



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES

**EFFECTO DE LAS ADICIONES DE LITIO SOBRE LA
MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE
ESPUMAS METÁLICAS BASE MAGNESIO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA

P R E S E N T A:

DULCE KARINA BERNAL APÁEZ

TUTOR

**Dr. IGNACIO ALEJANDRO FIGUEROA VARGAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES**

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX, 2024





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO

Presidente: M. en C. BALBINA OJEDA RAMÍREZ

Vocal: M. en I. AGUSTIN GERARDO RUIZ TAMAYO

Secretario: Dr. IGNACIO ALEJANDRO FIGUEROA VARGAS

1er Suplente: Dr. VICTOR ANTONIO ARANDA VILLADA

2do Suplente: M. en E. CLARA SARAID FLORES ROSAS

Sitio donde se desarrolló el tema:

Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM.

ASESOR DEL TEMA:

Dr. Ignacio Alejandro Figueroa Vargas

SUSTENTATE:

Dulce Karina Bernal Apéaz

RESUMEN

El presente trabajo reporta el estudio realizado de la fabricación y caracterización de dos espumas metálicas base magnesio con diferentes composiciones: 3% Li-97% Mg y 5% Li- 95% Mg, trabajando un tamaño de poro intermedio, así como celda abierta. Esto con el fin de analizar y determinar el efecto del litio en las propiedades mecánicas y microestructurales de las espumas metálicas producidas.

Para esto, se realizó la fabricación de las aleaciones con diferentes composiciones a través de una fundición en un horno de inducción controlado con una bomba de vacío y argón. Posteriormente, se generó la porosidad de las aleaciones por medio del método de infiltración en el que se busca tener una atmósfera controlada y con ayuda de gas argón, una preforma (NaCl), así como una presión determinada, se obtiene la porosidad deseada. Una vez que se obtuvieron las espumas metálicas, se realizó la lixiviación de la preforma para formar la porosidad y se llevó a cabo la caracterización de las espumas metálicas por medio de un ensayo de compresión, dureza Vickers y picnometría de helio, así como la obtención de sus microestructuras mediante preparación metalográfica.

Life is short, and the world is wide.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por la formación profesional que me ha brindado desde mi ingreso a bachillerato en el Colegio de Ciencias y Humanidades, mi camino en la ciencia por la Facultad de Química y la culminación de mis estudios con la realización de mi tesis en el Instituto de Investigaciones en Materiales, así como a cada una de las profesoras y profesores que han sido parte de mi formación académica.

Agradezco mi asesor, el Dr. Ignacio A. Figueroa Vargas, por la confianza y la oportunidad que me otorgó para la realización de este proyecto, así como la enseñanza y el apoyo que siempre me brindó.

Agradezco al proyecto UNAM-DGAPA-PAPIIT IN102422 por el financiamiento otorgado para la realización del presente proyecto. También quiero expresar mi más sincero agradecimiento a los técnicos del IIM-UNAM que me brindaron su ayuda durante la parte experimental del presente trabajo, sin un orden en particular los menciono a continuación: G.A. Lara, O. Novelo, C. Flores, A. Tejeda, A. Pompa, C. Ramos, E. Hernández, C. González, L. Bazán, F. Silvar, K.E. Reyes, R. Reyes, A. Bobadilla, F. García, y J. Romero. Finalmente, agradezco a la IQM Laura Sofía Figueroa Blanco por el tiempo dedicado a mostrarme lo esencial para el desarrollo de mi experimentación.

ÍNDICE

RESUMEN	III
AGRADECIMIENTOS	V
ÍNDICE	VI
ÍNDICE TABLAS.....	XI
ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS	XII
INTRODUCCIÓN	1
HIPÓTESIS	3
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS PARTICULARES	3
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO.....	4
1.1 ESPUMAS METÁLICAS.....	4
1.2 ESPUMAS DE MAGNESIO Y SUS ALEACIONES.	6
1.3 PROPIEDADES.	12
1.3.1 PROPIEDADES FÍSICAS.	12
1.3.2 PROPIEDADES MECÁNICAS.....	16
1.4 MÉTODOS DE FABRICACIÓN.	21
1.4.1 FUNDICIÓN.	21
1.4.2 METALURGIA DE POLVOS.....	23
1.4.3 INFILTRACIÓN.	24
1.4.4 MÉTODO “IN-SITU”.	26
1.5 APLICACIONES.....	26
1.5.1 INDUSTRIA AUTOMOTRIZ.....	27
1.5.2 INDUSTRIA AEROESPACIAL.....	29
1.5.3 INDUSTRIA BIOMÉDICA.....	30
CAPÍTULO 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	32
2.1 OBTENCIÓN DE ALEACIONES Mg-Li.	32
2.1.1 PREPARACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.....	32
2.1.2 PREPARACIÓN DE ALEACIONES Mg-Li.....	33
2.1.3 MAQUINADO DE PROBETAS.....	34
2.2 FABRICACIÓN DE ESPUMAS METÁLICAS	35
2.2.1 ELABORACIÓN DE EMPAQUES DE GRAFITO.....	35
2.2.2 PREPARACIÓN DE LA PREFORMA.....	36

2.2.3 ENSAMBLE DEL REACTOR.	37
2.3 MAQUINADO DE ESPUMAS METÁLICAS Y ELIMINACIÓN DE LA PREFORMA. 42	
2.3.1 EXTRACCIÓN DE CILINDROS.	42
2.3.2 MAQUINADO DE ESPUMAS METÁLICAS.	42
2.3.3 ELIMINACIÓN DE LA PREFORMA.....	44
2.4 CARACTERIZACIÓN DE LAS ESPUMAS METÁLICAS.....	46
2.4.1 PICNOMETRÍA.	46
2.4.2 DIFRACCIÓN DE RAYOS X.	47
2.4.3 ENSAYO DE DUREZA.	48
2.4.4 ENSAYO DE COMPRESIÓN.	50
2.4.5 PREPARACIÓN METALOGRÁFICA.	53
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	55
3.1 FABRICACIÓN DE ALEACIONES Y MAQUINADO DE LINGOTES.	55
3.2 PICNOMETRÍA.	56
3.3 POROSIDAD.....	57
3.4 DIFRACCIÓN DE RAYOS X.	59
3.5 MICROESTRUCTURAS E INTERPRETACIÓN METALOGRÁFICA.....	61
3.6 ENSAYO DE DUREZA.	62
3.7 ENSAYO DE COMPRESIÓN.	64
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES.....	66
REFERENCIAS.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de estructura porosa de una espuma metálica donde a) poro cerrado y b) poro abierto.	4
Figura 2. Tipos de poros en espumas metálicas a) poro cerrado y b) poro abierto.	5
Figura 3. Diagrama de fases para el sistema binario Mg-Li.	11
Figura 4. Variación de la densidad relativa en función de diferentes parámetros de la porosidad: número de poros por unidad de volumen (SV), número de poros por unidad de superficie (NA) y volumen por unidad de volumen (VV).....	15
Figura 5. Diferencia entre sólido celular y sólido poroso (espuma metálica)	16
Figura 6. Esquema de una curva esfuerzo – deformación de una espuma metálica proveniente de un ensayo de compresión	16
Figura 7. Mecanismo de deformación de las espumas metálicas	17
Figura 8. Curva de esfuerzo- deformación para un sólido (a) y una espuma metálica (b)	18
Figura 9. Esquema de una curva esfuerzo-deformación durante la absorción de energía	19
Figura 10. Esquema de un ejemplo de la flexión elástica de un modelo cúbico de celdas	20
Figura 11. Proceso de adición de agentes gasificantes	22
Figura 12. Fabricación de una espuma metálica por inyección directa de gas a la fundición	23
Figura 13. Diagrama de producción de espumas metálicas por medio de metalurgia de polvos	24
Figura 14. Ejemplificación del método de infiltración en estado líquido con material de sacrificio	25
Figura 15. Aplicaciones de las espumas metálicas en relación con la porosidad que poseen	27
Figura 16. Espuma metálica de estructura tipo sándwich	28
Figura 17. Espuma metálica en estructura tipo sándwich de autopartes	28
Figura 18. Esquema de una combinación ideal de propiedades mecánicas de espumas metálicas para su implementación en la industria automotriz	29
Figura 19. Estructura tipo “honeycomb” en la industria aeroespacial	30
Figura 20. Espumas metálicas utilizadas como prótesis óseas: a) columna vertebral y b) hueso cigomático macizo facial	31
Figura 21. Materia prima empleada para aleaciones: a) Lingotes de magnesio y b) cilindros de litio.....	33

Figura 22. a) Crisol utilizado para la fundición de la materia prima y b) Horno de inducción de atmósfera controlada.....	34
Figura 23. Torno para el maquinado de los cilindros obtenidos.	34
Figura 24. Cortadora para los cilindros obtenidos.....	35
Figura 25. Elaboración de empaques de grafito para el sistema de infiltración.	36
Figura 26. Preparación de la preforma en un equipo de a) tamiz y cribas y b) preforma (NaCl) con el tamaño de grano requerido.	37
Figura 27. Componentes para el ensamble del reactor para la fabricación de espumas metálicas.	38
Figura 28. Sistema de infiltración ensamblado correctamente.....	39
Figura 29. Sistema conectado con válvulas listas para el proceso de infiltración.	40
Figura 30. Etapas de la solidificación de espumas metálicas. a) muestra recién liberada del horno eléctrico, b) solidificación y c) enfriamiento de la espuma.....	41
Figura 31. Extracción de probetas en prensa hidráulica.	42
Figura 32. Torneado de los cilindros de espumas metálicas con ayuda del torno.....	43
Figura 33. Cilindros de espumas metálicos después de ser maquinados.....	43
Figura 34. Preparación de una solución alcalina de NaOH con agua destilada para la eliminación de la preforma. a) vaso de precipitados con la disolución y b) comparación del pH de la disolución	44
Figura 35. Etapa de lixiviación de las espumas metálicas con agitación magnética.	45
Figura 36. Espumas metálicas a) con preforma y b) sin preforma.	45
Figura 37. Picnómetro de helio.	47
Figura 38. Equipo para difracción de rayos X.	48
Figura 39. Durómetro para ensayo de dureza Vickers.	49
Figura 40. Ensayo de Dureza Vickers para a) espumas metálicas y b) muestras en bulto.	49
Figura 41. Máquina de ensayos universales.	51
Figura 42. Dimensiones a) la altura y b) el diámetro de las probetas bajo norma para el ensayo de compresión.	51
Figura 43. Montaje de las muestras en la máquina de ensayos universales.	52
Figura 44. Etapas del ensayo de compresión de una espuma metálica. a) Inicio del ensayo, b) inicio de la deformación y c) probeta deformada.	52
Figura 45. Preparación metalográfica: Desbaste.	53
Figura 46. Preparación metalográfica: a) Pulido y b) pasta de diamante utilizada para el pulido.....	54

Figura 47. Microscopio óptico para microestructuras.	54
Figura 48. Dimensiones de los lingotes de la aleación obtenidos mediante fundición. .	55
Figura 49. Probetas de material compuesto (NaCl + Mg-Li).	56
Figura 50. Vista de la porosidad de la espuma. a) altura y b) diámetro.	59
Figura 51. Difractograma de la muestra de 97% Mg – 3% Li.	60
Figura 52. Difractograma de la muestra de 95% Mg – 5% Li.	60
Figura 53. Microestructura del sistema Mg-Li a) Mg 97%-Li3% y b) Mg 95%-Li 5%. De las muestras en bulto.	61
Figura 54. Microestructura de espumas metálicas mostrando los poros, las interconexiones y la región sólida del material.	62
Figura 55. Espumas a) antes y b) después del ensayo de compresión	64
Figura 56. Curvas esfuerzo-deformación de las espumas metálicas de composición Mg: 97%-Li 3% y Mg 95%-Li 5%.	65

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de las espumas metálicas de acuerdo con el tamaño de poro presente en su estructura.	5
Tabla 2. Propiedades específicas del Mg	6
Tabla 3. Clasificación ASTM para aleaciones de Mg	7
Tabla 4. Datos de solubilidad para aleaciones de Mg de sistemas binarios	8
Tabla 5. Propiedades del Litio	10
Tabla 6. Denominación ASTM E11-04 para tamaño de partícula de los poros en espumas metálicas	14
Tabla 7. Valores obtenidos en la prueba de picnometría de He de las muestras en bulto.	56
Tabla 8. Valores obtenidos en la prueba de picnometría de He de las espumas metálicas.	57
Tabla 9. Valores de porosidad determinados después de la disolución de la preforma.	58
Tabla 10. Valores de Dureza Vickers (HV) de las muestras en bulto de la aleación.	63

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

Mg – Magnesio	IUPAC – Unión Internacional de Química Pura y Aplicada.
Li – Litio	ASTM – American Society for Testing and Materials
Al – Aluminio	HCP – Hexagonal Compacta
Fe – Hierro	BCC – Cúbica centrada en el cuerpo
Ca – Calcio	NA – Número de poros por unidad de superficie
Ti – Titanio	SV – Área de los poros por unidad de volumen
Co – Cobalto	VV – Volumen de poros por unidad de volumen
Cr – Cromo	g – gramo
Zn – Zinc	m – masa
Mn – Manganeso	v – volumen
Ag – Plata	mm – milímetro
Ni – Níquel	ml – mililitro
Cu – Cobre	nm – nanómetro
Zr – Zirconio	cm³ – centímetro cúbico
[CaMg(CO₃)₂] – dolomita	cm – centímetro
[MgCO₃] – magnesita	L/D – Relación de longitud entre diámetro
CO₃ – Carbonato	Kgf – Kilogramo fuerza
O₂ – Oxígeno diatómico	kJ – kilojoule
NaCl – Cloruro de sodio	GPa – Gigapascal
RE – Rare Earths (tierras raras)	Mpa – Megapascal
Ar – Argón	Torr – Torrichelli
He – Helio	T – temperatura
NaOH – Hidróxido de sodio	
HNO₃ – Ácido nítrico	
C₂H₆O – Etanol	

μm – micra	n – porosidad total
$^{\circ}C$ – grado Celsius	n_o – porosidad abierta
$p.f.$ – punto de fusión	ρ_r – densidad relativa
ρ – densidad	ρ_f – densidad de la espuma metálica
α – alfa	ρ_a – densidad de la aleación
L – longitud	σ – Esfuerzo
D – diámetro	ϵ -- Deformación
Θ – Theta	pH – potencial de hidrógeno
Φ – porcentaje de porosidad	P – Poro
V_p -- volumen de la probeta	$\%at.$ – porcentaje atómico
V_s volumen sólido de la espuma	$\%masa$ – porcentaje masa

INTRODUCCIÓN

Para la industria, la ciencia y la tecnología, el estudio de los materiales es de suma importancia para el desarrollo y procesamiento de nuevos componentes. En el transcurso de las décadas se han desarrollado varios materiales para diferentes áreas, gracias a la comprensión y entendimiento que actualmente se tiene sobre el tema. La clasificación de los materiales también ha tenido un crecimiento desbordante en consecuencia de los conocimientos actuales, una clasificación general está dada por el conocimiento presente de cuatro grupos de materiales [1]:

- Metales y aleaciones
- Cerámicos
- Polímeros
- Materiales compuestos

Esto nos permite ver más allá de lo que la ciencia e ingeniería de los materiales nos ofrece, puesto que, las propiedades de estos se determinan principalmente por la estructura que presentan. Gracias a los diferentes procesos que actualmente existen, el descubrimiento, la creación o la innovación de nuevos materiales tiene mayores posibilidades [3].

Por ejemplo, entre los materiales que han sido descubiertos y se han sometido a innovaciones, son los materiales celulares que se encuentran de manera natural o artificial y tienen una característica específica, esto es que presentan una parte de la estructura sólida y la otra parte con huecos, mejor conocida como “poros”, por lo que, la cantidad de porosidad será de suma importancia en este tipo de materiales. Entre los materiales porosos artificiales, es decir, que son creados o fabricados por el ser humano, se encuentran las espumas metálicas que son conocidas principalmente por su baja densidad. Así mismo se caracterizan por sus buenas propiedades tanto físicas como mecánicas que son causantes de su amplio campo de aplicaciones [1].

Dentro del estudio de nuevos materiales, se encuentra la investigación de aleaciones ligeras, entre éstas se encuentran las de base Mg que destacan por su baja densidad,

alta resistencia específica, etc. [2] El Mg tiene una estructura HCP que lo hace un material blando y debido a que su red cristalina carece de planos de deslizamiento, sus aleaciones son deficientes de propiedades plásticas.

HIPÓTESIS

Si se fabrican espumas metálicas de Mg-Li, éstas adquirirán un mayor límite de cedencia en virtud del endurecimiento por solución sólida.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la relación de porcentaje en masa del Mg y Li, para estudiar el efecto sobre la posible ductilidad que genera esta aleación.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Obtener los parámetros adecuados para la fabricación de espumas metálicas de Mg-Li.
- Determinar el porcentaje en masa de las fases alfa y tamaño de grano de la aleación de Mg – Li para comparar sus propiedades mecánicas de cada composición.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

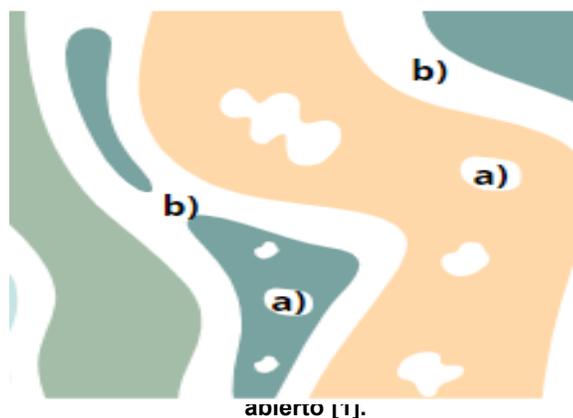
1.1 ESPUMAS METÁLICAS.

Las espumas metálicas son materiales porosos o celulares, también llamadas estructuras bifásicas que, como su nombre lo dice, están conformados por dos zonas, una región de la estructura se encuentra sólida y la otra región se encuentra con espacios vacíos, conocidos como “poros”. Estas espumas se pueden encontrar de distinta manera, dependiendo de su composición química. También, son conocidas por tener un alto contenido de porosidad (por encima del 50%), es por esto por lo que se consiguen densidades muy bajas [1].

Los poros se caracterizan por la forma y la distribución que adquieren a lo largo de la estructura, de esta manera dan lugar a las propiedades físicas y mecánicas de las espumas metálicas, estas se obtienen por diversos métodos de fabricación, dependiendo del tamaño y tipo de poro que se requiera.

Las espumas metálicas se clasifican por el tipo de ordenamiento de los poros que presenta su estructura (Figura 1) [2].

- Poros cerrados: es decir, los poros se encuentran aislados del resto de los poros.
- Poros abiertos: Los poros se encuentran interconectados entre sí, en grupos o se pueden presentar aglomerados [2].



Las espumas metálicas de poros cerrados (Figura 2a) generalmente se utilizan para propiedades estructurales, a diferencia de las de poros abiertos (Figura 2b), que son utilizadas principalmente por sus propiedades térmicas y superficiales [3].

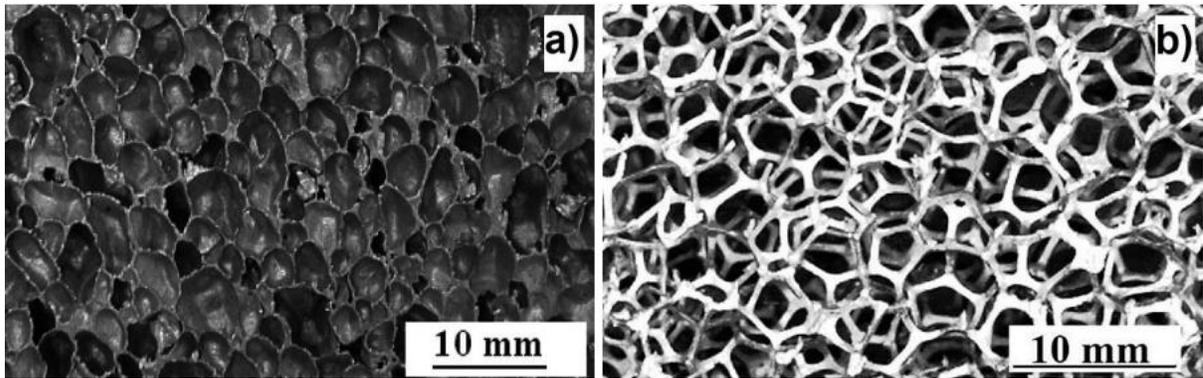


Figura 2. Tipos de poros en espumas metálicas a) poro cerrado y b) poro abierto. [3]

Otra de las características importantes a considerar en las espumas metálicas es la geometría particular que adquieren los poros de manera individual, así como su tamaño, pues son importantes para determinar las propiedades que tendrán estas espumas. Pueden adquirir formas esféricas, cilíndricas, irregulares, etc., y conforme a la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC), las espumas metálicas se pueden clasificar de acuerdo con el tamaño de diámetro que poseen (Tabla 1) [4].

Tabla 1. Clasificación de las espumas metálicas de acuerdo con el tamaño de poro presente en su estructura. [4]

Tipo de poro	Diámetro de poro (d) [nm]
Microporos	$d < 2.0$
Mesoporos	$2.0 \leq d \leq 50$
Macroporos	$d > 50$

1.2 ESPUMAS DE MAGNESIO Y SUS ALEACIONES.

El Mg es un elemento metálico estructural liviano y uno de los elementos más abundantes en la Tierra junto con el Al, Fe y Ca, pertenece al grupo de los alcalinotérreos, cuenta con una baja densidad ($\rho=1.738 \text{ [g/cm}^3\text{]}$) [6], este elemento no se encuentra de forma metálica, más bien, se encuentra en su forma iónica (en compuestos) debido a su alta reactividad [5-6]. Este metal es completamente extraído de minerales como la dolomita $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$ y la magnesita $[\text{MgCO}_3]$, así como de cloruros de Mg que se encuentran disueltos principalmente en el mar o en algunos lagos de agua salada [10]; es altamente reactivo con el O_2 , por lo que requiere parámetros de fusión controlados, en algunos casos, es necesario aplicar un recubrimiento para disminuir su reactividad y la mejora de sus propiedades físicas, mecánicas, estructurales y químicas, se hace principalmente con el efecto de elementos aleantes. Las principales propiedades que caracterizan al Mg se encuentran en la Tabla 2 [7].

Tabla 2. Propiedades específicas del Mg [7].

Estructura cristalina	Hexagonal compacta (hcp)
Densidad	1.738 g/cm ³
Módulo de Young	45 GPa
Último esfuerzo de tensión	80-180 MPa
Elongación de fractura	1-12%
Punto de fusión	650 °C
Punto de ebullición	1090 °C
Capacidad calorífica específica	1.05 kJ/(kg*K)
Calor de fusión	195 kJ/kg
Conductividad calorífica	156 W/(m*K)
Coefficiente lineal de expansión	$26 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Contracción (sólido-líquido)	4.2%
Conductividad eléctrica específica	$22.4 \text{ m}/(\Omega^* \text{mm}^{-2})$
Potencial normal	-2.37 V

Como se menciona anteriormente, el Mg es un metal altamente reactivo lo que hace que su fabricación y aplicaciones sean limitadas. Sin embargo, es importante mencionar que en su forma sólida que viene directamente de fundiciones no producen flama, en cambio,

sí se encuentra en pequeñas virutas, sí, por ello se debe trabajar con una atmósfera controlada.

Las aleaciones de Mg se clasifican a nivel mundial de acuerdo a la norma ASTM (American Society for Testing and Materials) B275, la cual indica que cada una de las aleaciones cuenta con una denominación de letras y números, las letras indican los principales elementos de aleación y el número se refiere al porcentaje en peso de cada uno de ellos, normalmente representado por un número entero. La última letra muestra variaciones menores en la composición química de las aleaciones, la mayoría de las veces, estas variaciones indican algún tratamiento térmico o mecánico, tal como el grado de pureza que existe en la aleación. La Tabla 3 muestra las abreviaciones para cada una de las aleaciones de magnesio con respecto a la norma ASTM B275 [14].

Tabla 3. Clasificación ASTM para aleaciones de Mg [14].

Letra	Elemento Aleante
A	Al
B	Bi
C	Cu
D	Cd
E	RE
F	Fe
H	Th
K	Zr
L	Li
M	Mn
N	Ni
P	Pb
Q	Ag
R	Cr
S	Si
T	Sn
W	Y

El Mg tiene una estructura cristalina hexagonal compacta (HCP) la que lo hace un material blando y cuenta con un diámetro de 0.320 nm, por tal motivo, la solución con otros metales es favorable [11]. En la Tabla 4 se encuentran los datos de solubilidad para las aleaciones de sistemas binarios de Mg, en donde algunos elementos pueden incitar la formación de compuestos intermetálicos [16].

Tabla 4. Datos de solubilidad para aleaciones de Mg de sistemas binarios [11].

Elemento	%e.p.	%at.	Sistema
Litio (Li)	5.5	17	Eutéctico
Aluminio (Al)	12.7	11.8	Eutéctico
Plata (Ag)	15	3.8	Eutéctico
Itrio (Y)	12.5	3.75	Eutéctico
Zinc (Zn)	6.2	2.4	Eutéctico
Neodimio (Nd)	~3	~1	Eutéctico
Zirconio (Zr)	3.8	1	Peritéctico
Manganeso (Mn)	2.2	1	Peritéctico
Torio (Th)	4.75	0.52	Eutéctico
Cerio (Ce)	0.5	0.1	Eutéctico
Indio (In)	53.2	19.4	Peritéctico
Talio (Tl)	60.5	15.4	Eutéctico
Cadmio (Cd)	100	100	Completa
Escandio (Sc)	~24.5	~15	Peritéctico
Plomo (Pb)	41.9	7.75	Eutéctico
Tulio (Tm)	31.8	6.3	Eutéctico
Terbio (Tb)	24	4.6	Eutéctico
Estaño (Sn)	14.5	3.35	Eutéctico
Galio (Ga)	8.4	3.1	Eutéctico
Iterbio (Yb)	8	1.2	Eutéctico
Bismuto (Bi)	8.9	1.1	Eutéctico
Calcio (Ca)	1.35	0.82	Eutéctico
Samarium (Sm)	~6.4	~1	Eutéctico
Oro (Au)	0.8	0.1	Eutéctico
Titanio (Ti)	0.2	0.1	Peritéctico

Entre las aleaciones más producidas de Mg, se encuentra el aluminio (Al), plata (Ag), zirconio (Zr), zinc (Zn), etc., y las más comerciales son de elementos aleantes como Al, Zn y Mn debido a las propiedades que el material adquiere. También, es importante resaltar que las impurezas provenientes del Fe, Ni y Cu atraen con más facilidad un incremento de la velocidad de corrosión presente en el Mg y sus aleaciones [12]. En la microestructura presenta granos equiaxiales grandes lo que afecta a las propiedades mecánicas, sin embargo, con la adición de elementos como Zr y Li, este grano tiende a disminuir su tamaño favoreciendo de esta manera las propiedades del material [10].

El proceso de fundición del Mg requiere algunas precauciones para su manejo, entre ellas, tener una atmósfera inerte debido a la elevada reactividad del Mg en estado líquido. Además, esta tecnología tiene distintas desventajas como: una eficiencia de producción baja y el alto costo en la producción y la ventaja es que sus aleaciones cuentan con un maquinado favorable en comparación de otros materiales estructurales [13].

- Sistema Mg-Li

El Li es el elemento metálico más ligero de la tabla periódica y debido a su alta reactividad, por sí solo, no tiene aplicaciones ingenieriles, No obstante, tiene una función importante como elemento aleante, en la Tabla 5 se presentan algunas de sus propiedades más específicas [19].

Tabla 5. Propiedades del Litio [19].

Estructura Cristalina	Cúbica centrada en el cuerpo (BCC)
Densidad	0.53 [g/cm ³]
Masa atómica	6.941 g/mol
Último esfuerzo de tensión	15 MPa
Punto de fusión	180.54 °C
Punto de ebullición	1342 °C
Capacidad calorífica específica	2.997 J/(g*°C)
Calor de fusión	137 J/g
Conductividad térmica	71.2 W/(m*K)
Electronegatividad	0.98
Radio iónico	0.68
Potencial normal	-3.02 V

La selección de los elementos aleantes está en función de las propiedades que se requieran para el componente, es necesario contar con elementos aleantes que favorezcan los procesos de maquinado, en donde interviene la deformación plástica a temperatura ambiente. El Mg posee una estructura cristalina HCP (hexagonal compacta) con únicamente tres planos de deslizamiento, por lo tanto, la solubilidad del Li como elemento aleante en la fase α Mg (Figura 3) es relativamente alta, hasta 5.5% en masa y 17% at [14]. De acuerdo con el diagrama de fases (Figura 3), se requiere tener el 11% en masa para dar la formación de la fase α Mg. El Mg tiene un radio atómico de tamaño pequeño, debido a esto, en su red cristalina es posible colocar átomos más pequeños en los intersticios, como los de Li, que es un metal más ligero [14].

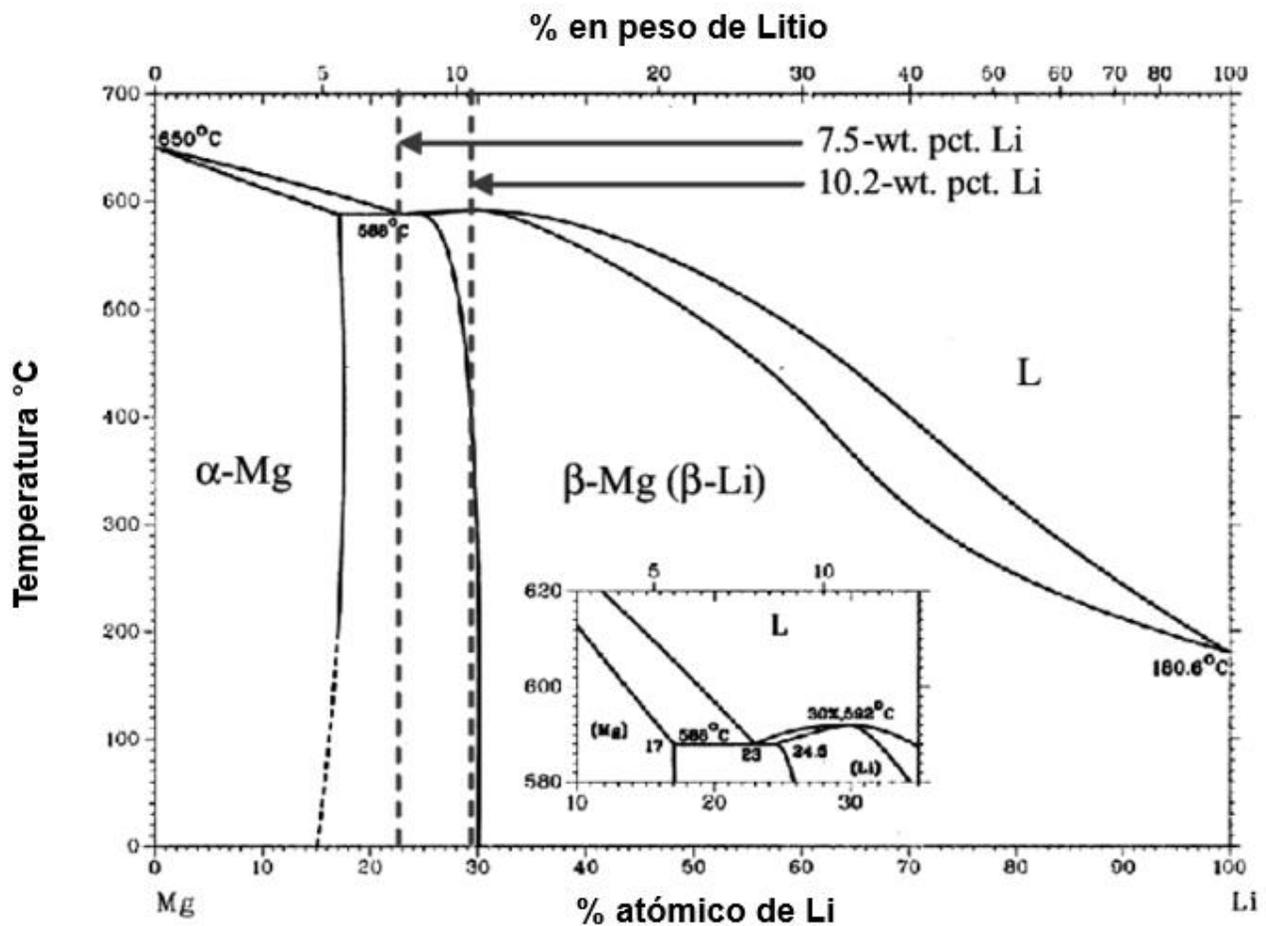


Figura 3. Diagrama de fases para el sistema binario Mg-Li [22].

En el diagrama de fases del sistema binario de Mg-Li (Figura 3) indica la variación de la densidad en función del porcentaje de Li, por lo que, la densidad con Li como elemento aleante, disminuye el parámetro de red y aumenta los planos de deslizamiento en el sistema binario, de esta manera la estructura cristalina cambia a una BCC (cúbica centrada en el cuerpo) proporcionando facilidad para los procesos de conformado mecánico [17].

1.3 PROPIEDADES.

En el campo de la ciencia y la ingeniería las aleaciones de Mg-Li son de gran interés debido a sus propiedades, principalmente su baja densidad que abarca de 1.35 a 1.72 [g/cm³] dependiendo de contenido de Li, en tanto que hace que los materiales metálicos sean más ligeros [18]. Dependiendo del Li asegura una reducción de la densidad, así como el aumento de la ductilidad, independientemente del tamaño de los granos y para el Mg como material estructural, proporciona un aumento en todas sus propiedades y lo hace uno de los elementos metálicos con mayor resistencia mecánica, por lo que su relación de resistencia-peso es bastante llamativo para industrias como la automotriz, aeroespacial o aeronáutica [9].

Al tratarse de materiales porosos o celulares, las espumas metálicas presentan diferentes propiedades que las hacen favorables, principalmente la alta porosidad en su estructura, entre otras, tales como la baja densidad que poseen y la absorción de energía, pues, son de alto interés para las múltiples aplicaciones que se pueden obtener para distintos campos industriales. Estas se dividen en propiedades físicas y mecánicas [2] y dependen de su composición química, su morfología y la distribución de los poros en su estructura [29].

1.3.1 PROPIEDADES FÍSICAS.

Las propiedades físicas de los materiales son las propiedades que principalmente se puede observar y medir, en algunos casos no se requiere saber el comportamiento químico de los materiales. Dos de los parámetros de mayor importancia en las estructuras de las espumas metálicas son la porosidad y la densidad (específicamente la densidad relativa), pues estos son encargados de determinar muchas de las propiedades físicas y mecánicas que estarán presentes en las espumas metálicas [23].

Porosidad

La porosidad se refiere al grado o parámetro en el que el volumen del material se llena de poros generados por aire o por gas, o bien, se encuentra vacío, se expresa como un

porcentaje del volumen total del material [24], es decir, representa los espacios vacíos de las espumas metálicas. En las espumas metálicas, se considera una buena porosidad cuando está por encima del 0.4-1.2 [g/cm³], es decir, los poros deben ocupar arriba del 50% del volumen total de toda la espuma, ya que, entre más contenido de porosidad presente, mejores propiedades mecánicas se pueden obtener. Se establecen dos tipos de porosidad como son: porosidad total o absoluta y porosidad abierta.

- Porosidad total o absoluta (n): Se considera el volumen total de los espacios vacíos por unidad de volumen, para ello se debe realizar el conteo de los espacios vacíos que se encuentran presentes en la estructura de la espuma metálica, espacios cerrados, abiertos o bien si son o no accesibles. La determinación se determina de forma indirecta a partir de ambas densidades [28].
- Porosidad abierta (n_o): También nombrada porosidad accesible, es el volumen de los poros abiertos o interconectados entre sí, se determina por medio de técnicas experimentales. Se trata del parámetro más importante de los materiales, pues determina la capacidad de absorber energía [28].

Con ayuda de la ecuación 1 se calcula el porcentaje de la porosidad [23].

$$\Phi = \frac{V_p - V_s}{V_p} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

Φ = porcentaje de porosidad

V_p = volumen de la probeta [cm³]

V_s = volumen sólido de la espuma [cm³]

En la Tabla 6 se encuentran los intervalos que abarca el tamaño de grano de acuerdo con la norma ASTM E11-04, las cuales se pueden considerar como tamaños de poro pequeño, intermedio y grande [26]; teniendo un poro uniforme con respecto al tamaño, morfología y distribución, puede favorecer las propiedades mecánicas de la espuma.

Tabla 6. Denominación ASTM E11-04 para tamaño de partícula de los poros en espumas metálicas [26] [27].

Poros (p)	Mm	In	Denominación
1	0.71	0.0278	25
	1.00	0.0394	18
2	2.00	0.0787	10
	2.38	0.0937	8
3	3.35	0.1320	6
	4.75	0.1870	4

Con la porosidad se pueden determinar otros parámetros geométricos para tener una mejor clasificación de las espumas, como lo son: el volumen de los poros por unidad de volumen (VV), el número de poros por unidad de superficie (NA) y el área de los poros por unidad de volumen (SV) [30].

Densidad

Por otro lado, la densidad es una de las propiedades elementales no solo de las espumas metálicas, si no, de todos los materiales. Es el grado en el que un volumen del material se llena con una sustancia, este se expresa como un porcentaje de su volumen total, en las espumas metálicas, la densidad relativa representa la fase sólida que está presente en las espumas, es decir, lo contrario de la porosidad [28].

La densidad relativa de las espumas metálicas se determina a partir de la densidad de la espuma y de la densidad de la aleación que la conforma, es decir, del material sólido, mediante la siguiente expresión (Ecuación 2) [29-30].

$$\rho_r = \frac{\rho_f}{\rho_a} \quad (2)$$

Donde:

ρ_r : Densidad relativa [g/cm³]

ρ_f : Densidad de la espuma metálica [g/cm³]

ρ_a : Densidad de la aleación [g/cm³]

Este parámetro al multiplicarlo por cien simboliza el porcentaje de sólido y el porcentaje de los espacios huecos en la estructura, de esta manera la porosidad también se puede definir de la siguiente manera (Ecuación 3) [30].

$$\rho = 1 - \frac{\rho_f}{\rho_a} \quad (3)$$

Los parámetros de NA, SV y VV pertenecientes a la porosidad, actúan con respecto a la densidad, por lo que, si la densidad disminuye, VV crece y NA y SV tienden a disminuir (Figura 4) [30].

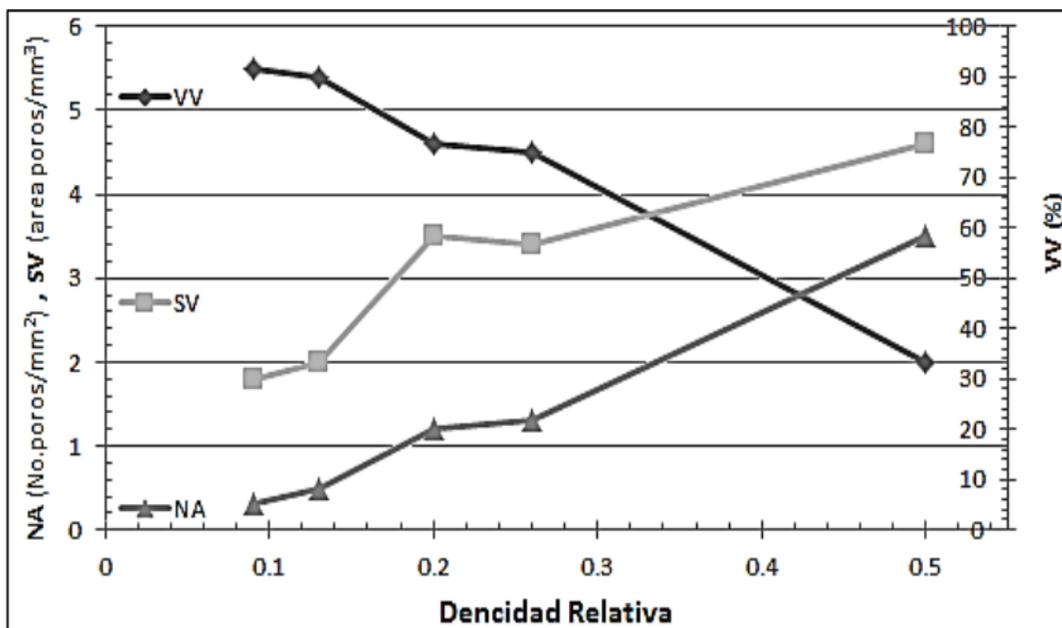


Figura 4. Variación de la densidad relativa en función de diferentes parámetros de la porosidad: número de poros por unidad de volumen (SV), número de poros por unidad de superficie (NA) y volumen por unidad de volumen (VV) [30].

Las espumas metálicas se pueden diferenciar de los sólidos celulares en función de su densidad relativa (Figura 5).

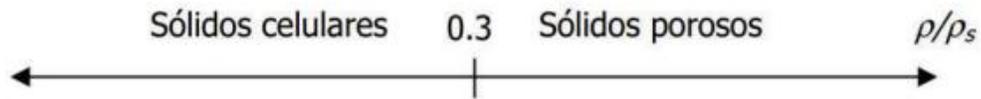


Figura 5. Diferencia entre sólido celular y sólido poroso (espuma metálica) [30].

1.3.2 PROPIEDADES MECÁNICAS.

Las propiedades mecánicas detallan el comportamiento que un material adquiere, en este caso de las espumas metálicas, de esta manera se determinan las aplicaciones que estas tendrán. Lo hacen ante las fuerzas que se aplican sobre ellas como lo son las fuerzas de tracción, compresión o torsión. En las espumas metálicas, las aplicaciones de mayor interés son conforme a las fuerzas de compresión uniaxial, que son asociadas con la porosidad y los parámetros antes mencionados, el tipo de poro (abierto o cerrado), así como los métodos de producción mediante los cuales se obtuvieron las espumas metálicas [31]. Gracias al ensayo de compresión se genera una curva de esfuerzo-deformación (Figura 6).

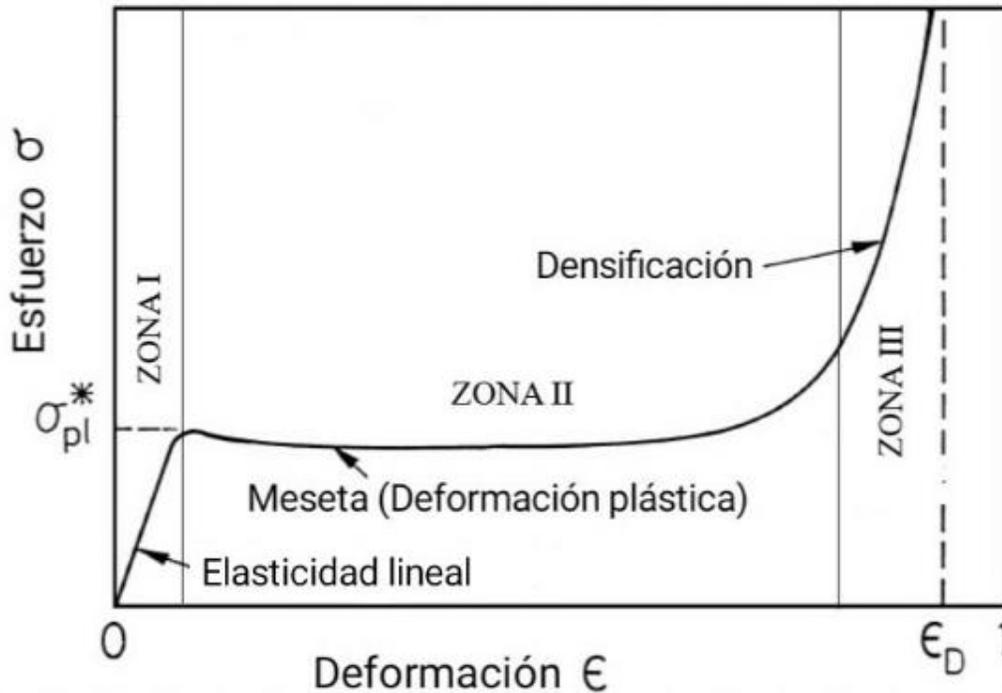


Figura 6. Esquema de una curva esfuerzo – deformación de una espuma metálica proveniente de un ensayo de compresión [32].

En la curva esfuerzo-deformación se presentan tres zonas que describen el comportamiento de la espuma metálica durante el proceso del ensayo de compresión, primero, se observa la Zona I, en esta se concentra la deformación o elasticidad lineal, la cual muestra proporcionalidad de la carga que es aplicada con una deformación cuasilineal, es decir, en esta zona se encuentran los valores del módulo de Young y módulo de rigidez. El módulo de Young se encuentra rigurosamente relacionado con el material o el sólido de la pared celular de la espuma metálica [32-33].

Por otro lado, en la Zona II se presenta una meseta cuasi-constante conocida como región de Plateau, que se lleva a cabo durante un periodo de grandes deformaciones y cercano a un esfuerzo constante, se caracteriza por mostrar una mayor deformación con poca carga aplicada, está pendiente de la meseta puede ser modificada o no, dependiendo de la distribución de los poros a lo largo de toda la estructura de las espumas metálicas, pues conforme al incremento de la carga aplicada, los poros que forman parte de la estructura de la espuma, comienzan a colapsar y expulsar el fluido que se encuentra en el interior de los poros, que generalmente se trata de aire, así, una vez que las paredes de cada una de las celdas se conectan entre sí, se da lugar a la última zona, la Zona III en donde se lleva a cabo la densificación del material, en donde la estructura interna de la espuma se encuentra colapsada, aquí se elimina el fluido (aire o gas) de los poros por completo y aumenta la densidad del material por lo que es muy necesario aplicar mayores cargas para deformar por completo el material (Figura 7) [32, 33, 34].

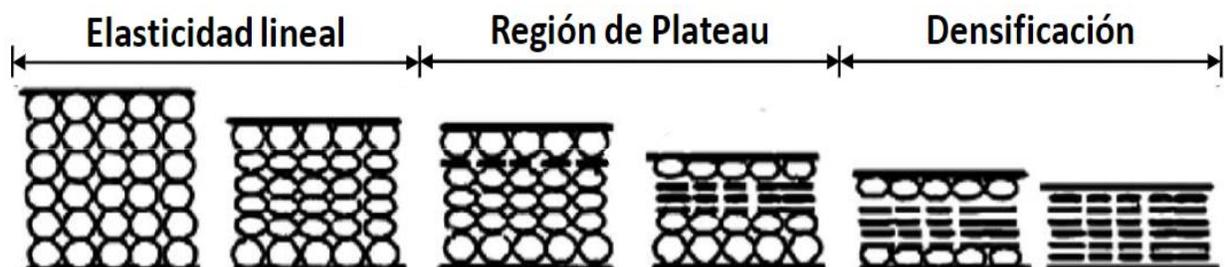


Figura 7. Mecanismo de deformación de las espumas metálicas [34].

Otra de las propiedades mecánicas más representativas de las espumas metálicas es su buena capacidad de absorción de energía con una elevada eficiencia, gracias a que las fuerzas están controladas por el nivel de esfuerzo en el que la espuma metálica absorbe la energía cinética [35], lo cual es de gran importancia debido a las aplicaciones que se pueden obtener. Ahora bien, en un material completamente sólido la energía absorbida por unidad de volumen es la misma que en una espuma metálica, sin embargo, los valores del esfuerzo máximo son diferentes (Figura 8) [32].

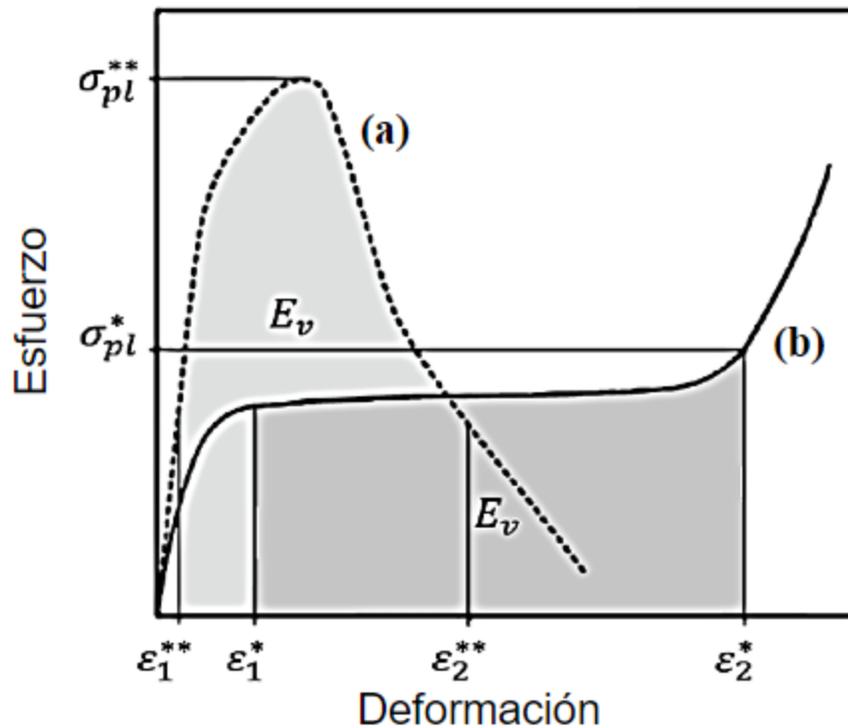


Figura 8. Curva de esfuerzo- deformación para un sólido (a) y una espuma metálica (b) [36].

La energía absorbida por unidad de volumen (W) de un material, corresponde al área bajo la curva del diagrama esfuerzo-deformación en un intervalo de deformación determinado [37], el trabajo en un ensayo de compresión uniaxial en una espuma metálica se realiza hasta alcanzar un intervalo del 50% a 70% de deformación. Esta región es la ideal para que el material pueda absorber energía, en otras palabras, el trabajo que se necesita para poder deformar las espumas metálicas es equivalente a la

energía cinética de una masa, de manera que con el espesor adecuado se podría absorber por completo la energía durante un impacto (Figura 9) [38].

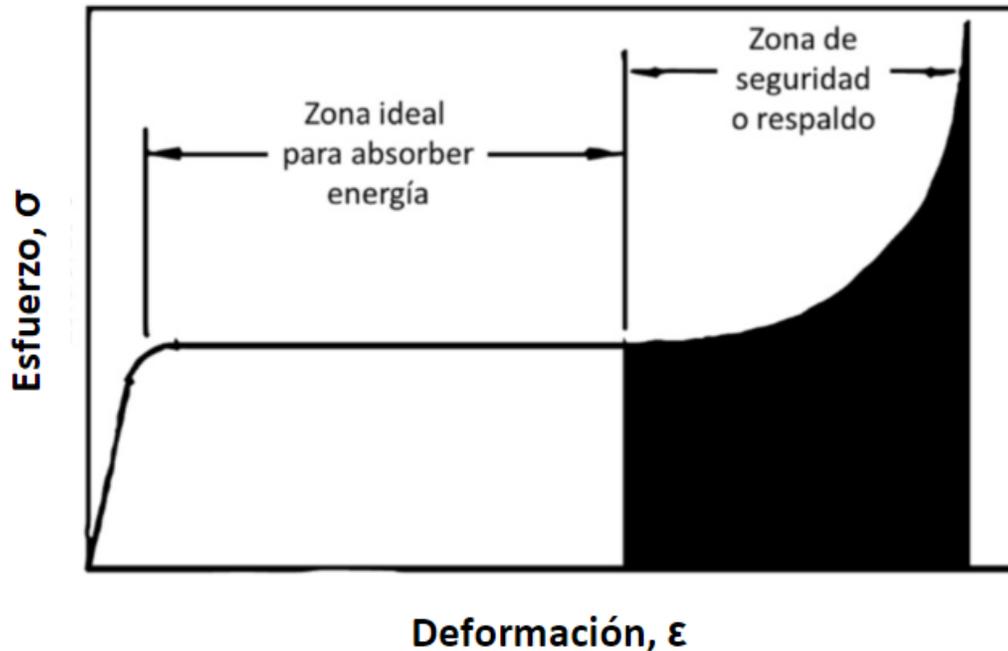


Figura 9. Esquema de una curva esfuerzo-deformación durante la absorción de energía [38].

En las espumas metálicas este comportamiento está relacionado a la flexión que existe en los bordes, así como al alargamiento de las caras, sin embargo, en las espumas de poro abierto y poro cerrado se refiere solamente a la flexión de los bordes (Figura 10). En las espumas de poro cerrado existe un comportamiento similar al de un material sólido, presentando un pequeño incremento del esfuerzo con la deformación plástica, esto sucede por los esfuerzos aplicados en la membrana de las caras de cada uno de los poros de las espumas [39]. A causa de la estructura de las espumas metálicas, los ensayos de compresión requieren un mayor cuidado debido a que los resultados que se obtienen en el proceso dependen completamente de la relación del tamaño del poro con el tamaño y la forma de la probeta que se ensaya, así como su acabado superficial y la manera en la que se colocan las probetas [29].

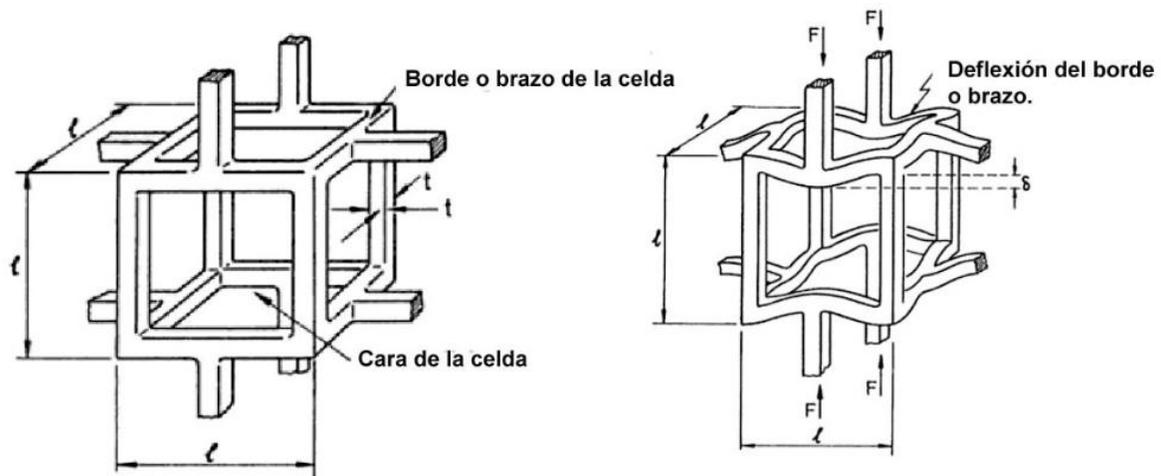


Figura 10. Esquema de un ejemplo de la flexión elástica de un modelo cúbico de celdas [40].

Para explicar el comportamiento de flexión en los bordes de la espuma metálica, se utiliza como modelo un arreglo de celdas cúbicas debido a que facilita el modelo de flexión y se puede extrapolar los resultados para modelos con geometrías más complejas. Además, se obtiene una aproximación más cercana del comportamiento de una celda real, ya que todas las estructuras de celdas fallan bajo los mismos mecanismos de deformación, por otro lado, se determina que la flexión de los bordes de la celda es proporcional a la fuerza que se aplica durante el ensayo de compresión [40].

1.4 MÉTODOS DE FABRICACIÓN.

Las espumas metálicas se pueden obtener por medio de una aleación o simplemente de un metal en estado puro. Existe una variedad de métodos para la producción de estos materiales porosos y cada método tiene características específicas, éstos se pueden dividir en cuatro grupos principales, por sus diferentes tipos de obtención a partir de [41]:

- Metal líquido
- Soluciones de iones de metal
- Metal sólido en forma de polvo
- Vapor de metal o compuestos metálicos gaseosos

De esta manera, cada espuma se puede clasificar por el medio en el que fue obtenida, (sólido, líquido o gaseoso). Cada método que se presenta a continuación presenta sus respectivas ventajas y desventajas, ya que en algunos procedimientos resulta complicado controlar la forma, el tamaño, la distribución y el tipo de celda que el poro tendrá a lo largo de la estructura de las espumas metálicas. Algunos métodos también permiten tener una mejor homogeneidad. Así mismo, dependiendo a la clasificación que contenga cada espuma, si es o no apta para uso industrial [2].

A continuación, se exponen algunos métodos que de acuerdo con diferentes investigaciones y aplicaciones son los más efectivos.

1.4.1 FUNDICIÓN.

En la fundición, la porosidad es parte de los defectos superficiales o internos que se presentan en los componentes producidos, esta porosidad se genera por distintos factores, principalmente por el atrapamiento del aire, gas o vapor en el metal líquido. Por lo que, en la producción de espumas metálicas, se realiza la inyección de un gas y se puede conseguir a través de:

- Adición de agentes gasificantes.

Este proceso también conocido como “proceso de alporas”, consiste en la adición de un gas en el metal líquido con ayuda de un agente gasificante o espumante (Figura 11),

estos agentes son sustancias que pueden producir gases al incrementar su temperatura, reaccionando con el metal, dando paso a la formación de gas en el interior de este, provocando la formación de poros y obteniendo una espuma metálica. Esta mezcla tiene que alcanzar una temperatura por arriba del punto de fusión del metal, así mismo, la viscosidad es controlada, por último, el metal es enfriado y procesado [42].



Figura 11. Proceso de adición de agentes gasificantes [42].

- Inyección de un gas.

El método de inyección de un gas, como su nombre lo dice, consiste en adicionar un gas que puede ser nitrógeno, argón o aire, para la generación de burbujas en el metal líquido, sin embargo, debido a la baja densidad de las burbujas, estas alcanzan la superficie de manera acelerada y para estabilizarlas en el metal líquido, se requiere el aumento de la viscosidad de este mismo, para esto, es necesario realizar una mezcla con carburo de silicio, aluminio u óxido de magnesio y modificar los parámetros de temperatura y presión para generar una mayor viscosidad, dificultando la migración de las burbujas y a su vez, logrando que la permanencia del gas sea prolongada hasta conseguir la solidificación (Figura 12) [42].

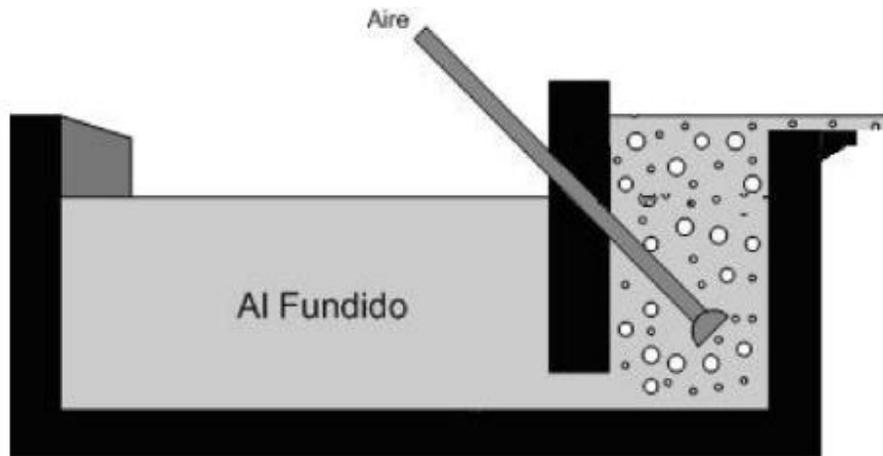


Figura 12. Fabricación de una espuma metálica por inyección directa de gas a la fundición [42].

1.4.2 METALURGIA DE POLVOS.

Este mecanismo de fabricación de espumas se caracteriza principalmente por ser obtenidas a partir de polvos metálicos, similar al proceso de agentes gasificantes, la diferencia principal es el estado del metal que se suministra. Consta de una mezcla del metal en polvo en conjunto del agente gasificante, esta se debe de encontrarse compactada aplicando cargas, posteriormente, se somete a un proceso de sinterización en donde se calientan las piezas a una temperatura menor a la de fusión del elemento matriz (entre 0.7 y 0.9 de la temperatura de fusión), con el objetivo de conseguir una buena distribución de las partículas a lo largo de toda la matriz [41,42].

En el proceso de sinterizado, el agente gasificante reacciona en estado sólido y este se expande y produce una alta porosidad dentro de la matriz, permitiendo tener varios parámetros controlados entre ellos, el tamaño y distribución de los poros a lo largo de la matriz prediciendo algunas propiedades físicas y químicas (Figura 13) [42].



Figura 13. Diagrama de producción de espumas metálicas por medio de metalurgia de polvos [42].

1.4.3 INFILTRACIÓN.

Se basa en la infiltración del metal líquido sobre una agrupación de partículas que son el material de sacrificio, mejor conocido como preforma, esta debe ser soluble, puesto que se retira para el acabado final de la espuma que puede ser orgánica o inorgánica [43]. La técnica más utilizada para este proceso se basa en fundir el metal o la aleación que se utilizará para la obtención de la espuma, con el objetivo de disminuir su viscosidad y de esta manera incitar que las cavidades se generen por partículas de NaCl (que sirve como preforma). Este material de sacrificio limita a los metales o aleaciones con los que puede ser utilizado, pues solo se puede emplear en aquellos metales cuyo punto de fusión sea inferior al material de sacrificio, este caso el NaCl, cuyo punto de fusión de 801°C [32].

Este proceso se divide principalmente en las siguientes etapas [43]:

- Preparación de la preforma.
- Ensamble del sistema
- Fundición del metal.
- Infiltración del gas en el metal líquido.
- Eliminación de la preforma.

El metal líquido cubrirá toda la preforma, la infiltración es generada mediante una presión utilizando un gas, generalmente argón y se obtiene un componente metal-preforma-metal, posteriormente se realiza la disolución de la preforma y como resultado final se tendrán las espumas de poro abierto (Figura 14). Es necesario controlar distintos parámetros en este proceso, sin embargo, presenta una gran ventaja, puesto que permite tener un mayor control de los poros, en donde se obtiene una porosidad mayor al 60% y la microestructura [43].

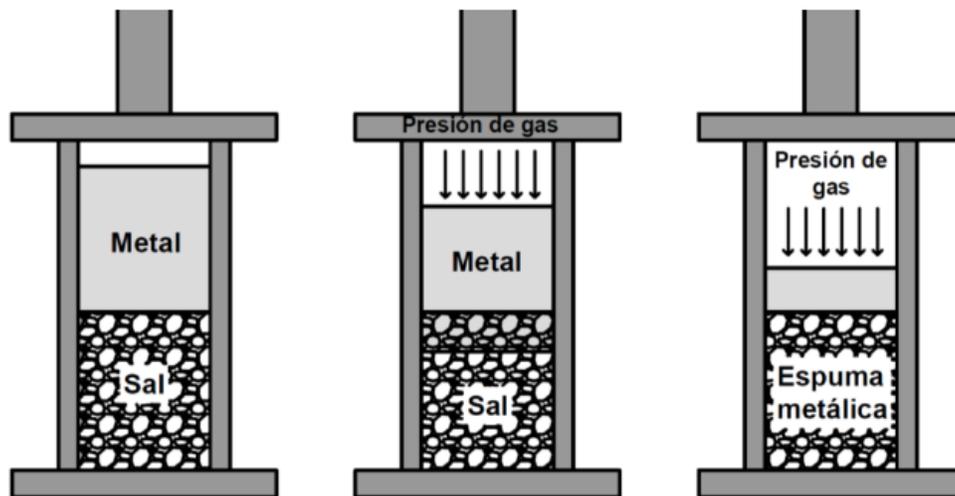


Figura 14. Ejemplificación del método de infiltración en estado líquido con material de sacrificio [32].

La ventaja de este proceso es que se pueden obtener espumas metálicas con tamaño de poro controlado, es decir, un tamaño de poro que puede ir desde 5 μm a 5 mm y una porosidad de 50% hasta un 80%. La desventaja principal de este proceso es que las

variables pueden ser difíciles de controlar, así como la geometría de los granos del material de sacrificio y la distribución de ellos en la estructura de las espumas [32].

1.4.4 MÉTODO “IN-SITU”.

Otra nueva forma de producción de espumas metálicas es un método que recibió el nombre de “In-Situ”, que proviene de la formación de la porosidad generada en el lugar en donde se fabricó la aleación. Este método propone una ruta diferente sin utilizar los métodos anteriormente mencionados como preformas, material de sacrificio o agentes espumantes. Se basa en fundir la aleación en un intervalo de composición y durante la solidificación que comúnmente es lenta, la porosidad comienza a generarse [54].

1.5 APLICACIONES.

Las espumas metálicas cuentan con numerosas propiedades que las hacen llamativas para diferentes campos de aplicaciones, por ejemplo, en la ingeniería. Las propiedades de las espumas metálicas dependen principalmente de la morfología, tamaño y distribución de los poros que se encuentran en las espumas metálicas, así como el proceso que se utilizó para su fabricación, generalmente se hace una diferencia entre una aplicación funcional o estructural, de igual manera la relación que tienen con la porosidad (Figura 15) [41].

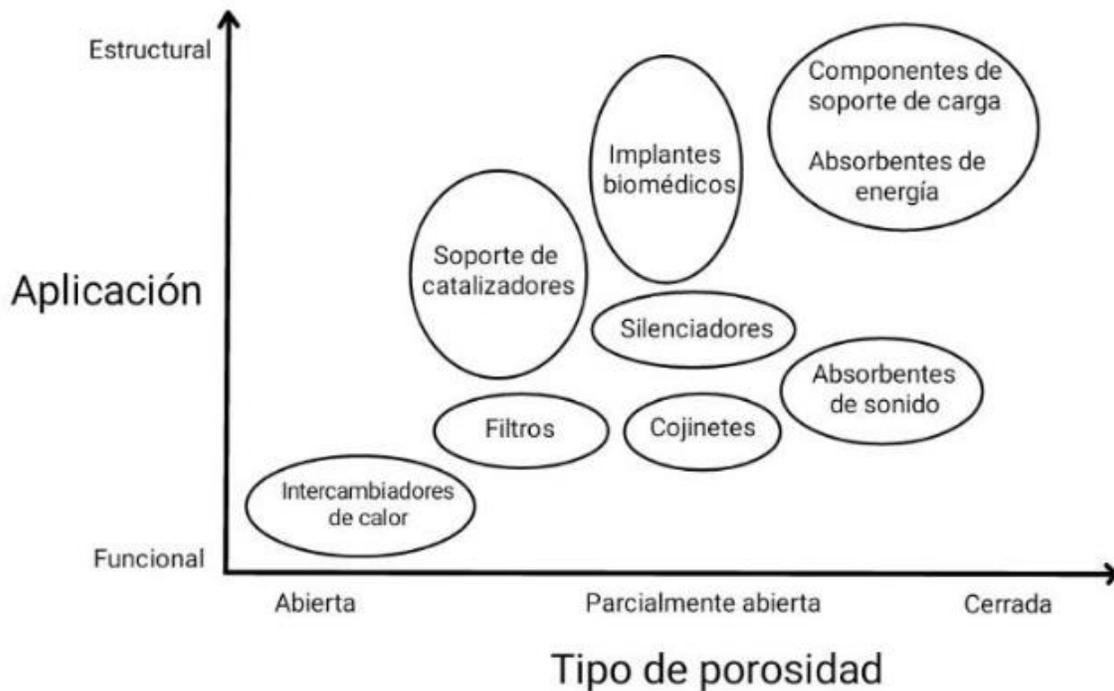


Figura 15. Aplicaciones de las espumas metálicas en relación con la porosidad que poseen [41].

Otro aspecto importante que se debe de considerar en los campos de aplicaciones de las espumas metálicas es el costo de producción que existe y el beneficio que generará. Existen campos de aplicaciones en los que las espumas metálicas generan más beneficios que otros materiales, pues es completamente necesario que sean viables para su producción a grandes escalas.

1.5.1 INDUSTRIA AUTOMOTRIZ.

Para la industria automotriz, el uso de las espumas metálicas tiene un gran beneficio pues, poseen una mayor resistencia cuando son sometidos a pruebas de impacto, además, se utilizan en estructuras tipo sándwich (Figura 16) para los componentes externos de los automóviles (Figura 17), en donde se disipa la energía transferida que se genera en un choque [45-46].

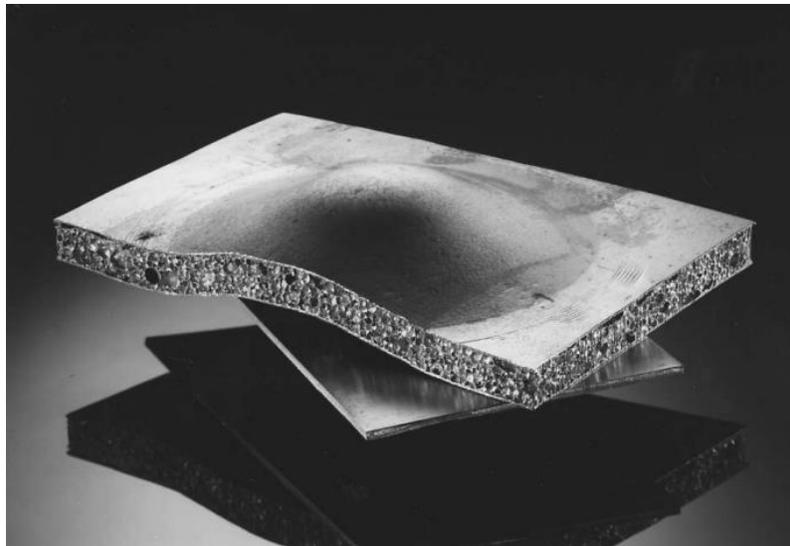


Figura 16. Espuma metálica de estructura tipo sándwich [41].

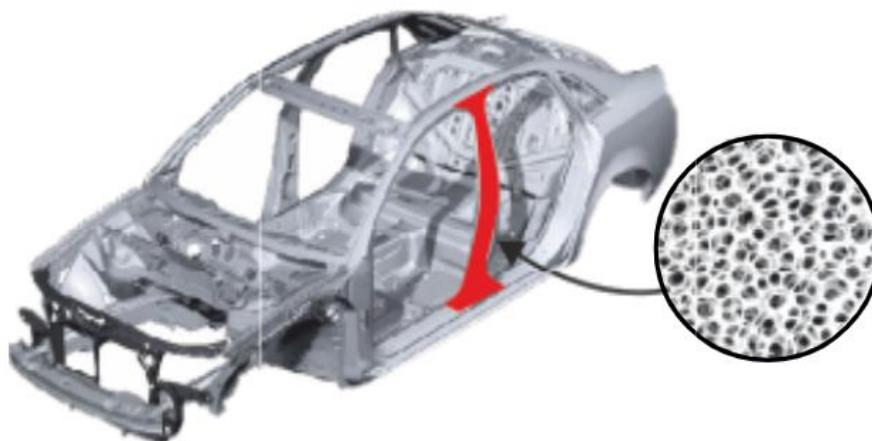


Figura 17. Espuma metálica en estructura tipo sándwich de autopartes [45].

Presentan un ahorro importante en cuestión de peso, de manera que se considera un ahorro de combustible importante, disipan el calor gracias al área superficial que poseen, por lo que también tienen una gran absorción de energía al ser sometidos a fuerzas de impacto [41], por lo que existen combinaciones ideales (Figura 18) de varios aspectos para que las espumas metálicas sean más favorables para componentes de industria automotriz, la mayoría de estos aspectos se pueden encontrar específicamente en espumas de poros abiertos [32].



Figura 18. Esquema de una combinación ideal de propiedades mecánicas de espumas metálicas para su implementación en la industria automotriz [41].

1.5.2 INDUSTRIA AEROSPACIAL.

El uso de las espumas metálicas en la industria aeroespacial es similar a la industria automotriz, en este caso, el sustituir estructuras costosas como las “honeycomb” (núcleo en forma de panal) que generalmente son de Al (Figura.19) por espumas metálicas o estructuras tipo sándwich es de suma importancia, entre las propiedades que se buscan son tener una mayor resistencia al pandeo y aplastamiento de los cohetes y, por otro lado, la buena isotropía de las propiedades mecánicas que presentan los paneles de las espumas metálicas. Una ventaja importante de todas con las que cuentan las espumas metálicas es que pueden adquirir diferentes geometrías a diferencia de los “honeycomb” que solo cuentan con una geometría.

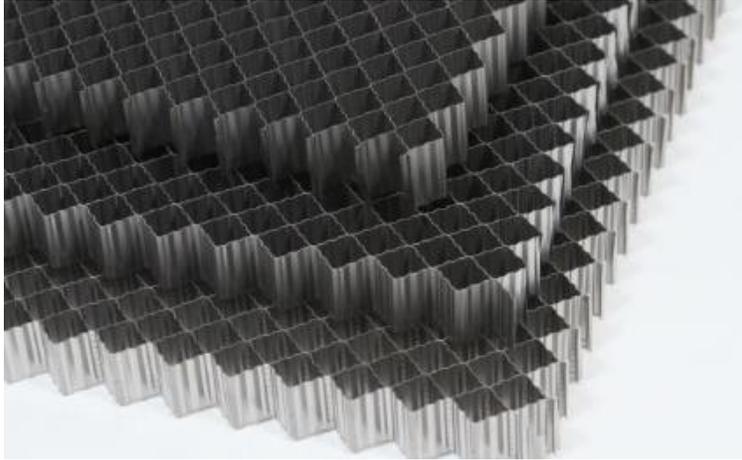


Figura 19. Estructura tipo “honeycomb” en la industria aeroespacial [32].

Las propiedades de rigidez y amortiguamiento que están presentes en las espumas representan combinaciones valiosas, pues actualmente se mantiene el estudio de estos materiales para componentes de choque, que puedan absorber energía para las plataformas de aterrizaje de los vehículos espaciales, así como emplearse de refuerzo para las estructuras que se utilizan como soporte de carga de satélites [32]. También son empleadas para purificar el combustible y aceite que utilizan en sus respectivas líneas de suministro, en este caso se usan espumas de acero inoxidable [47].

1.5.3 INDUSTRIA BIOMÉDICA.

En la industria biomédica, las espumas metálicas funcionan como reemplazo de implantes óseos o dentales (Figura 20), siempre y cuando sean de metales biocompatibles como, por ejemplo: el uso de aleaciones de titanio (Ti), cobalto (Co) – cromo (Cr), magnesio (Mg) y aceros inoxidables, así mismo aportan una buena rigidez, resistencia y por supuesto biocompatibilidad [48]. El cuerpo humano dispone de dos tipos de estructura ósea: la cortical y la trabecular; esta última es también conocida como “hueso esponjoso”, pues posee gran similitud con una esponja [32] por lo que, las espumas metálicas con permeabilidad abierta fomentan el crecimiento óseo gracias a la relación que existe entre la densidad, el módulo de Young de las espumas equivalente al

hueso que se va a sustituir, la rigidez mejorada que contienen y su biocompatibilidad, de igual manera se pueden realizar espumas biodegradables de Mg por su alta capacidad de absorción de energía, esto se debe a que una vez que el tejido ha crecido a través de los poros de las espumas, el cuerpo humano tiene la capacidad de absorber este metal y eliminarlo progresivamente del sistema [32,48].

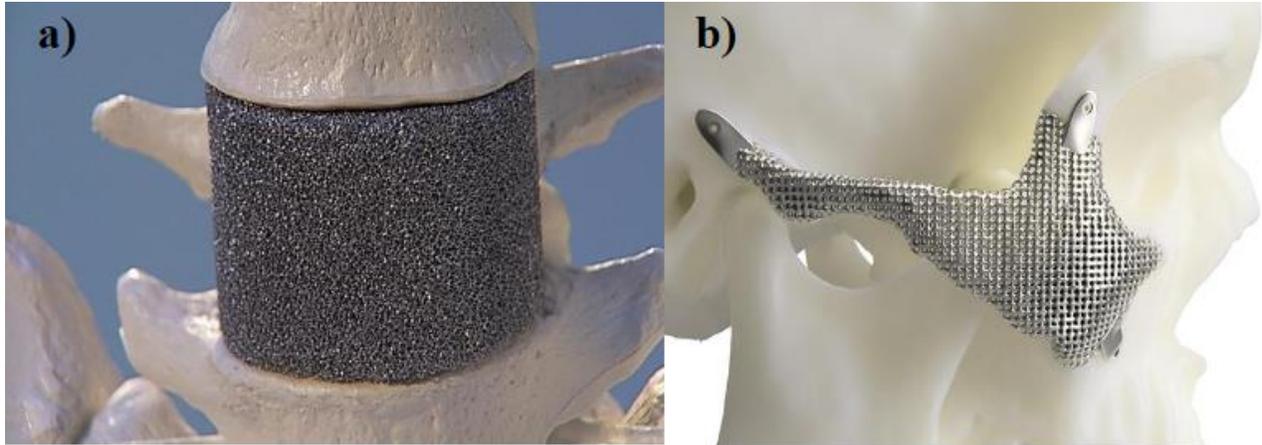


Figura 20. Espumas metálicas utilizadas como prótesis óseas: a) columna vertebral y b) hueso cigomático macizo facial [32].

CAPÍTULO 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este apartado se describe el procedimiento para la producción de las espumas metálicas, comenzando desde la fabricación de las aleaciones hasta la caracterización de estas obtenidas, explicando cada una de las técnicas de fabricación y caracterización utilizadas.

2.1 OBTENCIÓN DE ALEACIONES Mg-Li.

Para la obtención de los lingotes de aleaciones se realizó una serie de pasos que a continuación se presentan.

2.1.1 PREPARACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.

Para la parte experimental de este trabajo, se realizó la fabricación de dos diferentes aleaciones de Mg-Li cuyas composiciones variaron en cuanto a la cantidad de Li, esto con el propósito de comparar los efectos que tienen al aumentar la cantidad de Li en las espumas metálicas del sistema Mg-Li y encontrar los parámetros adecuados para la zona eutéctica.

Las composiciones químicas requeridas fueron:

- Mg-Li. 97% Mg y 3% Li.
- Mg-Li. 95% Mg y 5% Li.

Se realizó el cálculo para la cantidad de materia prima requerida para cada una de las aleaciones, utilizando lingotes de Mg de alta pureza (99.8%), así como Li (99.9%). Posteriormente se pesaron las placas y los pedazos de cada elemento como se muestra en las siguientes figuras (Figura 21).



Figura 21. Materia prima empleada para aleaciones: a) Lingotes de magnesio y b) cilindros de litio.

2.1.2 PREPARACIÓN DE ALEACIONES Mg-Li.

Una vez obtenida la masa de cada elemento, se colocó la carga en el interior del crisol (Figura 22a) y se introdujo en el horno de inducción de marca Leybold-Heraeus modelo LK8 (Figura 22b). Posteriormente, se realizó una purga por triplicado para tener una atmósfera inerte generando una presión de 1×10^2 Torr. Finalmente se generó vacío y se suministró Argón (Ar) de alta pureza.



Figura 12. a) Crisol utilizado para la fundición de la materia prima y b) Horno de inducción de atmósfera controlada.

2.1.3 MAQUINADO DE PROBETAS.

Una vez obtenidas las probetas de fundición se realizó el maquinado de estas con ayuda de un torno de marca SANDU modelo WM210V-G (Figura 23), para remover las impurezas del proceso realizado en las probetas. Con este proceso se mejora el acabado superficial de las muestras y reduce su diámetro.

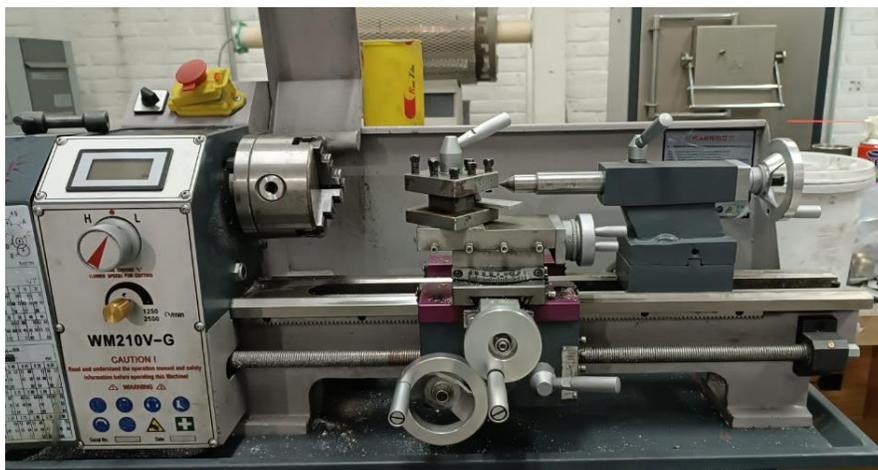


Figura 23. Torno para el maquinado de los cilindros obtenidos.

Posteriormente se realizó el corte de los cilindros previamente maquinados con ayuda de la cortadora marca KNOVA modelo KN SCM-712 (Figura 24). Estas muestras se trabajaron posteriormente para la obtención de las espumas metálicas.



Figura 24. Cortadora para los cilindros obtenidos.

2.2 FABRICACIÓN DE ESPUMAS METÁLICAS

Para la fabricación se utilizó el método de infiltración, por lo que se empleó una preforma y un sistema en el que se podría tener una atmósfera controlada. Este sistema estuvo conformado por diferentes componentes los cuales se acondicionaron para una preparación para cumplir con los parámetros adecuados.

2.2.1 ELABORACIÓN DE EMPAQUES DE GRAFITO.

Uno de los componentes más importantes para el sistema que se emplean para la infiltración, son los empaques que se utilizan como sello en el reactor, para que no exista la entrada de oxígeno en la atmósfera y se pueda tener un mejor control de ella. Se elaboraron de lámina de carbono de grafito los cuales se trazaron con medidas específicas para cada uno de los platos que conforman el sistema (Figura 25).



Figura 25. Elaboración de empaques de grafito para el sistema de infiltración.

2.2.2 PREPARACIÓN DE LA PREFORMA.

Debido a que las espumas se fabricaron por el método fundición-infiltración de la aleación en estado líquido, se utilizó una preforma sólida que actuó como material de sacrificio, estuvo conformada por granos de NaCl bajo condiciones controladas. Se preparó el material de sacrificio, triturando con ayuda de un cilindro (Figura 26a) los granos de NaCl para reducir el tamaño de los cristales (Figura 26b) y poder conseguir el tamaño deseado se colocan en un tamizador para separar los granos, en este caso se trabajó con un tamaño de grano de 2mm (Figura 26b).



Figura 26. Preparación de la preforma en un equipo de a) tamiz y cribas y b) preforma (NaCl) con el tamaño de grano requerido.

2.2.3 ENSAMBLE DEL REACTOR.

Una vez teniendo los materiales preparados, se realizó el ensamble del reactor (Figura 28) para la fabricación de las espumas metálicas por medio de infiltración, para esta etapa se utilizaron los siguientes componentes (Figura 27):

- Platos metálicos (inferior y superior): Plato inferior montado en el banco y el superior se coloca en la parte de arriba para poder sellar el sistema.
- Sellos de grafito o empaques: Se embonan en las ranuras de los platos metálicos.
- Crisol metálico: Se utilizó entre ambos platos, en el interior se encuentra la preforma y el lingote de la aleación.
- Preforma (NaCl): Se colocó dentro del crisol metálico.
- Probeta de aleación: Una de las probetas que se obtienen de fundición se colocan sobre la preforma.
- Espárragos: Varillas que se utilizaron de soporte para el sistema, estos se colocaron en los orificios de ambos platos, de esta manera se conectó el sistema.
- Rondanas: Se ubicaron en los espárragos en la parte encima del plato superior.
- Tuercas: Se utilizaron para evitar el movimiento de los platos y espárragos, fue necesario apretar adecuadamente.



Figura 27. Componentes para el ensamble del reactor para la fabricación de espumas metálicas.



Figura 28. Sistema de infiltración ensamblado correctamente.

Después del ensamble del sistema, se realizó la unión del sistema de válvulas al reactor, conectado un par de válvulas (del lado izquierdo conectada con vacío y lado derecho con Argón de alta pureza) y el manómetro (Figura 29). Esto con el objetivo de realizar una purga del sistema, que se obtiene generando vacío en el interior del sistema buscando eliminar el O_2 y otras impurezas, previamente se introdujo Ar a una presión controlada, realizando este proceso por triplicado para garantizar una atmósfera inerte en el interior del crisol.



Figura 29. Sistema conectado con válvulas listas para el proceso de infiltración.

Una vez que se realizó la purga y se aseguró que no hubiera fugas en el sistema, se introdujo el reactor en el interior del horno eléctrico precalentado a una temperatura de 750°C , después de una hora, se aseguró la fundición del material cuidando que la presión en el sistema se encontrara estable en 0.5 bar, posteriormente, se realizó el proceso de infiltración generando una presión de 1.8 bar de Ar durante 15 minutos y una vez realizado se retiró el sistema del horno eléctrico y se solidificó el material (Figura 30).



Figura 30. Etapas de la solidificación de espumas metálicas. a) muestra recién liberada del horno eléctrico, b) solidificación y c) enfriamiento de la espuma.

2.3 MAQUINADO DE ESPUMAS METÁLICAS Y ELIMINACIÓN DE LA PREFORMA.

2.3.1 EXTRACCIÓN DE CILINDROS.

Los cilindros que se obtuvieron en la fundición de aleaciones y en la fabricación de las espumas metálicas fueron extraídos con una prensa hidráulica marca MIKEL'S modelo TK4 (Figura 31).



Figura 31. Extracción de probetas en prensa hidráulica.

2.3.2 MAQUINADO DE ESPUMAS METÁLICAS.

Al igual que en el maquinado de las probetas de las aleaciones de Mg-Li, se realizó el mismo procedimiento de maquinado para las espumas metálicas como se muestra a continuación (Figura 32) con ayuda del torno de un torno de marca SANDU modelo WM210V-G (Figura 23), para remover las impurezas del proceso realizado en las probetas. Posteriormente se obtuvieron cilindros más pequeños para maquinarlos con

mayor facilidad (Figura 33) obteniendo unos cilindros de 2.5cm x 2cm para la caracterización de las espumas metálicas.

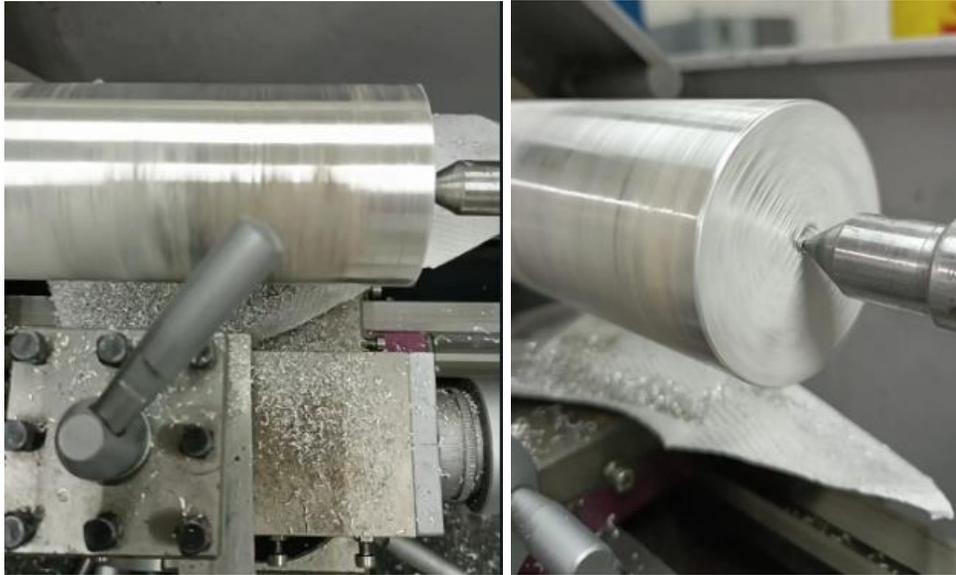


Figura 32. Torneado de los cilindros de espumas metálicas con ayuda del torno.



Figura 33. Cilindros de espumas metálicas después de ser maquinados.

2.3.3 ELIMINACIÓN DE LA PREFORMA.

Es fundamental que la preforma no llegue a su punto de fusión durante el proceso de infiltración, en este caso se utilizó como material de sacrificio (preforma) al NaCl, el cual tiene un punto de fusión de 801°C , por lo que es ideal para la producción de espumas con metales cuyo punto de fusión sea inferior a 750°C . Por lo tanto, ambos metales cumplen con esa característica: Mg (p.f. 650°C) y Li (p.f. 180.5°C) y se ajustan perfectamente [49]. Para la eliminación de la preforma, se realizó una lixiviación en un medio básico (pH=13) con una disolución de 4.1 g de NaOH por cada litro de agua destilada (Figura 34).

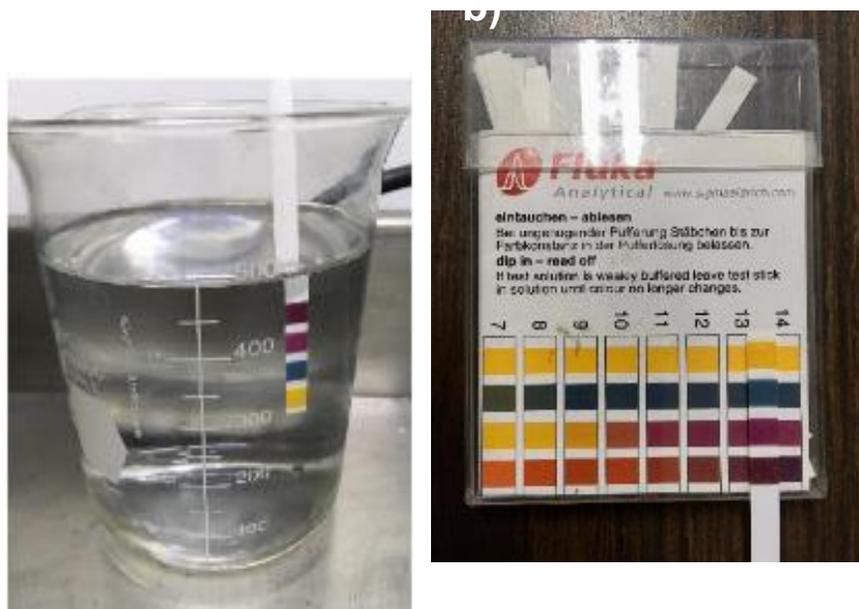


Figura 34. Preparación de una solución alcalina de NaOH con agua destilada para la eliminación de la preforma. a) vaso de precipitados con la disolución y b) comparación del pH de la disolución [27].

Posteriormente en un vaso de precipitados de 600 ml marca Pyrex, se agregaron 500 ml de la disolución preparada y se colocaron las muestras de las espumas metálicas que se fabricaron. Con una parrilla termomagnética marca Cole-Parmer modelo StableTemp se realizó la lixiviación de la preforma (Figura 35) a una velocidad de 850 rpm (controladas

en la parrilla) este proceso se realizó de tres a cuatro veces hasta que los poros quedarán completamente liberados (Figura 36).

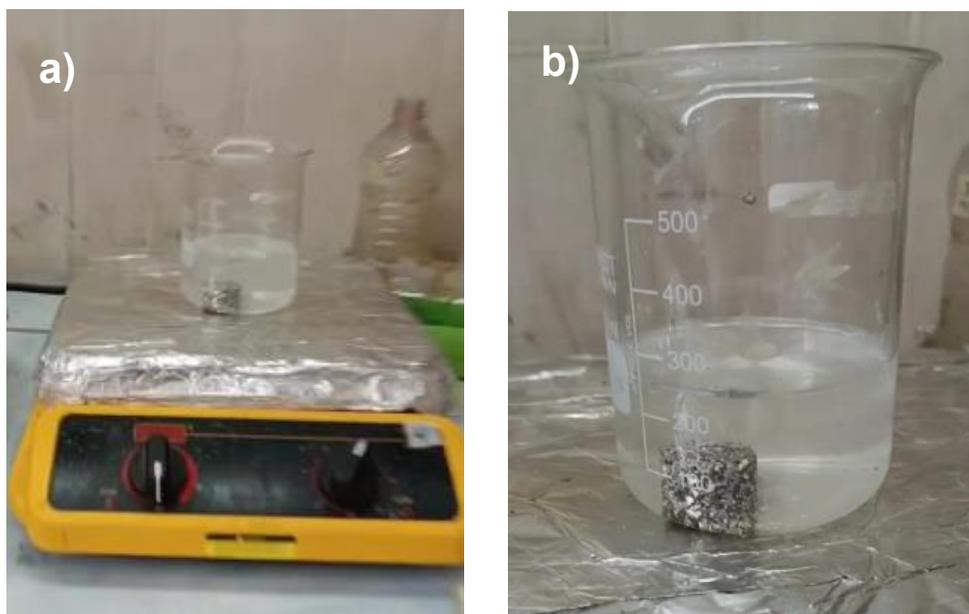


Figura 35. Etapa de lixiviación de las espumas metálicas con agitación magnética.

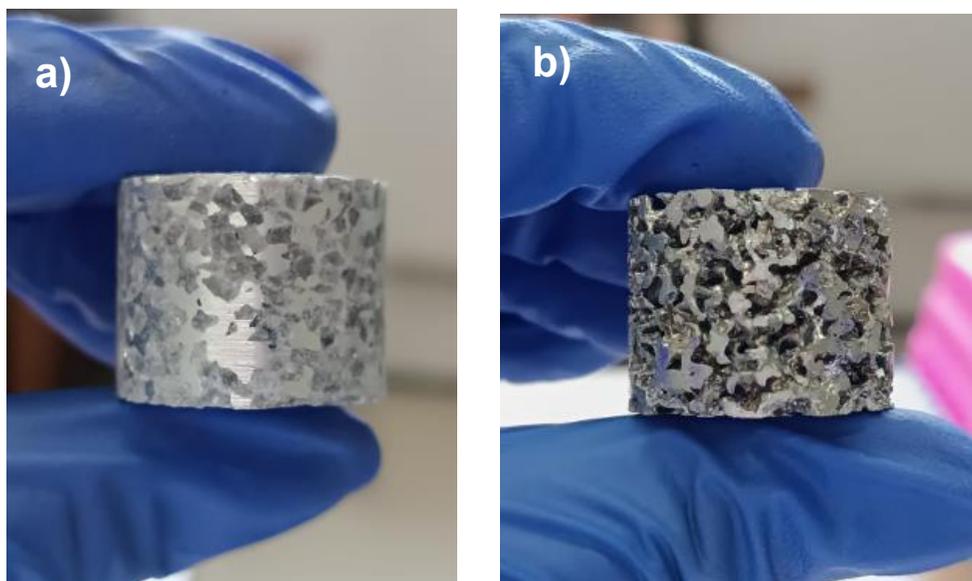


Figura 36. Espumas metálicas a) con preforma y b) sin preforma.

2.4 CARACTERIZACIÓN DE LAS ESPUMAS METÁLICAS.

2.4.1 PICNOMETRÍA.

Este método de caracterización se utiliza para determinar el volumen de materiales sólidos continuos (muestras en bulto) o porosos (espumas metálicas), así como su densidad. Se utilizó un picnómetro marca Quanta Chrome instruments modelo Ultrapyc 1200e (Figura 37). Este picnómetro utiliza He de alta pureza, pues al ser el elemento con el radio atómico más pequeño y un gas muy inerte, se tiene una mayor precisión en las mediciones, mide la variación de la presión en el sistema para determinar el volumen, por lo que es necesario tener los valores de la masa de cada una de las muestras. Para el cálculo del volumen y la densidad de cada una de las probetas, se realizó una purga por triplicado en el sistema con He, se seleccionó una celda para introducir cada una de las muestras y se procedió a realizar mínimo 5 corridas para obtener una desviación estándar mínima y valores más precisos.



Figura 37. Picnómetro de helio.

2.4.2 DIFRACCIÓN DE RAYOS X.

La difracción de Rayos X es una técnica semicuantitativa que se realiza para la obtención de las estructuras cristalinas del material, así como la identificación de las fases en las muestras en bulto, mediante interferencias producidas cuando las ondas se curvean (frente de onda) y dispersan. Para esta técnica se utilizó un difractómetro marca SIEMENS modelo D5000 (Figura 38).



Figura 38. Equipo para difracción de rayos X.

2.4.3 ENSAYO DE DUREZA.

Para la obtención de los valores de dureza, de las muestras de cada una de las composiciones que se trabajaron tanto en bulto como espumas metálicas, se realizó el ensayo de dureza Vickers, que consiste en una medición óptica de una huella que se obtiene al penetrar un material con una carga determinada (de 1 a 100 kgf) [50]. Se montaron en el porta muestras para asegurar que la superficie sea plana al efectuar el ensayo, se usó un durómetro marca SHIMADZU modelo HMV-G (Figura 39).

Para todas las muestras, se utilizó una carga de 0.050 kgf (245.2N), durante 15 segundos, utilizando un indentador punta diamante en forma de pirámide, para generar la huella que posteriormente se midió y con la cual se determinó la microdureza en cada una de las zonas de las muestras en bulto y las espumas metálicas (Figura 40). Se realizaron en total 10 mediciones en cada muestra, siguiendo los parámetros de la norma ASTM E384.



Figura 39. Durómetro para ensayo de dureza Vickers.

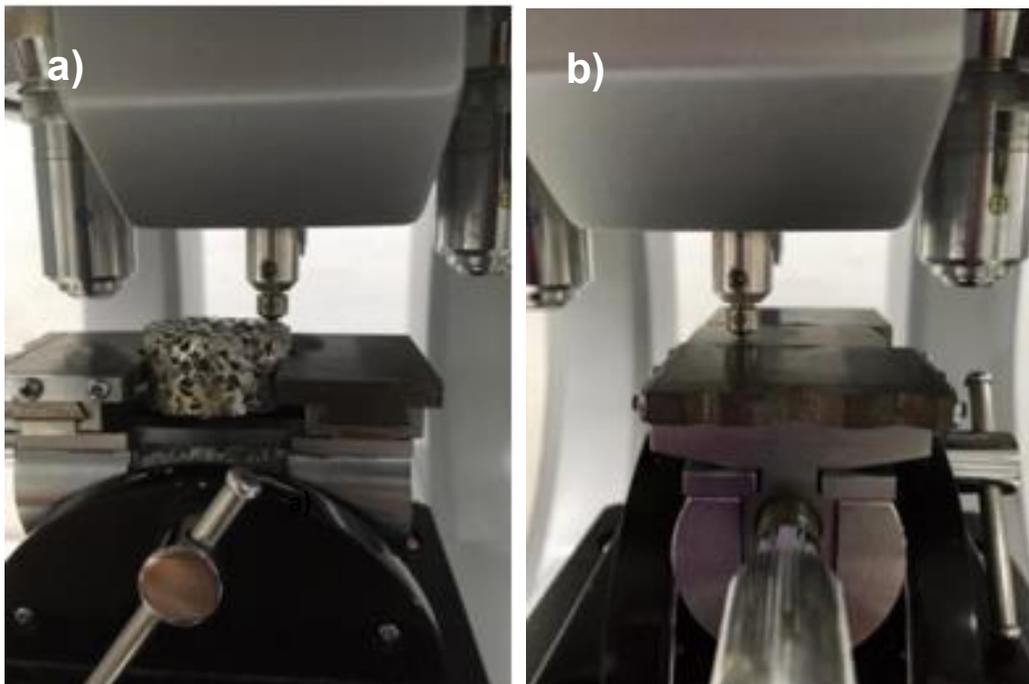


Figura 40. Ensayo de Dureza Vickers para a) espumas metálicas y b) muestras en bulto.

2.4.4 ENSAYO DE COMPRESIÓN.

Para este trabajo es importante determinar las diferentes propiedades mecánicas que tiene el material, para determinar el campo de aplicaciones de estas espumas, por este motivo se realizó el ensayo de compresión con el objetivo de generar las curvas esfuerzo-deformación de cada una de ellas. Se efectuó el ensayo de compresión uniaxial en una máquina universal de pruebas mecánicas marca Instron modelo 5500R (Figura 41). Esta prueba se realizó a una velocidad de 0.5 mm/min hasta alcanzar una deformación del 80%.

El ensayo se realizó bajo la norma ASTM E9 “Métodos de prueba estándar para ensayos de compresión de materiales metálicos” [52], cumpliendo la relación $L/D= 0.8$, teniendo un diámetro de 25.4 mm y una altura inicial de 20 mm (Figura 42). Se montó la muestra en el equipo (Figura 43) y se obtuvo la curva esfuerzo-deformación, con ella se determinaron propiedades mecánicas como el esfuerzo de cedencia, la tensión a la rotura y la energía máxima de absorción, en diferentes porcentajes de deformación.



Figura 41. Máquina de ensayos universales.

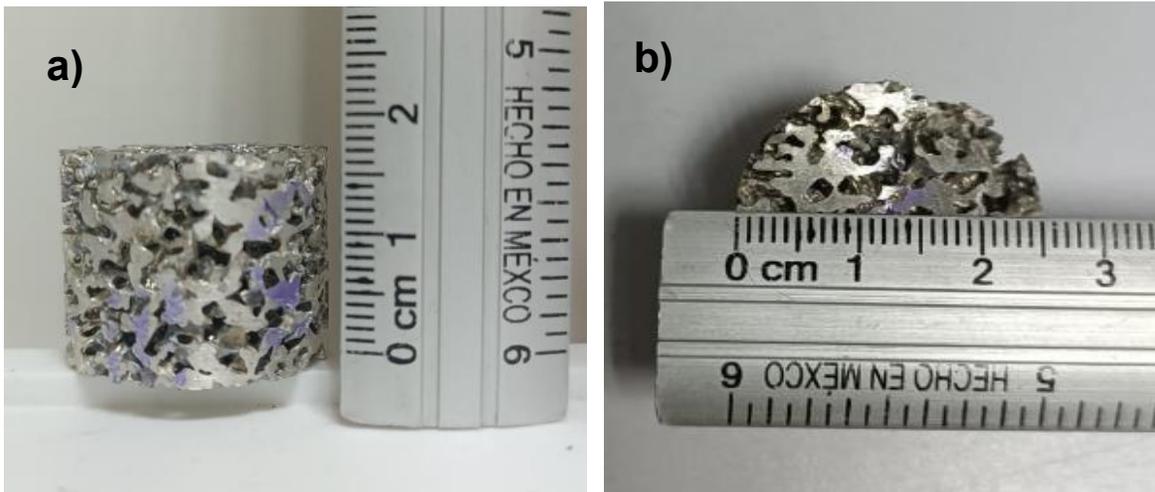


Figura 42. Dimensiones a) la altura y b) el diámetro de las probetas bajo norma para el ensayo de compresión.



Figura 43. Montaje de las muestras en la máquina de ensayos universales.

A continuación, se muestran las etapas de deformación del ensayo de compresión para las espumas metálicas (Figura 44).

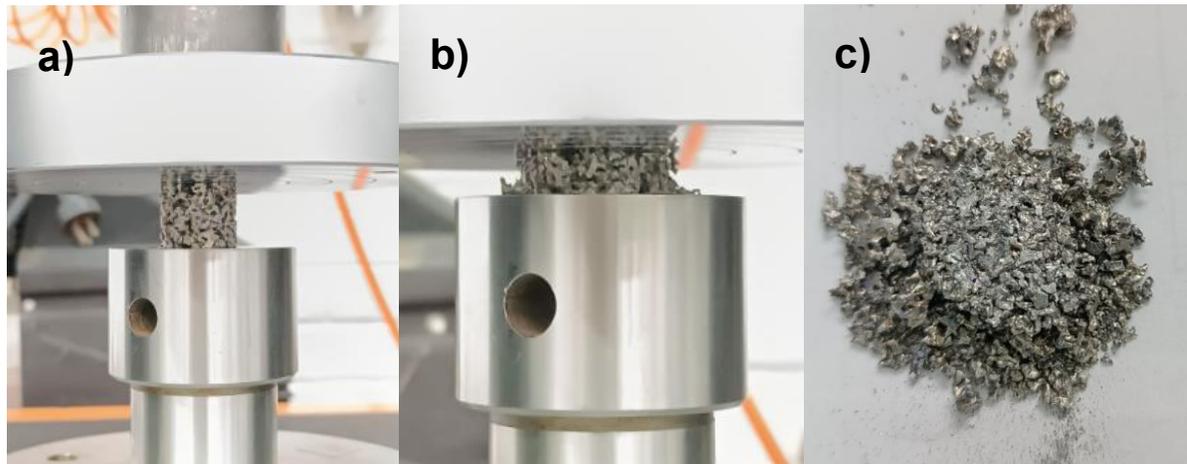


Figura 44. Etapas del ensayo de compresión de una espuma metálica. a) Inicio del ensayo, b) inicio de la deformación y c) probeta deformada.

2.4.5 PREPARACIÓN METALGRÁFICA.

Para la obtención de las microestructuras, se realizó la preparación metalográfica de las muestras en bulto y de las espumas metálicas, con una pulidora marca PRESI modelo minitech 250 SP1. Se realizó el desbaste grueso utilizando lijas de grado: 320, 400 y 600 y después se realizó el desbaste fino con lijas de grado 800, 1000, 1500, 2000 y 4000 (Figura 45).

Para realizar la etapa de pulido, se utilizó un paño para pulido fino (Figura 46) y como lubricante se utilizó pasta de diamante de 1 μm para pulido grueso y $\frac{1}{4}$ de μm para el pulido fino, para quitar las rayas en el material y lubricarlo debido a que el agua provoca la oxidación del Mg (Figura 46).



Figura 45. Preparación metalográfica: Desbaste.



Figura 46. Preparación metalográfica: a) Pulido y b) pasta de diamante utilizada para el pulido.

Para llevar a cabo el revelado químico de las piezas ya pulidas, se preparó una disolución de ácido nítrico (HNO_3) en etanol ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$), mejor conocida como NITAL, con una concentración de 2.4 ml y 50 ml respectivamente [53]. El reactivo se preparó en la campana de extracción, y las muestras se atacaron por inmersión durante 5-7 segundos. Por último, se enjuagaron con etanol y se secaron con aire para observar cada una de las microestructuras en un microscopio óptico marca AmScope modelo T1A (Figura 47).

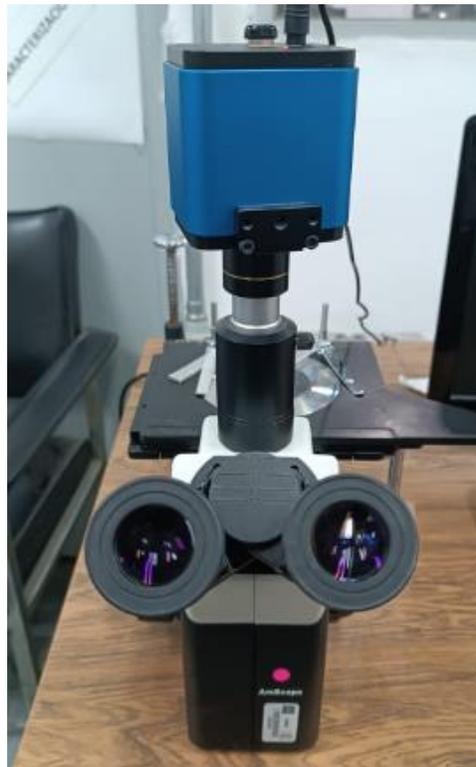


Figura 47. Microscopio óptico para microestructuras.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos en cada una de las pruebas, realizadas de la fabricación y caracterización de las espumas metálicas trabajadas con las composiciones químicas estudiadas, que se obtuvieron a partir del proceso de infiltración.

3.1 FABRICACIÓN DE ALEACIONES Y MAQUINADO DE LINGOTES.

Una vez que se obtuvieron los lingotes de la aleación de Mg-Li, fueron extraídos del crisol con una prensa hidráulica (Figura 31), las dimensiones de los cilindros fueron entre 17-18 cm de altura y 6.3-6.5 cm de diámetro (Figura 48).

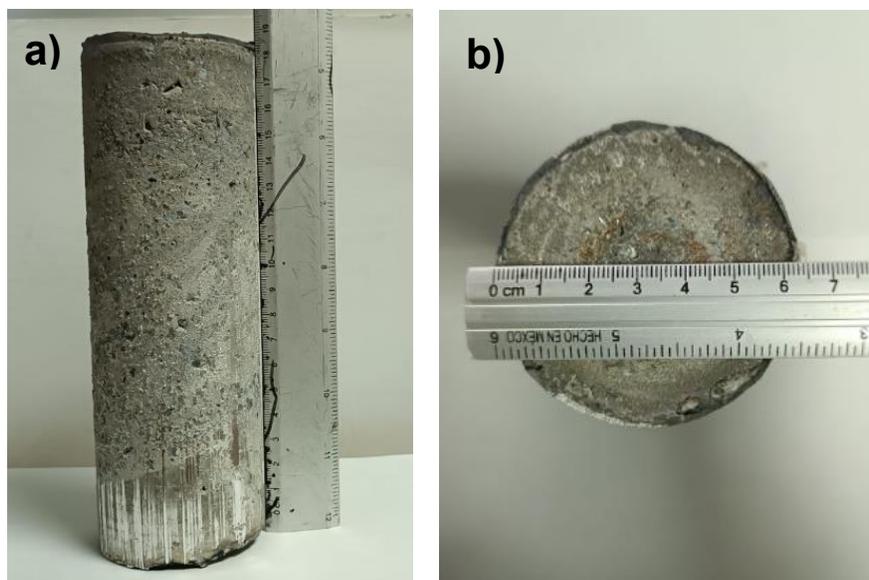


Figura 48. Dimensiones de los lingotes de la aleación obtenidos mediante fundición.

Una vez que los cilindros fueron desmontados y maquinados, se obtuvieron muestras de 2.54 cm x 2 cm (Figura 49), respetando la norma ASTM E9 como anteriormente se mencionó.



Figura 49. Probetas de material compuesto (NaCl + Mg-Li).

3.2 PICNOMETRÍA.

Para la prueba de picnometría se tomaron dos de las muestras de espumas y dos de las muestras sólidas de cada composición, para determinar la densidad y el volumen de cada una de ellas, los resultados se presentan en las Tablas 7 y 8, respectivamente.

Tabla 6. Valores obtenidos en la prueba de picnometría de He de las muestras en bulto.

Composición	m [g]	Vol. [cm ³]	ρ [g/cm ³]
Mg 97%-Li 3%	15.73	9.257	1.70
Mg 95%-Li5%	14.76	8.774	1.683

Tabla 7. Valores obtenidos en la prueba de picnometría de He de las espumas metálicas.

Composición	m [g]	Vol. [cm ³]	ρ [g/cm ³]
Mg 97%-Li 3%	5.72 g	3.044	1.70
Mg 95%-Li5%	5.15 g	2.258	1.683

3.3 POROSIDAD.

Para obtener la porosidad, se realizó la lixiviación de la preforma de manera satisfactoria; de esta manera se determina que hubo una disolución del NaCl (material de sacrificio) adecuado sin que el NaOH reaccionara con el material compuesto, dejando libres las interconexiones de los poros de las espumas metálicas para dar paso a su caracterización. En la tabla 7 y 8 se muestran los datos que se requieren para obtener la porosidad; con la ecuación de la densidad (Ecuación 4), se despeja la masa para poder determinarla y se obtiene el % de porosidad por medio de una regla de tres:

- **Para la aleación 97% Mg – 3% Li**

Datos:

$$\rho = 1.7 \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

$$V = 9.257 \text{ cm}^3 \quad \rho = \frac{m}{v} \quad (4) \quad m = \rho * v$$

$$m = \left(1.7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) (9.257 \text{ cm}^3) = 15.73$$

Regla de tres:

$$15.73 \rightarrow 100\% \quad \frac{(5.72)(100)}{15.73} = 36.36$$

$$5.72 \rightarrow X$$

$$\text{Entonces: } 100 - 36.36 = 64\%$$

POROSIDAD= 64%

- Para la aleación 95% Mg – 5% Li

Datos:

$$\rho = 1.683 \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

$$V = 8.774 \text{ cm}^3 \quad \rho = \frac{m}{v} \quad (4) \quad m = \rho * v$$

$$m = \left(1.683 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) (8.774 \text{ cm}^3) = 15.73$$

Regla de tres:

$$14.76 \rightarrow 100\% \quad \frac{(5.15)(100)}{14.76} = 27.17$$

$$5.15 \rightarrow X$$

Entonces: $100 - 34.9 = 65.1\%$ **POROSIDAD= 65%**

De acuerdo con la teoría, se considera que, para obtener espumas metálicas con una porosidad favorable, esta debe ser superior al 50% y según los resultados obtenidos (Tabla 9), se considera una porosidad efectiva para las espumas metálicas obtenidas mediante infiltración; por lo que se determina que los parámetros utilizados para la infiltración son de suma importancia, así como el material de sacrificio. Los parámetros utilizados fueron: una temperatura de 750°C durante una hora, una presión del sistema de 0.5 bar durante la fusión del material y una presión de 1.8 bar de infiltración con Ar durante 15 minutos.

Tabla 8. Valores de porosidad determinados después de la disolución de la preforma.

Espuma	Masa antes de la disolución	Masa después de la disolución	% de porosidad
Mg 97%- Li 3%	15.73 g	5.72 g	64%
Mg 95%-Mi 5%	14.76 g	5.15 g	65%

A continuación, se presenta la vista de la altura y el diámetro (Figura 50) de una espuma metálica con la porosidad después de remover la preforma.

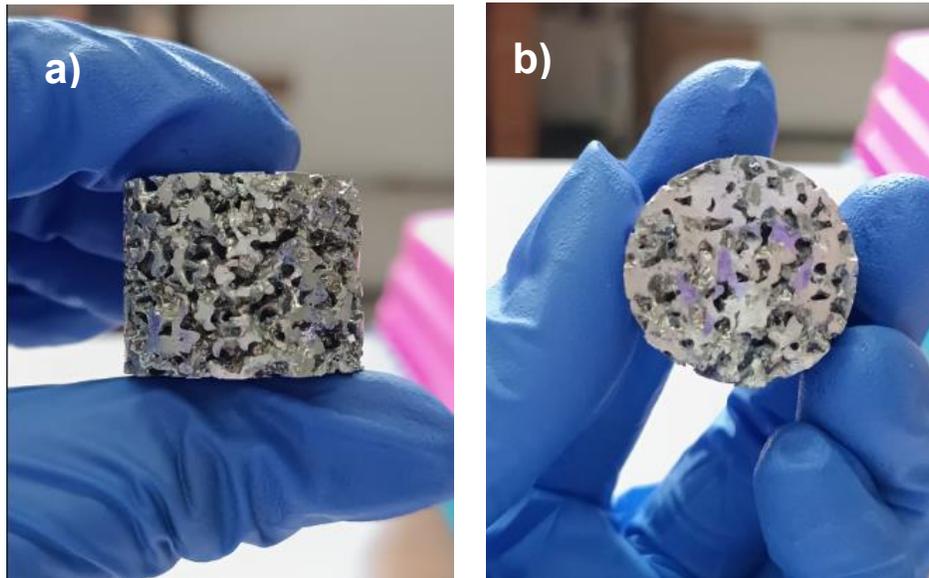


Figura 50. Vista de la porosidad de la espuma. a) altura y b) diámetro.

3.4 DIFRACCIÓN DE RAYOS X.

En los diagramas de difracción de rayos X se obtienen los picos que corresponden a los planos que producen la difracción y se pueden relacionar a los índices de Miller, en este caso se obtienen los planos cristalográficos de la fase α Mg correspondientes a los picos característicos de ambos difractogramas. En el eje vertical o eje de las Y se muestra la intensidad de cada uno de los rayos X difractados (cuentas relativas) que, están en función de la suma del ángulo de incidencia y el de difracción, representado por 2θ en el eje de las X.

Para la composición de 3% litio, en total se obtuvieron 7 picos de mayor intensidad (Figura 51) siendo el tercer pico con la posición 36.70 en las X (2θ) con una intensidad de más de 1000 cuentas relativas (eje Y). En la espuma metálica de 5% de litio, que presenta 8 picos, se encuentra una gran similitud en la posición de cada uno de los picos, así como la intensidad de estos (Figura 52).

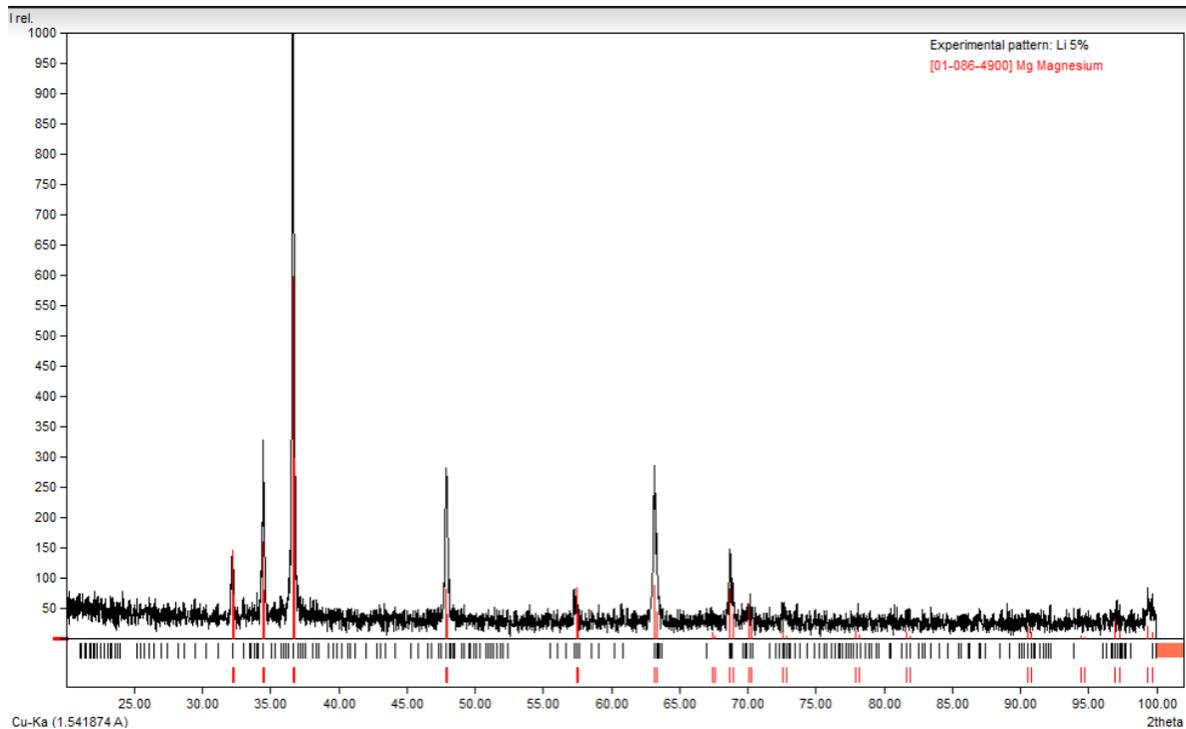


Figura 51. Difractograma de la muestra de 97% Mg – 3% Li.

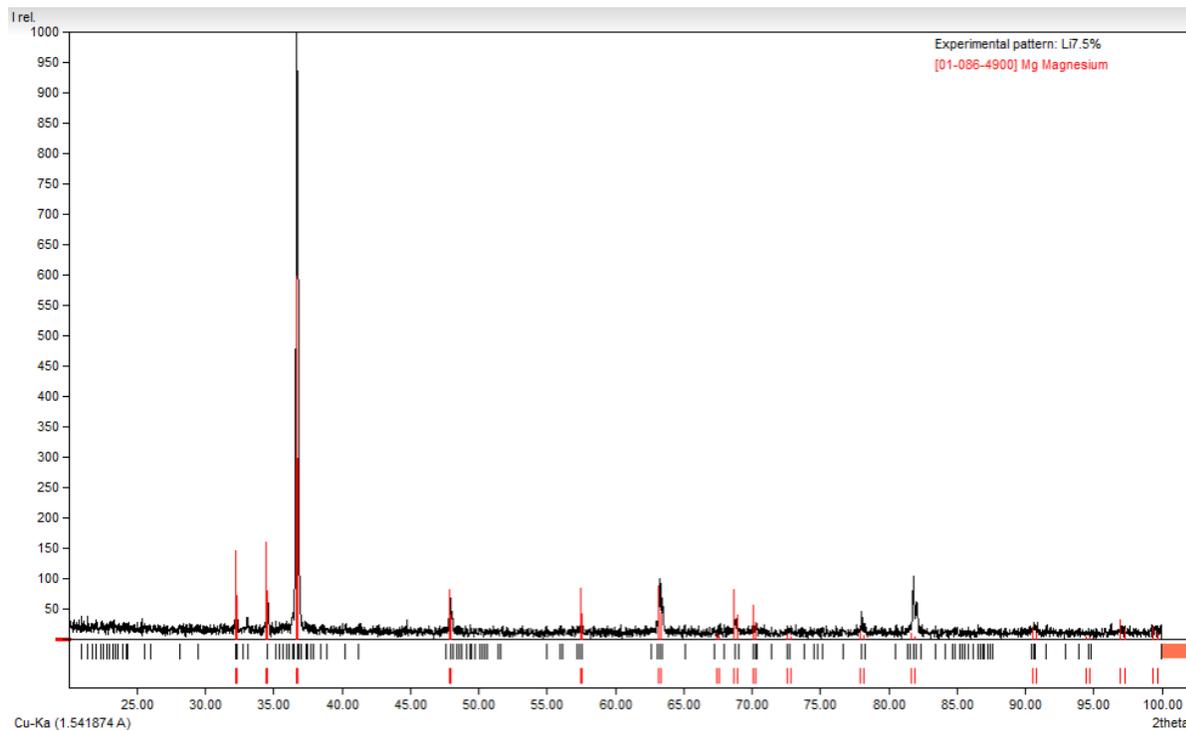


Figura 52. Difractograma de la muestra de 95% Mg – 5% Li.

3.5 MICROESTRUCTURAS E INTERPRETACIÓN METALGRÁFICA.

Una vez obtenida la preparación metalográfica de las probetas de las espumas y las muestras en bulto, se realizó el revelado químico con una solución de NITAL (HNO_3 + etanol) para obtener la microestructura y así analizarlo en el microscopio óptico. Se obtuvieron las microestructuras (Figura 53).

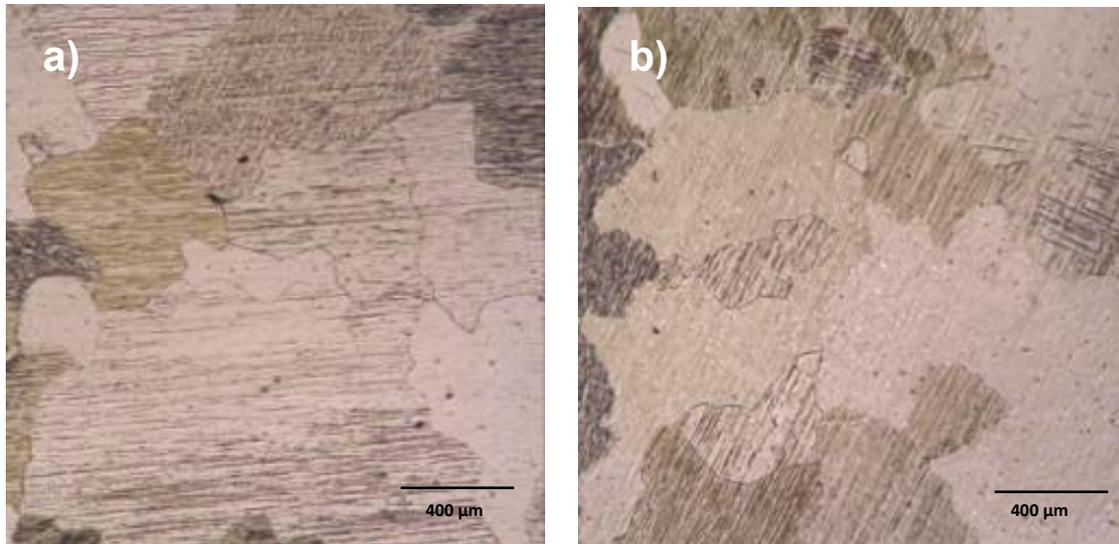


Figura 23. Microestructura del sistema Mg-Li a) Mg 97%-Li 3% y b) Mg 95%-Li 5%. De las muestras en bulto.

Las microestructuras muestran la presencia de granos equiaxiales que son pertenecientes al Mg. Así mismo, en algunas zonas se encuentra la formación de algunas maclas, provocadas por alguna deformación mecánica o un recocido después de una deformación plástica, en este caso no se realizó ningún tratamiento térmico, por lo que se le asocia a alguna deformación plástica que tuvo el material al ser maquinado.

También, indican un movimiento de planos en los átomos de la red cristalina, solo se presentan en metales de estructuras BCC y HCP, en este caso el Li y el Mg, recordando que el Mg tiene una microestructura HCP y el litio está formado por una estructura BCC, indican que hubo una deformación en la estructura. La cantidad de movimiento de cada plano de los átomos es directamente proporcional a la distancia del plano del maclaje, debido a un esfuerzo cortante aplicado en paralelo a estos planos.

De igual manera se aprecia que conforme el Li aumenta en su composición, hay una reducción de área en los granos equiaxiales del Mg. Esto quiere decir que el Li actúa como refinador de grano en la microestructura del Mg, por lo que tiende a ser un material más duro pero frágil, es decir, que tiene una menor deformación plástica.

Finalmente, se muestra la microestructura de las espumas metálicas (Figura 54) en donde se ve el poro (zona negra), sus interconexiones y la región sólida de la aleación, en esta se observa la misma microestructura, pero esta vez dando prioridad a la fase del Mg.

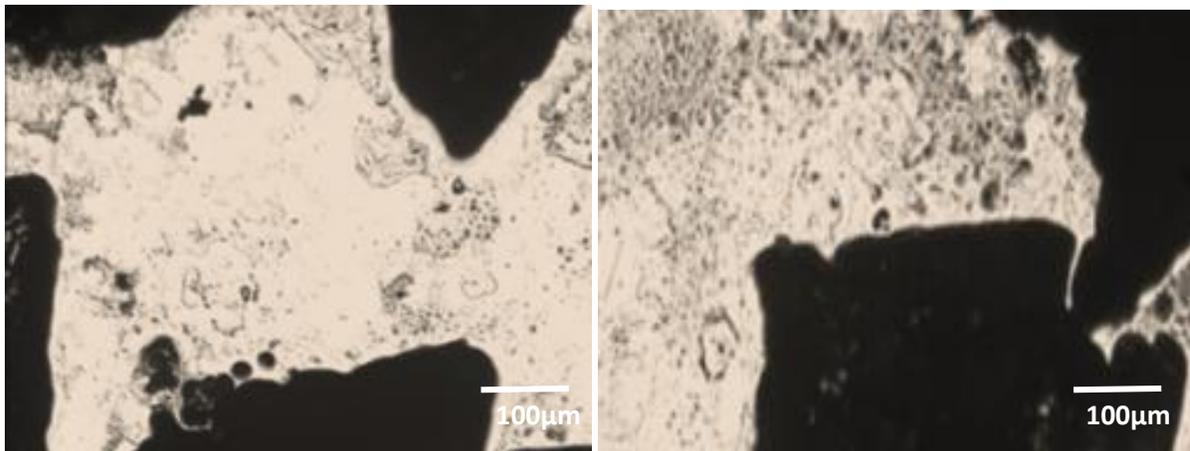


Figura 54. Microestructura de espumas metálicas mostrando los poros, las interconexiones y la región sólida del material.

3.6 ENSAYO DE DUREZA.

El método de dureza Vickers consistió en una medición óptica a los materiales obtenidos, se utilizó un indentador de pirámide de diamante, lo que ayuda a tener un rango de escala de durezas más grande que cualquier otro tipo de dureza. La forma del indentador debe ser capaz de producir impresiones geoméricamente similares, independientemente del tamaño; la impresión debe tener puntos de medición bien definidos y el indentador, una alta resistencia a la auto deformación. A través de estos puntos de medición es en donde el sistema óptico juega un papel muy importante, pues a través de estas mediciones, el

equipo determina la dureza del material. Una ventaja de este ensayo es que el cálculo es completamente independiente al tamaño del indentador [27].

Se aplicó una carga de 0.050 kg/f durante 15 segundos dejando una huella que, gracias al sistema óptico, se obtienen los valores de la dureza. De esta manera, se realizan los cálculos pertinentes del área de la superficie inclinada de la indentación. Los valores de medición de la dureza Vickers se obtienen al dividir la carga en kgf por el área de indentación en mm².

En la Tabla 10 se muestra el promedio de los resultados del ensayo de dureza, determinando que conforme aumenta la cantidad de Li en la muestra, la dureza aumenta. Esto ocurre debido a que la solidificación tiende a ser más rápida, el tamaño de grano disminuye por lo que se vuelve un material más duro, de esta manera se sabe que es un material más resistente. Es importante mencionar que los valores de durezas fueron independientes de la muestra en bulto o la espuma metálica, debido a que los valores fueron similares en uno o en otro.

Tabla 9. Valores de Dureza Vickers (HV) de las muestras en bulto de la aleación.

Composición	Muestra	Dureza Vickers (HV)
Mg 97%-Li 3%	Periferia	40.28
	Centro	39.71
	Espuma	41.22
Mg 95%-Li 5%	Periferia	43.91
	Centro	43.89
	Espuma	46.92

Existe una diferencia entre la muestra en bulto y la muestra de espuma metálica, pues, los valores de dureza de las espumas metálicas son ligeramente mayores a las muestras en bulto, esto se debe a la solidificación, es decir, las espumas metálicas tuvieron una mayor rapidez de solidificación que las muestras en bulto.

3.7 ENSAYO DE COMPRESIÓN.

Para el ensayo de compresión se trabajó con una máquina de ensayos universales a una velocidad de $v = 0.5 \text{ mm/min}$, $T = 23^\circ\text{C}$ y una deformación del 80%. A continuación, se muestran las probetas de las espumas antes y después del ensayo de compresión (Figura 55). Ambas espumas se desintegraron por completo, debido a que el ensayo se efectuó al 80% de deformación.

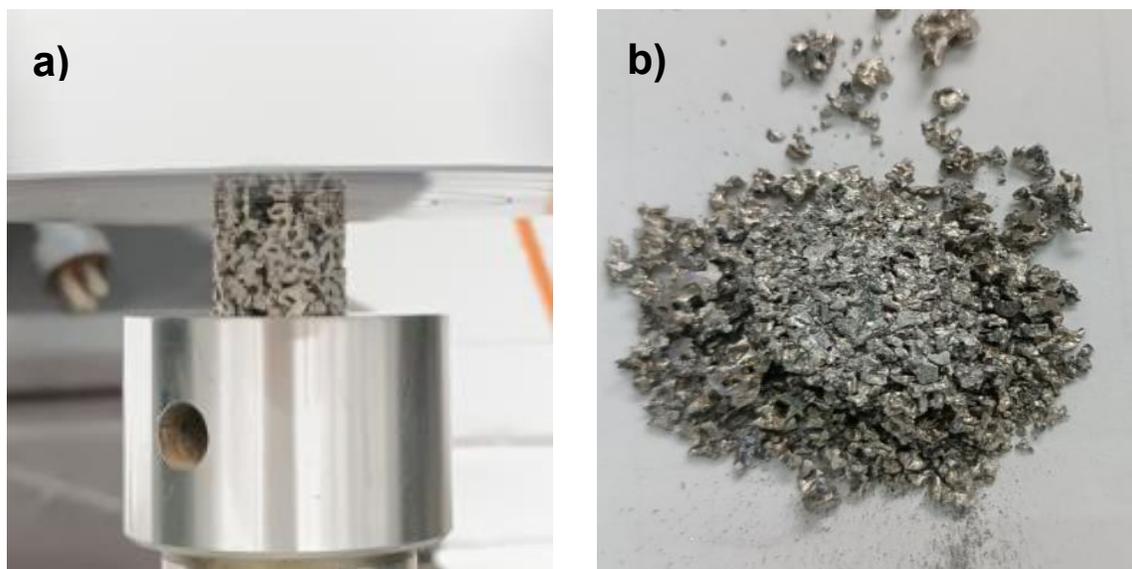


Figura 55. Espumas a) antes y b) después del ensayo de compresión

Una vez realizado el ensayo y con los datos obtenidos se elaboró la curva de esfuerzo – deformación (Figura 56). Esta es una representación gráfica que representa los esfuerzos a los que es sometido un material en función de la deformación que genera, son realizadas para la obtención de parámetros fundamentales en el estudio de los materiales. En este caso, de las espumas metálicas, como la capacidad de absorción de energía (W), el Módulo de Young, etc. También, muestran tres regiones importantes: la región lineal, región de Plateau y la densificación, y de esta manera saber si presenta un comportamiento elástico o plástico.

En la gráfica de la Figura 56 se muestran dos curvas que pertenecen al comportamiento de las dos composiciones de espumas metálicas trabajadas, Mg 97%-Li 3% (línea rosa) y Mg 95%-Li 5% (línea naranja) en donde principalmente se observa que ambas llegaron a un 80% de deformación. Sin embargo, la composición de 3% Li (línea rosa) fue la que demostró tener mayor resistencia a la fuerza aplicada, a diferencia de la curva con mayor % de Li. Esto se puede atribuir a la mayor cantidad de interconexiones que hay en 3% de Li que en 5% de Li. De igual manera, se explica que puede ser por el cambio de estructura cristalina en los átomos o el tipo de poro producido en cada una de las composiciones.

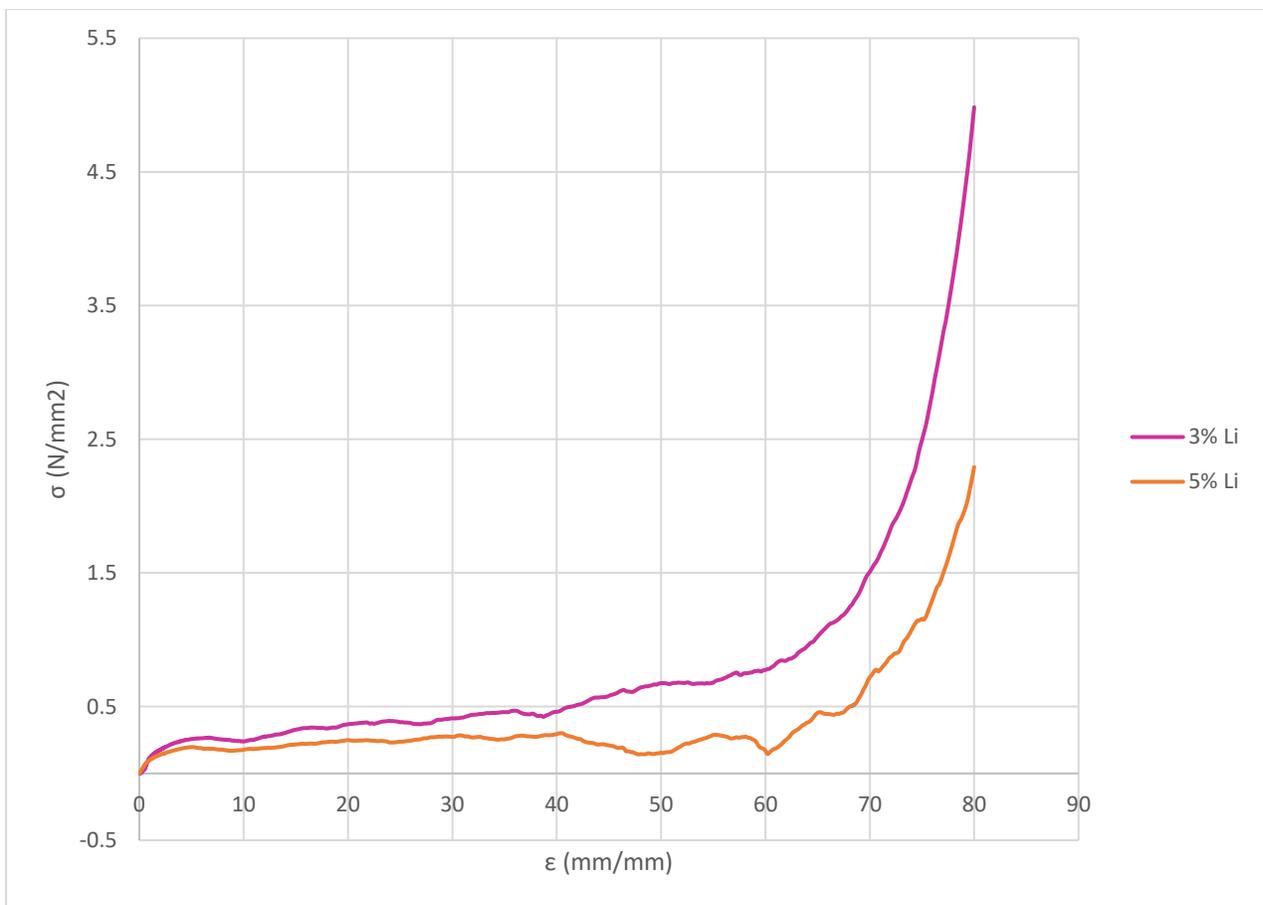


Figura 56. Curvas esfuerzo-deformación de las espumas metálicas de composición Mg: 97%-Li 3% y Mg 95%-Li 5%.

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

- El método de infiltración es uno de los procesos que ayudan a controlar el tamaño de poros que se requieren, pero no controlan la morfología.
- Los parámetros de infiltración determinados para el sistema de aleación utilizado fueron: presión de 0.5 bar y temperatura de trabajo a 750 °C durante 60 minutos, así como una presión de infiltración de 1.8 bar durante 15-17 minutos.
- Las propiedades mecánicas de las espumas metálicas dependen de la forma, el tipo, tamaño y distribución de los poros en la estructura del material.
- La densidad de las espumas metálicas disminuye conforme se aumenta la adición de Li en la composición.
- El Li en las aleaciones de magnesio mejora las propiedades físicas y químicas de las espumas metálicas, pero disminuye las propiedades mecánicas.
- Conforme aumenta la adición de Li en la aleación, aumenta la dureza, pero disminuye su capacidad de absorción de energía.
- La absorción de energía también aumenta o disminuye por el tipo de poro presente en las espumas metálicas.
- El Li se comporta como un refinador de los granos equiaxiales del magnesio.
- La aparición de maclas en las microestructuras de las aleaciones es provocada por la deformación plástica generada en el material.

REFERENCIAS

- [1] Askeland, Donald R. & Prulé Pradeep P. (2004). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. México, International Thompson Editores SA.
- [2] Figueroa, I.A., Lara, G.A., (2018). *Introducción a las espumas metálicas*. Morelia, México, ¿Ya te enteraste? Investigación Científica 2, Academia Michoacana de Ciencias A.C. pp. 73-88.
- [3] Gutierrez, J.A., Oñoro, J., (2008) *Espumas de Aluminio: Fabricación, propiedades y aplicaciones*. Revista Metalúrgic, 44 vol. (5) pp. 457-476.
- [4] Ishizaki, K., Kormarneni, S., Nanko, N., (1998), *Porous Materials: Process technology and applications*. Rev. Adv. Mater. Sci. Vol. (24) pp. 35-43.
- [5] Mordije, B.L., Elbert, T., (2001) *Structural materials, Properties Microstructural and Processing*, Materials Science and Engineering 302, pp. 37-45.
- [6] Danish, M., Ginta, T., Yasir, M., Abdul, R., Ahmad, M., (2018), *Light Alloys and their machinability*, pp. 3-12.
- [7] Carou, Diego., Davim, J. Paulo. (2019), *Manufacturing, Design, and Technology. Machining of Light Alloys: Aluminum, Titanium and Magnesium*. CRC Press Taylor & Francis Group Vol. (13) pp.
- [8] Kainer K. U., (2003). *Magnesium Alloys and Technology*. Wiley-VCH.
- [9] Gaines L., Cuenca, R., Stodolsky F., (1995). *Potential applications of wrought magnesium alloys for passenger vehicles*, Argonne National Laboratory, Estados Unidos.
- [10] Berri, L.F., Echeverry, M., Correa Bedoya, E., Zuleta G., Robledo S.M., (2017). *Development of the magnesium alloy industry in Colombia An opportunity*. Revista DYNA Vol. (84) No. 203, Colombia pp. 55-64.
- [11] Polmear, I.J., (1995). *Light alloys: Metallurgy of the light metals, Third*. Londres: J. Wiley & Sons.

- [12] Shaw, B.A., (2003) *Corrosion resistance of magnesium alloys*, ASM Handb., vol. 13, pp. 692-696.
- [13] Peloubet, J.A., (2012). *Machining magnesium*, Magnesium Technology Centre, Swinton, Manchester.
- [14] Kainer, K. U., (2003). *Magnesium Alloys and Technologies*. Wiley-VCH. Germany pp. 3-6.
- [15] ASTM International (2005). B275, *Standard Practice for Codification of Certain Nonferrous Metals and Alloys, Cast and Wrought*. ASTM International. Estados Unidos.
- [16] Hernández, Daniela. (2016). *Comportamiento Mecánico y Microestructural de Uniones Disímiles de Aleaciones de Al A6061-T6 y A7075-T6 y Mg AZ31B mediante el Proceso de Fricción-Agitación (FSW)* [Monografía], Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, Saltillo, México.
- [17] Askeland, D. R., (2014). *Ciencia e Ingeniería de Materiales*. Cengage Learning, (6^a ed), CDMX, pp. 547-540.
- [18] Wu, R.Z., Qu, Z.K., Zhang, M.L., (2010). *Reviews on the influences of alloying elements on the microstructure and mechanical properties of Mg-Li base alloys*. Rev.Adv.Mater.Scie. Vol. (24). República de China. Pp. 35-43.
- [19] Ross, R. B., (1992). *Metallic Materials Specification Handbook*. Springer Science Business Media, B.V. (4ta ed.) Vol. (1), UK. Pp. 209-240.
- [20] Haferkamp H., Boehm R., Holzkamp U., (2001). *Alloy development, Processing and Applications in Magnesium Lithium Alloys*, *Materials Transactions*. Vol. (42). Japón. Pp. 1160-1166.
- [21] ASM International. (2004). *Handbook of Metallography and Microstructures*. Vol (9).
- [22] Okamoto, H., (2013). *Supplemental Literature Review of Binary Phase Diagrams: Cs-In, Cs-K, Cs-Rb, Eu-In, Ho-Mn, K-Rb, Li-Mg, Mg-Nd, Mg-Zn, Mn-Sm, O-Sb, and Si-Sr*. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion* Vol. (34). Japón. Pp. 251-263.

- [23] Abarca, E. P., (2017). *Síntesis de espumas metálicas de aluminio de celda abierta*. [Tesis de Posgrado]. Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- [24] Duknah, N., (2013). *Metal foams, fundamentals and applications*. DEStech publications. Pp. 1-30, 362-378.
- [25] Gibson, L.J. and Ashby, M.F. (1999) *Cellular Solids Structure and Properties*. 2nd ed. Cambridge University Press.
- [26] ASTM International. (2004) E11-04, *Standard Specification for Wire Cloth and Sieves for Testing Purposes*, ASTM International. Estados Unidos.
- [27] Figueroa. L. S., (2023). *Efecto del litio en espumas metálicas base magnesio*. [Tesis de Licenciatura] Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, México.
- [28] Rodríguez, J. A., (2010). *Propiedades Físicas: Densidad y porosidad*. [Monografía]. Universidad Oviedo. Pp. 1-4.
- [29] Contreras, L. T., (2016). *Producción, caracterización estructural y mecánica de espumas metálicas base aluminio*. [Tesis de Licenciatura] Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, México.
- [30] Bin. J., Zejun, W., (2007). *Effect of pore size and relative density on the mechanical properties of open cell aluminium foams*. Scripta Materialia Vol (56). Pp 169-172.
- [31] Mendieta, I., (2022). *Obtención y Caracterización mecánica de espumas metálicas de Al-Mg-Cu y Al-Cu-Mg*. [Tesis de Licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, México.
- [32] Hernández, N. A., (2020). *Estudio del comportamiento mecánico de espumas metálicas de aluminio refinado y diseño de un nuevo método de obtención de espumas metálicas para aleaciones con memoria de forma* [Tesis de Posgrado]. Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, México.
- [33] Enriquez, J. A., (2021). *Efecto de la precipitación sobre las propiedades mecánicas de espumas metálicas de Al-7075*. [Proyecto de Investigación] Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, México.

- [34] Yilong, L., Guibao, Q., Yang Y. (2016). *Preparations and Compressive Properties of Magnesium Foams*. Rare Metal Materials and Engineering, Vol. (10). Pp. 2498-2502.
- [35] Granados, C., (2018). *Producción y caracterización de espumas metálicas de Al y Mg de poro abierto*. [Tesis de Maestría] Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, México.
- [36] Hans P., Kriszt B., (2002). *Handbook of cellular metals: Production, processing and applications*, Wiley VCH, Austria.
- [37] Azamar, M. F., (2019). *Estudio de la permeabilidad a altas presiones de espumas de aluminio*. [Tesis de Matesría]. Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, México.
- [38] Valencia, A., (2013). *Las espumas metálicas. Metal foams*. Revista CINTEX, Colombia. Pp. 101-152.
- [39] Gibson, L., (2000). *Mechanical Behavior of Metallic Foams*. Annual Review of Materials Science Vol. (30). Pp. 191-227.
- [40] Molina, O. D., (2015). *Caracterización Microestructural y mecánica de espumas metálicas de aluminio fabricadas por un nuevo proceso de infiltración*. [Tesis de Posgrado]. Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX. México.
- [41] Banhart, J., (2001). *Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams*. Progress in Materials Science Vol. (46). Germany. pp. 559-632.
- [42] Gutierrez, J.A., Oñoro, J., (2008) *Espumas de Aluminio: Fabricación, propiedades y aplicaciones*. Revista Metalúrgic, 44 vol. (5) pp. 457-476.
- [43] Norbert, I. O., (2013). *Metal matrix syntactic foams produced by pressure infiltration the effect of infiltration parameters*. Materials Science & Engineering A. Vol. (583). Hungary. pp. 11-19.
- [44] Lou, X., Xu, J. Y., Bai, E. L., (2014). *Mechanical Properties of ceramics-cement based porous material under impact loading*. 778e784 Mater. Des. 55.

- [45] García, M. (2016). *Commercial Applications of Metal Foams: Their Properties and Production*. Materials Ed. 9.
- [46] Singh, S., Bhatnagar, N. (2017). *A Survey of Fabrication and Application of Metallic Foams*. Journal of Porous Materials, Vol (25). Pp. 775-787.
- [47] Liu, P.S., Chen, G.F. (2014). *Porous Materials Processing and Applications*. 1st ed. Tsinghua University Press.
- [48] Kumar, D., Gupta, M. (2020). *An Insight into Metal Based Foams: Processing, Properties and Applications*. Springer. Vol (145). Germany.
- [49] Pérez, P., Castillo, M., Bravo, D., Sánchez, F., (2018). *Obtención de espumas metálicas de aluminio por el método de infiltración en preformas lixiviables*. Ciencia Digital Vol. (2), No. 2. Pp. 348-360.
- [50] Uberti, B., de los Angeles Caravaca, M., Miño, J. C., Valdez, L., D'Ambra, R. B., & Casali, R. A. (2016). *PREDICCIÓN DE LA MICRO DUREZA VICKERS EN MATERIALES SUPERDUROS, DIAMANTE Y OTROS COMPARADOS CON LOS OBTENIDOS EN TiO₂ POROSO y OXIDO DE ZINC*. In *Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales*.
- [51] ASTM International (2002). E384-99, *Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*. ASTM International. Estados Unidos.
- [52] ASTM International (2000). E9-89a, *Standard Test Method of Compression Testing of Metallic Materials at Room*. ASTM International. Estados Unidos.
- [53] Wang, L., Dong, H., (2010) *Effect of Y on microstructure and mechanical properties of duplex Mg-7Li alloys*, Journal Alloys and Compounds 506, pp. 468-474.
- [54]. Hernández, J.M., Figueroa, I.A., González G., Salas A.E., Mendoza L.E., Alfonso I., Lara G.A., (2022). *In-Situ Porosity formation of self-foaming Al-Fe-Cu Alloys*. Appl. Phys.