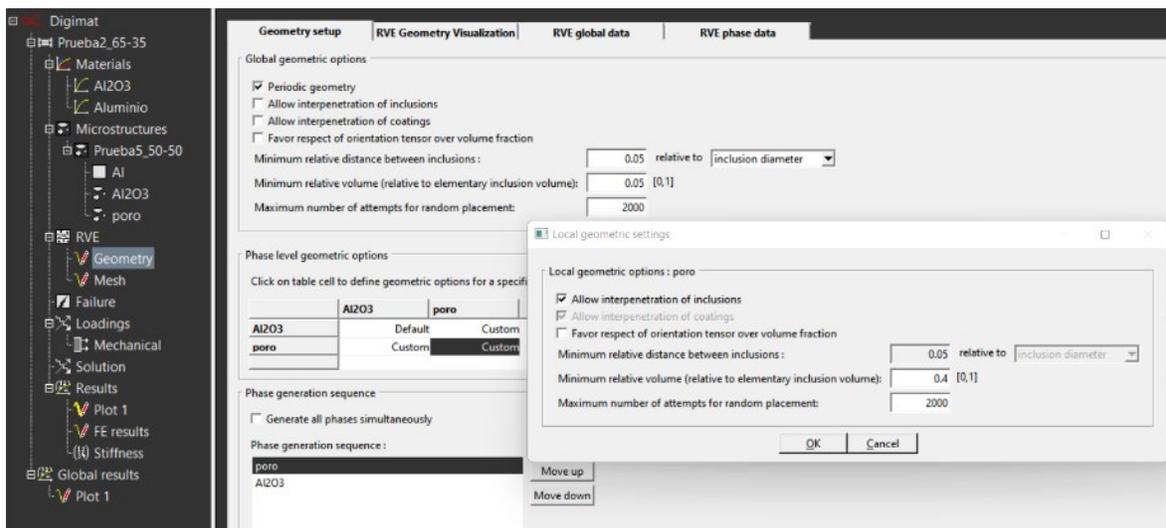


Figura 28 Configuración del RVE.

Después de lo anterior se configura el comportamiento de las fases, esto es, dando una distancia relativa entre inclusiones (refuerzos), si deseamos que las inclusiones se puedan inter penetrar o no, de igual manera con los poros. En nuestro caso, se mantuvieron las opciones por default para comprobar si los modelos resultaban idóneos con estas opciones estándar, sin embargo, se realizaron modificaciones en permitir la interpenetración de los poros, ya que como es sabido la porosidad es interconectada dentro de la espuma y excluir el solapamiento entre poros y refuerzo, de esta manera las partículas reforzantes quedan embebidas dentro de la matriz metálica.

Como resultado de los procedimientos anteriormente planteados, se obtuvieron las 3 geometrías creadas de los materiales compuestos como se representa en la Figura 29, donde las partículas azules representan a las partículas espaciadoras (o poros), y por otro lado las pequeñas esferas rojas representan el material reforzante ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  o  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ).

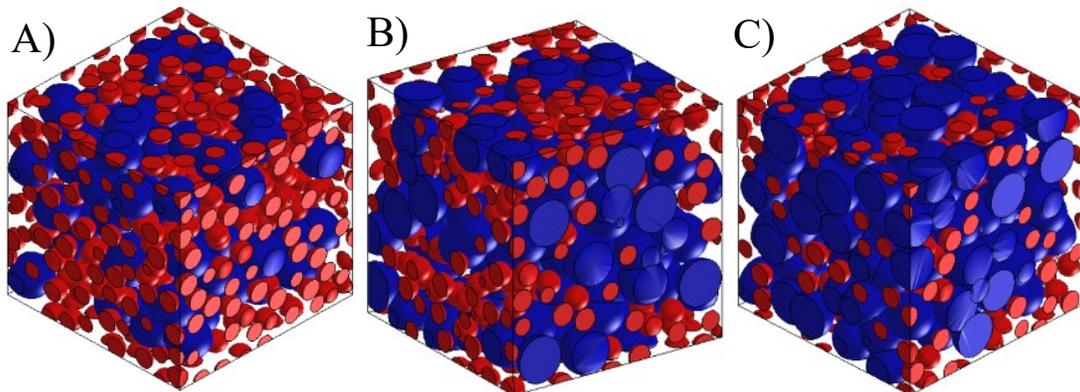


Figura 29 Modelado de espumas compuestas usando Digimat. De izquierda a derecha: Espuma con A) 50% NaCl-50% Refuerzo, B) 65% NaCl -35% Refuerzo y C) 80% NaCl - 20% Refuerzo.

#### 2.5.1.2. Extracción de espumas cilíndricas en SolidWorks

Una vez que se obtienen los modelos cúbicos del material compuesto, estos se exportan y se cargan en el software SolidWorks 2022 para poder extraer el modelo cilíndrico que será sometido a esfuerzos de compresión. Como se puede observar en la Figura 30, en una de las caras del cubo se crea un croquis y se realiza la operación de corte para obtener un modelo

cilíndrico. De esta manera se obtiene la probeta que posteriormente se cargará dentro de ANSYS 18.1.

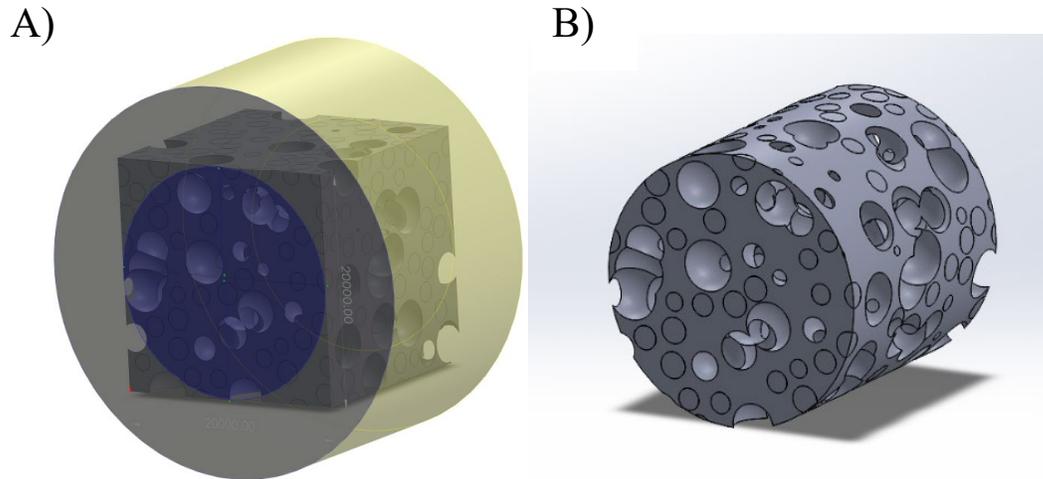


Figura 30 Obtención de la probeta cilíndrica a partir del cubo generado en Digimat.

### 2.5.1.3. Modelo final de las espumas en ANSYS 18.1

Finalmente, después de todo el proceso que conlleva obtener los cilindros en SolidWorks, los mismos ahora si pueden importarse a ANSYS para poder establecer las características correspondientes a las propiedades mecánicas de cada uno de los componentes, los parámetros de mallado, condiciones de frontera y finalmente las condiciones para los resultados deseados después de llevar a cabo la simulación. Las espumas generadas pueden observarse en la Figura 31.

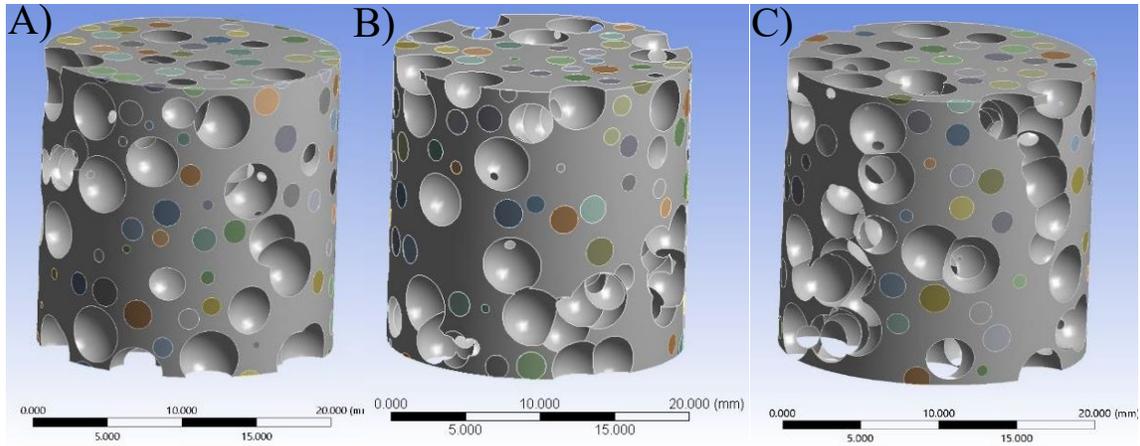


Figura 31 Modelos finales de las espumas generadas en ANSYS 18.1. Espuma con A) 50% NaCl-50% Refuerzo, B) 65% NaCl -35% Refuerzo y C) 80% NaCl -20% Refuerzo.

**2.5.2. Simulación de comportamiento compresivo elástico**

Los diferentes modelos de las espumas se sometieron a compresión utilizando ANSYS 18.1 18.1. 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 para validar la eficiencia y exactitud de estos modelos. El módulo de Young utilizado en los cálculos correspondió al obtenido para la aleación en estado de colada. Para el caso de las esferas de alúmina e hidróxido de aluminio los valores de los módulos de elasticidad fueron 60 y 5 GPa, respectivamente. Estos valores fueron obtenidos de los proveedores de los materiales. Para el caso de la alúmina era de esperarse un valor mucho más alto, sin embargo, el valor tan bajo es debido al proceso de producción de estas esferas, que es a través de partículas sinterizadas por lo que las esferas poseen porosidad, lo que reduce su módulo de Young. El valor final 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 detallarán.

$$E = P_z * L_0 / D_{Máx} \dots\dots\dots (11)$$

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  $D_{\text{máx}}$  es el desplazamiento máximo de la probeta en el eje z.

### 2.5.2.1. Condiciones de contorno

Para realizar la simulación se aplicó una carga dependiente del área efectiva de cada espuma, tomándose como referencia la aplicación de una carga de 10000 Pa para la aleación en estado de colada, para poder representar de forma real las condiciones de un trabajo experimental, se deben aplicar las condiciones de contorno, fuerzas, desplazamientos y parámetros aplicados a una geometría. La primera condición que se coloca es prohibir el desplazamiento en una de las caras de la probeta. Como primera instancia en la cara inferior se coloca un soporte fijo en el eje Z, esto genera que la cara inferior quede inmovilizada como se observa en la Figura 32.

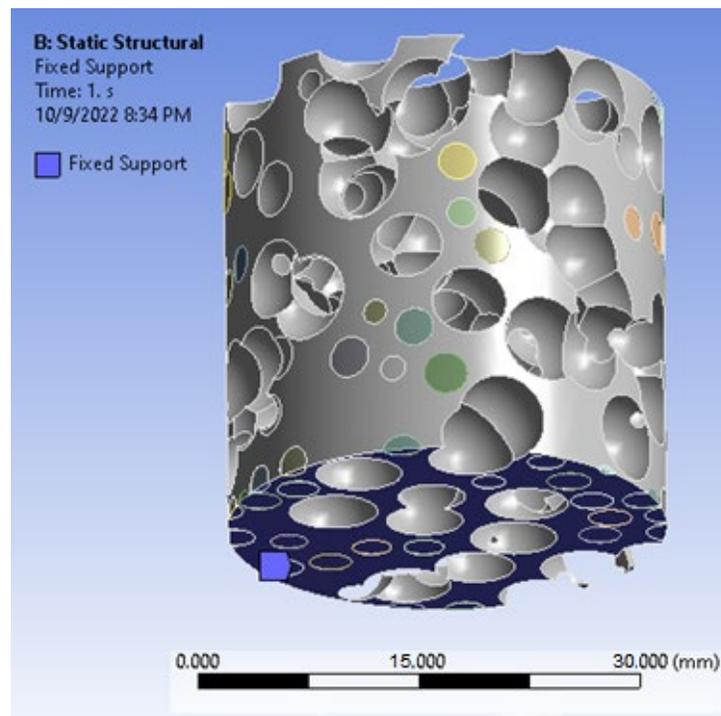


Figura 32 Soporte fijo aplicado a la cara inferior.

Posterior a eso se aplica un desplazamiento remoto en la cara superior de tal manera que se pueda especificar el desplazamiento de la cara superior sobre un eje al aplicar una presión externa. Dicha condición se observa en la Figura 33. Cabe mencionar que en esta etapa es en donde se selecciona una característica muy importante, el comportamiento que tendrá la superficie al aplicar la carga, se especifica un “comportamiento unido” y de esta manera todos los elementos se mueven como uno solo.

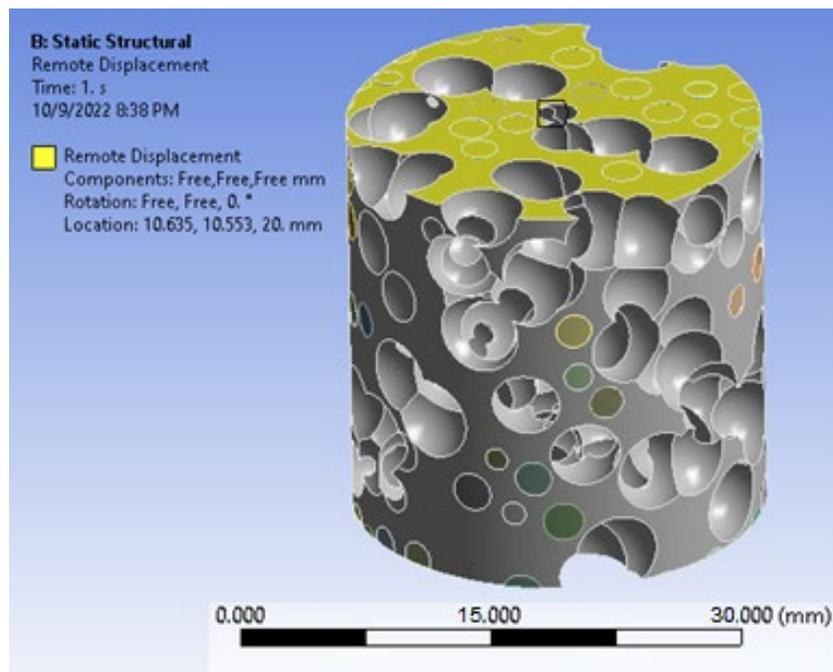


Figura 33 Condición de desplazamiento remoto.

Y finalmente se aplica la carga correspondiente que funge como presión de compresión en la cara superior de la espuma como se observa en la Figura 34.

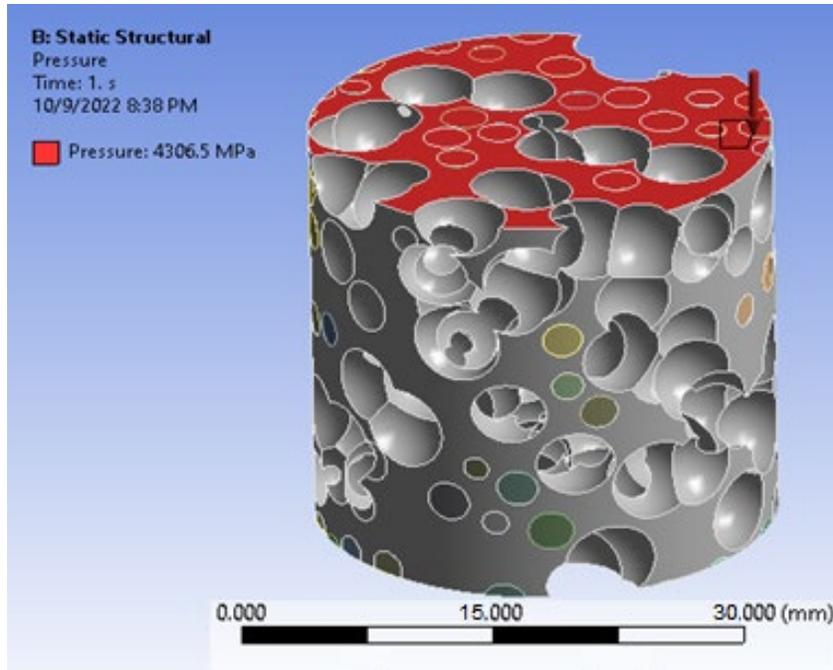


Figura 34 Presión aplicada en la cara superior de la espuma.

Las cargas aplicadas, de acuerdo con el área en cada modelo, se observan en la Tabla 6, para que la presión efectiva sea la indicada anteriormente.

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

Relaciones % NaCl- % refuerzo	Área efectiva (mm <sup>2</sup> )	Presión aplicada (Pa)
50-50	173.62	5526.66
65-35	151.38	4797.39
80-20	135.29	4306.54

Finalmente se insertan las soluciones que arrojará la simulación. En este caso la medición de la deformación direccional es la que interesa, ya que este valor es el que será aplicado en la fórmula mencionada anteriormente para determinar el módulo de Young, la configuración usada en dentro del software se observa en la Figura 35.

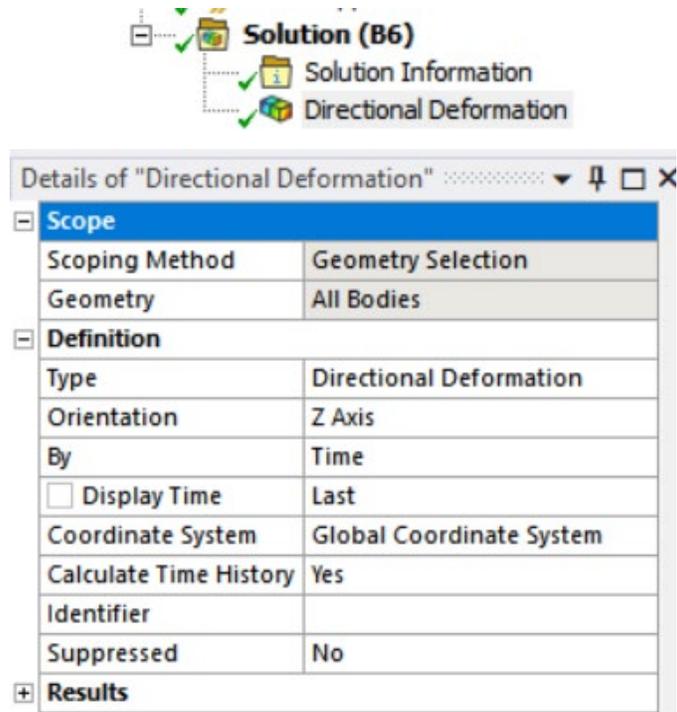


Figura 35 Solución seleccionada para la obtención de los resultados.

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.

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

Relaciones % NaCl- % refuerzo	Tipo de elemento	Cantidad de elementos	Cantidad de nodos
<b>50-50</b>	Solid187	115190	213957
<b>65-35</b>	Solid187	277814	454949
<b>80-20</b>	Solid187	236225	392141

En la Figura 36 se puede observar el tipo de elemento que es usado por el software, correspondiente a SOLID187, que 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.

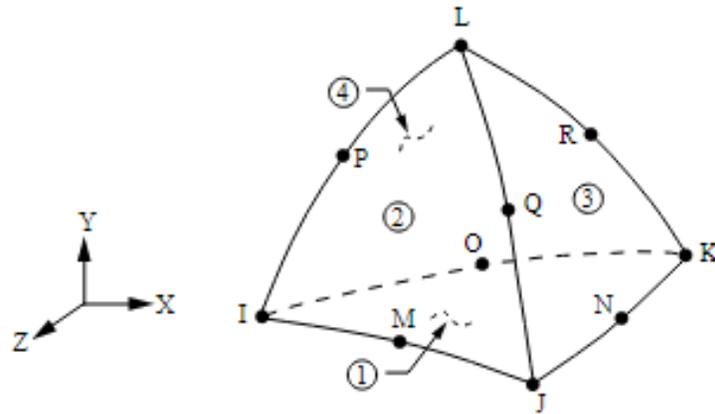


Figura 36 Elemento Solid187.

El proceso de simulación a realizar en el software ANSYS WORKBENCH 18.1, se describe a continuación:

- Ingresar a la pestaña *Static Structural*, la cual permite realizar análisis estructurales (Figura 37).
- Ingresar las propiedades mecánicas relevantes para el estudio. Para esto ingresar a la pestaña correspondiente a *Engineering Data*.
- Cargar la geometría en la pestaña *Geometry*. En esta pestaña se puede modificar la geometría en caso de ser necesario. Se pueden modificar las dimensiones generales de la espuma, y agregar o sustraer esferas de refuerzo.
- Abrir la pestaña *Model*, pestaña donde se configura y genera el mallado, se aplican las condiciones de contorno, restricciones y desplazamientos. Acá es necesario seleccionar el tipo de análisis (Fuerza de reacción, deformación, esfuerzos, etc.). Una vez ingresados y configurados todos los parámetros, se inicia la simulación para obtener los datos requeridos.

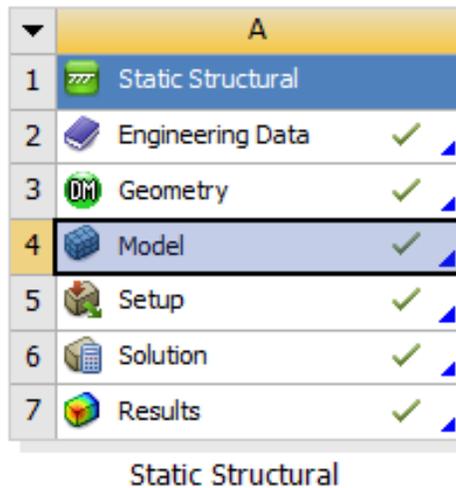


Figura 37 Ventana de módulo estructural del software ANSYS 18.1 WORKBENCH.

### 2.5.2.2. Mallado

El mallado de las espumas debe garantizar buenos resultados, para lo cual se utiliza una malla cuyos parámetros relevantes (Calidad del elemento, relación de aspecto, asimetría y calidad ortogonal), se encuentren dentro de los límites aceptados estudiados en capítulos anteriores. En la Figura 39 se muestra la configuración de malla seleccionada en ANSYS 18.1, que es utilizada para todas las simulaciones, así como un ejemplo de su visualización.

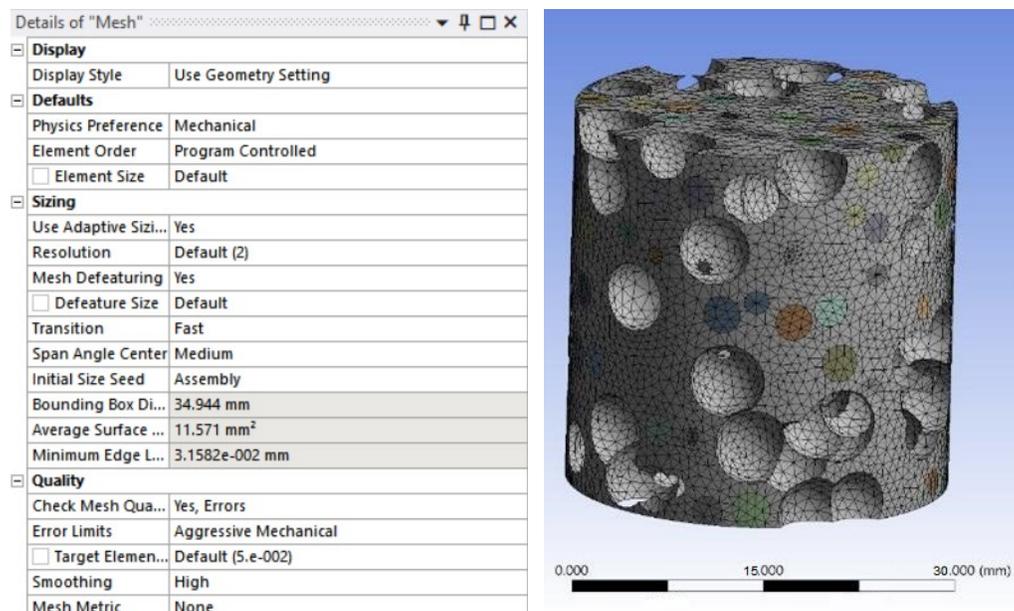


Figura 38 Parámetros de mallado usados.

### 2.5.3. Modelos matemáticos comparativos

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, y el modelo de Gan y col., todos ya establecidos en la literatura [95].

**Modelo de Zhu et al. [70]**

$$E = \frac{1.009 E_s \rho^2}{1 + 1.514 \rho^2} \dots \dots \dots (12)$$

**Modelo de Warren y Kraynik's. [96]**

$$E = \frac{E_s \rho^2 (11 + 4\rho)}{(10 + 31\rho + 4\rho^2)} \dots \dots \dots (13)$$

**Modelo de Gan et al. [92]**

$$E = \frac{E_s \rho^2}{1 + 6\rho} \dots \dots \dots (14)$$

Donde:

- $E_s$  es el módulo de Young del compuesto (a modo de comparación se usó el calculado a través de la regla de las mezclas y a través del modelo de Halpin-Tsai), y
- $\rho$  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 incluyen la porosidad, no tomando en cuenta aspectos tan relevantes como el tamaño de poro, el espesor de la pared y la distribución de la porosidad, entre otros. 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 los materiales, se comenzó con el estudio de la aleación en el estado de colada. Primeramente, se muestra la microestructura de la aleación estudiada mediante SEM, utilizando electrones retrodispersados, como se aprecia en la Figura 39 (izquierda). Como puede observarse, la microestructura de esta aleación Al-Si-Cu está formada por  $\alpha$ -Al y segundas fases de color claro, las cuales corresponden a fases ricas en Cu ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ), como se comprobará más adelante. Por otra parte, el estudio mediante MO muestra que además de la fase anteriormente mencionada también está presente el eutéctico Al-Si, de color más oscuro. Esta fase no se apreciaba en el SEM debido a la escala de grises similar a la matriz de  $\alpha$ -Al. Se ha reportado que debido a estas semejanzas morfológicas para el análisis de estas aleaciones es imprescindible la combinación de técnicas de imágenes de MO y SEM. [97]

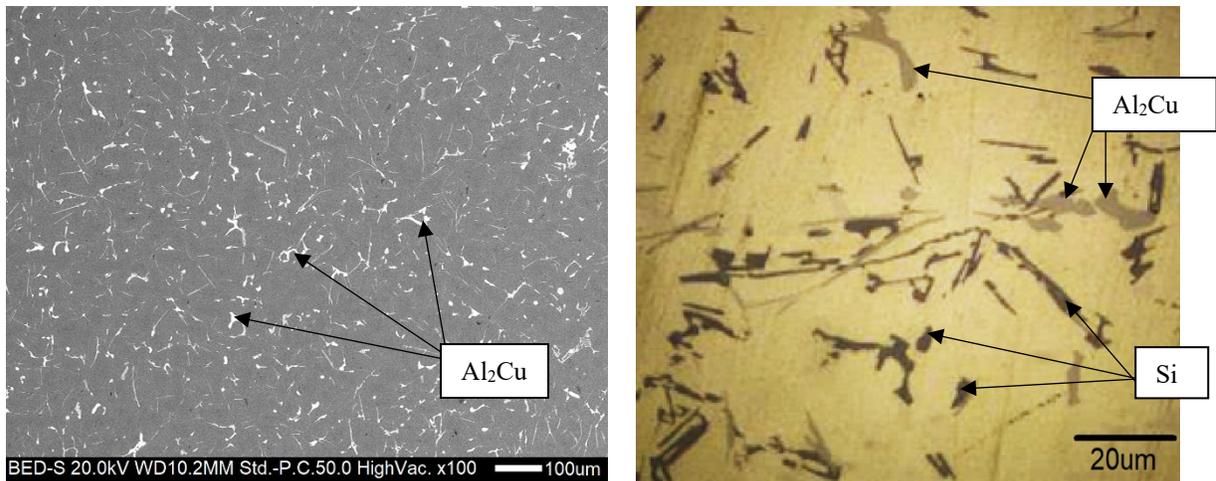


Figura 39 Micrografías de la aleación 332 obtenidas mediante SEM (izquierda) y MO (derecha).

Para un análisis más detallado de esta aleación las muestras se observaron a mayores aumentos. Esto permitió observar la presencia no solo de la fase  $\text{Al}_2\text{Cu}$  (fases en forma de bloques (Figura 40), sino que aparece una segunda fase de color claro, que corresponde a

fases con elevado contenido de Fe y Mn (Figura 41). Estas fases son características de estas aleaciones, como se comentó anteriormente, y son causadas por la presencia de estos elementos químicos, difíciles de eliminar de las aleaciones de Al.

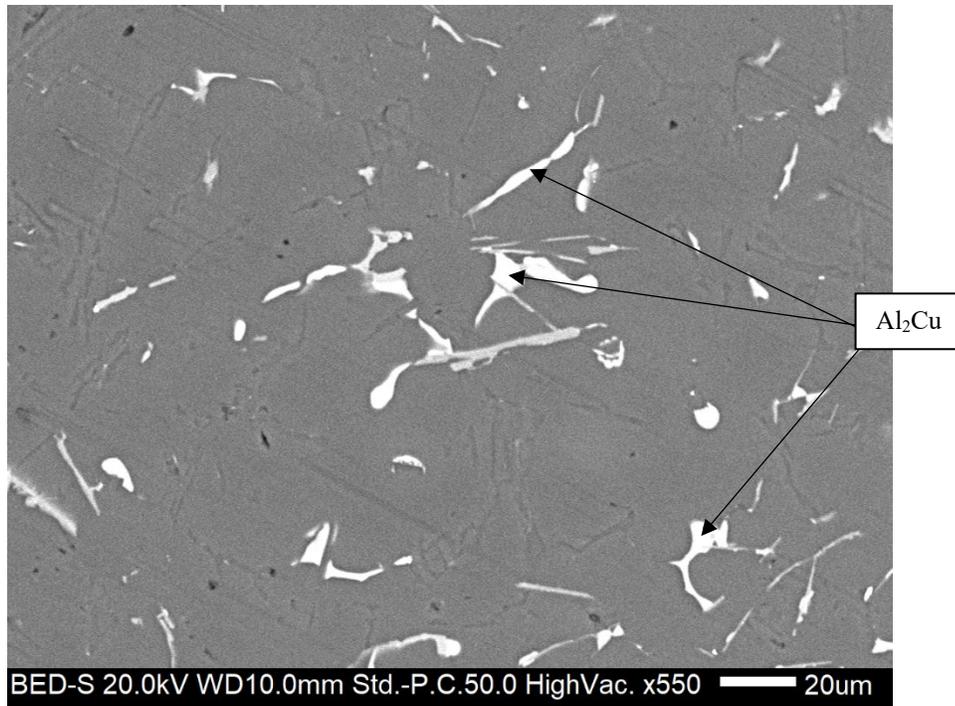


Figura 40 Micrografía de la aleación de Al donde se muestran las fases ricas en Cu, a 500x.

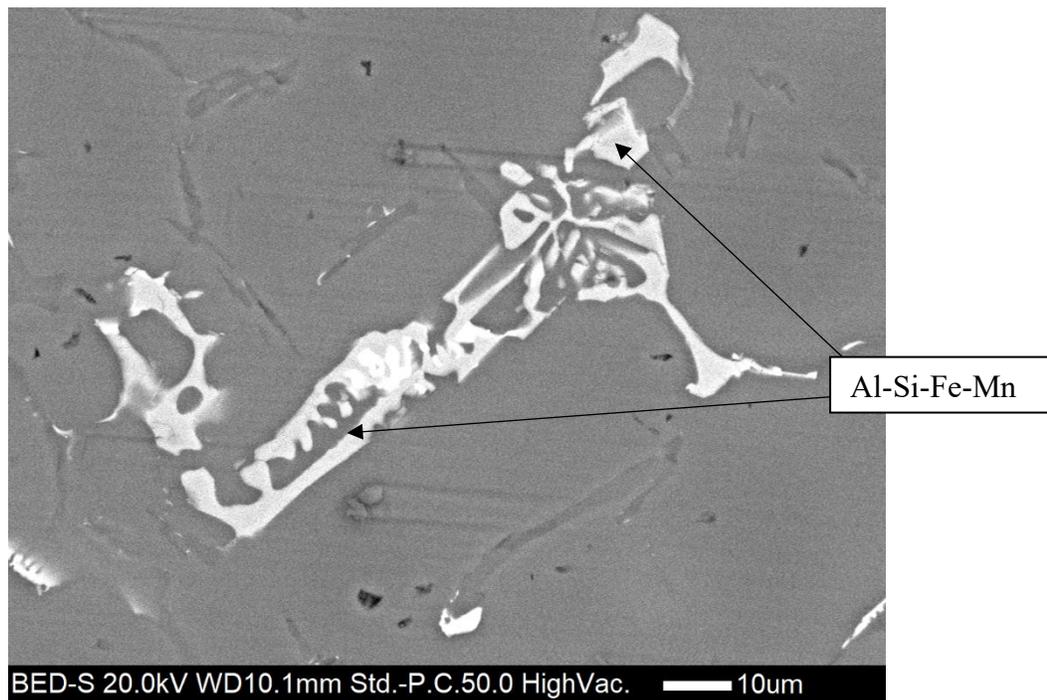


Figura 41 Micrografía de la aleación de Al, donde se muestra la fase Al-Si-Fe-Mn.

La distribución elemental presente en la aleación se muestra en el análisis EDS de la Figura 42, obtenido para el barrido de la microestructura a 100 aumentos, que corresponde a la región de la imagen de SEM de la Figura 39 (izquierda). Se realizaron 5 análisis similares en diferentes regiones de la muestra para obtener un promedio representativo.

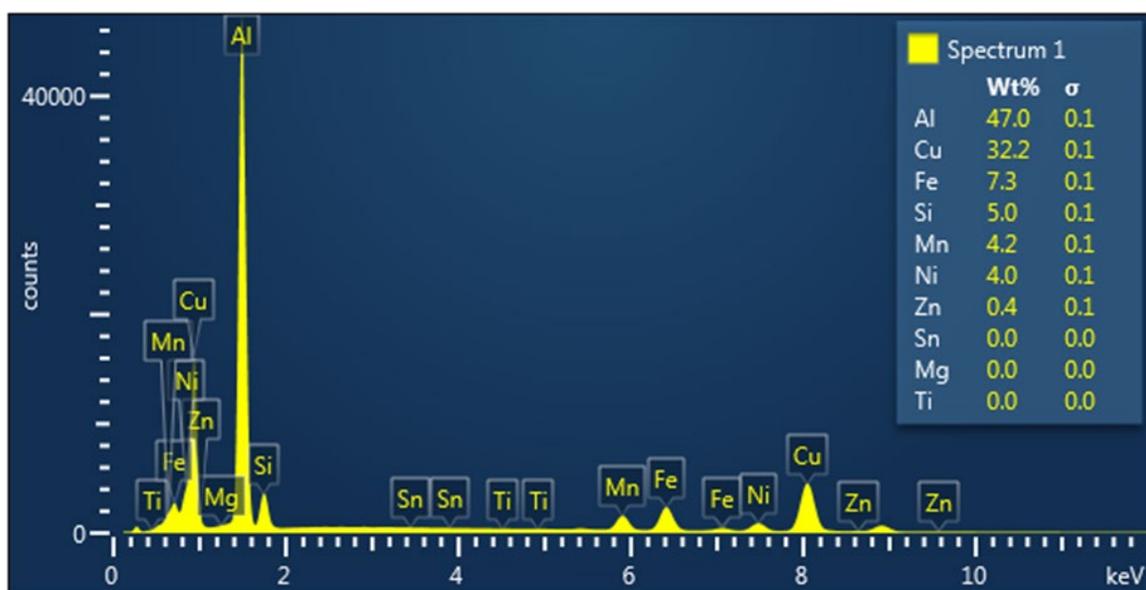


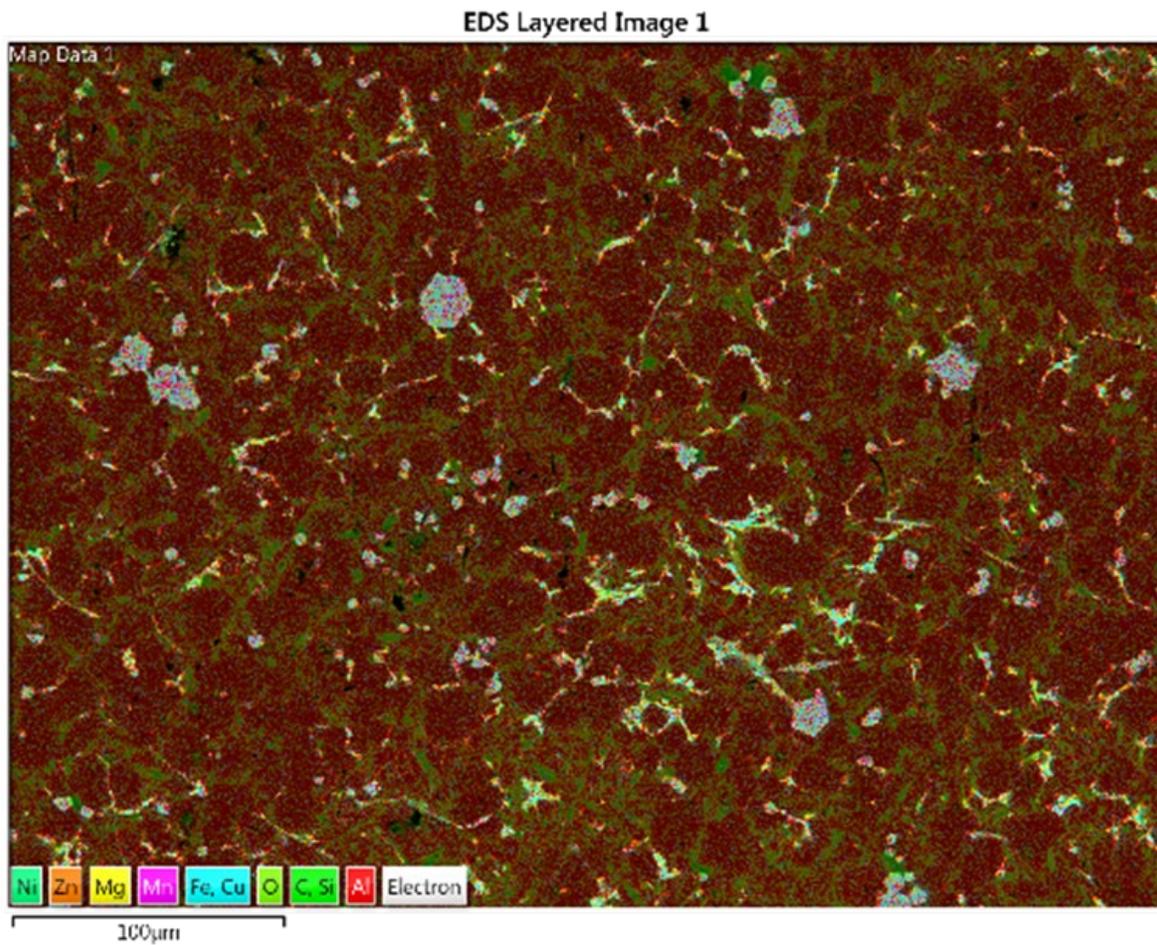
Figura 42 EDS de la aleación realizado en SEM.

Como puede observarse en los valores promedios de la Tabla 8, la composición química de la aleación se encuentra entre los rangos de las composiciones obtenidas de la norma ASTM, y mostrada en la Tabla 3 capítulo II. Es importante destacar que el EDS es una técnica semicuantitativa, y solo se utiliza para fines analíticos comparativos, y no para el estudio exacto de la composición química de la aleación o de fases específicas.

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

Elemento	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Sn	Total
%Peso	0.7	81.8	10.5	0.5	1.3	0.5	3.6	1.0	0.1	100
%Atómico	0.01	85.6	10.21	0.48	0.58	0.1	2.43	0.45	0	100

Con la finalidad de mostrar 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 Figura 43 se observa el mapeo a bajos aumentos, destacándose la ubicación de los principales elementos de aleación (Al, Si, Cu, Fe, Mn y Mg). Estos elementos están distribuidos en todo el material, y existen algunas concentraciones en algunas de las fases.



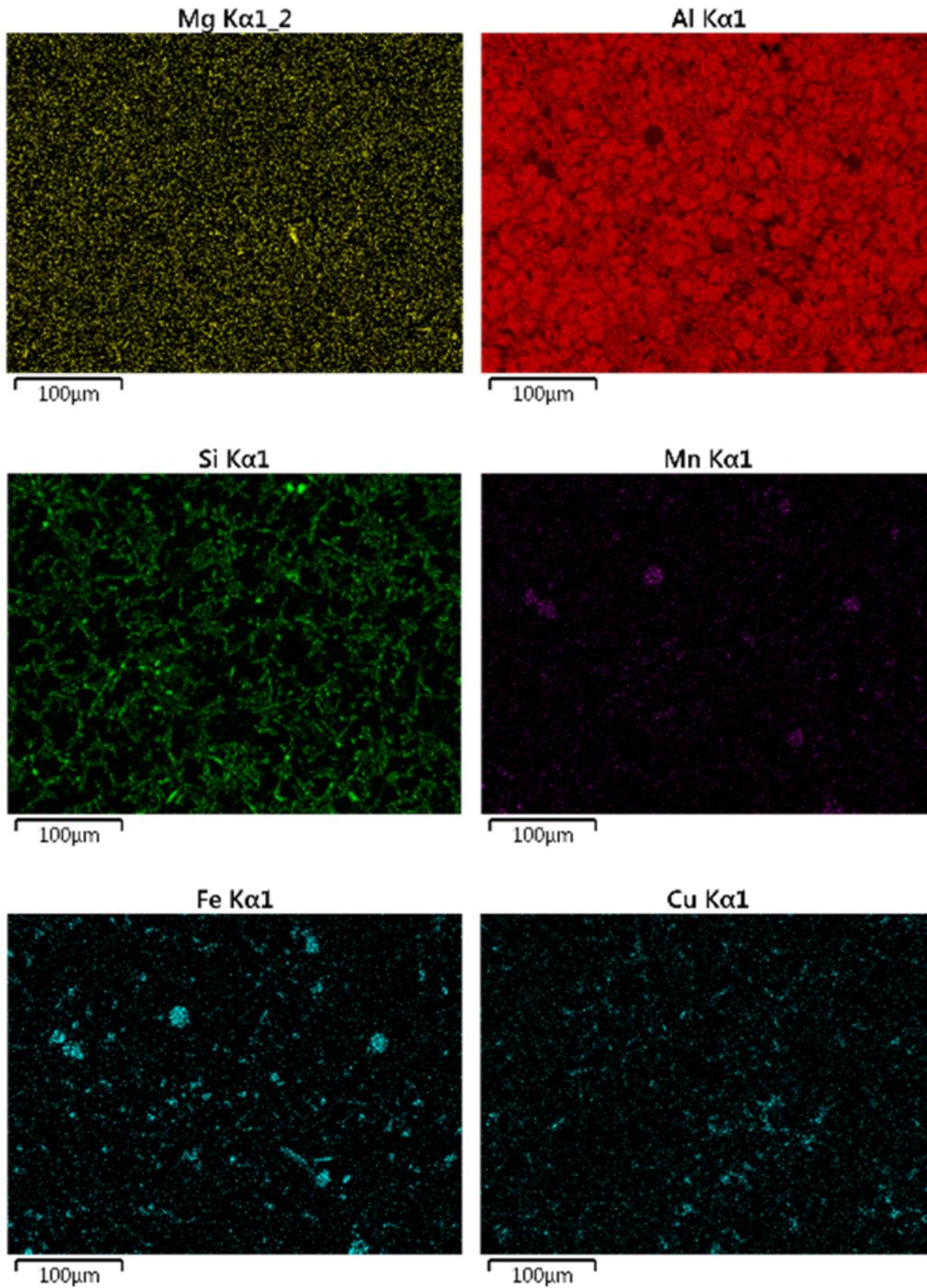
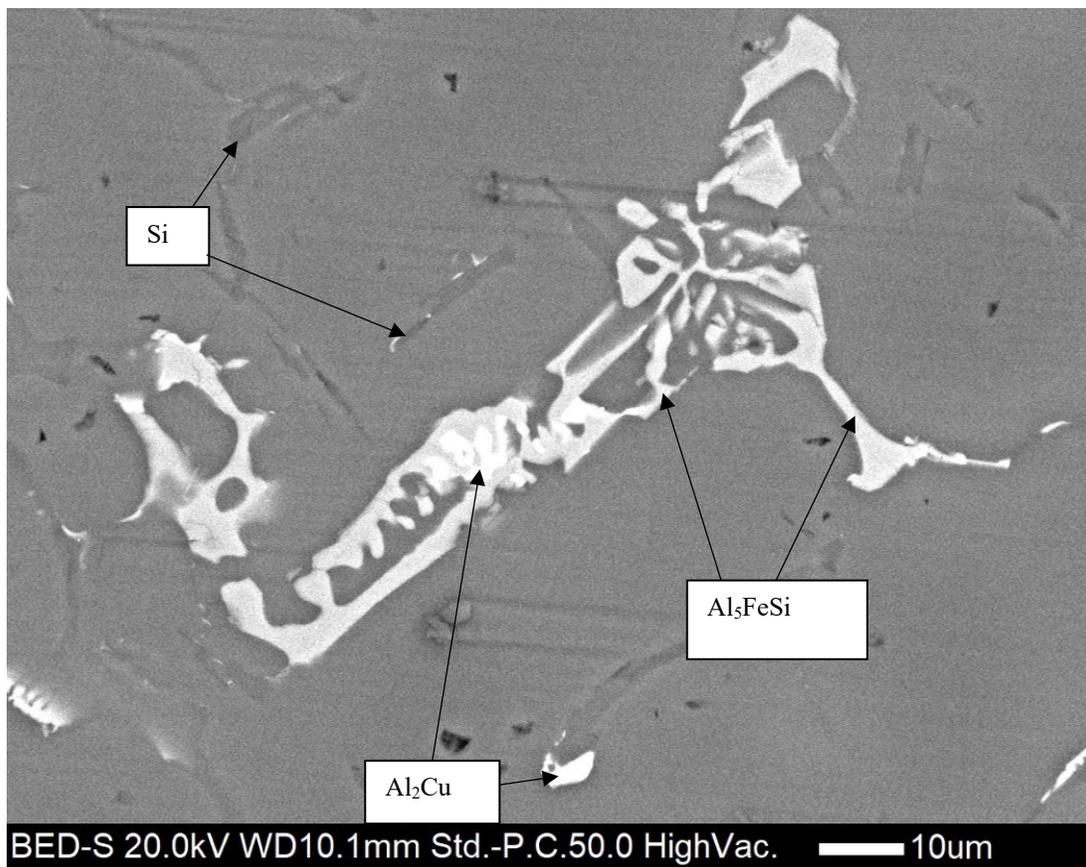
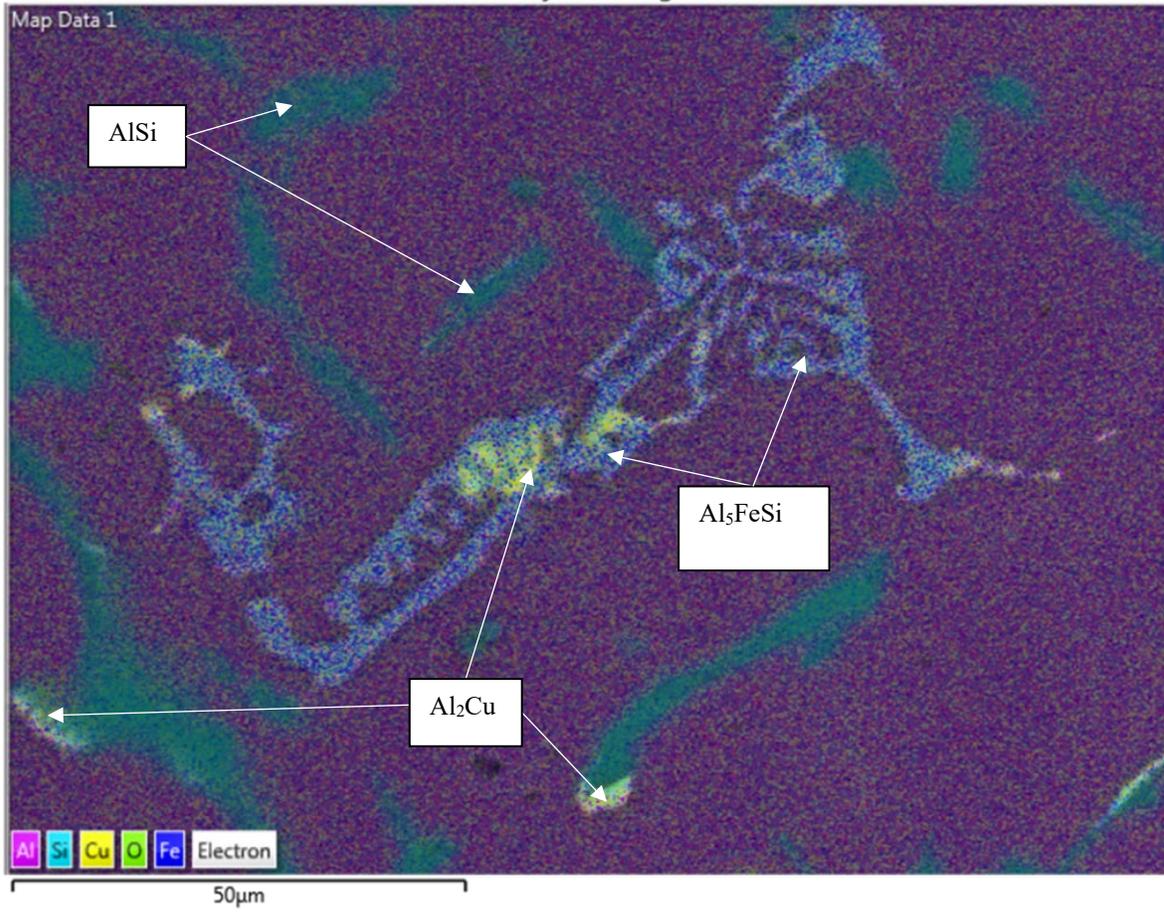


Figura 43 Mapeo químico elemental por EDS de la aleación de aluminio en estado de colada.

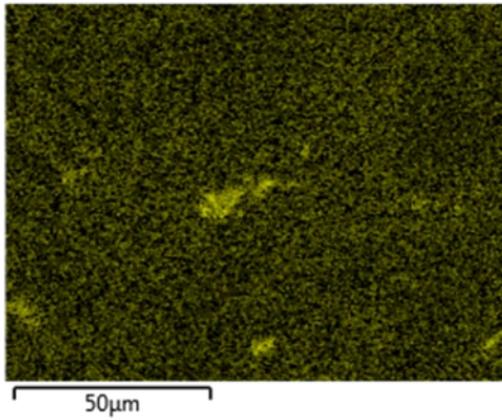
Para un mejor análisis de las fases se muestran mapeos a mayores aumentos. En la Figura 44 se observa que la matriz está compuesta de aluminio principalmente, con la presencia en disolución de los elementos aleantes. Por otra parte, los elementos de aleación están distribuidos de manera localizada en las diferentes fases secundarias. El silicio (cian) está fundamentalmente localizado en el eutéctico, pero también en los intermetálicos ricos en Fe. Finalmente, el Cu está presente en la fase  $\text{Al}_2\text{Cu}$ . Estos resultados están acordes con lo observado por Musa y Bariş en su trabajo [98].



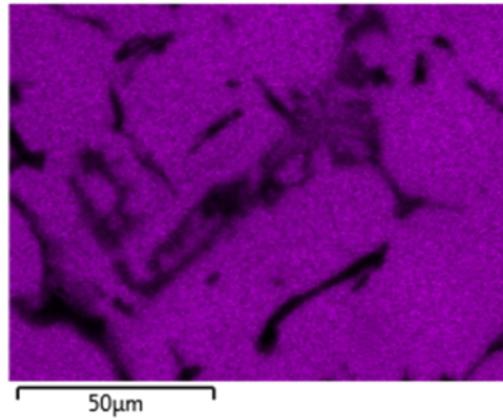
EDS Layered Image 1



Cu K series



Al K series



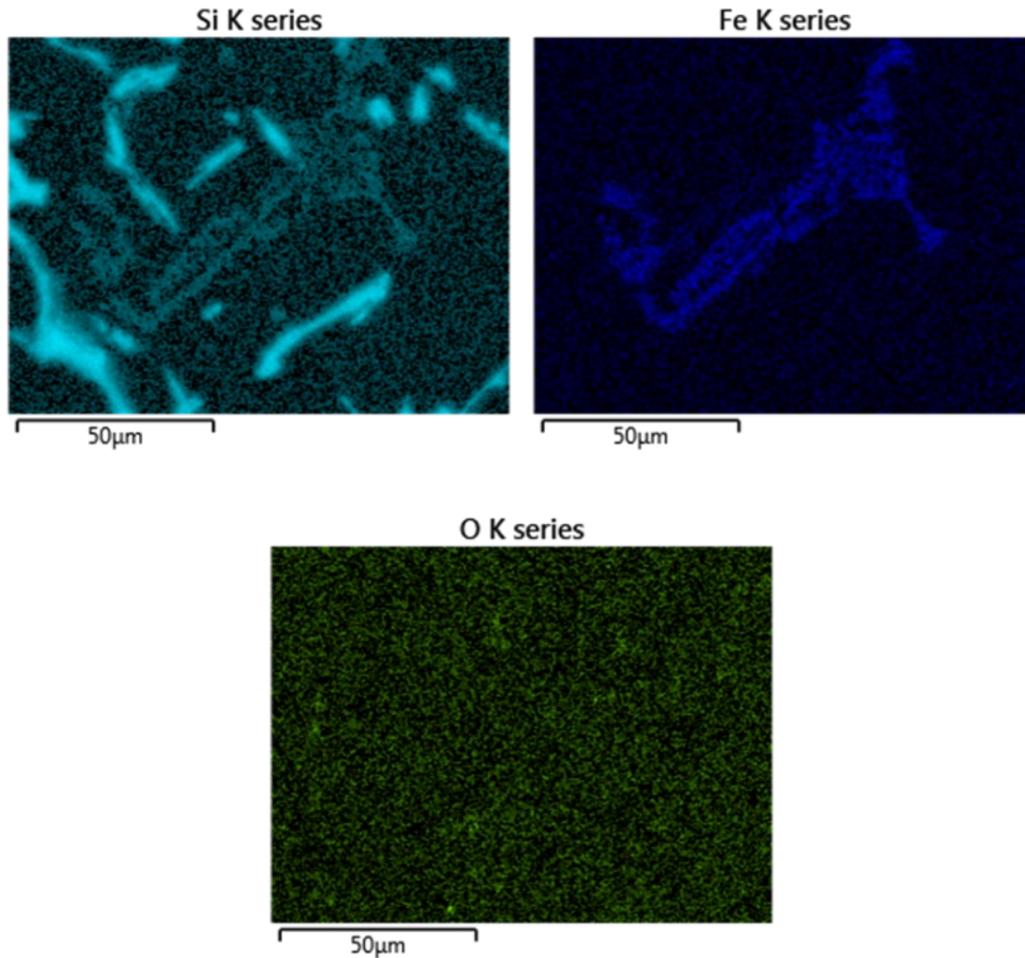
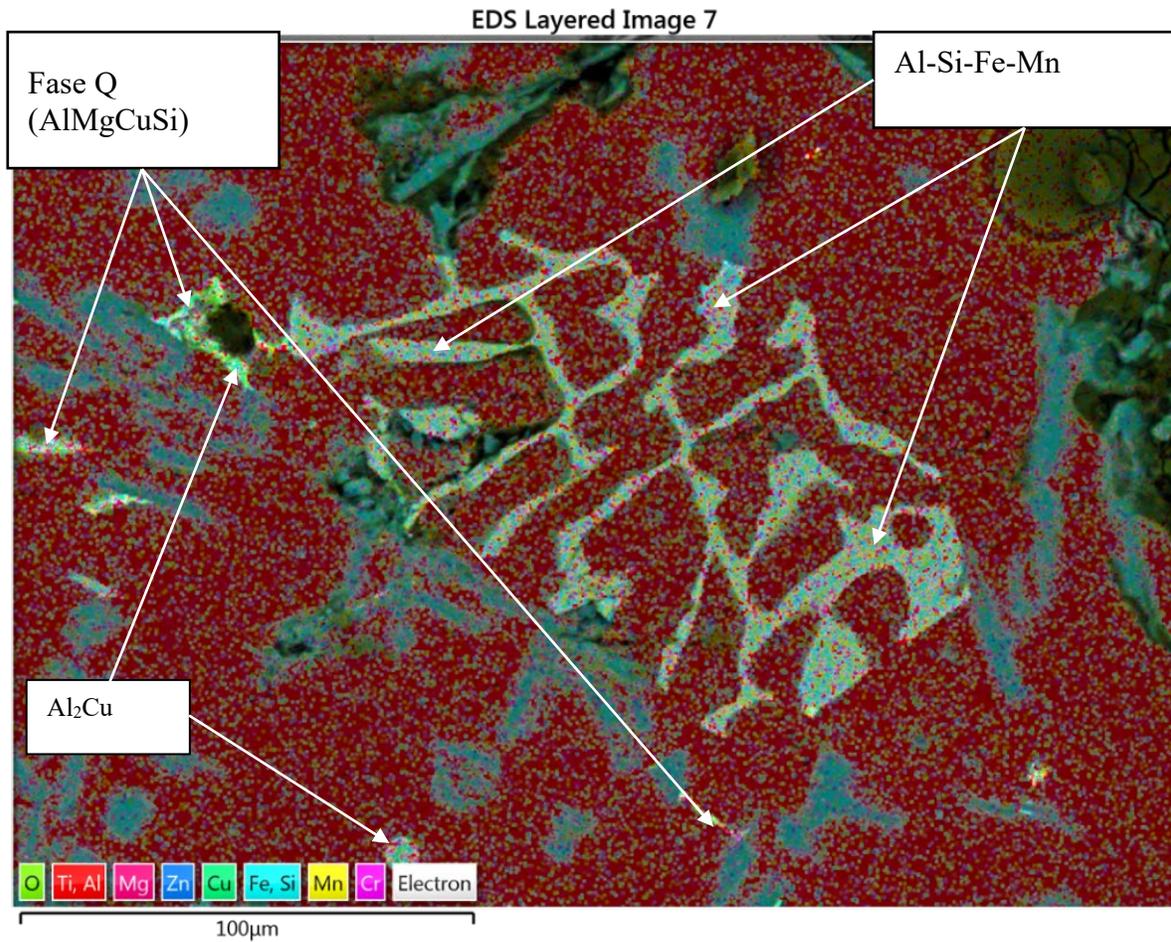


Figura 44 Mapeo químico elemental por EDS para conocer su distribución elemental.

Debido a la presencia del Fe, es que se realizó un estudio de las otras fases ricas en Fe y Mn. Como puede apreciarse en la Figura 45, aparte de la fase  $Al_2Cu$ , la presencia de elementos de aleación localizados sugiere que también existe una fase rica en Mg, conocida como Q ( $Al_5Mg_8Si_6Cu_2$ ). Se ha reportado que al final de la solidificación de estas aleaciones la fase Q crece a partir del  $Al_2Cu$  [99]. Por otra parte, la fase intermetálica en forma de esqueleto de pescado contiene elevada presencia de Fe y Mn. A pesar de que el sistema ternario que forma la fase  $Al_5FeSi$  resulta ser de los más perjudicables para las propiedades mecánicas de las aleaciones Al-Si, en varios estudios se ha demostrado que la adición de ciertos elementos como el Mn ayudan a que las fases del sistema  $Al_5FeSi$ , que son quebradizas, se transformen a la morfología compacta como escritura china, esqueleto de pescado, glóbulo o poliédrica

dando como resultante una restauración de la resistencia a la tracción y elongación [100]; es por eso que en la aleación base observamos elevada presencia de esta fase rica en Mn y Fe (Figura 45).



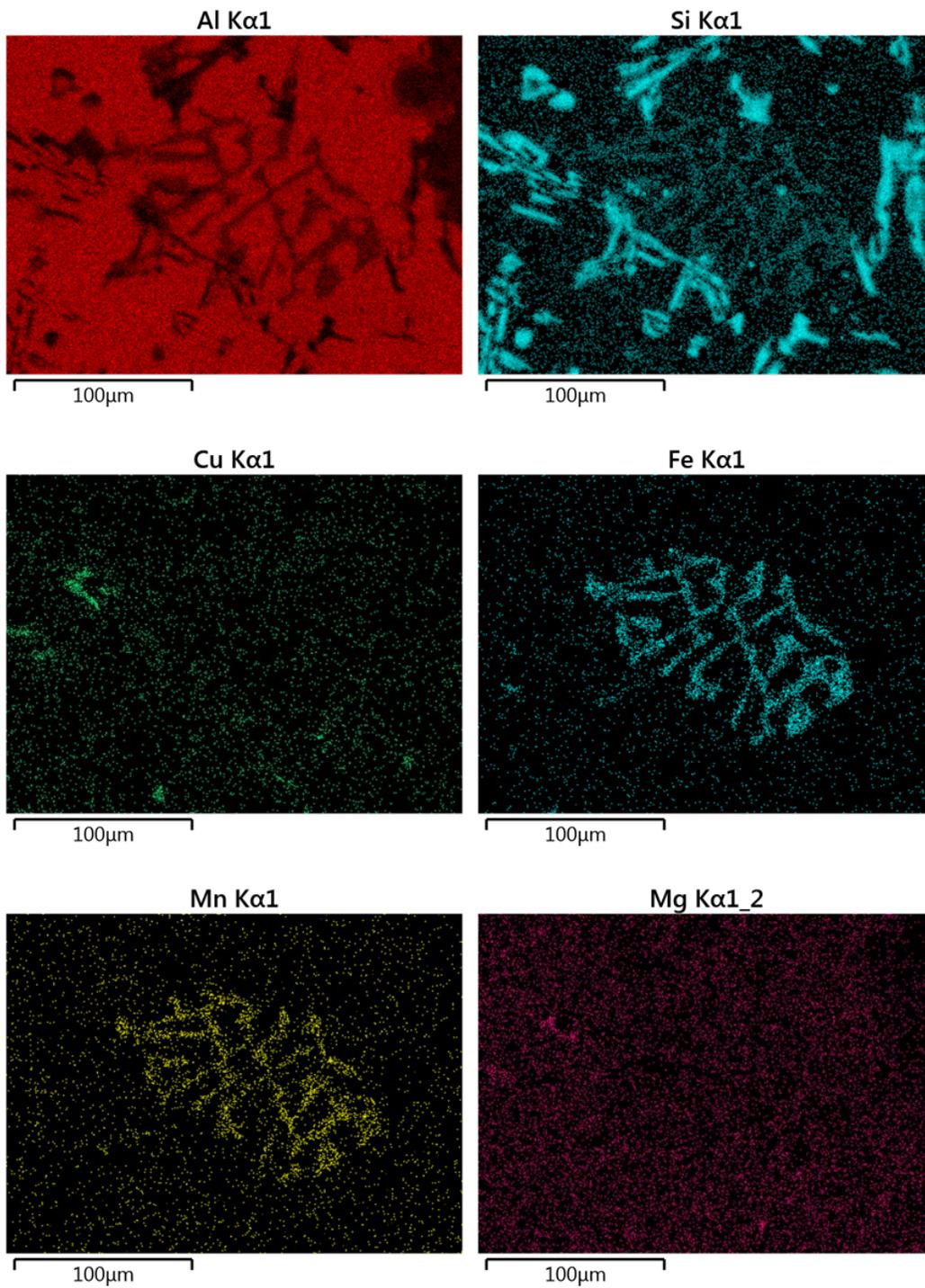


Figura 45 Mapeo químico elemental por EDS de la fase cuaternaria AlSiFeMn.

### 3.1.1. Análisis por difracción de rayos X (DRX)

Con la finalidad de comprobar la presencia de las diferentes fases en esta aleación, se realizó un estudio mediante DRX. Como puede apreciarse en el difractograma de la Figura 46, los picos más importantes corresponden al  $\alpha$ -Al, además de a las fases Si eutéctico y  $\text{Al}_2\text{Cu}$ . La presencia del intermetálico rico en Mn y Fe también fue comprobada. Esto corrobora los resultados obtenidos mediante análisis de imágenes y EDS.

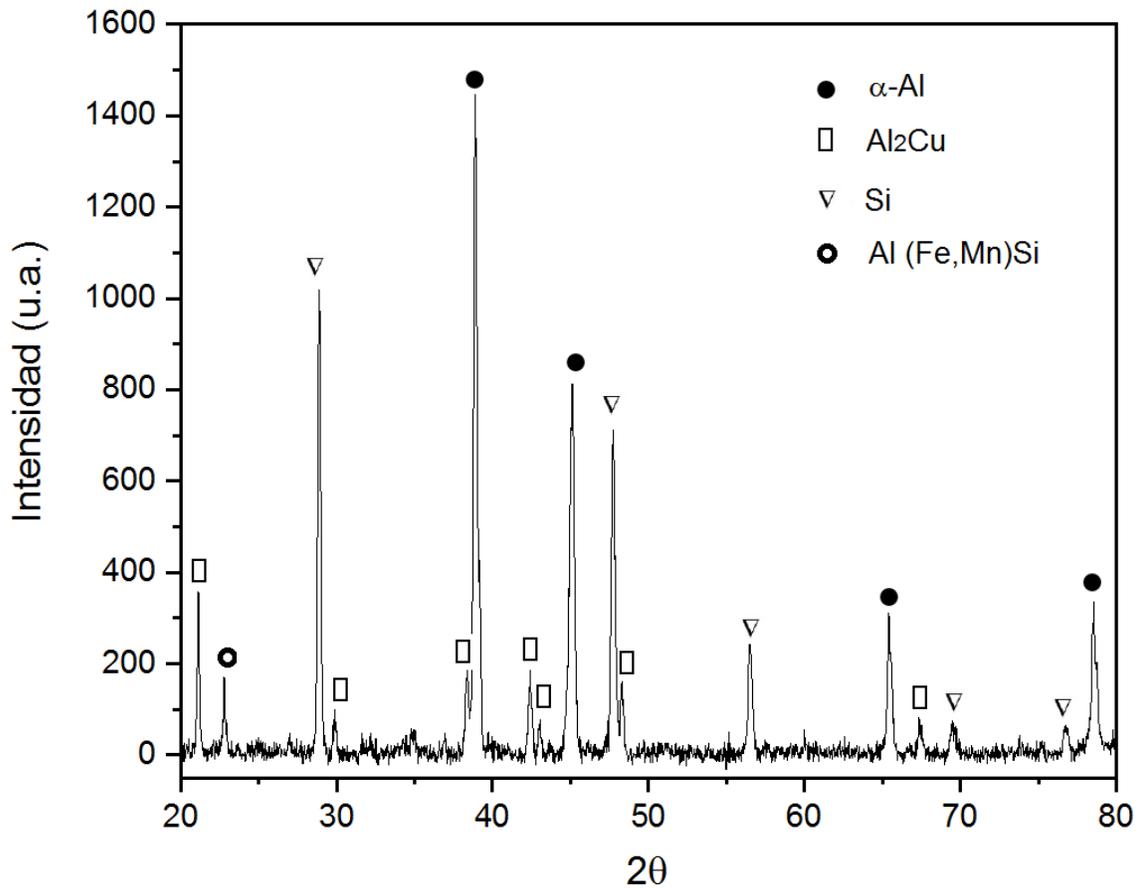


Figura 46 Difractograma de la aleación base.

### 3.2. Caracterización óptica de las espumas obtenidas

Las espumas fabricadas con las tres diferentes características propuestas en el capítulo II se analizaron mediante diferentes técnicas. Estos materiales fueron obtenidos manteniendo invariables las condiciones del proceso de producción, con la finalidad de obtener resultados reproducibles. A continuación, se presenta su caracterización.

#### 3.2.1. Espumas con relación 50% NaCl-50% refuerzo

Las espumas fabricadas con esta relación de partículas en la mezcla (50% NaCl-50% refuerzo) poseen una estructura de poros interconectados, una distribución homogénea entre los tamaños de los poros, y partículas reforzantes también homogéneamente distribuidas, tal como se aprecia en la Figura 47. En ella se muestran probetas maquinadas para apreciar mejor la morfología de las espumas obtenidas. Un detalle que se puede notar es que las esferas de las espumas reforzadas con alúmina (de aquí en adelante las del lado derecho) presentan una rugosidad muy elevada comparadas con las de hidróxido de aluminio. Esto se debe al proceso de maquinado de las probetas, ya que la alúmina como es sabido es un material con elevada dureza, lo que hizo más complicado este proceso, también alterando el maquinado de la matriz.

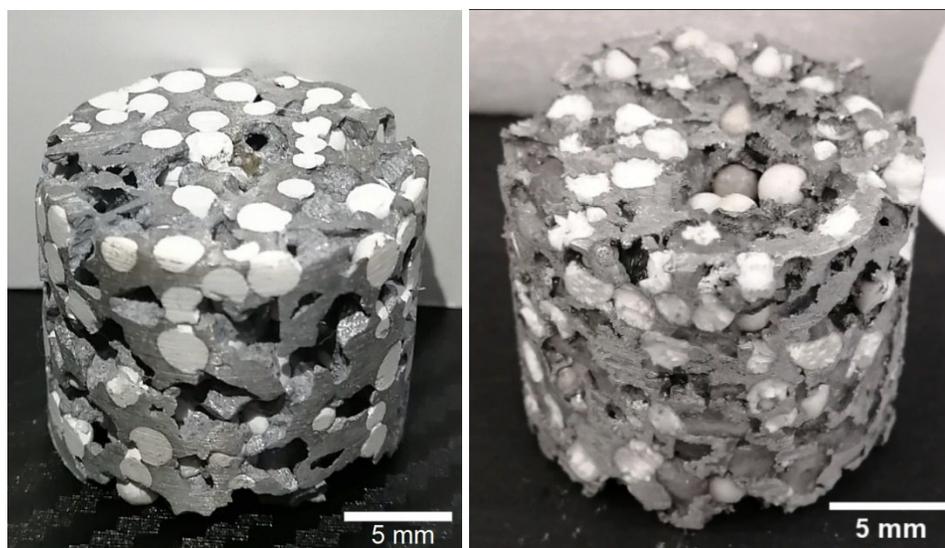


Figura 47 Espuma fabricada con una relación 50% NaCl - 50% Al(OH)<sub>3</sub> (izquierda); y espuma fabricada con una relación 50% NaCl - 50% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (derecha).

En la Figura 48 puede apreciarse con más detalle el acomodo de las esferas reforzantes, donde se puede confirmar la hipótesis de que estas partículas se ubicarían en las paredes de las celdas, entre los poros. Este comportamiento se tiene en todas las espumas fabricadas, es por eso por lo que solo se muestran dos fotos a modo de ejemplo para la alúmina y el hidróxido de aluminio. Tal cual como se observa en estas macrografías, la matriz de aluminio “abraza” las esferas reforzantes, lo que al momento de someterse a un esfuerzo de compresión se traduciría en una transmisión de la fuerza compresiva hacia el material de refuerzo. En la Figura 48 del lado derecho podemos apreciar más claramente el espesor de pared que rodea a las esferas, que en promedio fue de 1.08 mm para estas espumas.

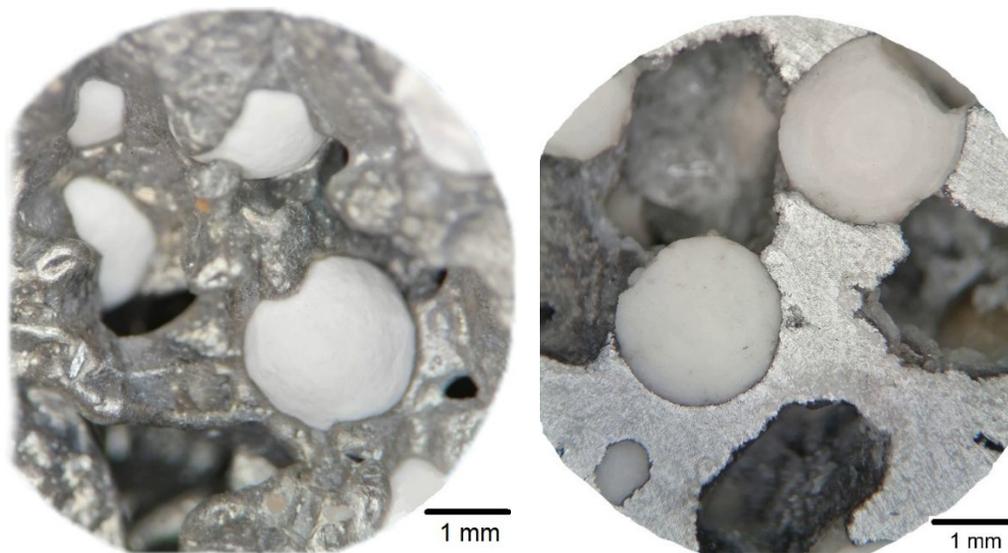


Figura 48 Ubicación de las partículas reforzantes dentro de la matriz metálica, hidróxido de aluminio (izquierda), alúmina (derecha).

### 3.2.2. Espumas con relación 65% NaCl-35% refuerzo

En la siguiente imagen (Figura 49) se muestran espumas con un aumento en la cantidad de partículas espaciadoras y una reducción en la cantidad de material reforzante (65% NaCl-35% refuerzo). A primera vista se puede apreciar este cambio en la mezcla, existiendo igualmente distribuciones homogéneas de poros y reforzantes. En este caso también se aprecia la rugosidad para las espumas reforzadas con alúmina (a la derecha en la Figura 49).

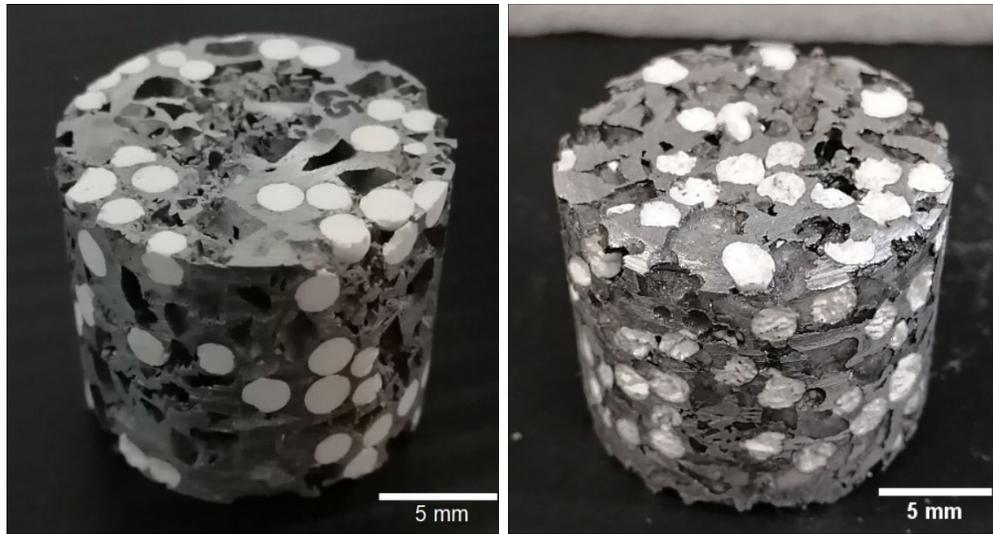


Figura 49 Espuma fabricada con una relación 65% NaCl - 35%  $\text{Al}(\text{OH})_3$  (izquierda). Espuma fabricada con una relación 65% NaCl - 35%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (derecha).

Un detalle para resaltar para las espumas con 65% NaCl-35% refuerzo es el decremento en el espesor de pared (Figura 50), pues en este caso el promedio fue de 0.93 mm, lo cual podría llevar a un decremento en las propiedades mecánicas. Al igual que en el caso 50%-50% se puede apreciar cómo las esferas se encuentran rodeadas por matriz metálica.

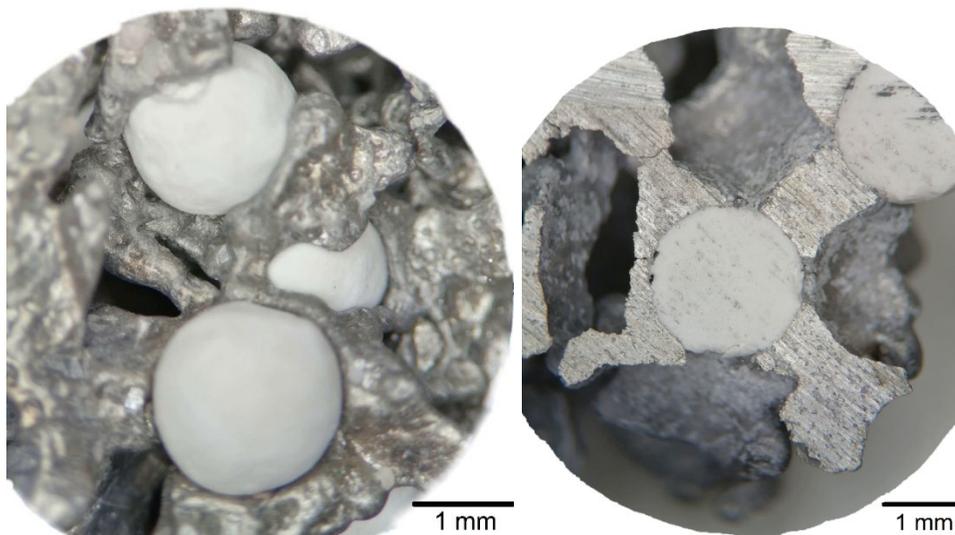


Figura 50 Ubicación de las partículas reforzantes dentro de la matriz metálica. Hidróxido de aluminio (izquierda), alúmina (derecha).

### 3.2.3. Espumas con relación 80% NaCl-20% refuerzo

En la Figura 51 se muestran espumas con una relación 80% NaCl-20% refuerzo. Se aprecia un aumento todavía mayor en la cantidad de poros y una reducción en la cantidad de material reforzante. Se aprecia que la porosidad y los reforzantes están homogéneamente distribuidos. Nuevamente se aprecia la apariencia rugosa de la superficie para las espumas reforzadas con alúmina, ya que por su elevada dureza el maquinado no resulta con un buen acabado superficial.

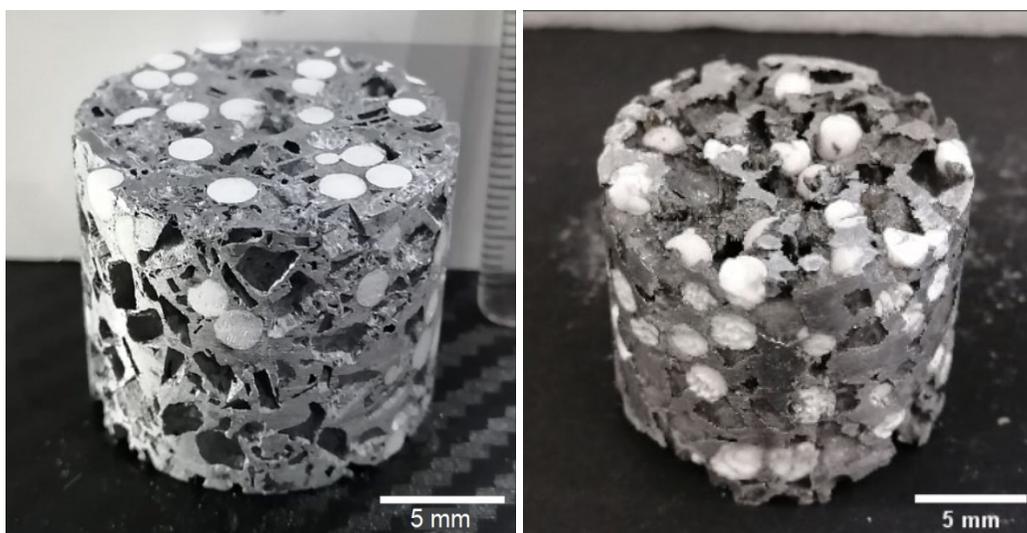


Figura 51 Espuma fabricada con una relación 80% NaCl - 20%  $\text{Al}(\text{OH})_3$  (izquierda).  
Espuma fabricada con una relación 80% NaCl - 20%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (derecha).

Como se aprecia en la Figura 52 el espesor de pared es menor, alcanzando en este caso un promedio de 0.68 mm, lo cual podría indicar nuevamente un decremento en las propiedades mecánicas de las espumas. Nuevamente la distribución del material reforzante es de manera homogénea, lo que sugiere que el proceso de fabricación es adecuado para producir este tipo de espumas reforzadas.

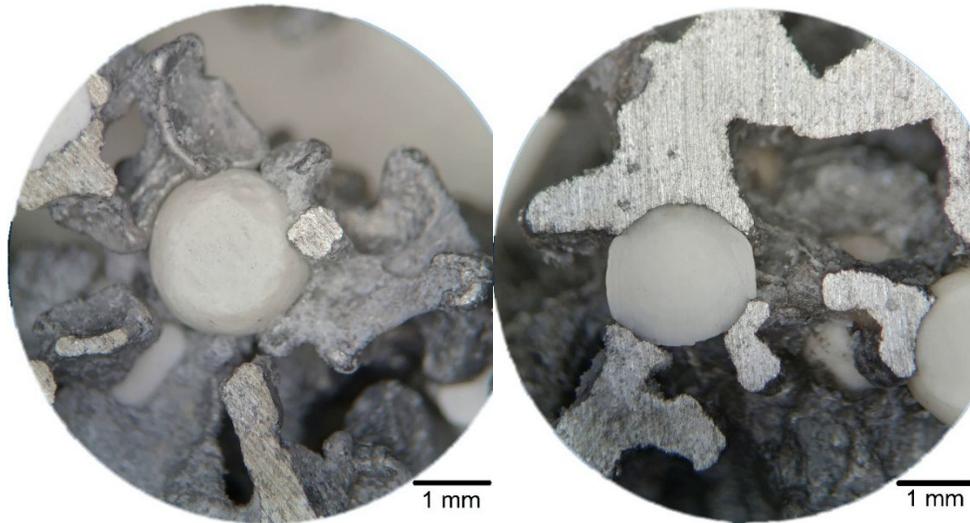


Figura 52 Ubicación de las partículas reforzantes dentro de la matriz metálica. Hidróxido de aluminio (izquierda), alúmina (derecha).

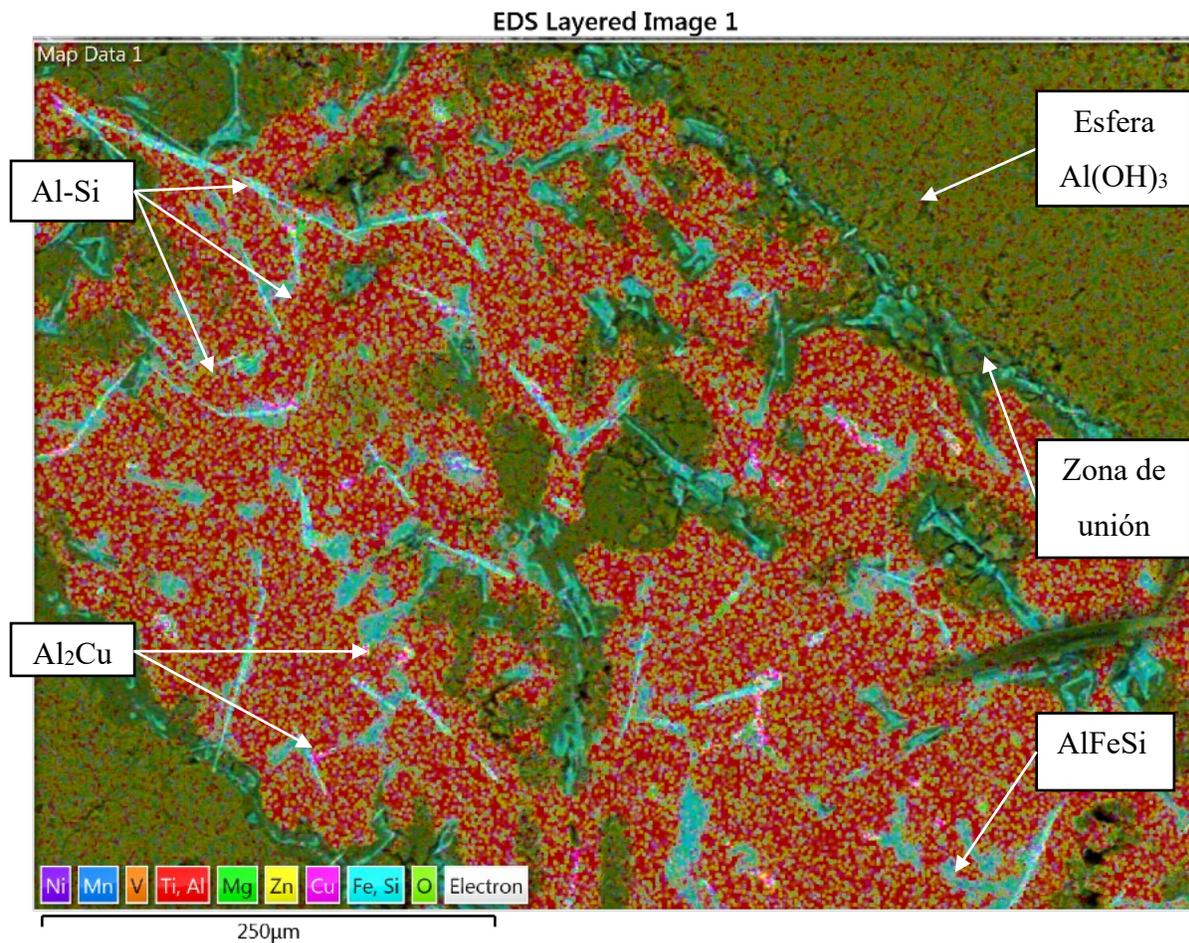
### 3.3. Estudio de la interface creada entre el material reforzante y la matriz

En esta sección se realizará un análisis para determinar si existe alguna interacción entre la matriz y el material reforzante, alguna interface o productos de reacción. Esto es importante, ya que podría influir en las propiedades mecánicas finales de las espumas. De la mano con este análisis se podría pensar que las propiedades mecánicas se verían favorecidas si se crea algún mecanismo de unión entre la matriz y el reforzante, ya que se podría producir la transferencia de carga de la matriz hacia las partículas cerámicas sin que éstas se separen completamente de la matriz, soportando la carga. Por el contrario, si las partículas no presentan ninguna unión con la matriz las propiedades mecánicas se verían comprometidas, ya que actuarían como partículas independientes. Para analizar estos fenómenos se analizó la microestructura de las espumas, enfocándonos en la interface matriz-reforzante, un análisis elemental (EDS), mediante mapeo y escaneo lineal, y difracción de rayos x.

#### 3.3.1. Espumas con relación 50% NaCl-50% Refuerzo

En primera instancia presentamos el mapeo correspondiente a la espuma con  $\text{Al}(\text{OH})_3$  como material reforzante (Figura 53). Se denota que en la zona delimitada por la esfera (interface)

se observa una banda donde se muestra la presencia localizada de oxígeno y silicio. La presencia de Si elemental indica que la fase Si eutéctico solidificó de manera preferencial en la zona de contacto con el reforzante. Por otra parte, la presencia de O y menor contenido de Al en la interface podría sugerir que existe difusión entre la esfera reforzante de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  y la matriz, formándose  $\text{Al}_2\text{O}_3$  o algún otro óxido. Es importante destacar que en la matriz (aleación de Al) el contenido de Al es de 85.6 % atómico (ver Tabla 8), mientras que de acuerdo con sus composiciones estequiométricas el  $\text{Al}_2\text{O}_3$  contiene 40 % de Al. Por este motivo la intensidad de Al en la interface es mucho menor.



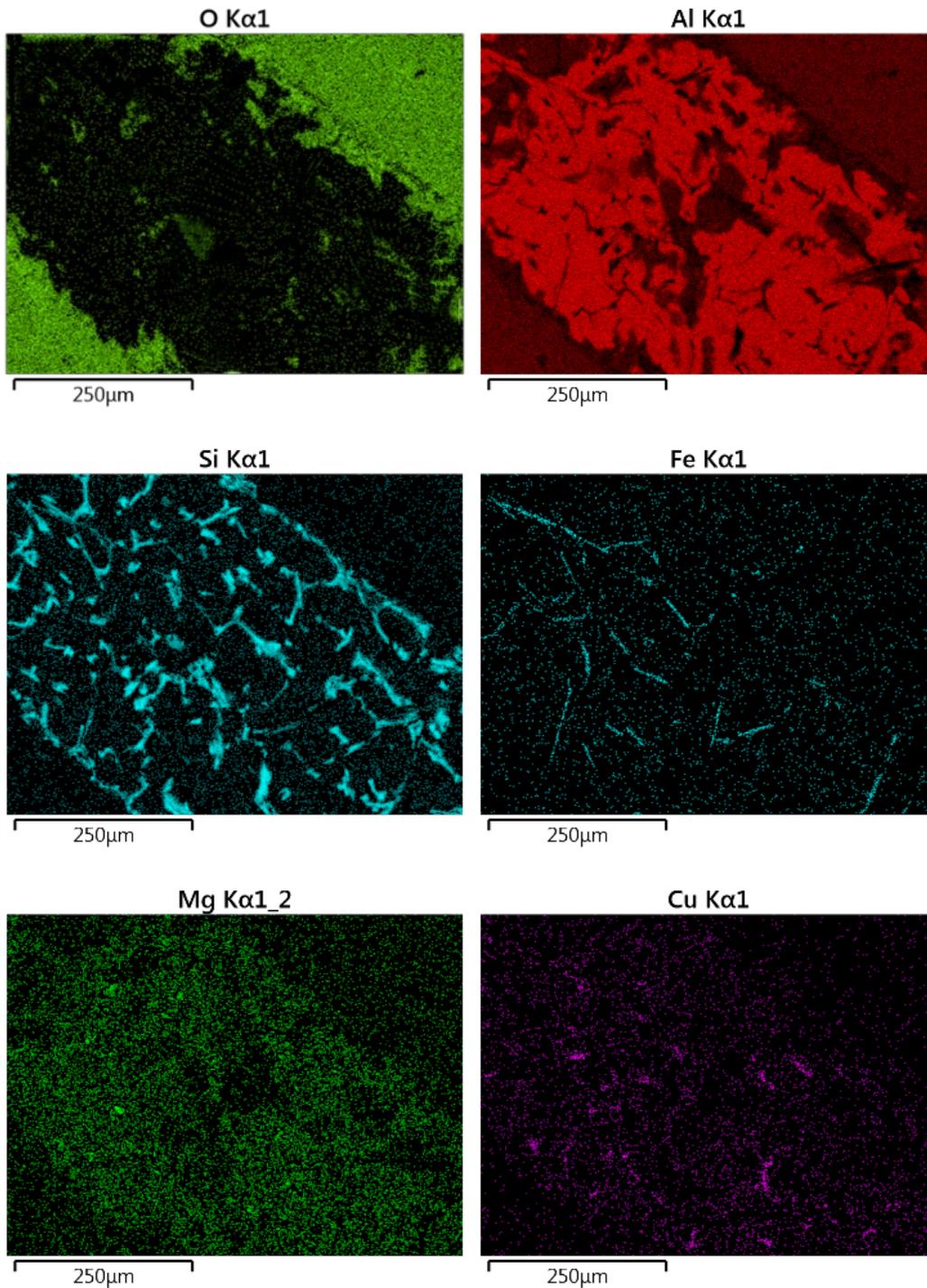
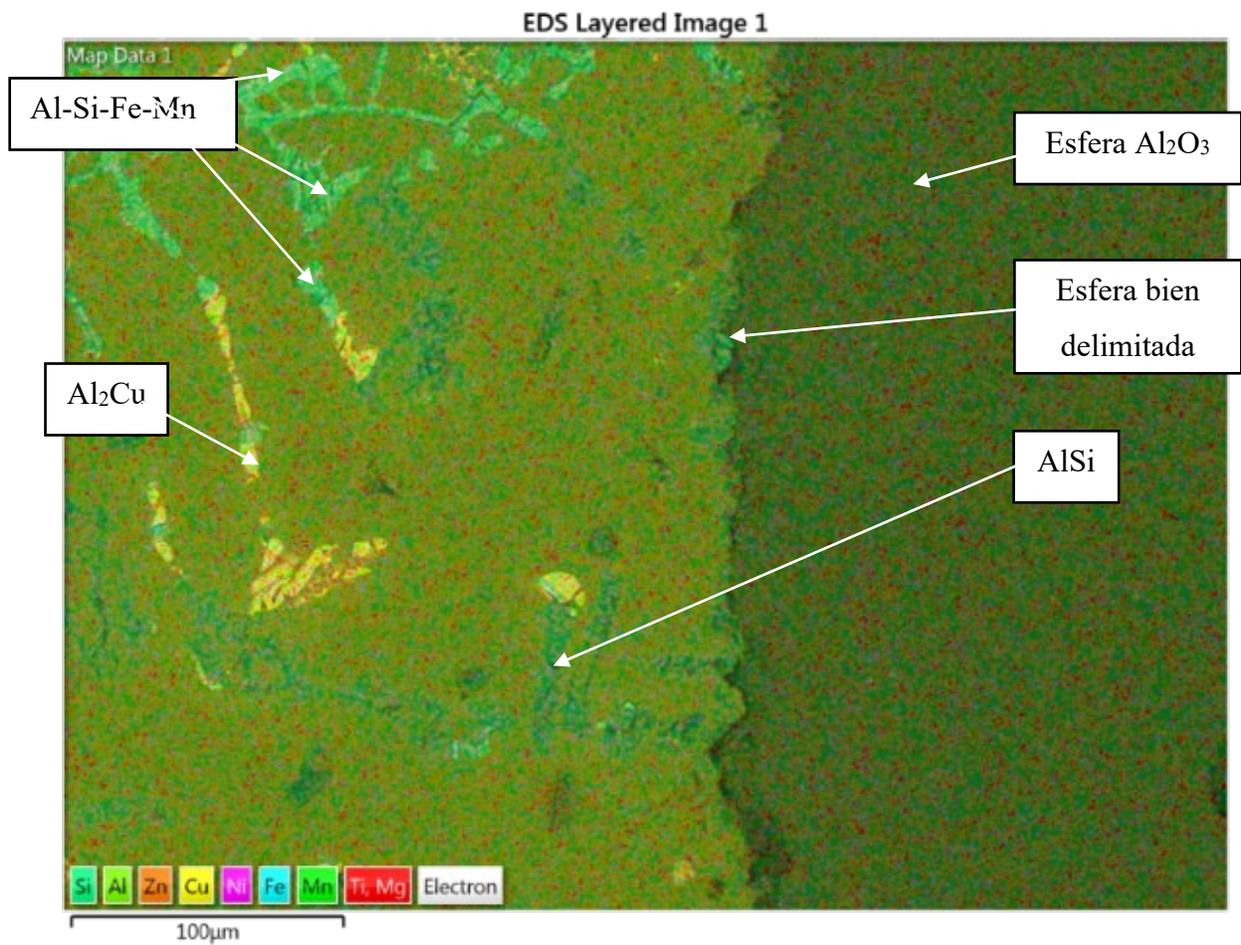


Figura 53 Mapeo químico elemental por EDS de la espuma 50% NaCl - 50% Al(OH)<sub>3</sub>.

Al compararse las imágenes anteriores con el mapeo correspondiente a la espuma con refuerzo de alúmina (Figura 54), puede apreciarse como diferencia fundamental que en este

caso no existe la interface antes mencionada. No existe una zona de transición de concentración de los elementos químicos, sino una frontera completamente definida. Esto es una muestra de la falta de mojabilidad por parte de la alúmina y por consiguiente de unión entre la matriz y el reforzante, lo cual podría ser una limitante en la obtención de las propiedades mecánicas deseables. Es necesario recordar que la presencia de una interface en los materiales compuestos facilita la transferencia de carga y hace que los materiales tengan mejores propiedades mecánicas.



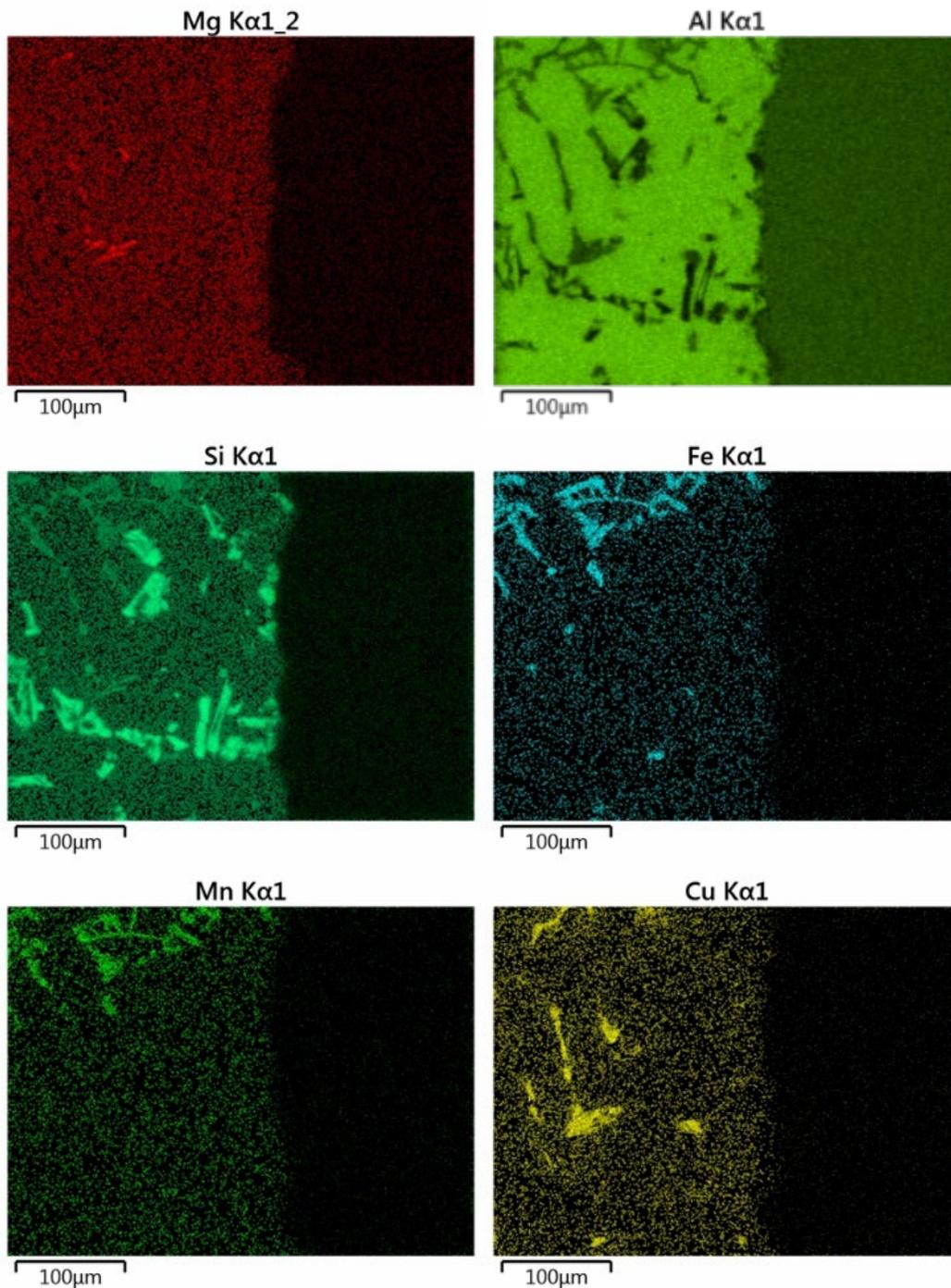


Figura 54 Mapeo químico elemental por EDS de la espuma 50% NaCl - 50% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

A pesar de que en los mapeos podemos observar una interface claramente marcada en la espuma reforzada con Al(OH)<sub>3</sub> y no en la espuma con Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, este hecho podemos corroborarlo al analizar los linescan correspondientes (Figura 55 y 56, respectivamente). Las

variaciones lentas en la Figura 55 para las cuentas de aluminio y oxígeno podrían indicar la presencia de algún óxido en la interface para las espumas con  $\text{Al}(\text{OH})_3$  como material de refuerzo, siendo la transición entre la esfera y la matriz una transición suave.

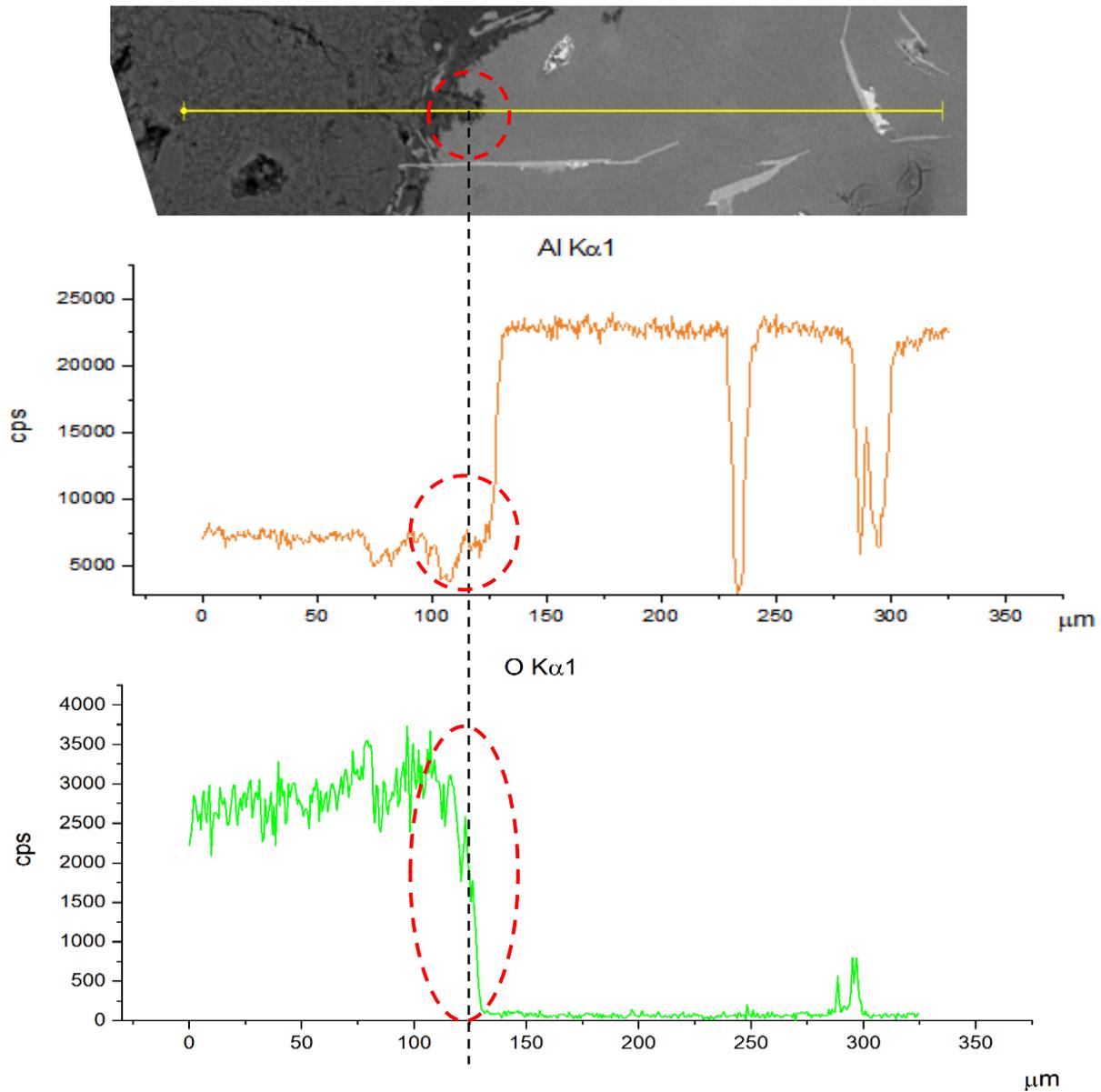


Figura 55 Linescan obtenido por EDS sobre la espuma 50% NaCl - 50%  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , zona de interface entre refuerzo y matriz.

Por el contrario, y como puede apreciarse en la Figura 56, para las esferas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  la caída de cuentas es abrupta, indicando que no existe interface presente, cambiando la composición química de forma diferente a la observada para el hidróxido.

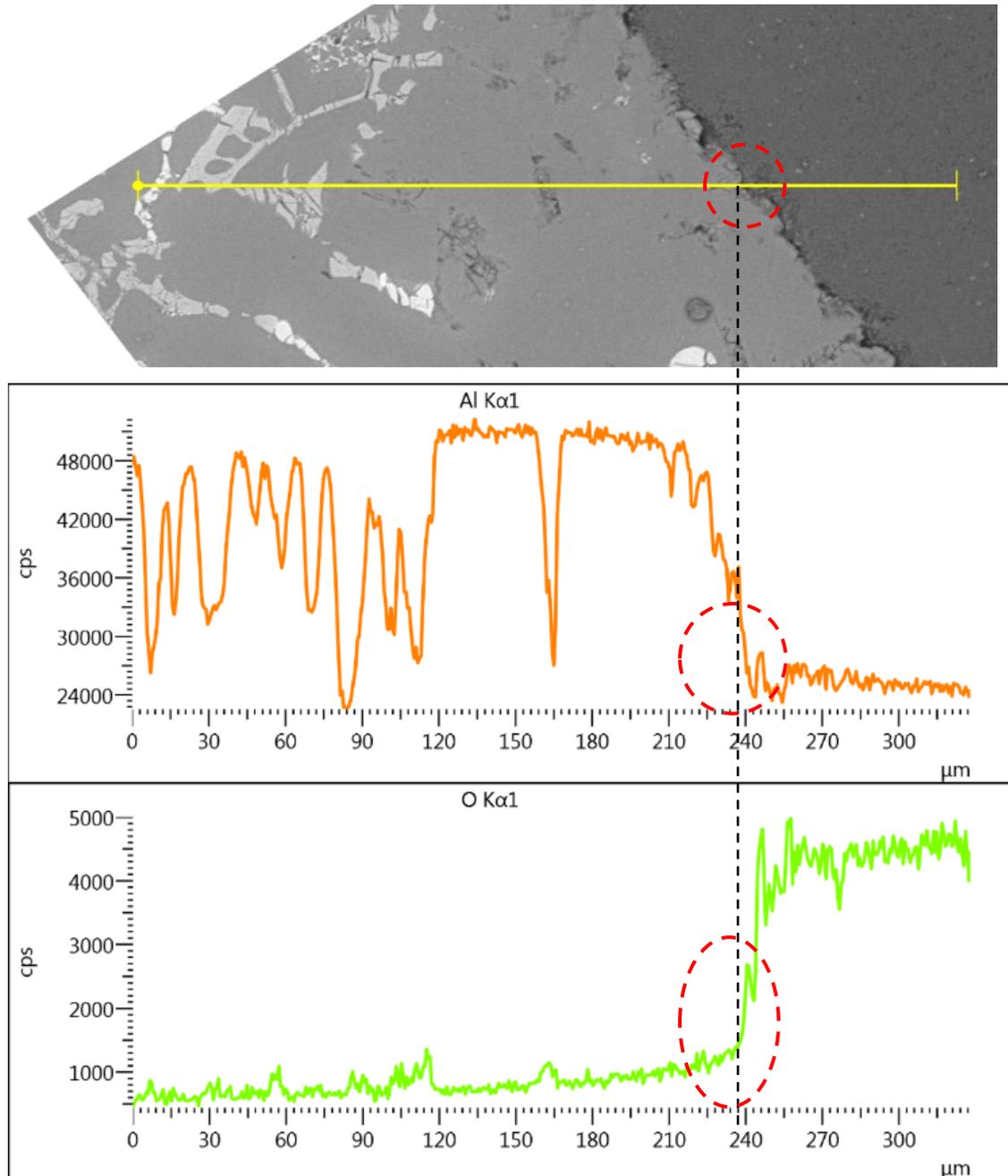
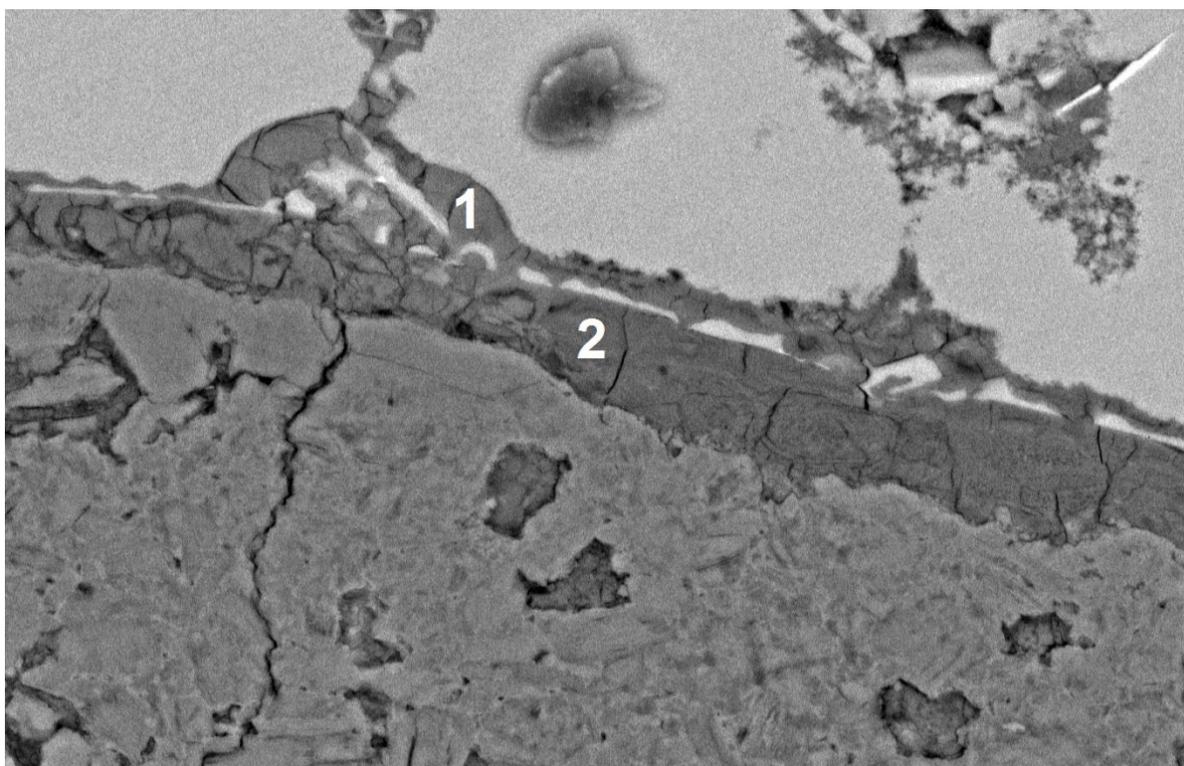


Figura 56 Linescan obtenido por EDS sobre la espuma 50% NaCl - 50%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , zona de interface entre refuerzo y matriz.

### 3.3.2. Análisis mediante EDS de la interface

Los mapeos y EDS lineales anteriormente mostrados, nos llevaron a la conclusión de la existencia de productos de reacción en las espumas reforzadas con  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . Para su identificación, primeramente, se realizaron EDS puntuales sobre puntos seleccionados en la interface, los que nos permitieron concluir que su composición química podría corresponder a  $\text{SiO}_2$ . Esto se aprecia en la Figura 57, donde los porcentajes de elementos de aleación fueron, para el EDS puntual 1, 30 % at. de Si y 52 % de O; mientras que para el EDS puntual 2 se encontró 7 % de Si y 68 % de O. El EDS 2, al realizarse más cercano al reforzante, resultó en valores mayores de O. Es importante recordar que el EDS es un método semicuantitativo, con el cual no podemos determinar exactamente la presencia o no de una fase. Sin embargo, es una herramienta invaluable para tener una estimación. Por tal motivo, para corroborar que el producto de reacción correspondió al  $\text{SiO}_2$ , se realizó DRX, cuyos resultados presentaremos más adelante en el apartado de análisis de la interface.



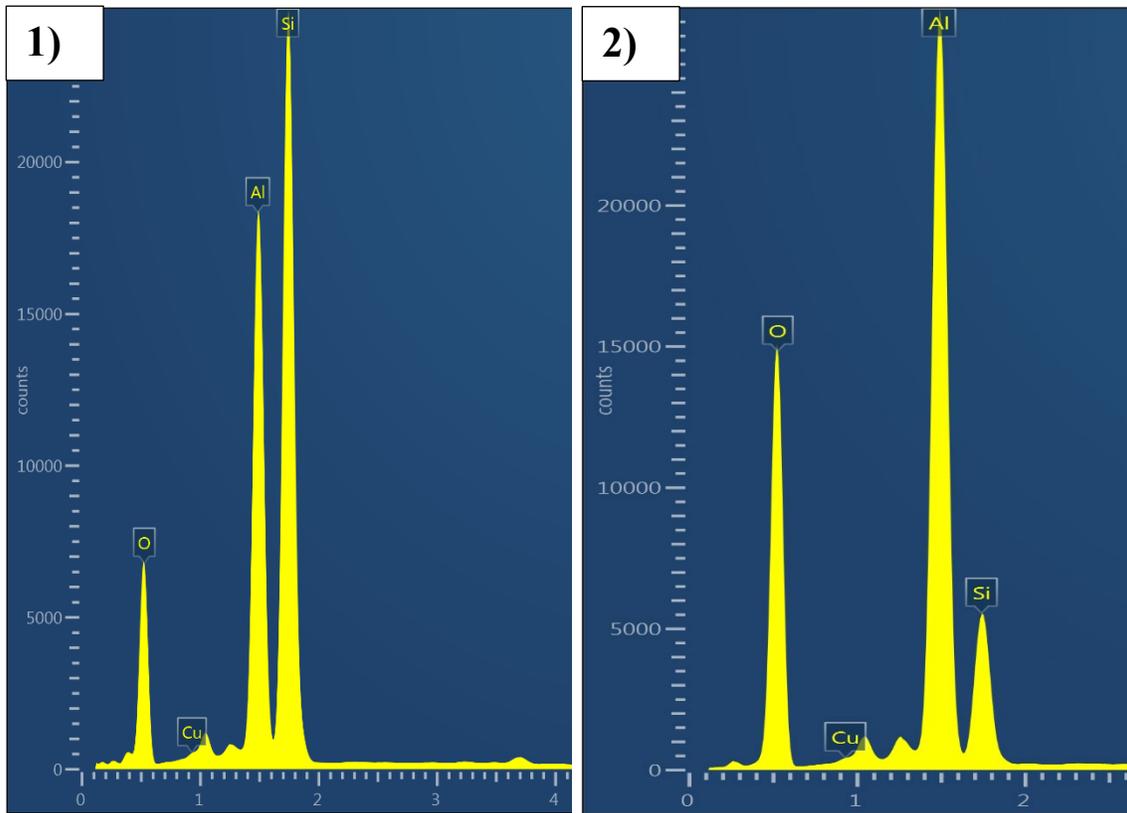
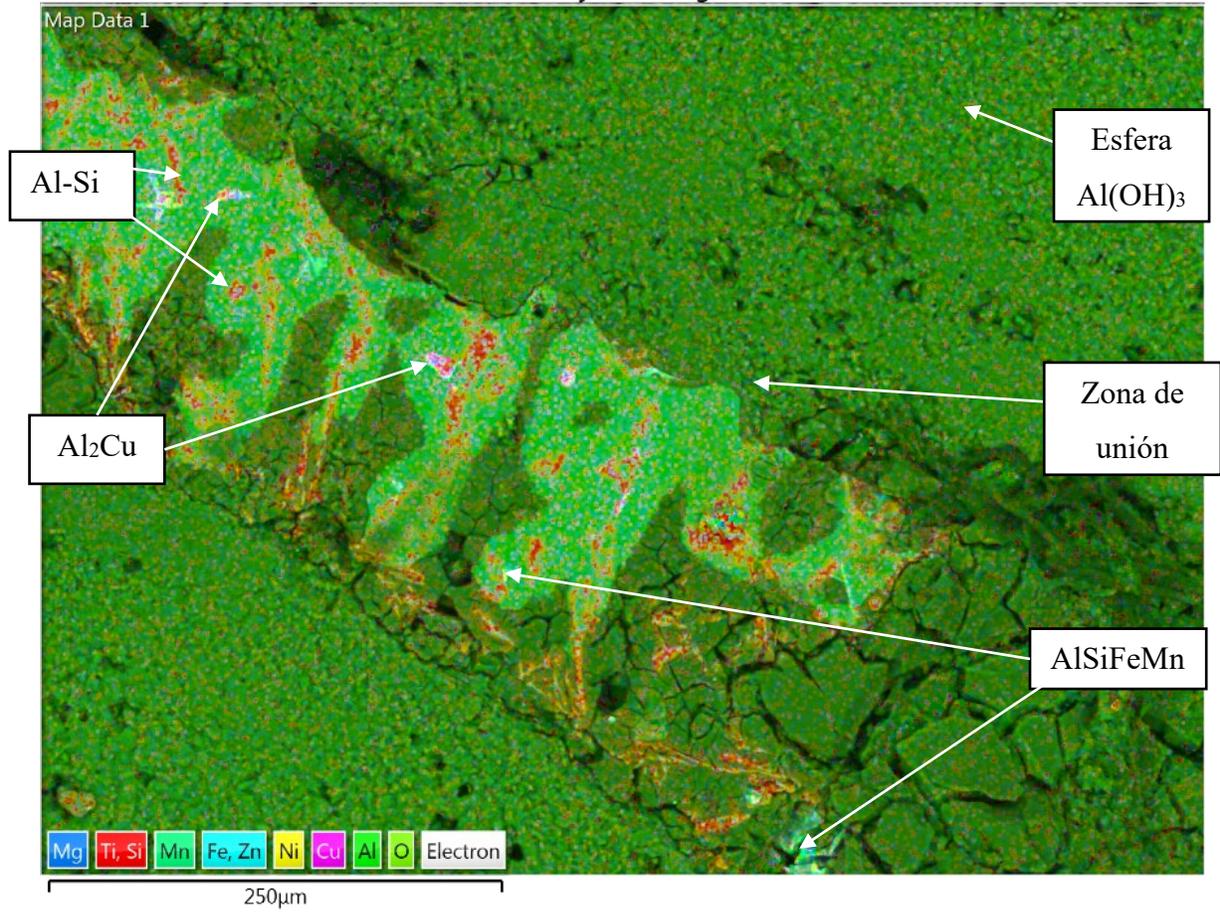


Figura 57 Imagen obtenida mediante SEM, y EDS realizados a la zona de interface en los puntos 1 y 2.

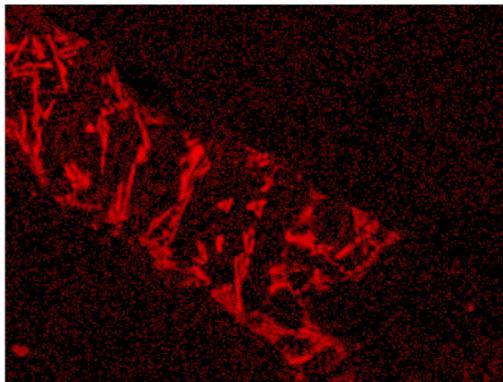
### 3.3.3. Espumas con relación 65% NaCl-35% Refuerzo

En los mapeos de las Figuras 58 y 59 nuevamente podemos encontrar presencia de las principales fases componentes en nuestra aleación, siendo éstas Al-Si eutéctico,  $Al_2Cu$ , Al-Si-Fe-Mn y fase Q. Tal cual se puede apreciar en el mapeo correspondiente a la unión matriz-hidróxido de aluminio (Figura 58), en este caso nuevamente tenemos una interface irregular, con contenidos irregulares de Al y O entre el reforzante y la matriz. La disminución en el contenido de Al en esta zona es el principal indicativo de esta unión.

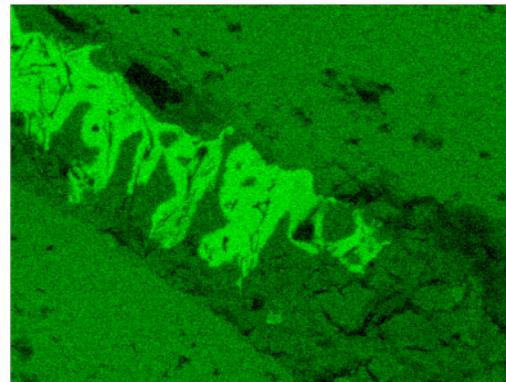
EDS Layered Image 1



Si Kα1



Al Kα1



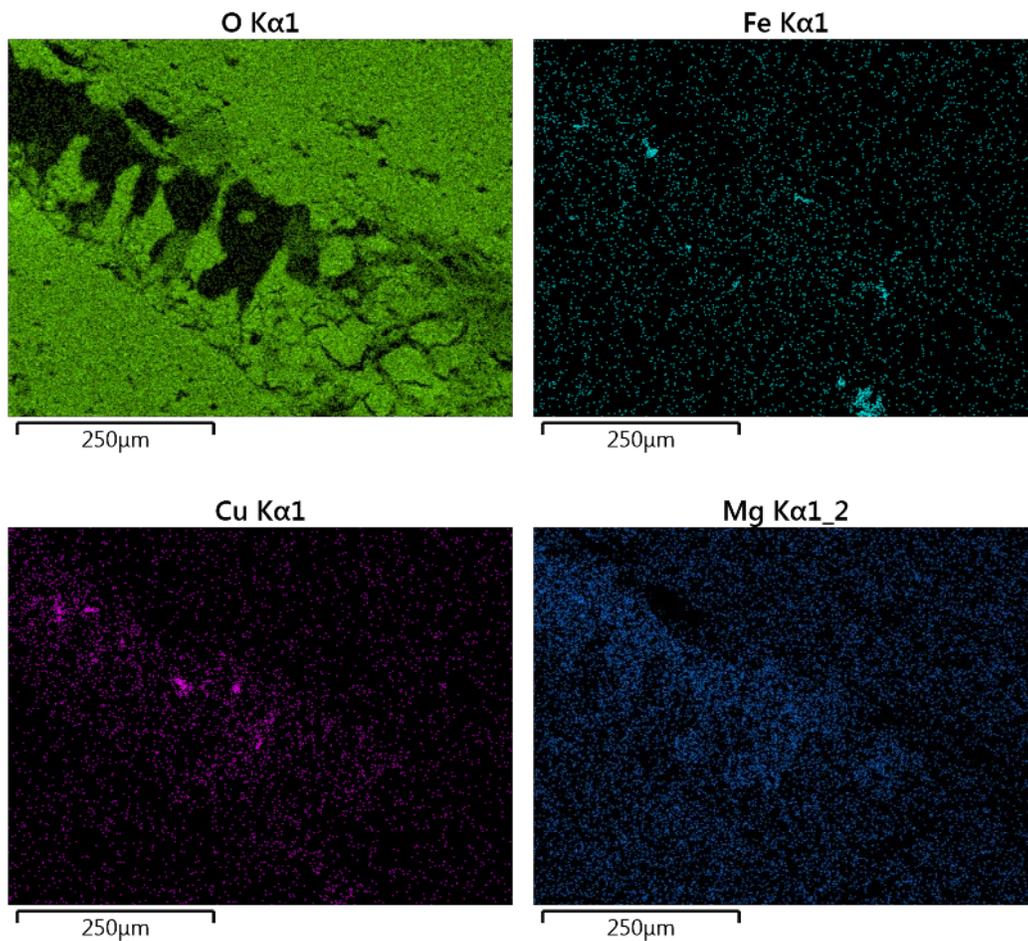
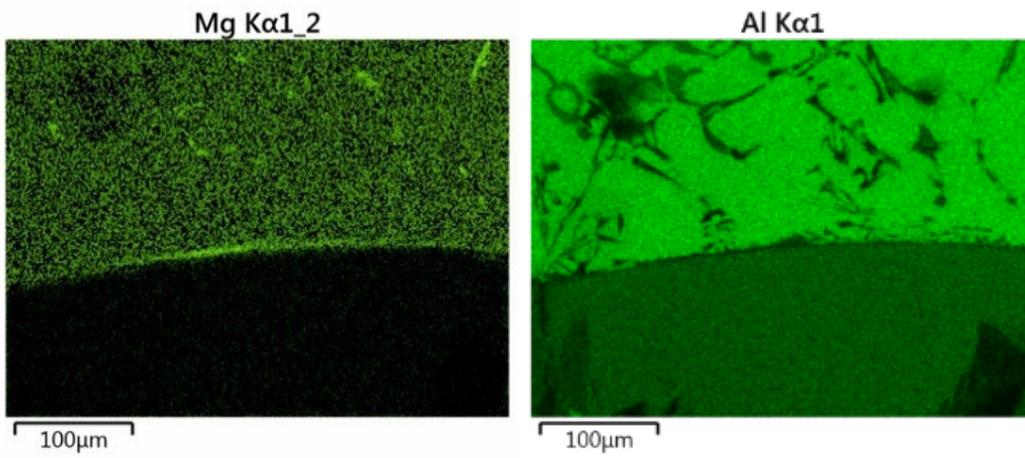
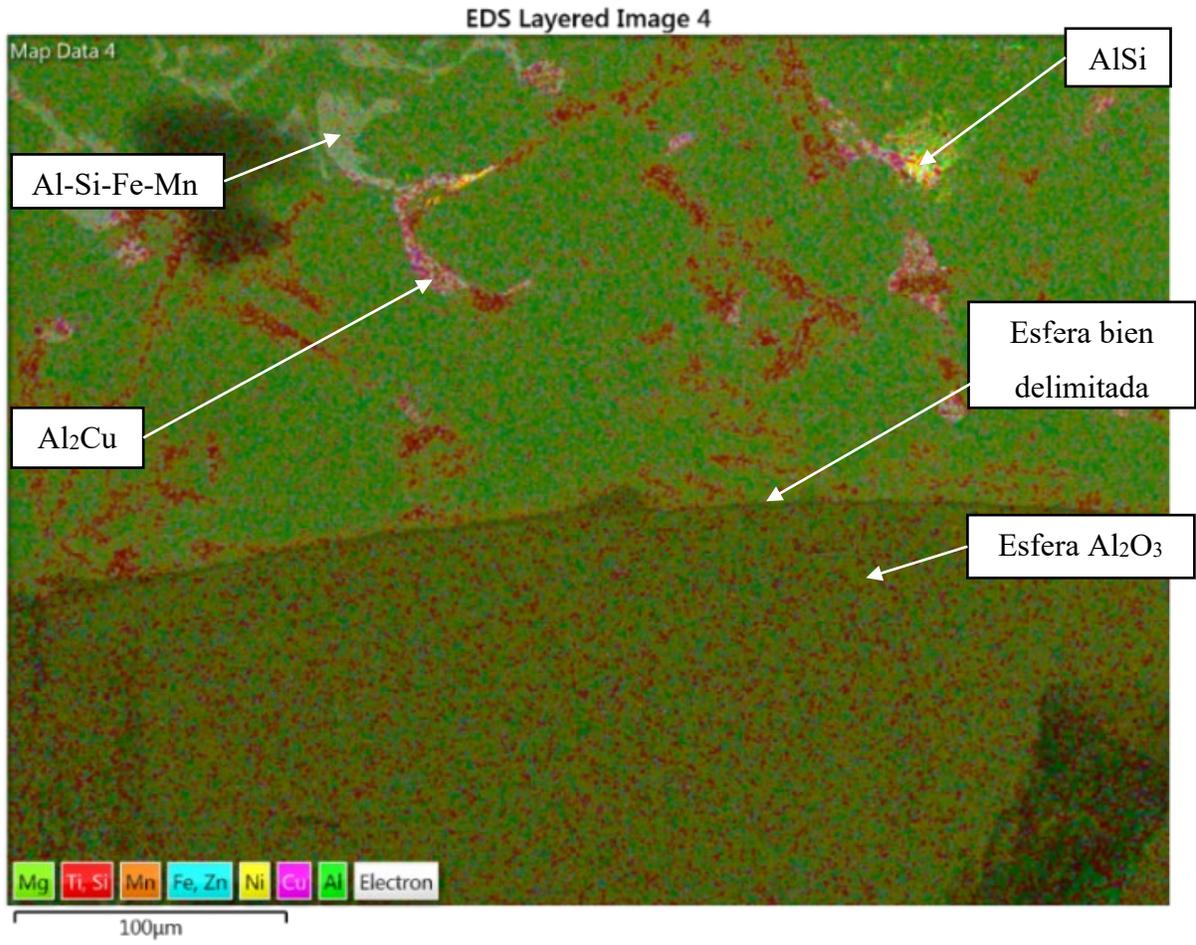


Figura 58 Mapeo químico elemental por EDS de la espuma 65% NaCl - 35% Al(OH)<sub>3</sub>.

De manera contraria, con la alúmina como reforzante no se detectó una interface visible, sino solamente la zona de unión matriz-refuerzo (Figura 59). Esto es sobre todo notorio para el mapeo del Al, donde se observan diferencias de intensidades de color más notables.



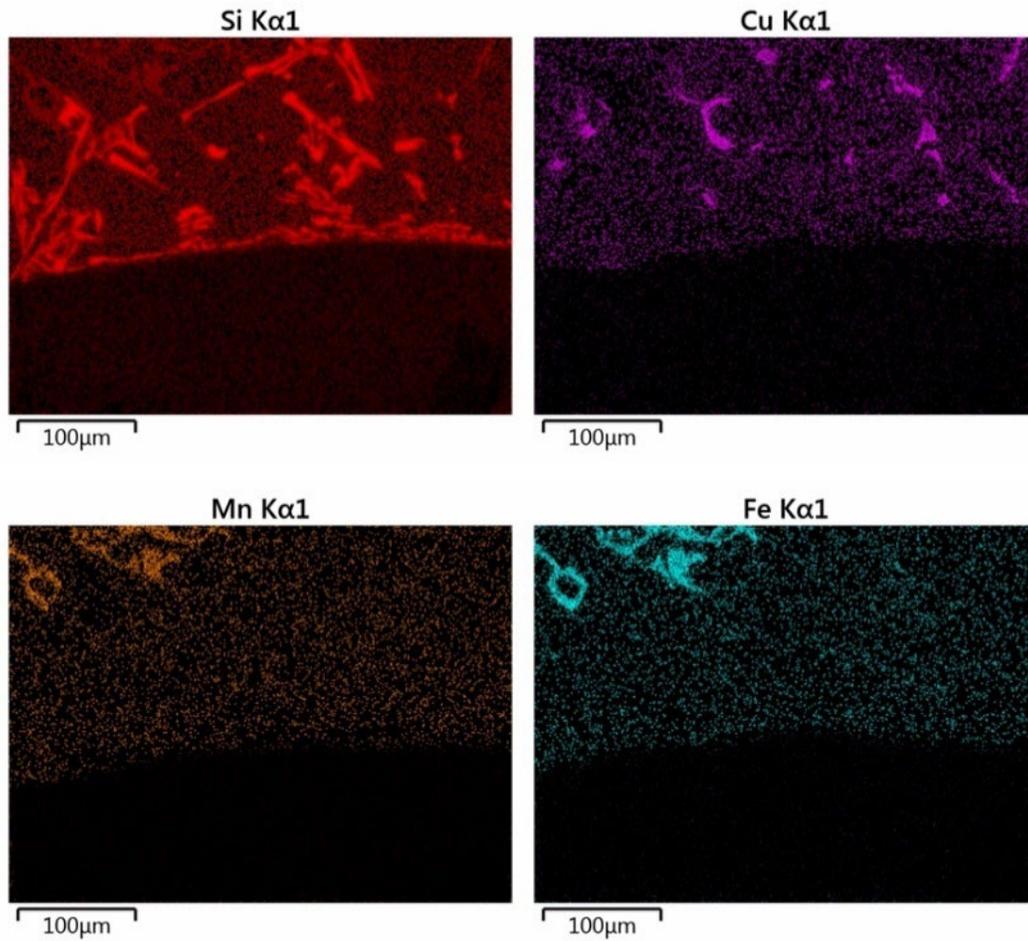


Figura 59 Mapeo químico elemental por EDS de la espuma 65% NaCl - 35% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Es de destacar que en este caso los linescan de Al y O (Figuras 60 y 61) para el caso del hidróxido presentaron variaciones suaves en la zona de transición entre la esfera y la matriz y para la alúmina los cambios son abruptos, lo que indica ausencia de interface.

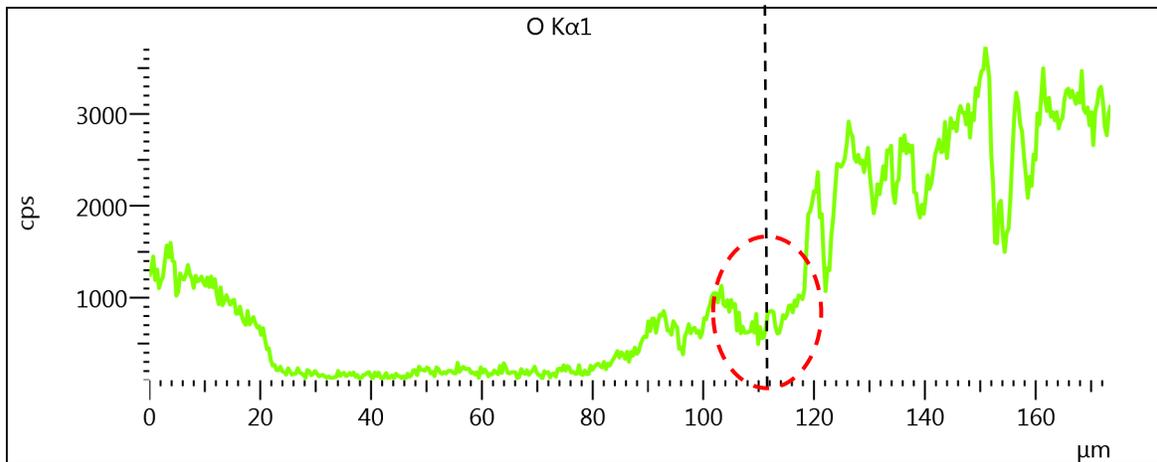
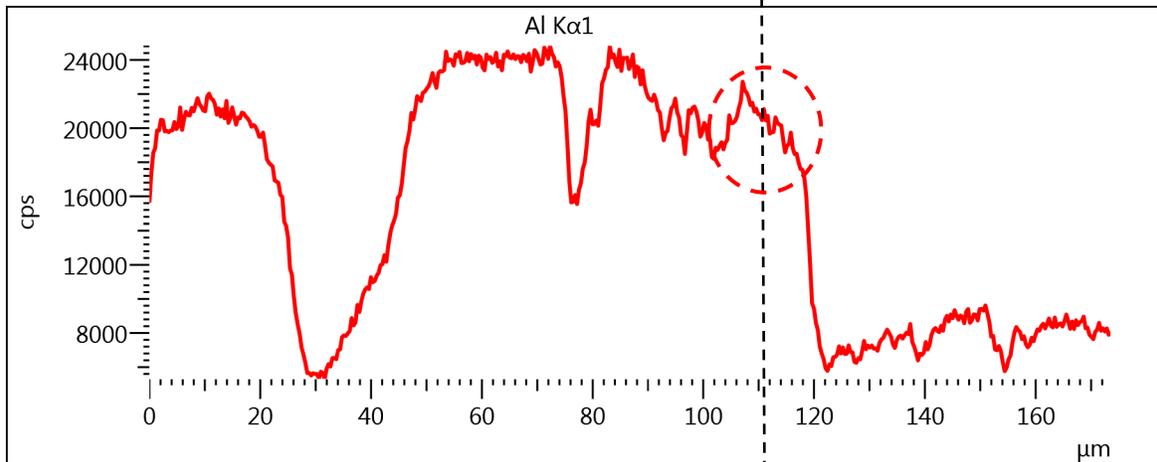
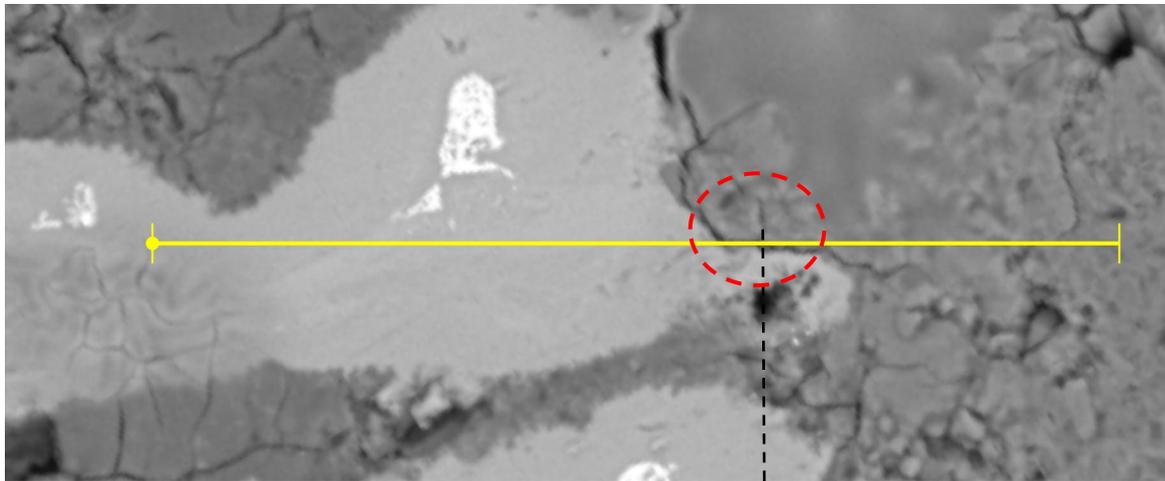


Figura 60 Linescan obtenido por EDS sobre la espuma 65% NaCl - 35% Al(OH)<sub>3</sub>, zona de interface entre refuerzo y matriz.

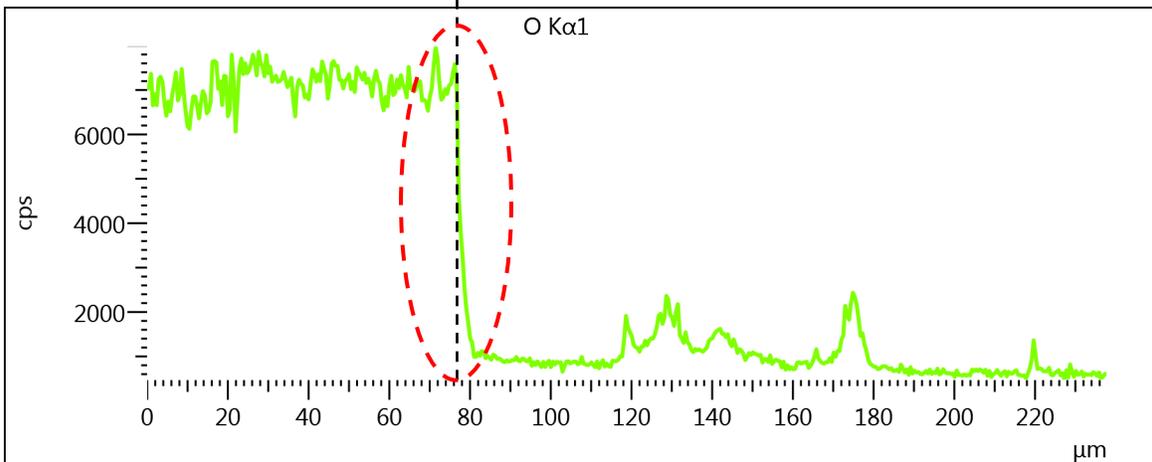
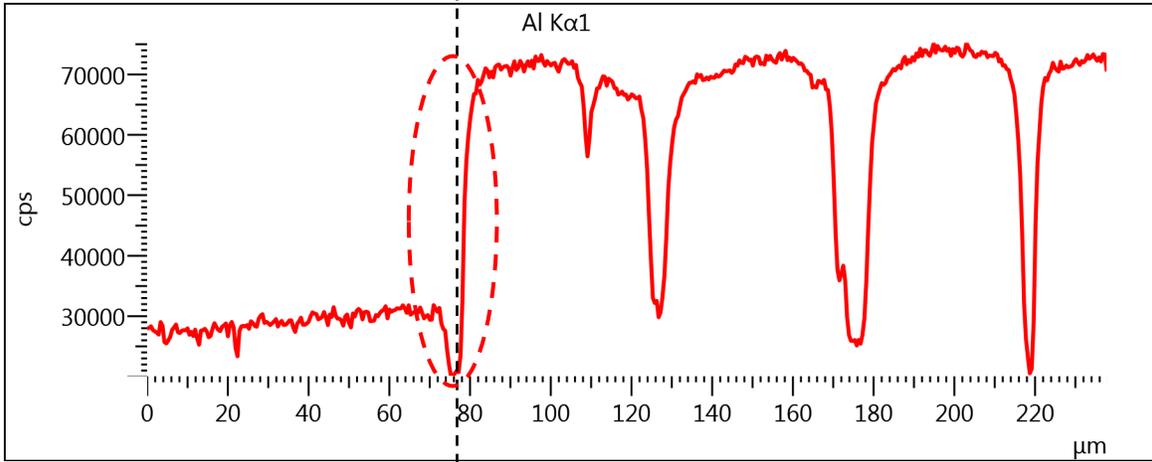
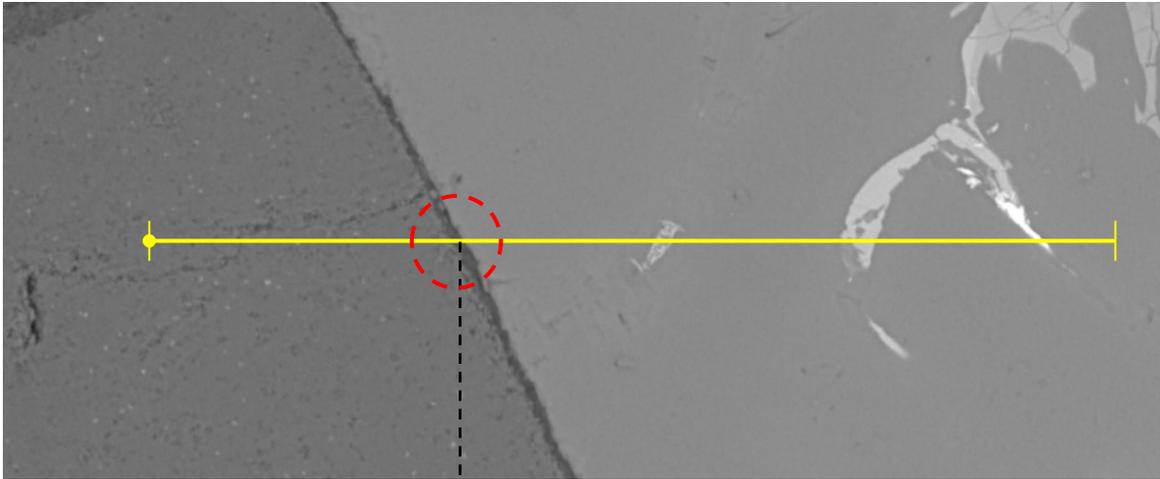
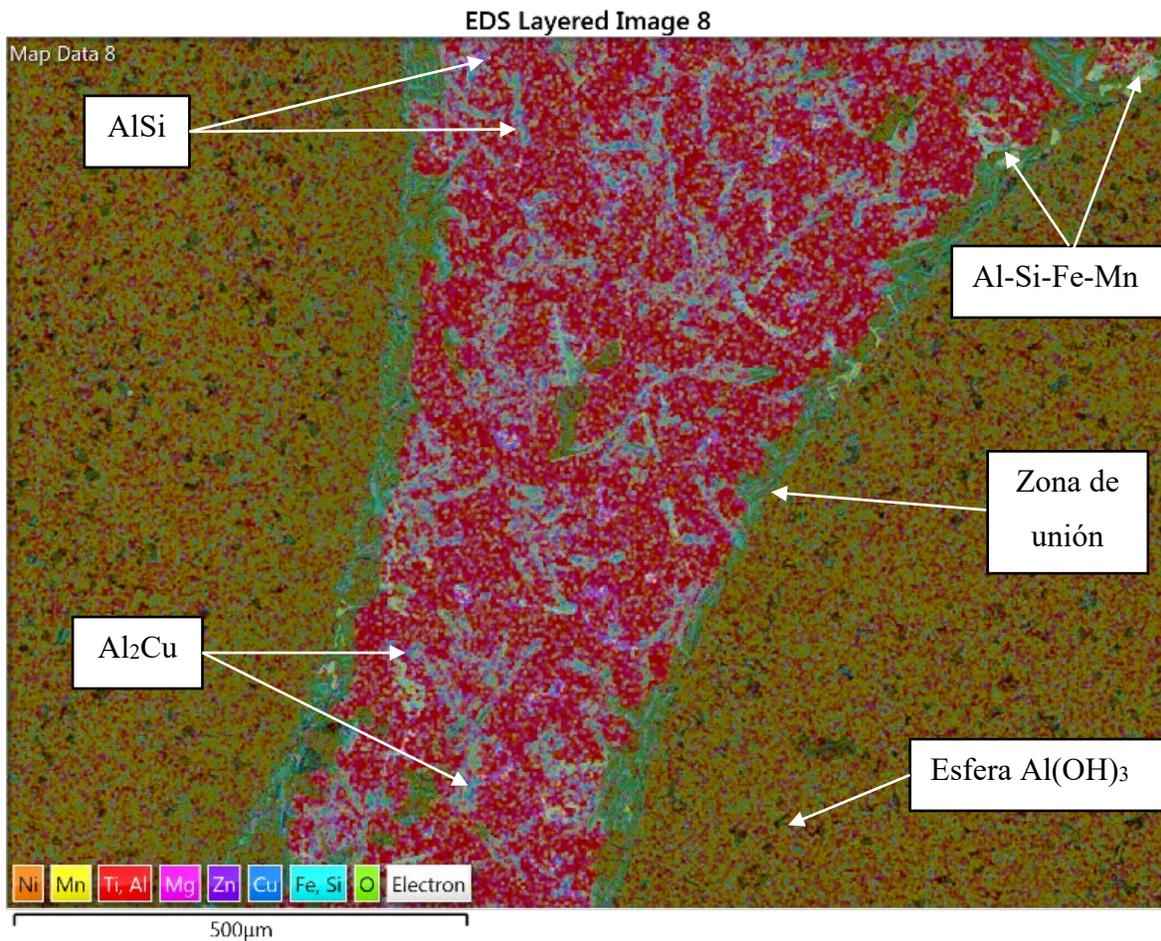


Figura 61 Linescan obtenido por EDS sobre la espuma 65% NaCl - 35% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, zona de interface entre refuerzo y matriz.

### 3.3.4. Espumas con relación 80% NaCl-20% Refuerzo

En la Figura 62 se observa el mapeo elemental para las espumas con relación 80% NaCl-20% refuerzo de  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . Se aprecia una zona interfacial muy bien delimitada, corroborando una vez más la unión matriz-reforzante en todas las espumas reforzadas  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . Nuevamente la disminución en la intensidad del color para el mapeo del Al en esta zona muestra la formación de un compuesto interfacial, y la mojabilidad entre la matriz y el  $\text{Al}(\text{OH})_3$ .



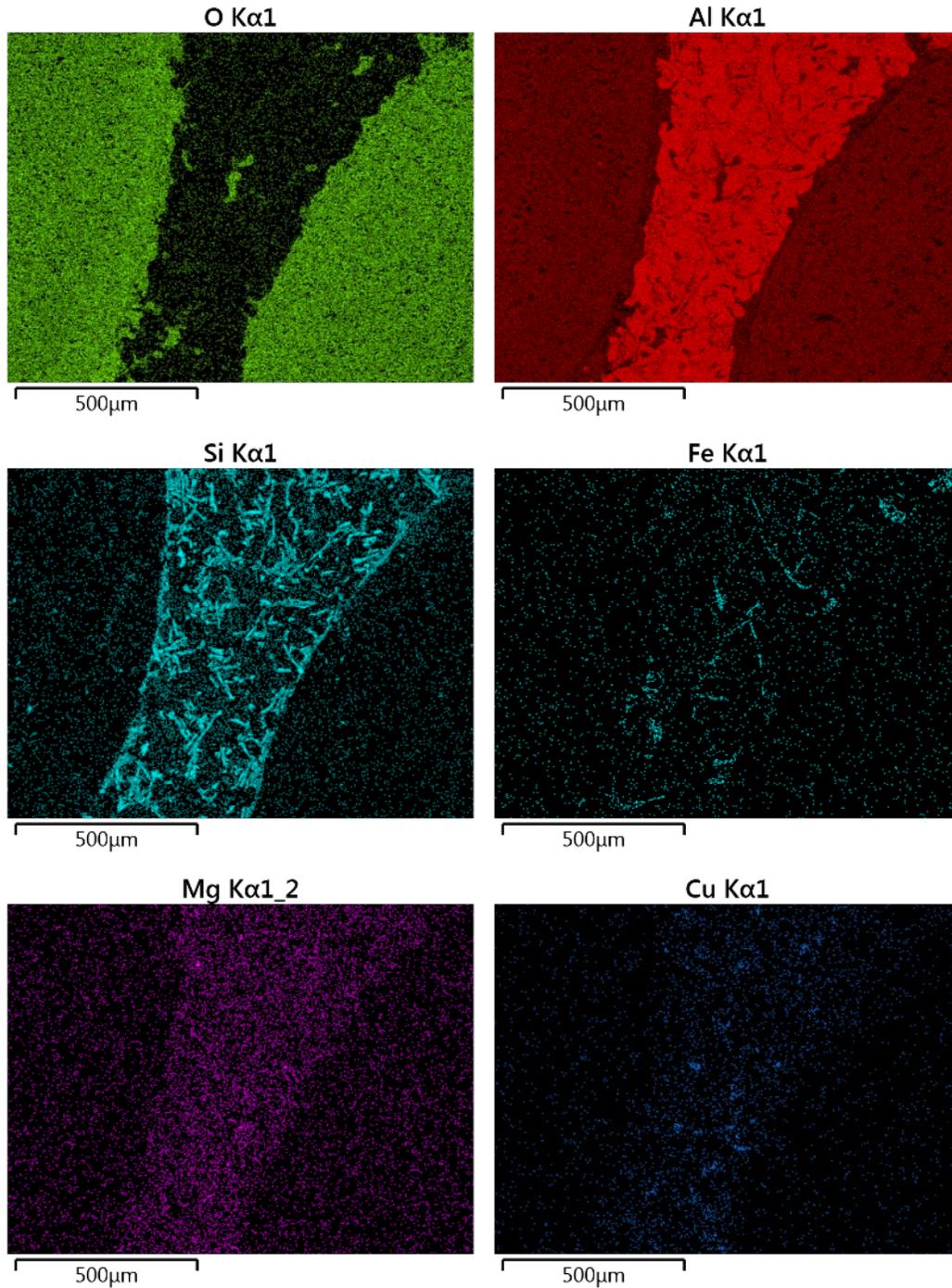
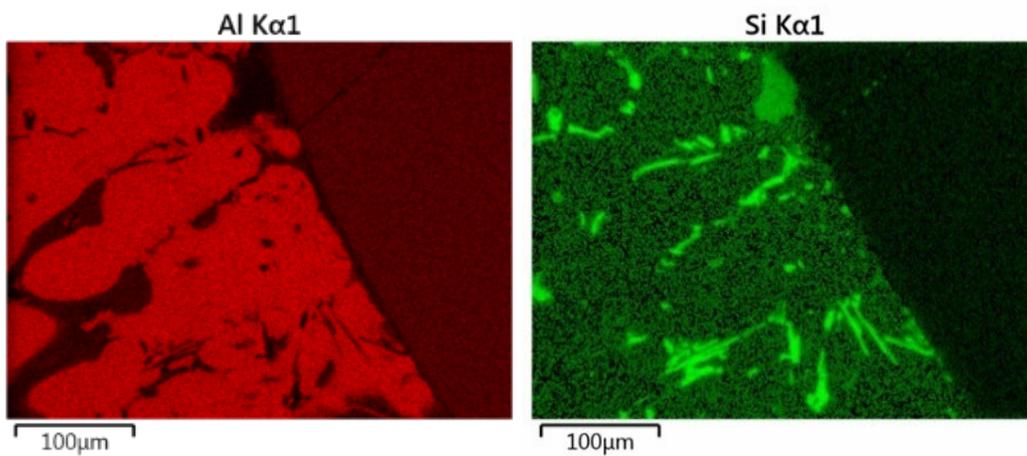
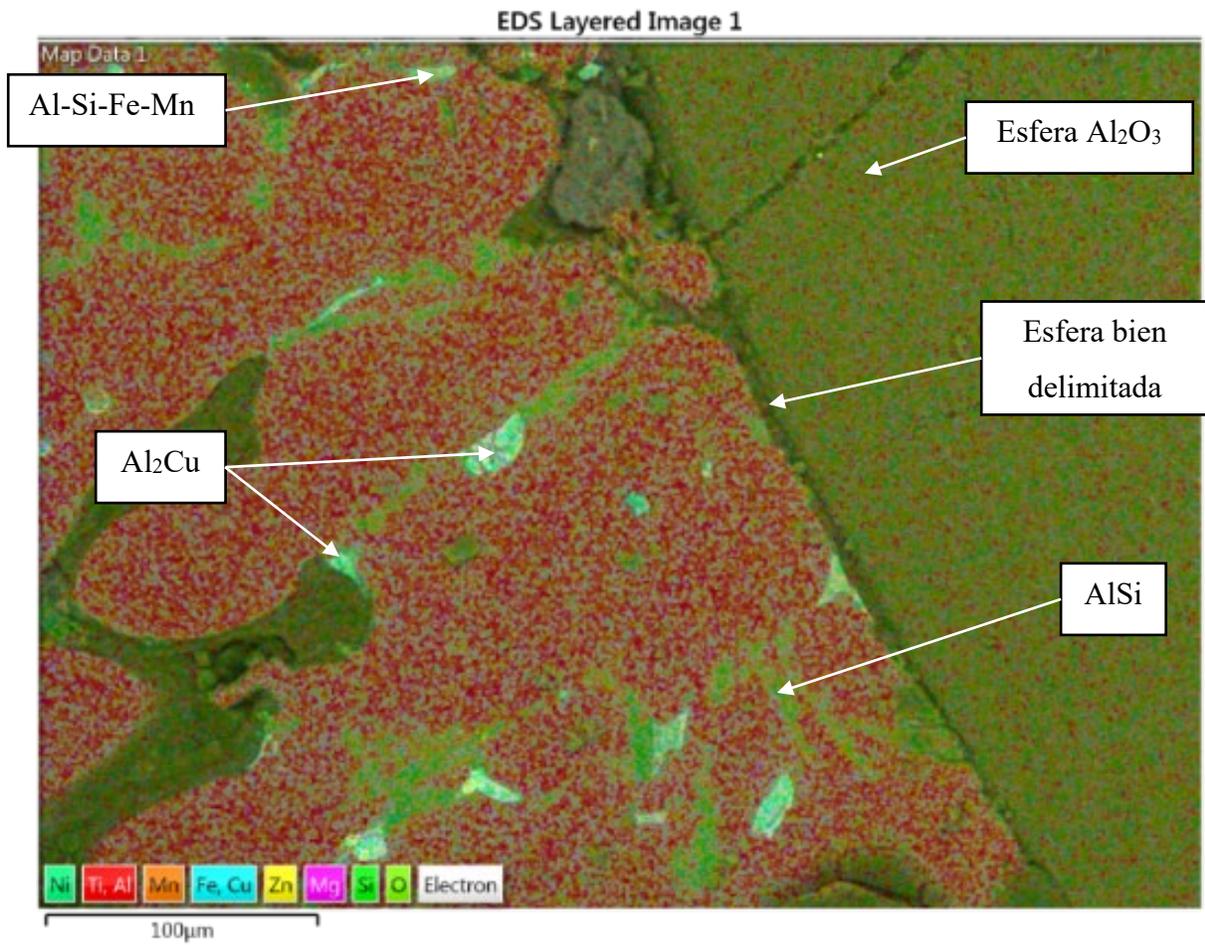


Figura 62 Mapeo químico elemental por EDS de la espuma 80% NaCl - 20% Al(OH)<sub>3</sub>.

En el caso de las espumas 80% NaCl-20% refuerzo de alúmina nuevamente en el mapeo de no se observa ninguna zona de reacción en la unión entre los dos materiales (Figura 63). Se

observa la distribución elemental base de la aleación, con los elementos característicos encuentran distribuidos homogéneamente. La separación matriz-reforzante es muy marcada.



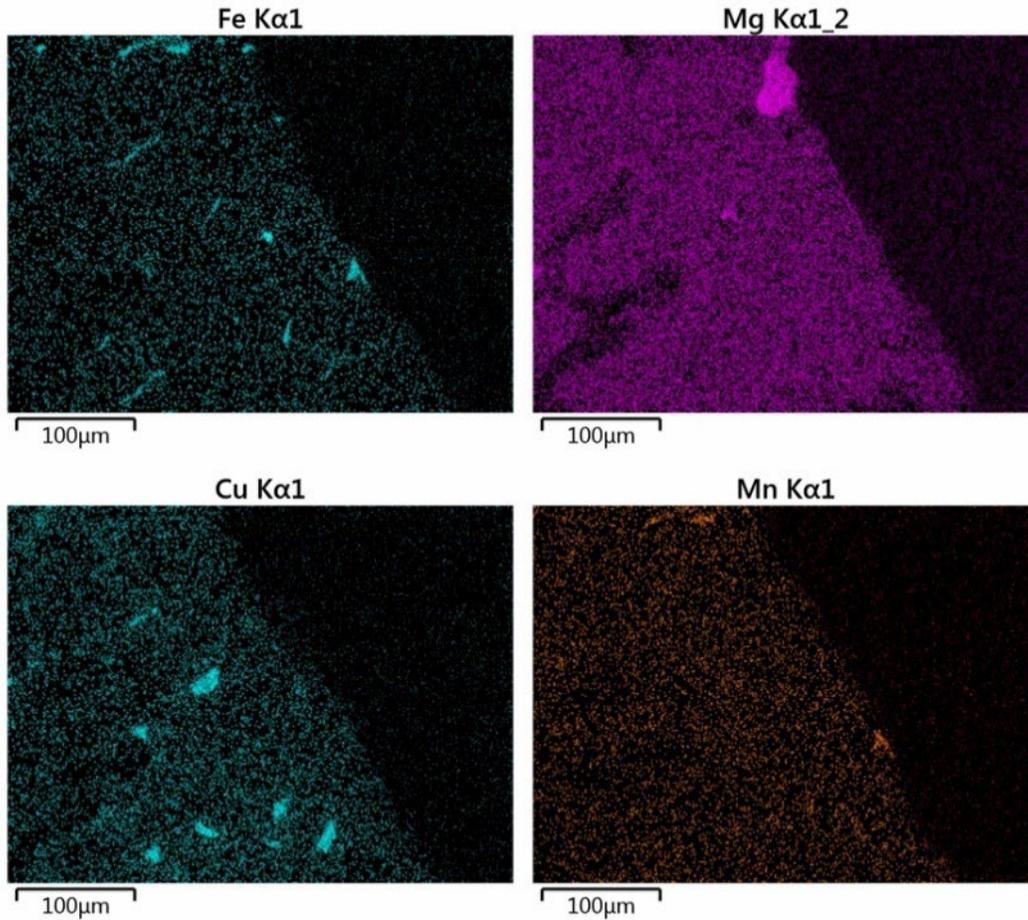


Figura 63 Mapeo químico elemental por EDS de la espuma 80% NaCl - 20% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Como puede observarse en las Figuras 64 y 65, se puede confirmar de manera repetitiva como los line scan poseen los mismos comportamientos que las espumas anteriores. Por un lado, en la Figura 64 tenemos al hidróxido como material reforzante, la transición entre la matriz y la esfera presenta cambios suaves en los gráficos mientras que en la Figura 65 en donde la alúmina juega el papel de material de refuerzo los cambios de un material a otro son bastante abruptos y notorios.

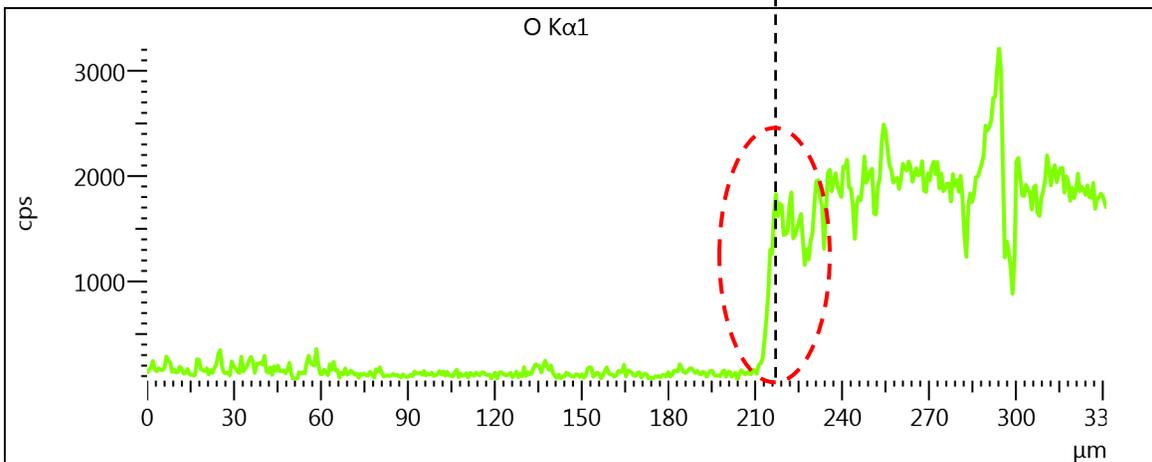
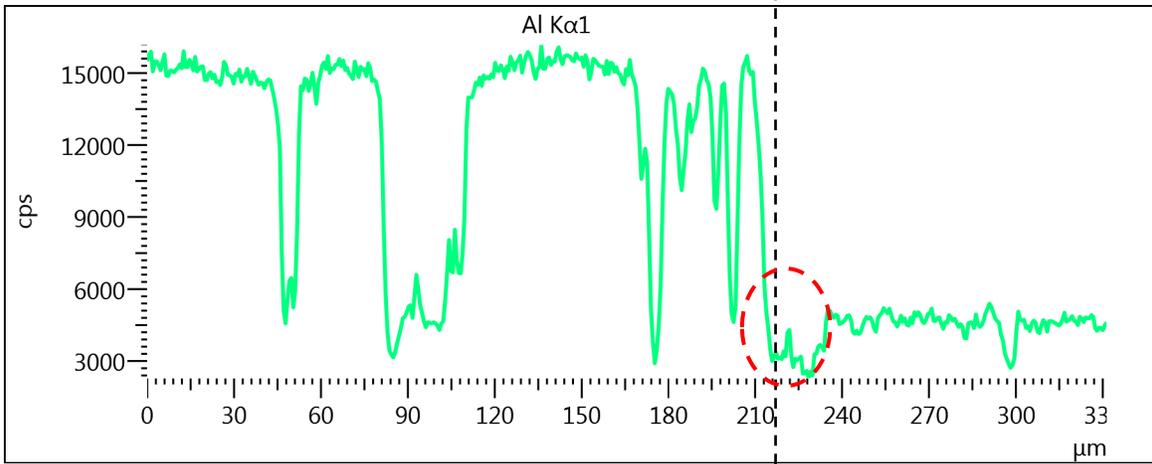
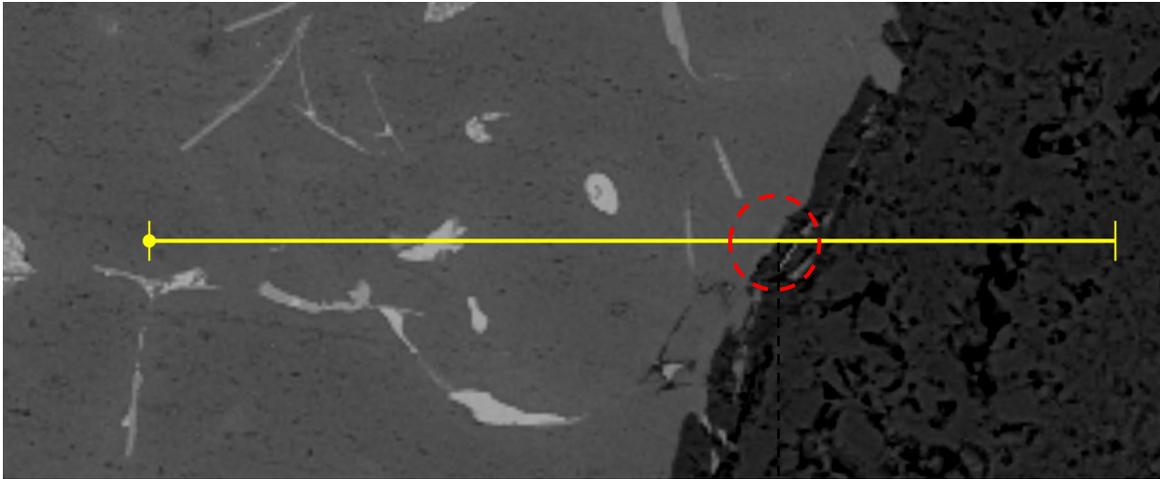


Figura 64 Linescan obtenido por EDS sobre la espuma 80% NaCl - 20% Al(OH)<sub>3</sub>, zona de interface entre refuerzo y matriz.

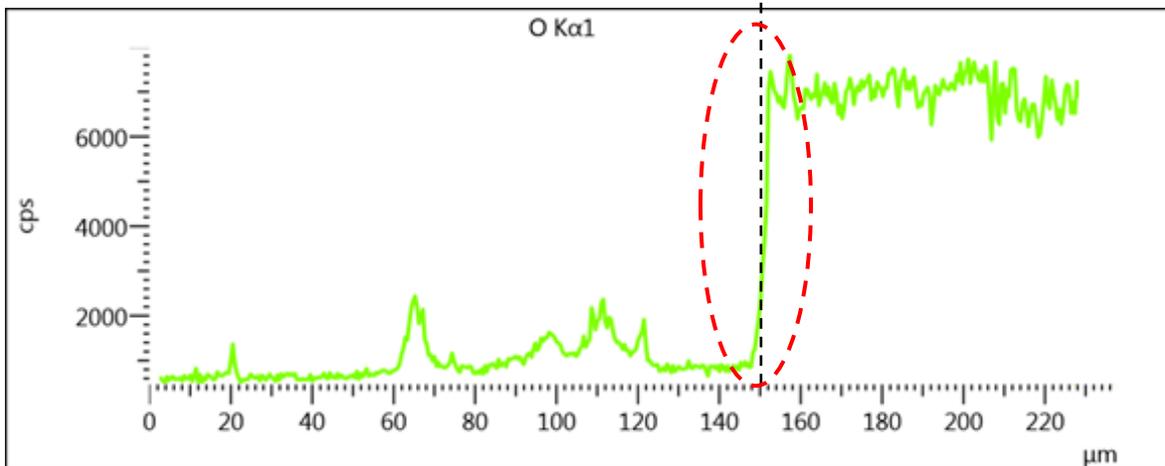
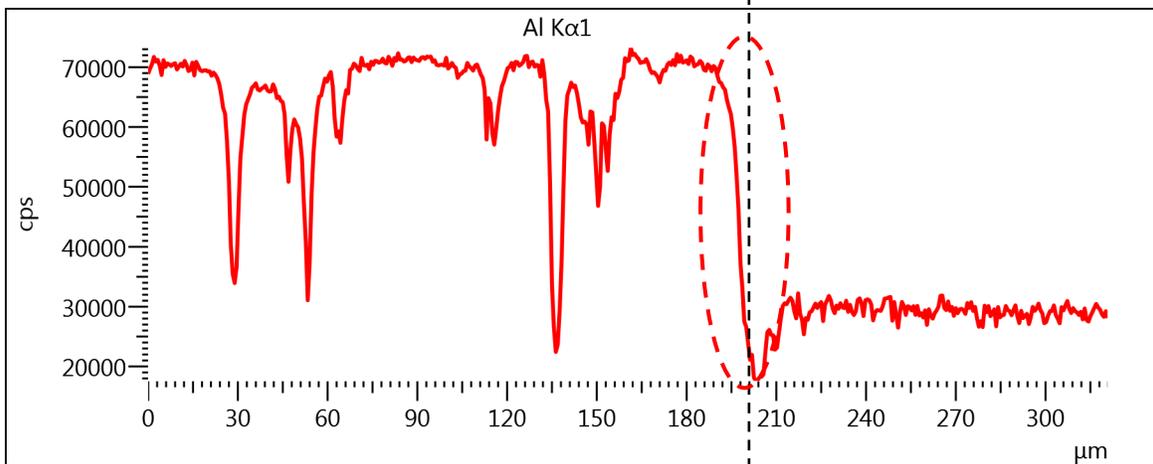
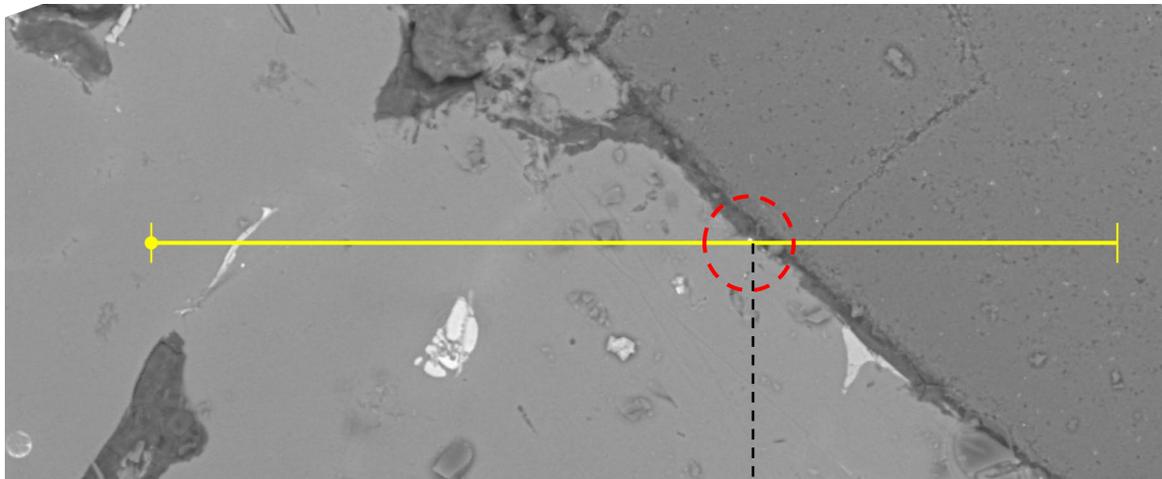


Figura 65 Linescan obtenido por EDS sobre la espuma 80% NaCl - 20% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, zona de interface entre refuerzo y matriz.

### 3.4. Análisis de la interface

Cuando vamos a analizar las interfaces entre los reforzantes y la matriz de Al, es importante analizar las estructuras de los cerámicos reforzantes. Primeramente, la alúmina utilizada en el presente trabajo, que posee una estructura cristalina interna donde los iones de oxígeno están empaquetados en un arreglo de celda hexagonal (CHP) con iones de aluminio ocupando 2/3 partes de los sitios octaédricos (Figura 66) 2040 °C. [50]

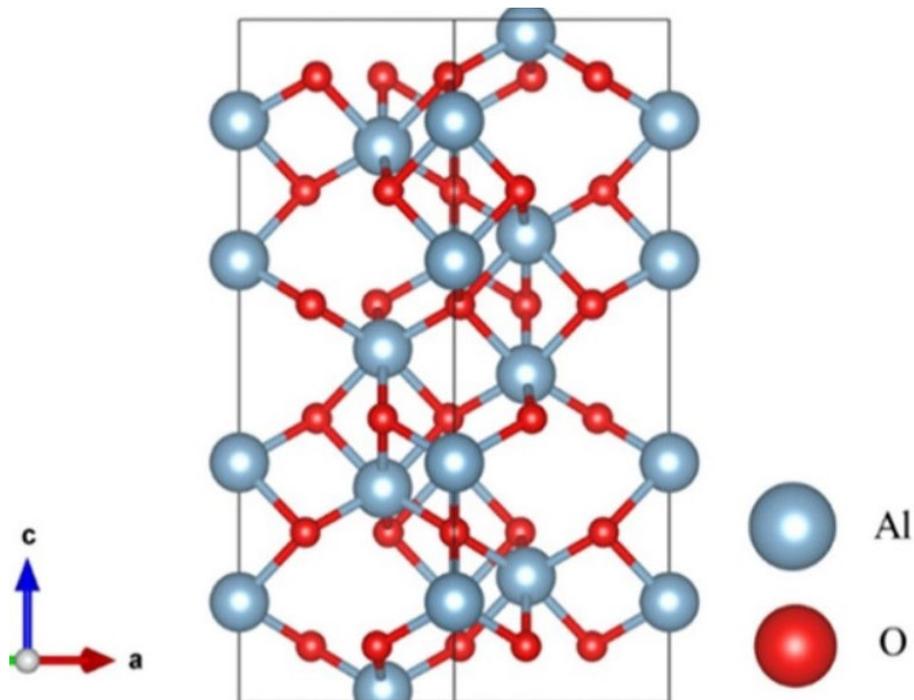


Figura 66 Estructura cristalina de la  $\alpha$ -alúmina. [101]

Por otra parte, la unidad estructural básica del hidróxido de aluminio consiste en dos láminas de iones de hidroxilo empaquetadas y unidas por los iones de aluminio, que ocupan dos tercios de los intersticios en un arreglo de octaédrico. A medida que las capas dobles se apilan, adoptan una estructura empaquetada abierta, cada capa de hidroxilo se encuentra directamente encima de la que está debajo. Este arreglo atómico puede observarse en la Figura 67.

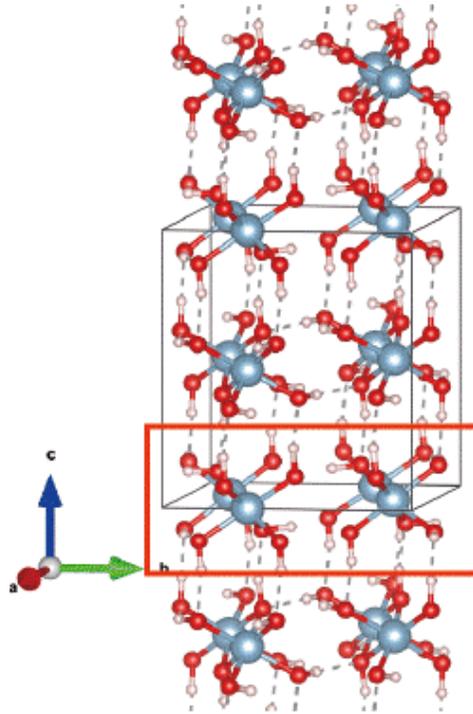


Figura 67 Estructura cristalina del  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . [102]

Debido a estas estructuras, y a las diferencias de composiciones entre las esferas reforzantes y la matriz, puede ocurrir la difusión de elementos de aleación, así como la formación de interfaces. En el caso de nuestra aleación matriz, los principales elementos aleantes son Si (10.7%) y Cu (3.6%). Se han encontrado muy pocas interfaces donde participe el Cu como elemento de aleación reaccionando con reforzantes de alúmina. Un ejemplo es la formación de  $\text{CuAl}_2\text{O}_4$  en una aleación Al-12Si-1.0Cu-1.1Mg-1.4Ni reforzada con fibras cortas de alúmina [103], pero solo bajo condiciones muy específicas cuando el metal fundido cuenta con exceso de oxígeno. Por otra parte, la adición de Si puede provocar la presencia de óxidos ricos en este elemento en la interface, como demostraron Janowski y Pletka [104] para aleaciones reforzadas con partículas de alúmina. La presencia de una interface como estas podría reducir o aumentar las propiedades mecánicas, dependiendo a si esta facilita a la unión o desunión del reforzante con la matriz. En el caso de nuestra investigación este tipo de interfaces no fue detectada al analizar mediante SEM las espumas reforzadas con alúmina.

Es por esto por lo que con la finalidad de analizar la presencia de la interface en las espumas reforzadas con  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , éstas se sometieron a un estudio mediante DRX. En la Figura 68, se aprecian los difractogramas correspondientes a la aleación as-cast, la espuma, el hidróxido de aluminio, y con especial atención apreciamos el difractograma de la interface. Este difractograma se tomó utilizando una muestra preparada de manera especial para el estudio de posibles productos de reacción, generados por la interacción de la aleación líquida con las partículas reforzantes durante el proceso de infiltración. Para esto, se procedió primeramente a eliminar mecánicamente las esferas reforzantes, y la mayor parte de la matriz posibles, dejando solamente el hueco donde estaría el reforzante, con parte de la matriz. Esto posibilitó disminuir la cantidad de  $\alpha\text{-Al}$  para que el porcentaje de posibles productos de reacción aumentara, y fueran detectables mediante DRX. Como puede apreciarse, existen dos picos que no corresponden ni a la aleación as-cast, ni al reforzante. Estos picos pudieron indexarse (flecha), correspondiendo al  $\text{SiO}_2$ . Esto corrobora los datos obtenidos mediante los EDS realizados en la interface. La estructura del  $\text{Al}(\text{OH})_3$  mostrada en la Figura 67 y su elevada mojabilidad posibilitaron la formación de esta interface.

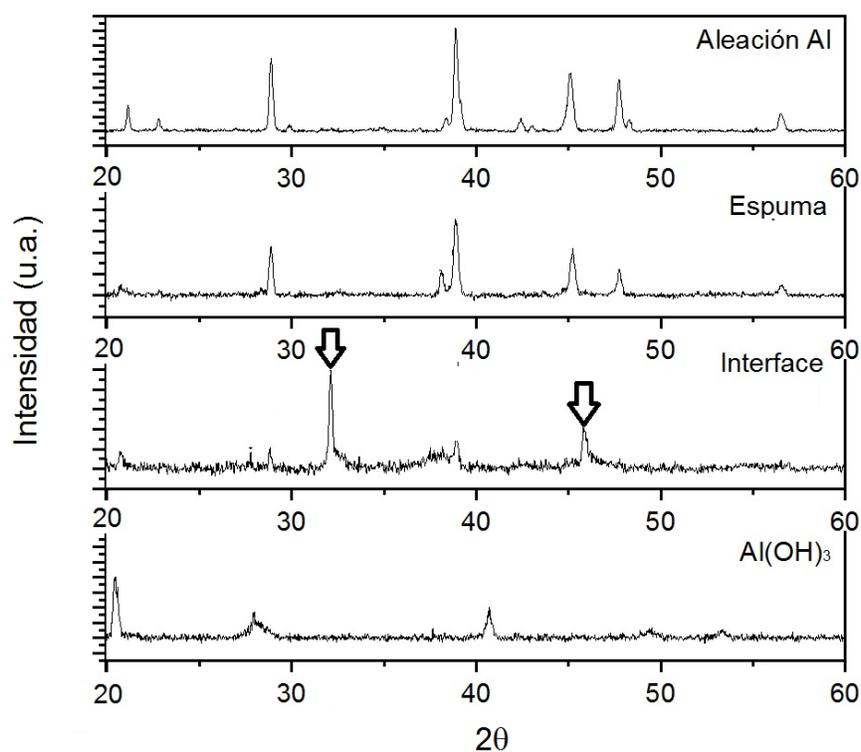


Figura 68 DRX realizados a la espuma reforzada con  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , donde se muestra la presencia de picos de  $\text{SiO}_2$  (flechas) en la interface.

Los resultados anteriores motivaron un cambio en los modelos elaborados mediante ANSYS 18.1, ya que en ellos se utilizó unión total entre los reforzantes y la matriz. Esta modificación se realizó para los modelos de las espumas reforzadas con alúmina, ya que para ellas no se presentó una interface, estando matriz y reforzante visiblemente separados. Para el caso de las espumas reforzadas con hidróxido de aluminio se mantuvieron los modelos, con la unión total matriz-reforzante.

### **3.5.Comparación física de las espumas**

En la Figura 69 se realiza una comparación entre las espumas fabricadas utilizando los dos reforzantes con diferentes contenidos de porosidad. Las diferentes mezclas son evidentes ya que se denota la reducción en la cantidad de material reforzante. Las distribuciones de material reforzante y poros son homogéneas en todos casos, sin aglomeraciones, lo que corrobora que el método de mezclado de los espaciadores y los reforzantes fue correcto. En la siguiente Tabla 9 se muestra una comparación de las principales características físicas entre las espumas fabricadas, incluyendo los valores de densidad, porosidad y espesor de pared. Como se puede observar, cada una de las propiedades mostradas posee una disminución en el sentido a la disminución del material de refuerzo o al aumento de material espaciador (de izquierda a derecha), esta disminución se justifica ya que al aumentar la cantidad de material espaciador la densidad disminuye, la porosidad aumenta y el espesor de pared decrece. Para las espumas con ambos reforzantes, con el mismo porcentaje de mezclas, los resultados fueron repetitivos, sin importar si fue alúmina o hidróxido de aluminio. Esto se puede comprobar por los valores similares obtenidos para ellos. La porosidad mayor fue cercana al 50 %, mientras que la menor densidad fue de  $0.92 \text{ g/cm}^3$ . La densidad relativa que se muestra es en relación con la matriz de Al (densidad de  $2.7 \text{ g/cm}^3$ ), no de un material compuesto.

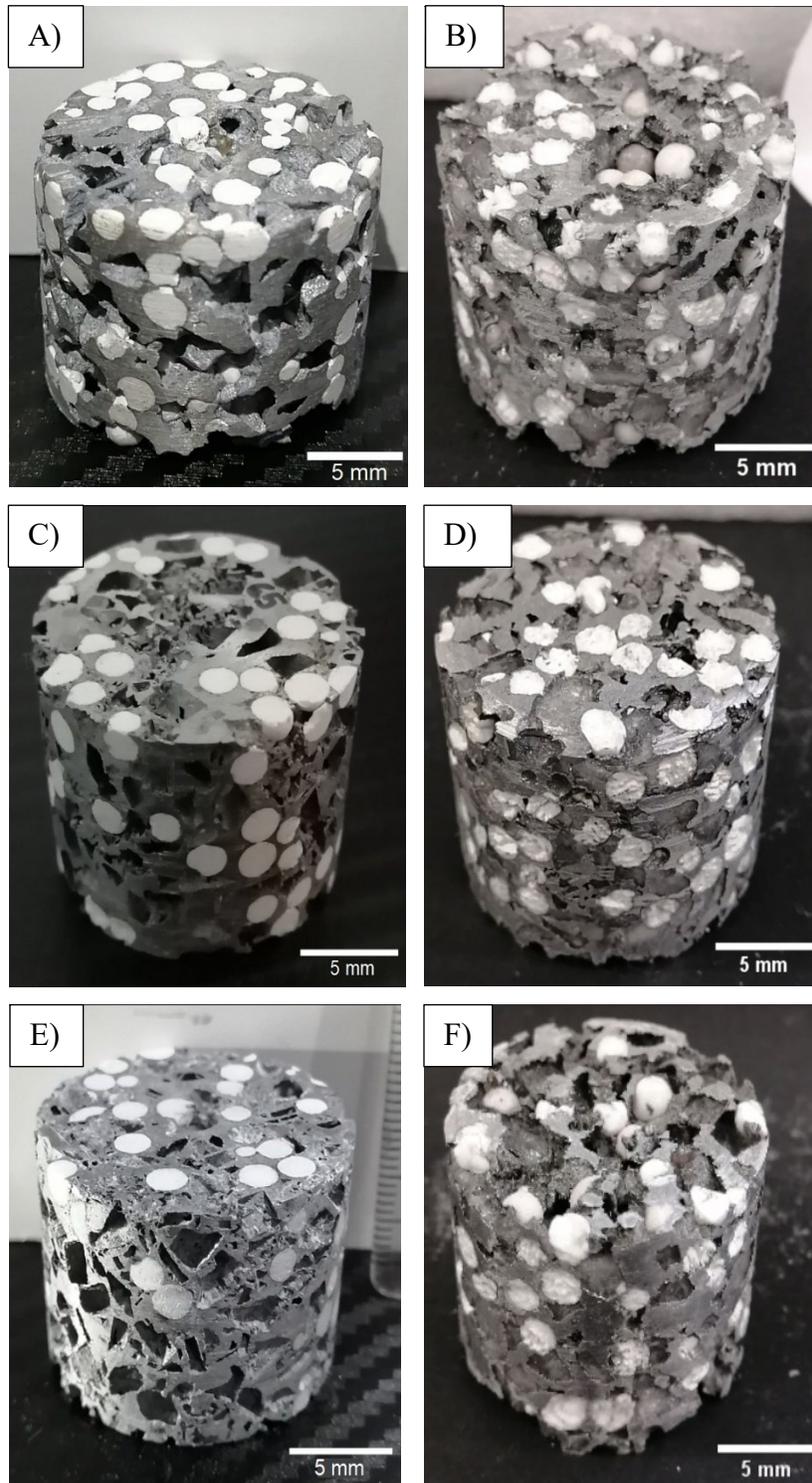


Figura 69 Comparación entre espumas: A y B: 50% NaCl – 50% refuerzo, C y D: 65% NaCl – 35% refuerzo y E y F: 80% NaCl – 20% refuerzo,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (derecha) y  $\text{Al}(\text{OH})_3$  (izquierda) respectivamente.

Tabla 9 Principales características físicas de las espumas fabricadas.

	% NaCl - % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			% NaCl - % Al(OH) <sub>3</sub>		
	50% - 50%	65% - 35%	80% - 20%	50% - 50%	65% - 35%	80% - 20%
<b>% de reforzante</b>	38.08	21.5	12.3	38.08	21.5	12.3
<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1.66	1.53	1.47	1.07	0.96	0.92
<b>Porosidad (%)</b>	38.08	40.23	49.11	38.08	40.23	49.11
<b>Espesor de pared (mm)</b>	1.28	1.02	0.99	1.26	1.05	1.00
<b>Densidad relativa</b>	0.61	0.57	0.48	0.46	0.35	0.30

### 3.6. 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 30 mm de diámetro y 25 mm de altura, de acuerdo con lo planteado en la parte experimental. Los resultados tal cual como se puede observar en las Figuras 70 y 71 muestran una gran diferencia en el comportamiento de las espumas, y confirman lo analizado anteriormente en el análisis de interfaces. Debido a que el material reforzante mostrado en la Figura 70 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) no presenta una buena unión con la matriz, las espumas no poseen completa la típica curva característica de esfuerzo-deformación, no contando con la etapa de densificación. La explicación de este comportamiento podría originarse en que, durante la compresión de la matriz, las esferas reforzantes se separan de la matriz, y se mueven entre los poros, por lo que no se distribuye la carga entre ellos. Por este motivo la matriz absorbe toda la carga, teniendo incluso menores espesores de pared, fallando en ese punto. Este colapso total se genera debido al rompimiento de las paredes de las celdas. Por el contrario, en la Figura 71 observamos un comportamiento mucho más adaptado a una curva típica para una espuma, observándose muy bien las 3 diferentes etapas del ensayo: la zona de deformación elástica, la zona de deformación plástica y colapso de celdas, y finalmente la zona de densificación. Sumado a esto cabe resaltar que se confirma lo esperado en cuanto a que, a mayor porosidad en las espumas, menores propiedades mecánicas poseen estas, de tal modo que las curvas siguen el orden de menor cantidad de material espaciador a mayor cantidad.

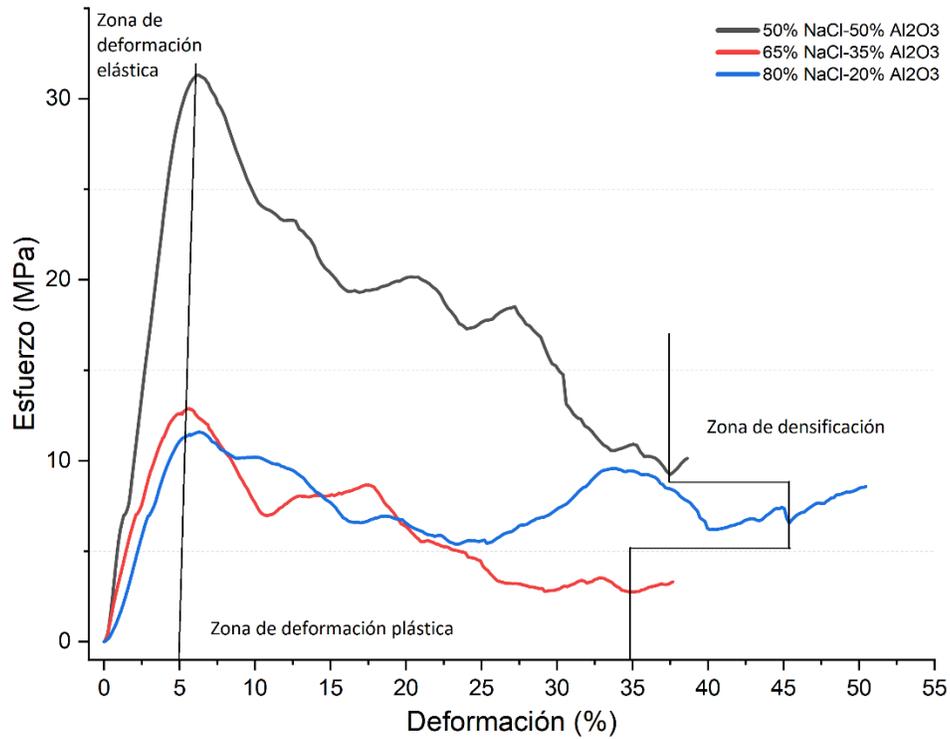


Figura 70 Curvas esfuerzo - deformación de las espumas fabricadas usando  $\text{Al}_2\text{O}_3$  como reforzante.

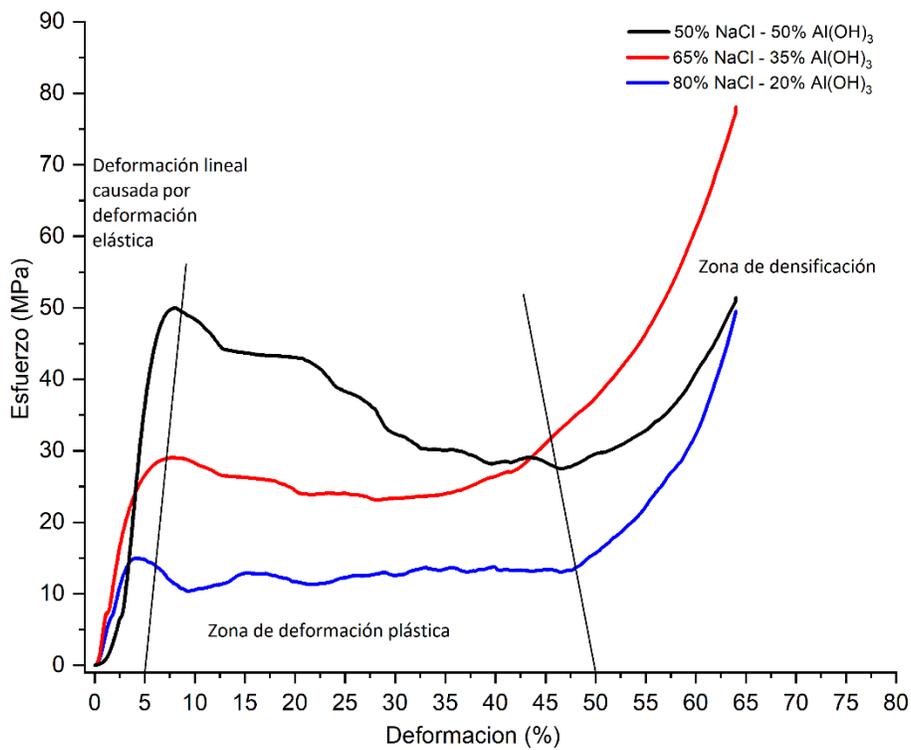


Figura 71 Curvas esfuerzo - deformación de las espumas fabricadas usando  $\text{Al}(\text{OH})_3$  como reforzante.

Los valores de módulo de Young para estas espumas fueron para el caso 50% NaCl y 50% refuerzo: 0.58 GPa y 1.09 GPa para Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Al(OH)<sub>3</sub> respectivamente, para la relación 65% NaCl y 35% refuerzo: 0.59 GPa y 1.30 GPa para Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Al(OH)<sub>3</sub>, y finalmente para la relación 80% NaCl y 20% refuerzo: 0.77 GPa y 1.50 GPa para Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Al(OH)<sub>3</sub> respectivamente, mientras que los valores de resistencia a la cedencia fueron 31.2 y 49.86 MPa para la primer relación, 12.87 y 29.02 MPa para la segundo y 11.58 y 14.95 MPa para el tercero, mientras que los valores para los cuales comienza la densificación fueron 9.24 y 29.73 MPa para el primer caso, 2.57 y 27.4 MPa para el segundo caso y 6.55 y 31.29 MPa para el tercer caso. De manera resumida los diferentes datos extraídos de las curvas se muestran en la Tabla 10. Como puede apreciarse, las propiedades mecánicas fueron significativamente superiores para las espumas reforzadas con Al(OH)<sub>3</sub>, esto, aunque la alúmina posee mejores propiedades mecánicas, por lo que se esperaría que las espumas reforzadas con estas esferas tuvieran a su vez mejores propiedades. La falta de unión matriz-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> provocó esta disminución considerable en su comportamiento mecánico.

Tabla 10 Comparación de propiedades mecánicas entre las espumas fabricadas.

	% NaCl - % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			% NaCl - % Al(OH) <sub>3</sub>		
	50% - 50%	65% - 35%	80% - 20%	50% - 50%	65% - 35%	80% - 20%
<b>Resistencia a cedencia (MPa)</b>	31.2	12.87	11.58	49.86	29.02	14.95
<b>Esfuerzo mínimo de Plateau (MPa)</b>	9.24	2.74	5.38	27.47	23.09	10.33
<b>Esfuerzo de compactación (MPa)</b>	9.24	2.57	6.55	29.73	27.4	13.29
<b>Esfuerzo de rotura (MPa)</b>	10.13	3.3	8.57	78.05	51.38	49.5

### 3.7. Modelos y simulación

Enseguida se muestran las características de los modelos que fueron usados en ANSYS 18.1, debido a que las características de los modelos son las mismas para todas las espumas solo se muestra 1 de cada una, la única diferencia es que durante la ejecución de la simulación los valores de propiedades mecánicas cambiaron ya fuese para Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> o para Al(OH)<sub>3</sub>. Por otra

parte, como se comentó anteriormente, para el caso de los modelos reforzados con  $Al_2O_3$  se utilizaron dos casos de frontera entre la matriz y el reforzante: el primero de los casos fue con unión total, y el segundo sin unión, lo cual se mostrará a continuación.

### 3.7.1. Espumas con relación 50% NaCl-50% refuerzo

En la Figura 72 A se observa el modelo de las espumas para una relación de 50% NaCl - 50% de refuerzo.

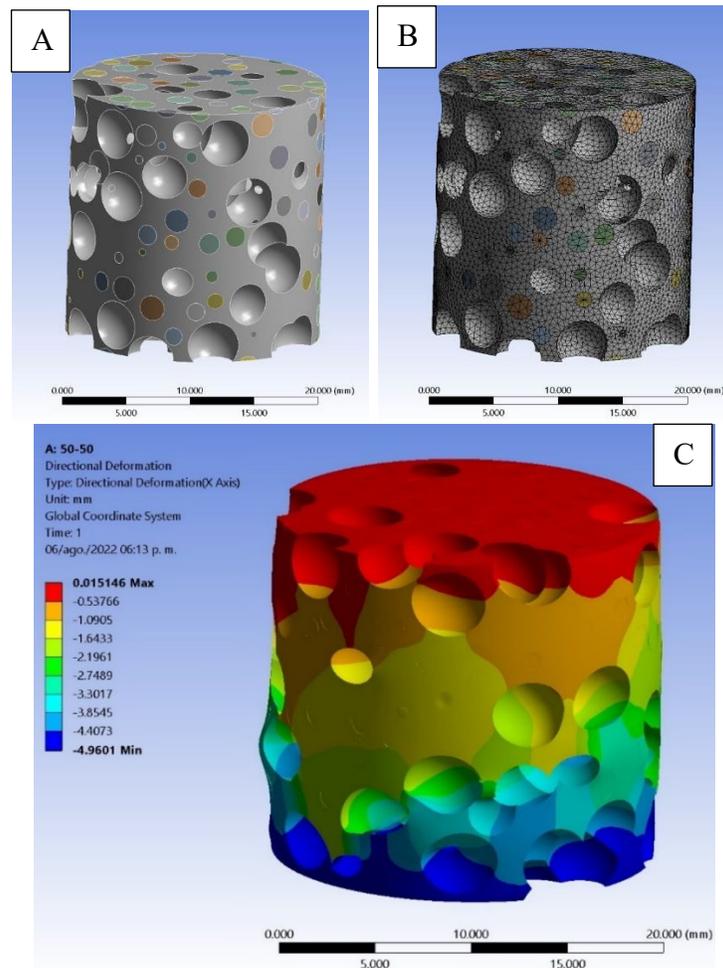


Figura 72 Modelo de espumas con relación 50% NaCl - 50% refuerzo, su mallado y la respuesta al esfuerzo de compresión.

Por otra parte, el mallado utilizado se puede apreciar en la Figura 72 B, mientras que la respuesta obtenida después de aplicar un esfuerzo para lograr un desplazamiento se muestra

en la Figura 72 C. Se puede apreciar que el mayor desplazamiento ocurre en la superficie superior, lo cual coincide con las restricciones de carga anteriormente descritas, aplicadas a los modelos.

### 3.7.2. Espumas con relación 65% NaCl-35% refuerzo

En la Figura 73 A se muestra una espuma con relación 65% NaCl - 35% de refuerzo.

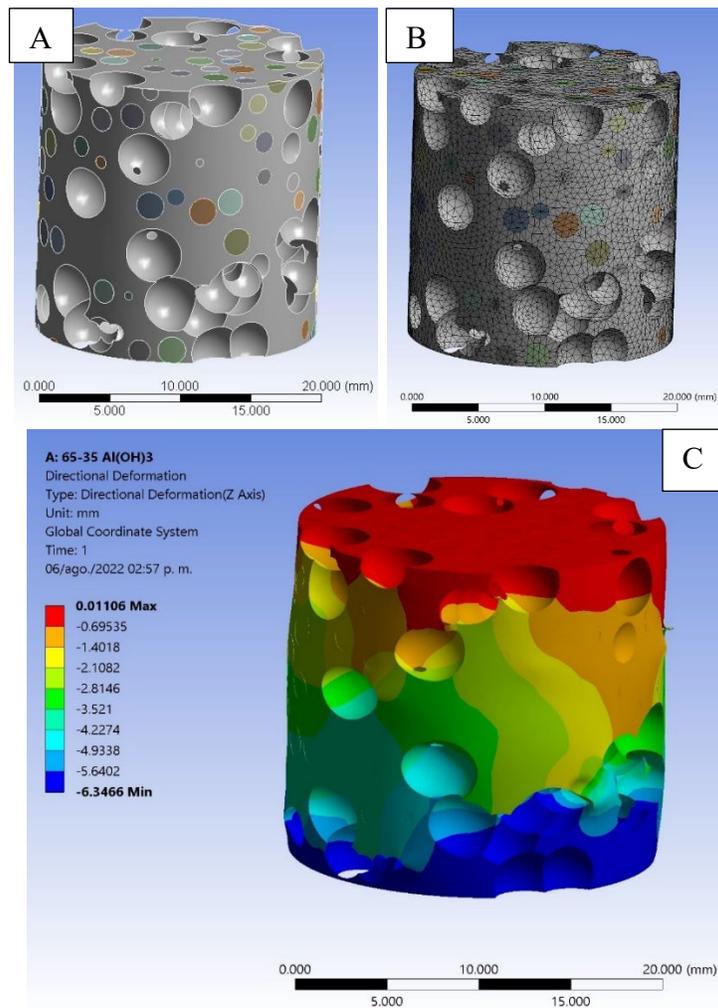


Figura 73 Modelo de espumas con relación 65% NaCl - 35% refuerzo, su mallado y la respuesta al esfuerzo de compresión.

En las Figura 73 A se aprecia un cambio en la distribución y cantidad de las partículas reforzantes, así como de los poros en el cuerpo de la espuma, mientras que el mallado y la respuesta al desplazamiento se aprecian en las Figuras 73 B y C, respectivamente.

### 3.7.3. Espumas con relación 80% NaCl-20% refuerzo

Para los modelos de las espumas con una relación 80% NaCl - 20% refuerzo (Figura 74), el aumento de poros es aún más notable como se puede apreciar, y la disminución de partículas reforzantes obedece a los porcentajes propuestos.

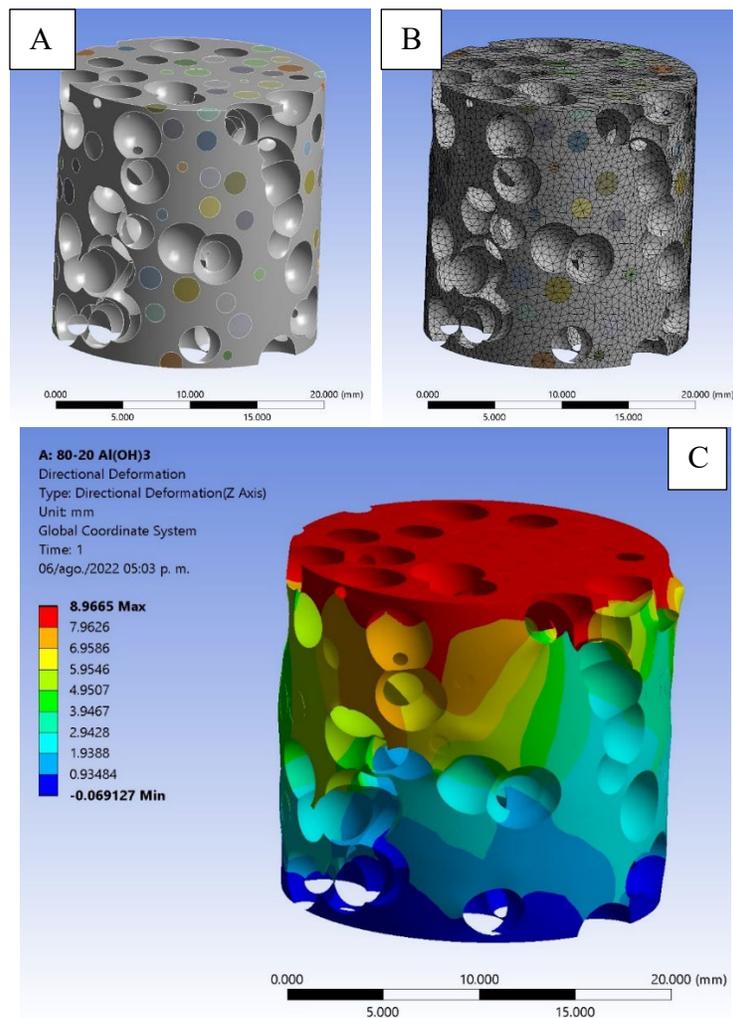


Figura 74 Modelo de espumas con relación 80% NaCl - 20% refuerzo, su mallado y la respuesta al esfuerzo de compresión.

### 3.8. Comparación de resultados experimentales, simulaciones computacionales y modelos teóricos

El primer parámetro que comparar después de obtenidos los resultados es la porosidad, lo cual se presenta en la Figura 75. Este es un parámetro muy importante, ya que las propiedades mecánicas de las espumas están directamente relacionadas y dictadas por sus porosidades. Otro aspecto importante es que con estos resultados podemos corroborar la veracidad y la confiabilidad de los modelos computacionales para la predicción de propiedades mecánicas. Tal cual como se puede observar en la gráfica, los valores para todas las relaciones de las mezclas con ambos materiales son bastante cercanas, comenzando con los valores teóricos. Estos son los valores que se esperaban obtener, corroborándose con los valores obtenidos a través del software ImageJ de análisis de imagen sobre las probetas fabricadas. Posterior a esto, se analizaron los modelos de ANSYS 18.1, los cuales poseen características muy similares a las espumas reales.

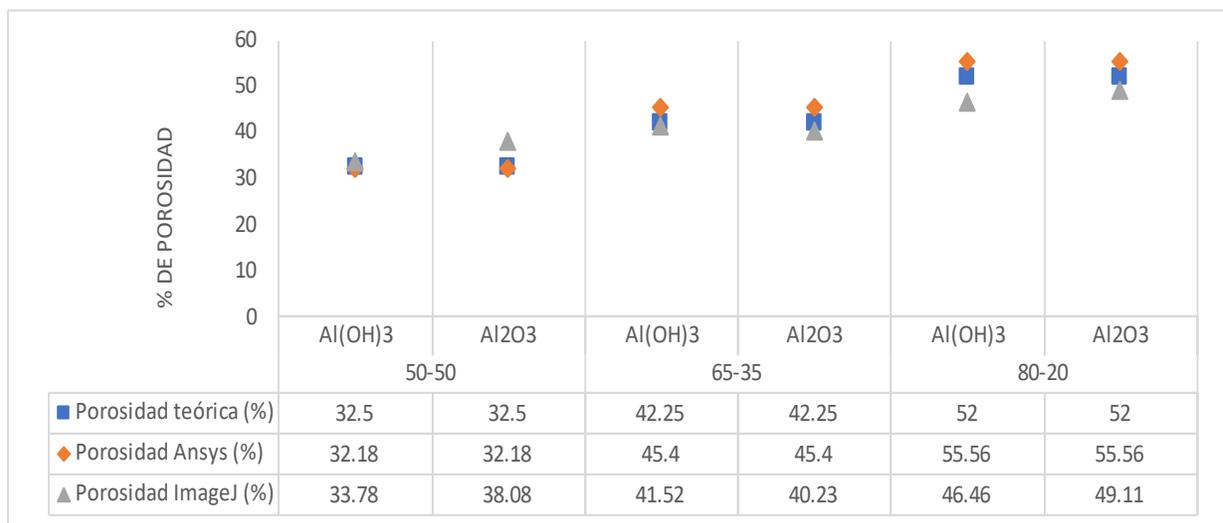


Figura 75 Gráfico de comparación entre los diferentes valores de porosidad obtenidos.

El siguiente parámetro son los valores de densidad. En primera instancia, al ser el hidróxido de aluminio ( $2.42 \text{ g/cm}^3$ ) menos denso que la alúmina ( $3.89 \text{ g/cm}^3$ ), era de esperarse que la densidad de las espumas fabricadas con el primero fueran menores. El comportamiento se muestra en la Figura 76, comparando valores reales y los esperados según la regla de las

mezclas (ROM). Las espumas fabricadas con  $\text{Al}(\text{OH})_3$  como refuerzo poseen una densidad menor, y por otro lado en ambos casos la densidad obedece nuevamente a la cantidad de material espaciador, reduciendo su valor conforme incrementa el material espaciador. Al comparar los resultados obtenidos de manera experimental con los teóricos usando la regla de las mezclas se confirma el hecho de que esta ecuación sobreestima los resultados ya que no se consideran aspectos que resultan en los experimentos a la hora de fabricar las espuma.

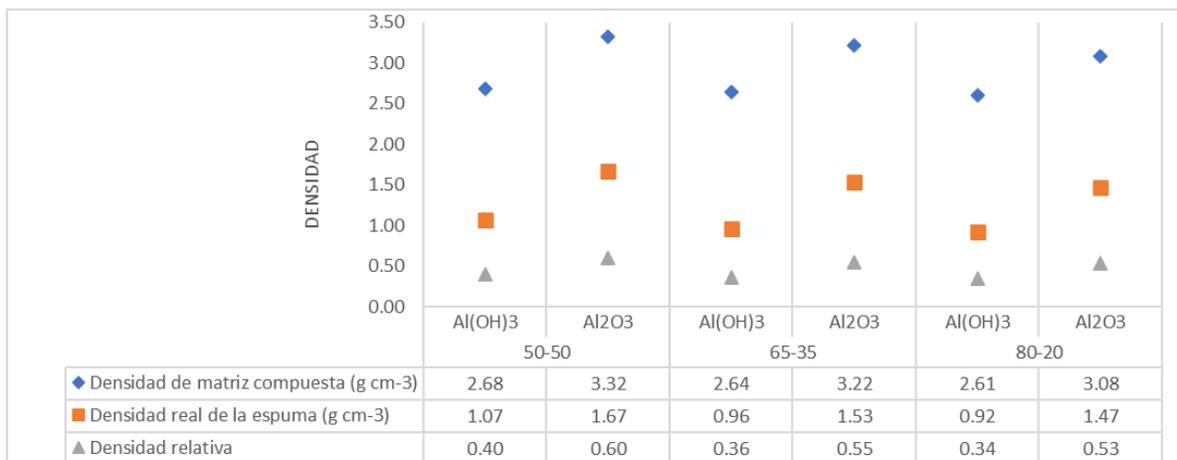


Figura 76 Valores de densidad obtenidos.

En la Figura 77 se muestran los resultados obtenidos para el módulo de Young experimental, los estimados con los modelos computacionales, así como por modelos matemáticos varios, presentados en las ecuaciones 12, 13 y 14. Tal cual se puede observar los modelos matemáticos sobreestiman en el valor del módulo de Young, ya que solo consideran la densidad relativa, la cual es dependiente solamente del porcentaje de porosidad en las espumas. Sin embargo, ese no es el único factor que afecta el valor del módulo de Young, pues otros parámetros tienen un efecto muy importante, tal como el tamaño de poro, el espesor de pared, la distribución de la porosidad, etc. Por otro lado, al observar estos valores teóricos podemos reforzar la eficacia del uso del método de elementos finitos para la predicción de las propiedades mecánicas de las espumas metálicas, ya que posee una extremada cercanía con los resultados de los modelos experimentales. Otra característica importante para mencionar en este gráfico es que se demuestra el efecto de la interfaz que

podiera generarse entre el material reforzante y la matriz, como se puede ver los valores de módulo de Young obtenidos de ANSYS 18.1 cuando se simuló una unión completa entre matriz-alúmina (Figura 78 A, estructura coherente) los valores fueron más elevados que cuando no se consideró una unión entre ambos materiales (Figura 78 B, estructura incoherente y caso real), estando cerca de los valores obtenidos con el modelo de Zhu. Esto se debe a que en el caso de la alúmina el modelo correcto debe ser el inciso B de la Figura 78, ya que como se observaron en los análisis de SEM no existe una unión o interface entre la matriz y el reforzante. Por este motivo sus propiedades mecánicas fueron inferiores a las logradas cuando el reforzante fue el hidróxido de aluminio. Para el caso de este último reforzante el modelo correcto fue el mostrado en la Figura 78 A, ya que sí ocurrió la formación de una interface.



Figura 77 Módulo de Young de modelos matemáticos, simulados y experimentales.

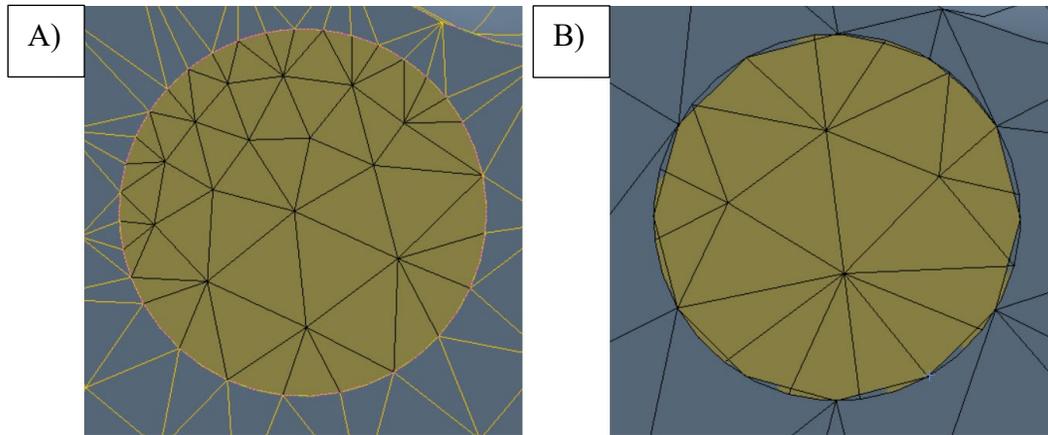


Figura 78 Modelación de interfaces con mallado A) coherente y B) incoherente.

El efecto de la porosidad sobre el módulo de elasticidad puede apreciarse en la Figura 79. En todos los casos el aumento de la porosidad origina una disminución significativa del módulo de Young. En las primeras dos relaciones (50% NaCl-50% refuerzo y 65% NaCl -35% refuerzo) la diferencia entre los valores de E es mayor porque prevalece el efecto del material reforzante, sin embargo, en el caso de las espumas con una relación de 80% NaCl -20% refuerzo la diferencia entre los módulos de Young es menor debido a que la cantidad de refuerzo es poca y prevalecen las propiedades de la porosidad.

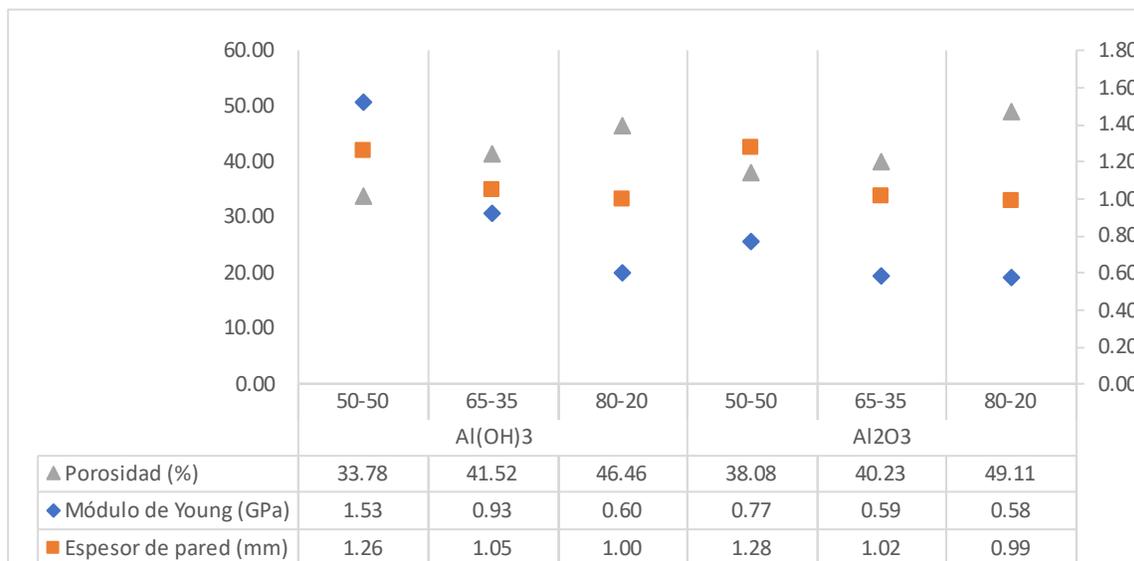


Figura 79 Grafico de porosidad (eje y de la izquierda) vs módulo de Young (GPa) vs espesor de pared de celda (mm) (eje y de la derecha).

Finalmente, se realizó una comparación entre las espumas fabricadas en este trabajo y espumas similares fabricadas por otros autores en el caso de Papadopoulos y Szyniszewski, demostrando que, nuestras espumas poseen una mayor capacidad a soportar deformación, son más dúctiles y resistentes lo que las hace ideales para aplicaciones que requieren alta absorción de energía. Y, por otro lado, los trabajos de Yiatros y Bastawros que fabricaron compuestos con esferas de hierro y espumas de poros cerrado, respectivamente.

Esto se demuestra en la Figura 80 en donde se tienen los resultados de los ensayos de compresión llevados a cabo en este trabajo y los demás autores, así como los valores de resistencia a la cedencia mostrados en la tabla 11.

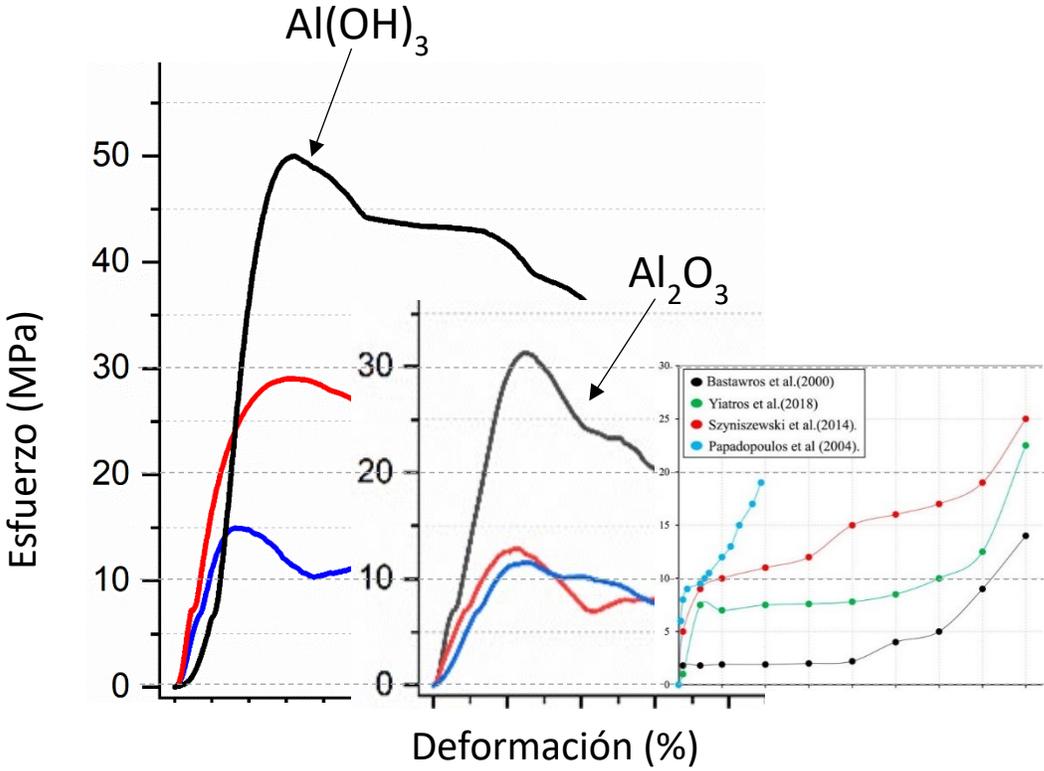


Figura 80 Comparativa de propiedades mecánicas de las espumas fabricadas en este trabajo y espumas de otros autores. [105]

Tabla 11 Comparativa de resistencia a la cedencia de las espumas fabricadas en este trabajo y espumas de otros autores.

	% NaCl - % Al(OH) <sub>3</sub>			% NaCl - % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
	50% - 50%	65% - 35%	80% - 20%	50% - 50%	65% - 35%	80% - 20%
<b>Resistencia a cedencia (MPa)</b>	49.86	29.02	14.95	31.2	12.87	11.58

	Papadopoulos y col. (2004)	Szyniszewski y col. (2014)	Yiatros y col. (2018)	Bastawros y col. (2000)
<b>Resistencia a cedencia (MPa)</b>	8.75	9	7.6	2.4

# Capítulo IV

## Conclusiones

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

- 1) El proceso de fabricación por medio de infiltración resultó ser óptimo para la obtención de espumas metálicas con alúmina e hidróxido de aluminio como material de refuerzo, y NaCl como partículas espaciadoras.
- 2) Las espumas compuestas obtenidas poseen porosidades de entre el 33 y 50 %, estando los poros y el material reforzante homogéneamente distribuidos, y no se observaron defectos a simple vista en su estructura.
- 3) Las modificaciones realizadas al dispositivo para la fabricación de las espumas resultaron ser adecuadas, ya que permitieron la extracción de los materiales resultantes más fácilmente, lo que minimiza los daños en la espuma final.
- 4) Para las espumas reforzadas con alúmina no se encontró ninguna interface generada entre la matriz y este material, sin embargo, en el caso del hidróxido de aluminio se observó una interface entre matriz y refuerzo, correspondiente a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .
- 5) La falta de unión de las esferas reforzantes de alúmina con la matriz originó que estos materiales tuvieran propiedades mecánicas significativamente más bajas que las espumas reforzadas con hidróxido de aluminio. Para el primer caso incluso las espumas no presentaron la etapa de densificación en la curva esfuerzo deformación.
- 6) Se observó que la interface formada entre el material reforzante y la matriz tiene un efecto determinante sobre las propiedades mecánicas de las espumas, ya que aun cuando la alúmina posee un módulo de Young mayor que el hidróxido de aluminio, las espumas reforzadas con este último tuvieron un mayor valor de módulo elástico.
- 7) Corroboramos que es posible modelar espumas compuestas gracias al procedimiento descrito en el presente trabajo y haciendo uso de diferentes softwares, lo que permite lograr diferentes configuraciones en las geometrías, como porcentaje de porosidad, tamaños, combinaciones de materiales, uniones entre ellos, etc.
- 8) El uso del método de elementos finitos (FEM) demostró ser efectivo en la predicción de la porosidad resultante en las espumas de aluminio, así como en la estimación del módulo de Young, debido a que se obtuvieron mejores aproximaciones que los modelos matemáticos, sabiendo que estos modelos realizan una sobreestimación de las propiedades mecánicas.

- 9) Fue posible recrear el comportamiento de las espumas compuestas, modificando la interface matriz-reforzante, para casos con total unión y casos sin unión, lo que llevó a estimaciones del módulo de elasticidad muy cercanos a los valores experimentales.
- 10) Las propiedades mecánicas de las espumas metálicas compuestas se vieron influenciadas por los porcentajes relativos de porosidad y de reforzante. Para porosidades bajas el efecto del reforzante fue predominante, mientras que para porosidades altas el efecto de la porosidad fue el más influyente.

## Recomendaciones

1. Incrementar la temperatura y/o el tiempo de fabricación para buscar promover la formación de una interface entre la matriz y la alúmina, y así poder explotar el módulo de Young que posee este material de refuerzo.
2. Explorar con otros porcentajes de mezclas para mejorar las propiedades mecánicas o incluso realizar una mezcla de reforzantes.
3. Probar con diferentes tamaños y geometrías de reforzante para evaluar el impacto en el módulo de Young.
4. Estudiar la mojabilidad del aluminio con el hidróxido de aluminio para complementar el trabajo y explorar la creación de uniones químicas.
5. Estudiar el uso de mezclas graduales en tamaños o porcentajes para la fabricación de espumas compuestas y obtener diferentes respuestas mecánicas a compresión.

## Bibliografía

- [1] L. Stanev, M. Kolev, B. Drenchev, and L. Drenchev, “Open-Cell Metallic Porous Materials Obtained Through Space Holders—Part II: Structure and Properties. A Review,” *J Manuf Sci Eng*, vol. 139, no. 5, May 2017, doi: 10.1115/1.4034440.
- [2] H. P. Degischer and B. Kriszt, *Handbook of Cellular Metals - Production, Processing, Applications*, 1st ed. Wiley-VCH, 2002. doi: 10.1002/3527600558.fmatter\_indsub.
- [3] M. K. Surappa, “Aluminium matrix composites: Challenges and opportunities,” *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, vol. 28, no. 1–2, pp. 319–334, Feb. 2003, doi: 10.1007/BF02717141.
- [4] S. V. Kamat, J. P. Hirth, and R. Mehrabian, “Mechanical properties of particulate-reinforced aluminum-matrix composites,” *Acta Metallurgica*, vol. 37, no. 9, pp. 2395–2402, Sep. 1989, doi: 10.1016/0001-6160(89)90037-0.
- [5] D. J. Lloyd, “Particle reinforced aluminium and magnesium matrix composites,” *International Materials Reviews*, vol. 39, no. 1, pp. 1–23, Jan. 1994, doi: 10.1179/095066094790150982.
- [6] Zuhailawati H., P. Samayamutthirian, and Mohd Haizu C.H., “Fabrication of low cost of aluminium matrix composite reinforced with silica sand,” *Journal of Physical Science*, vol. 18, no. 1, pp. 47–55, 2007, Accessed: Apr. 11, 2020. [Online]. Available: [http://www.usm.my/jps/18-1-07/Article 18-1-5.pdf](http://www.usm.my/jps/18-1-07/Article%2018-1-5.pdf)
- [7] A. Włodarczyk-Fligier, L. A. Dobrzański, M. Kremzer, and M. Adamiak, “Manufacturing of aluminium matrix composite materials reinforced by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles Manufacturing and processing,” *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 27, no. 1, pp. 99–102, Mar. 2008, Accessed: Apr. 11, 2020. [Online]. Available: [http://jamme.acmsse.h2.pl/papers\\_vol27\\_1/27123.pdf](http://jamme.acmsse.h2.pl/papers_vol27_1/27123.pdf)
- [8] L. Licitra, D. D. Luong, O. M. Strbik, and N. Gupta, “Dynamic properties of alumina hollow particle filled aluminum alloy A356 matrix syntactic foams,” *Mater Des*, 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2014.03.041.

- [9] “Www.frbb.utn.edu.ar/utec/9/n03.html,” 2016. Wwww.frbb.utn.edu.ar/utec/9/n03.html (accessed Nov. 14, 2016).
- [10] P. A. Moreno and A. S. Pérez, “Método De Los Elementos Finitos: Introducción A Ansys, 1a Edición. Universidad de Sevilla.” Sevilla, 1999.
- [11] E. Silberio Benavides, “Tesis de maestría: Diseño de un dispositivo experimental de maquinado para aleaciones de aluminio silicio,” Universidad Autónoma De Nuevo León, 2012.
- [12] ASM, “ASM handbook Volume 2 - Properties and selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials,” *ASM Metals Handbook*, vol. 2, p. 1300, 1993.
- [13] M. Zaman, *Tesis de doctorado: 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.
- [14] J. Hirsch, B. (Birgit) Skrotzki, G. Gottstein, and Deutsche Gesellschaft für Materialkunde., “Aluminium alloys: their physical and mechanical properties,” *Materials Science Forum*, 2008, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.331-337.1001.
- [15] J. L. Nebreda, “Tesis de maestría: Optimización de la estructura celular en espumas de aluminio,” Universidad de Valladolid, 2014.
- [16] J. Jarillo, “Tesis de maestría: Modelización del comportamiento mecánico de una espuma metálica,” Universidad Carlos III de Madrid, 2009. [Online]. Available: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/8064>
- [17] B. Cárcel González, “Tesis de maestría: Efectos de la estructura celular sobre el comportamiento mecánico de espumas de aluminio de poro cerrado obtenidas por fusión. Aplicación en absorbedores de energía.” Universitat Politècnica de València, Valencia (Spain), 2016. doi: 10.4995/Thesis/10251/61298.
- [18] “The Gibson Group | Cellular Solids: Structure, Properties and Applications.” <https://lornagibson.org/research> (accessed Mar. 24, 2023).

- [19] “File:Aluminium foam.png - Wikimedia Commons.” [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Aluminium\\_foam.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Aluminium_foam.png) (accessed Mar. 24, 2023).
- [20] J. C. Carranza, “Tesis de maestría: Efecto de la geometría fractal del sistema poroso sobre el comportamiento a la compresión de espumas metálicas,” Universidad Nacional Autónoma de México, 2018.
- [21] L. Salvo, G. Martin, M. Suard, A. Marmottant, R. Dendievel, and J. J. Blandin, “Processing and structures of solids foams,” *C R Phys*, vol. 15, no. 8–9, pp. 662–673, Oct. 2014, doi: 10.1016/J.CRHY.2014.10.006.
- [22] O. E. Ochoa de Jesús, “Tesis de maestría: Obtención y propiedades de espumas metálicas base ZINALCO,” Instituto Politécnico Nacional, México, D.F., 2008. Accessed: May 01, 2021. [Online]. Available: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/7873/IM%20183.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [23] J. Banhart, “Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams,” *Prog Mater Sci*, vol. 46, no. 6, pp. 559–632, Jan. 2001, doi: 10.1016/S0079-6425(00)00002-5.
- [24] A. Calle Fernández, “Tesis de maestría: Estudio del comportamiento mecánico de las espumas pulvimetalúrgicas de aluminio,” Escuela Superior de Ingenieros de Minas, 2012. Accessed: Jul. 02, 2020. [Online]. Available: <https://oa.upm.es/14986/>
- [25] J. A. Gutiérrez-Vázquez and J. Oñoro, “Aluminium foams. Manufacture, properties and applications,” *Revista de Metalurgia*, vol. 44, no. 5, Oct. 2008, doi: 10.3989/revmetalm.0751.
- [26] P. W. Hardy and G. W. Bpeisker, “Method of producing a lightweight foamed metal,” pp. 75–95, Jul. 1963.
- [27] J. Banhart, “Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams,” *Prog Mater Sci*, vol. 46, no. 6, pp. 559–632, Jan. 2001, doi: 10.1016/S0079-6425(00)00002-5.

- [28] R. K. Everett and R. J. Arsenault, *Metal matrix composites. Processing and interfaces*, 1st ed. Academic Press, 1990. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-341832-6.X5001-4>.
- [29] T. W. Clyne and P. J. Withers, “An Introduction to Metal Matrix Composites,” *An Introduction to Metal Matrix Composites*, Jun. 1993, doi: 10.1017/CBO9780511623080.
- [30] I. Duarte and J. M. F. Ferreira, “Composite and Nanocomposite Metal Foams,” *Materials 2016, Vol. 9, Page 79*, vol. 9, no. 2, p. 79, Jan. 2016, doi: 10.3390/MA9020079.
- [31] W. Smith and J. Hashemi, *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*, 4th ed. McGraw-Hill, 2014. Accessed: Apr. 22, 2020. [Online]. Available: <https://chirinossilvaroger.files.wordpress.com/2012/05/fundamentos-de-la-ciencia-e-ingenieria-de-materiales-4ta-edicic3b3n-william-f-smith-javad-hashemi.pdf>
- [32] D. B. Miracle, S. L. Donaldson, S. D. Henry, W. W. Scott, J. J. Brown Kelly Ferjutz Edward Kubel, and J. Heather Lampman Elizabeth Marquard Beverly Musgrove Mary Jane Riddlebaugh Juli Williamson, *ASM Handbook Volume 21 Composites Prepared under the direction of the ASM International Handbook Committee*. 2001. Accessed: Apr. 19, 2020. [Online]. Available: [www.asminternational.org](http://www.asminternational.org)
- [33] L. P. Viera and V. A. Carpio, “Materiales Cementantes Compuestos (CCM): Estado del Arte, Situación Actual y Aplicaciones en la Ingeniería Civil,” *Ingenio*, vol. 2, no. 2, pp. 5–16, Nov. 2019, doi: 10.29166/ingenio.v2i2.1640.
- [34] M. A. Ahmad, H. Rafiq, S. I. A. Shah, S. A. Khan, S. T. U. I. Rizvi, and T. A. Shams, “Selection Methodology of Composite Material for Retractable Main Landing Gear Strut of a Lightweight Aircraft,” *Applied Sciences 2022, Vol. 12, Page 5689*, vol. 12, no. 11, p. 5689, Jun. 2022, doi: 10.3390/APP12115689.
- [35] C. Edil da Costa, F. Velasco López, and J. M. Torralba Castelló, “Materiales compuestos de matriz metálica. I parte. Tipos, propiedades, aplicaciones,” *Revista de Metalurgia*, vol. 36, no. 3, pp. 179–192, Jun. 2000, doi: 10.3989/revmetalm.2000.v36.i3.570.

- [36] J. Á. Peñaloza Nieblas, “Tesis de maestría: Elaboración de materiales compuestos a base de fibras orgánicas con posibles aplicaciones aeronáuticas,” Instituto Politécnico Nacional, Guanajuato, 2015.
- [37] M. D. Escalera Rodríguez, “Tesis de maestría: Soldadura de materiales compuestos de matriz de aluminio con refuerzo discontinuo: Soldadura por difusión y soldadura fuerte,” Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 1997.
- [38] O. Cuevas mata, “Tesis de maestría: Efecto de los parámetros del proceso de soldadura por fricción-agitación en uniones de compuestos avanzados de matriz metálica,” Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, 2014.
- [39] C. Saravanan, K. Subramanian, D. B. Sivakumar, M. Sathyanandhan, and R. S. Narayanan, “Fabrication of aluminium metal matrix composite-A review,” *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, vol. 7, no. 7, pp. 82–87, 2015, Accessed: Apr. 25, 2020. [Online]. Available: [www.jchps.com](http://www.jchps.com)
- [40] Y. García Figueredo, “Tesis de doctorado: Desarrollo y caracterización de un material compuesto de matriz de aluminio,” Universidad Central Marta Abreu de las Villas, Santa Clara, 2017.
- [41] G. Ramu and R. Bauri, “Effect of equal channel angular pressing (ECAP) on microstructure and properties of Al-SiCp composites,” *Mater Des*, vol. 30, no. 9, pp. 3554–3559, Oct. 2009, doi: 10.1016/j.matdes.2009.03.001.
- [42] 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 Materials Science*, vol. 9, pp. 54–61, 2015, doi: 10.1016/j.mspro.2015.04.007.
- [43] J. H. Cadena *et al.*, “Production of al foams using the SDP method: Processing parameters and introduction of a new sintering device,” *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, vol. 52, no. 1, pp. 47–52, 2016, doi: 10.2298/JMMB150128024C.

- [44] A. Chouhan, "Tesis de ingeniería: Synthesis and Characterization of Ti-foam Using NaCl as Space Holder," National Institute of Technology, Odisha, 2015. Accessed: Jul. 01, 2021. [Online]. Available: [http://ethesis.nitrkl.ac.in/7390/1/Synthesis\\_Chouhan\\_2016.pdf](http://ethesis.nitrkl.ac.in/7390/1/Synthesis_Chouhan_2016.pdf)
- [45] J. Liu, "Tesis de doctorado: Processing and properties of metal-ceramic interpenetrating composites," Loughborough University, Loughborough, 2012. Accessed: May 01, 2020. [Online]. Available: [https://repository.lboro.ac.uk/articles/thesis/Processing\\_and\\_properties\\_of\\_metal-ceramic\\_interpenetrating\\_composites/9230606](https://repository.lboro.ac.uk/articles/thesis/Processing_and_properties_of_metal-ceramic_interpenetrating_composites/9230606)
- [46] B. Terry and G. Jones, "Metal matrix composites: current developments and future trends in industrial research and applications," *Elsevier Advanced Technology, Mayfield House, 256 Banbury Rd, Oxford OX2 7 DH, UK, 1990. 154*, 1990, Accessed: Apr. 24, 2020. [Online]. Available: <https://trove.nla.gov.au/version/45464484>
- [47] J. Binner, "Interpenetrating Composites," in *Cellular Ceramics*, Weinheim, FRG: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006, pp. 571–579. doi: 10.1002/3527606696.ch5i.
- [48] A. Szlancsik, B. Katona, A. Kemény, and D. Károly, "On the Filler Materials of Metal Matrix Syntactic Foams," *Materials*, vol. 12, no. 12, Jun. 2019, doi: 10.3390/MA12122023.
- [49] C. B. Carter and M. G. Norton, *Ceramic Materials*. New York, NY: Springer New York, 2013. doi: 10.1007/978-1-4614-3523-5.
- [50] P. Auerkari, "Mechanical and physical properties of engineering alumina ceramics," Finlandia, 1996.
- [51] M. A. Iqbal, M. A. Iqbal, and M. Fedel, "Fire Retardancy of Aluminum Hydroxide Reinforced Flame Retardant Modified Epoxy Resin Composite," *Russian Journal of Applied Chemistry*, vol. 91, no. 4, pp. 680–686, Apr. 2018, doi: 10.1134/S1070427218040225/METRICS.

- [52] P. Hiremath, H. S. Arunkumar, and M. Shettar, "Investigation on Effect of Aluminium Hydroxide on Mechanical and Fire Retardant Properties of GFRP- Hybrid Composites," *Mater Today Proc*, vol. 4, no. 10, pp. 10952–10956, 2017, doi: 10.1016/J.MATPR.2017.08.051.
- [53] A. Kennedy, "Porous Metals and Metal Foams Made from Powders," in *Powder Metallurgy*, InTech, 2012. doi: 10.5772/33060.
- [54] K. K. Chawla, "Interfaces in metal matrix composites," *Compos Interfaces*, vol. 4, no. 5, pp. 287–298, Jan. 1996, doi: 10.1163/156855497X00046.
- [55] H. R. Shetty and T. W. Chou, "Mechanical properties and failure characteristics of FP/aluminum and W/aluminum composites," *Metallurgical Transactions A*, vol. 16, no. 5, pp. 853–864, May 1985, doi: 10.1007/BF02814836.
- [56] K. K. Chawla, "Metal Matrix Composites," in *Composite Materials*, New York, NY: Springer New York, 1998, pp. 164–211. doi: 10.1007/978-1-4757-2966-5\_6.
- [57] P. Shen, H. Fujii, T. Matsumoto, and K. Nogi, "Reactive wetting of SiO<sub>2</sub> substrates by molten Al," *Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci*, vol. 35 A, no. 2, pp. 583–588, 2004, doi: 10.1007/S11661-004-0369-0/METRICS.
- [58] I. Sulima and B. Mikulowski, "Influence of silicon on the wetting-bond strength-structure relationship in the AlSi11/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> joints," *Metallurgical and Materials Transactions A 2006 37:11*, vol. 37, no. 11, pp. 3275–3281, Nov. 2006, doi: 10.1007/BF02586162.
- [59] K. Landry and N. Eustathopoulos, "Dynamics of wetting in reactive metal/ceramic systems: linear spreading," *Acta Mater*, vol. 44, no. 10, pp. 3923–3932, Oct. 1996, doi: 10.1016/S1359-6454(96)00052-3.
- [60] I. Budai and G. Kaptay, "A new class of engineering materials: Particle-Stabilized metallic emulsions and monotectic alloys," *Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci*, vol. 40, no. 7, pp. 1524–1528, 2009, doi: 10.1007/S11661-009-9857-6.
- [61] S. Bao, K. Tang, A. Kvithyld, M. Tangstad, and T. A. Engh, "Wettability of aluminum on alumina," *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and*

*Materials Processing Science*, vol. 42, no. 6, pp. 1358–1366, Dec. 2011, doi: 10.1007/S11663-011-9544-Z.

- [62] A. Z. Díaz Mendoza and R. V. Ulloa Figueroa, “Tesis de ingeniería: Desarrollo de un proceso pulvimetalúrgico para la fabricación de metales porosos base titanio, plata, aluminio y níquel y evaluación de sus propiedades mecánicas,” Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2005.
- [63] L. J. Gibson, “Mechanical Behavior of Metallic Foams,” *Annual Review of Materials Science*, vol. 30, no. 1, pp. 191–227, Aug. 2000, doi: 10.1146/annurev.matsci.30.1.191.
- [64] M. Yu and J. Banhart, “Mechanical properties of metallic foams,” *Metal Foams*, pp. 37–48, Jan. 1998.
- [65] K. Stöbener and J. Baumeister, “Composites based on metallic foams: phenomenology; production; properties and principles,” in *Proceedings of the International Conference "Advanced Metallic Materials"*, 2003, pp. 281–286. Accessed: Sep. 28, 2020. [Online]. Available: <http://www.metalfoam.net/papers/Stoebener AMM03.pdf>
- [66] F. Šimančík, J. Jerz, J. Kováčik, and P. Minár, “Aluminium foam - A new light-weight structural material,” *Kovove Materialy*, vol. 35, no. 4, pp. 265–277, 1997.
- [67] J. Cantú Rodríguez, “Tesis de maestría: Espumas Metálicas, equilibrio y cinética de sólidos,” Universidad Complutense de Madrid, 2008.
- [68] I. A. Irausquín Castro, “Tesis de maestría: Caracterización mecánica de espumas metálicas y su aplicación en sistemas de absorción de energía,” Universidad Carlos III de Madrid, 2012. [Online]. Available: [https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/15003/Tesis\\_Ignacio\\_Alejandro\\_Irausquin\\_Castro.pdf](https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/15003/Tesis_Ignacio_Alejandro_Irausquin_Castro.pdf)
- [69] 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*, 1997, doi: 10.1016/S0022-5096(96)00090-7.

- [70] O. D. Molina Ramírez, “Tesis de maestría: Caracterización microestructural y mecánica de espumas metálicas de aluminio fabricadas por un nuevo proceso de infiltración,” Universidad Nacional Autónoma de México, 2015. [Online]. Available: [https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB\\_UNAM/TES01000728314](https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000728314)
- [71] L. J. Gibson and M. F. Ashby, *Cellular Solids: Structure and Properties, Second Edition*. Cambridge University Press, 1997. doi: 10.1017/CBO9781139878326.
- [72] F. Simancik, H. P. Degischer, and H. Wörz, “Foamed aluminium-Light structural and insulation material,” in *Proceedings of the Fourth European Conference on Advanced Materials & Processes (Euromat’95)*, 1995, pp. 191–196.
- [73] S. Farhadi, “Tesis de maestría: Dynamic Characterization and Modelling of Metallic Foam Material,” Universidad Politécnica de Turín, Turín, 2018. Accessed: Apr. 28, 2020. [Online]. Available: <https://webthesis.biblio.polito.it/9893/1/tesi.pdf>
- [74] A. F. Giamei, “Symposium on Metal Foams,” Fraunhofer EEUU, 1997, pp. 63–78.
- [75] T. J. Lu and C. Chen, “Thermal transport and fire retardance properties of cellular aluminium alloys,” *Acta Mater*, vol. 47, no. 5, pp. 1469–1485, Mar. 1999, doi: 10.1016/S1359-6454(99)00037-3.
- [76] P. Sánchez Pérez, “Tesis de maestría: Simulación numérica de la respuesta dinámica a compresión de tubos de aluminio rellenos de espuma metálica,” Universidad Carlos III de Madrid, 2011.
- [77] “Judith Bellostes : cielo raso de aluminio celular – espuma de aluminio estabilizada : Estudio de arquitectura.” <https://blog.bellostes.com/?p=399> (accessed Jul. 15, 2022).
- [78] V. C. Srivastava and K. L. Sahoo, “Processing, stabilization and applications of metallic foams. Art of science,” *Materials Science Poland*, vol. Vol. 25, No. 3, 2007.
- [79] “Boeing’s 787 - SAMPE Global.” <https://www.sampe.org/boeings-787/> (accessed Mar. 24, 2023).
- [80] I. Torres Vela, “Tesis de maestría: Desarrollo y análisis de un modelo numérico para el estudio de elementos tubulares sometidos al impacto,” Universidad Carlos III de

- Madrid, 2011. [Online]. Available: [https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/13661/ISMAEL\\_TORRES\\_VELA\\_PFC.pdf;jsessionid=DA0326B34DEFA0CCE51E8462426C4E0E?sequence=1](https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/13661/ISMAEL_TORRES_VELA_PFC.pdf;jsessionid=DA0326B34DEFA0CCE51E8462426C4E0E?sequence=1)
- [81] L. P. Lefebvre, J. Banhart, and D. C. Dunand, “Porous metals and metallic foams: Current status and recent developments,” *Adv Eng Mater*, 2008, doi: 10.1002/adem.200800241.
- [82] D. Laughlin and K. Hono, Eds., *Physical Metallurgy*, 5th Edition. Elsevier, 2014. Accessed: Apr. 29, 2020. [Online]. Available: <https://www.elsevier.com/books/physical-metallurgy/laughlin/978-0-444-53770-6>
- [83] J. I. Goldstein, D. E. Newbury, J. R. Michael, N. W. M. Ritchie, J. H. J. Scott, and D. C. Joy, *Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis*. 2017. doi: 10.1007/978-1-4939-6676-9.
- [84] M. Ashby, A. G. Evans, N. A. Fleck, L. J. Gibson, J. W. Hutchinson, and H. N. G. Wadley, *Metal Foams: A Design Guide*, 1st ed., vol. 1. Butterworth-Heinemann, 2000. Accessed: Apr. 28, 2020. [Online]. Available: <http://www.bh.com>
- [85] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, and D. Fox, *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics: Seventh Edition*. Elsevier Ltd, 2013. doi: 10.1016/C2009-0-26332-X.
- [86] J. N. Reddy, *Introduction to the Finite Element Method*, 4th Editio. New York: McGraw-Hill Education, 2019. [Online]. Available: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781259861901>
- [87] J. H. Ramírez, “Tesis de maestría: Estimación del comportamiento a la compresión de espumas metálicas con diferentes grados de porosidades,” Universidad Autónoma del Carmen, 2014.
- [88] W. Ogierman and G. Kokot, “Determination of Local Strain Distribution at the Level of the Constituents of Particle Reinforced Composite: An Experimental and Numerical

Study,” *Materials* 2020, Vol. 13, Page 3889, vol. 13, no. 17, p. 3889, Sep. 2020, doi: 10.3390/MA13173889.

- [89] 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.
- [90] J. C. Carranza, B. Y. Casas, I. A. Figueroa, L. E. Carranza, and I. Alfonso, “Design, fabrication and operation of a device for manufacturing metal foams and composites by infiltration,” *International Journal of Metalcasting*, pp. 1–13, Feb. 2023, doi: 10.1007/s40962-023-00979-x.
- [91] A. J. Hamad, “Size and shape effect of specimen on the compressive strength of HPLWFC reinforced with glass fibres,” *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, vol. 29, no. 4, pp. 373–380, Oct. 2017, doi: 10.1016/J.JKSUES.2015.09.003.
- [92] 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, Dec. 2005, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2005.03.002.
- [93] S. K. Sebsadji and K. Chouicha, “Determining periodic representative volumes of concrete mixtures based on the fractal analysis,” *Int J Solids Struct*, vol. 49, no. 21, pp. 2941–2950, Oct. 2012, doi: 10.1016/J.IJSOLSTR.2012.05.017.
- [94] L. Pérez, S. Lascano, C. Aguilar, 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, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.06.038.
- [95] 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, Aug. 2014, doi: 10.1016/j.commatsci.2014.04.065.

- [96] W. E. Warren and A. M. Kraynik, "The Linear Elastic Properties of Open-Cell Foams," *J Appl Mech*, 1988, doi: 10.1115/1.3173680.
- [97] T. E. Soto *et al.*, "An Overview on the Identification and Characterization of Cu-Rich Second Phases in Casting Al Alloys," *International Journal of Metalcasting*, Oct. 2022, doi: 10.1007/s40962-022-00889-4.
- [98] M. Gogebakan and B. Avar, "Structural evolutions of the mechanically alloyed Al<sub>70</sub>Cu<sub>20</sub>Fe<sub>10</sub> powders," *Pramana*, vol. 77, pp. 735–747, 2011, doi: 10.1007/s12043-011-0091-6.
- [99] E. Samuel, A. M. Samuel, H. W. Doty, S. Valtierra, and F. H. Samuel, "Intermetallic phases in Al–Si based cast alloys: new perspective.," *International Journal of Cast Metals Research*, vol. 27, no. 2, pp. 107–114, Jan. 2014, doi: 10.1179/1743133613Y.0000000083.
- [100] L. Zhang, J. Gao, L. N. W. Damoah, and D. G. Robertson, "Removal of iron from aluminum: A review," *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, vol. 33, no. 2, pp. 99–157, 2012, doi: 10.1080/08827508.2010.542211.
- [101] B. Ramogayana, D. Santos-Carballal, K. P. Maenetja, N. H. De Leeuw, and P. E. Ngoepe, "Density Functional Theory Study of Ethylene Carbonate Adsorption on the (0001) Surface of Aluminum Oxide  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>," *ACS Omega*, vol. 6, no. 44, pp. 29577–29587, Nov. 2021, doi: 10.1021/ACSOMEGA.1C03771.
- [102] D. Kim, J. H. Jung, and J. Ihm, "Theoretical Study of Aluminum Hydroxide as a Hydrogen-Bonded Layered Material," *Nanomaterials 2018, Vol. 8, Page 375*, vol. 8, no. 6, p. 375, May 2018, doi: 10.3390/NANO8060375.
- [103] K. H. Baik, G. C. Lee, and S. Ahn, "Interface and tensile behavior of squeeze cast AC8A-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite," *Scripta Metallurgica et Materialia*, vol. 30, no. 2, 1994, doi: 10.1016/0956-716X(94)90046-9.
- [104] G. M. Janowski and B. J. Pletka, "The influence of interfacial structure on the mechanical properties of liquid-phase-sintered aluminum-ceramic composites,"

*Materials Science and Engineering: A*, vol. 129, no. 1, pp. 65–76, Oct. 1990, doi: 10.1016/0921-5093(90)90345-4.

- [105] T. Kalpakoglou and S. Yiatros, “Metal foams: A review for mechanical properties under tensile and shear stress,” *Frontiers in Materials*, vol. 9. 2022. doi: 10.3389/fmats.2022.998673.

## Publicaciones derivadas del presente trabajo de tesis:

- Christian C. Reyes, Luis Béjar, Luis Pérez, Claudio Aguilar, **Juan C. Carranza**, Luis E. Carranza, and Ismeli Alfonso, “Use of The Fractal Dimension for Porosity Modification in Aluminum Foams Manufactured Using Space Holder Particles,” *Theoretical and Applied Mechanics*, vol. 48, no. 1, pp. 109–125, 2021, doi: 10.2298/TAM210129005R.
- L.E. Carranza, L. Béjar, C. Aguilar, G. Lara, I.A. Figueroa, **J.C. Carranza**, T.E. Soto, I. Alfonso, “Phase transformations and porosity formation for Cu-Sn alloys over solution heat treated,” *Mater Lett*, vol. 330, p. 1-4, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.matlet.2022.133362.
- C. Reyes, L. Béjar, **J. C. Carranza**, P. Pérez, L. Pérez, y I. Alfonso, “DEM-FEM combination for modeling and simulation of fractal metallic foams”, *Mater Today Commun*, vol. 34, 2023, doi: 10.1016/j.mtcomm.2022.105054.
- B. Y. Casas, **J. C. Carranza**, L. Béjar, C. Aguilar, I. A. Figueroa, y I. Alfonso, “Production of aluminum foams with hierarchical porosity by a combination of two different manufacturing methods”, *J Alloys Compd*, vol. 831, p. 154780, ago. 2020, doi: 10.1016/j.jallcom.2020.154780.
- Bertha Y. Casas, **Juan C. Carranza**, Ignacio A. Figueroa, Jose G. González, Orlando Hernandez, Luis Béjar, Claudio Aguilar, Ismeli Alfonso, “Fractal and conventional analysis of Cu content effect on the microstructure of Al-Si-Cu-Mg Alloys”, *Materials Research*, vol. 23, núm. 4, p. 20190666, ago. 2020, doi: 10.1590/1980-5373-MR-2019-0666.
- **Juan C. Carranza**, Bertha Y. Casas, Ismeli Alfonso, Luis Perez, Robin A.L. Drew, Jorge A. Verduzco, Ignacio A. Figueroa, “Estimation of the pores agglomeration effect on the compressive behavior of metallic foams: Infiltration and powder metallurgy study cases,” *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, vol. 50, no. 2, May 2020, doi: 10.7546/JTAM.50.20.02.07.
- **J. C. Carranza**, B. Y. Casas, I. A. Figueroa, L. E. Carranza, and I. Alfonso, “Design, fabrication and operation of a device for manufacturing metal foams and composites by infiltration,” *International Journal of Metalcasting*, pp. 1–13, Feb. 2023, doi: 10.1007/S40962-023-00979-X/TABLES/2.
- **J. C. Carranza**, L. Pérez, R. Ganesan, B. Y. Casas, R. A. L. Drew, C. Ruiz-Aguilar, I. A. Figueroa, I. Alfonso, “Effect of fractal distribution of the porosity on mechanical properties of Al foams manufactured by infiltration,” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 41, no. 9, p. 379, Sep. 2019, doi: 10.1007/s40430-019-1876-7.