



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**EFFECTO DEL LITIO EN ESPUMAS METÁLICAS BASE**

**MAGNESIO**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA**

**P R E S E N T A:**

**LAURA SOFÍA FIGUEROA BLANCO**



**CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO, 2023**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

Jurado asignado:

**Presidente:** M. EN C. BALBINA OJEDA RAMÍREZ

**Vocal:** M. EN E. CLARA SARAID FLORES ROSAS

**Secretario:** DR. IGNACIO ALEJANDRO FIGUEROA VARGAS

**1er Suplente:** DR. GABRIEL ÁNGEL LARA RODRÍGUEZ

**2do Suplente:** M. EN C. JONATHAN ZAMORA MENDIETA

Sitio donde se desarrolló el tema:

Instituto de Investigaciones en Materiales, U.N.A.M.

Asesor del tema:

---

Dr. Ignacio Alejandro Figueroa Vargas

Supervisor técnico:

---

M. en C. Manuel Farid Azamar Jácome

Sustentante:

---

Laura Sofía Figueroa Blanco

## Resumen

En este trabajo de tesis se investigaron los parámetros de fabricación de espumas metálicas base magnesio de celda abierta y poro intermedio (2 mm) a través del método de fundición/infiltración. Además, la preforma que se utilizó fue NaCl por tener el punto de fusión superior al del magnesio, removiéndola mediante lixiviación en la zona de pasivación del material para evitar corroer la matriz y obtener las espumas.

En las espumas resultantes, se calculó la porosidad, se realizó la caracterización estructural, física y mecánica a través de microscopía óptica, picnometría de helio, ensayos de dureza y compresión. Se compararon los resultados obtenidos para ambas composiciones en las espumas y en las probetas en bulto, para analizar el comportamiento de cada muestra.

Se obtuvieron espumas metálicas de alta porosidad, con un comportamiento mecánico típico de estos materiales, determinando el último esfuerzo de compresión, la tenacidad y la capacidad de absorción de energía. Se concluyó que una pequeña adición de litio modifica las propiedades físicas y mecánicas, disminuyendo la densidad y al mismo tiempo la resistencia mecánica. Sin embargo, es posible incrementar las propiedades mecánicas a través de tratamientos térmicos o añadiendo otro elemento aleante.

Esta investigación se conforma de 4 capítulos: en el primero se presenta la teoría pertinente para comprender todo lo relacionado a los materiales de estudio. En el segundo capítulo se describe detalladamente la metodología experimental seguida para todas las muestras, así como el proceso de infiltración. Los resultados de cada prueba y su discusión se exponen en el tercer capítulo. Finalmente, en el cuarto capítulo se muestran puntualmente las conclusiones a las que se llegó al término de este trabajo.

## **Agradecimientos**

A la Universidad Nacional Autónoma de México, mi alma máter, que me ha dado la mejor formación desde que ingresé al Colegio de Ciencias y Humanidades hasta el día de hoy.

A la Facultad de Química, por mi valiosa educación universitaria que me permitió desarrollarme en el ámbito de la ciencia.

Al Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM por abrirme sus puertas para complementar y culminar mis estudios profesionales, sobretodo, por fomentar mi interés en la investigación de los materiales metálicos.

Agradezco al proyecto UNAM-DGAPA-PAPIIT (No. IN102422) por el financiamiento otorgado para la realización del presente proyecto.

A mis sinodales: M. en C. Balbina Ojeda Ramírez, por su manera de transmitir el conocimiento aunado a su excelente calidad como persona, a la M. en E. Clara Saraid Flores Rosas, por sus enseñanzas y apoyo desde que fueron mis profesoras durante la carrera. En especial, quiero agradecer al Dr. Ignacio Alejandro Figueroa Vargas, por darme la oportunidad de incorporarme a su equipo de investigación, por su paciencia y asesorarme en la realización de este proyecto. Agradezco las valiosas aportaciones de cada uno para mejorar este trabajo.

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. Por último, agradezco al M. en C. Julio Esteban Méndez Durán por su amistad, apoyo y asesoría en el transcurso de este trabajo.

## **Dedicatorias**

A mi padre José Gerardo Figueroa González, por el apoyo y los recursos otorgados durante mis estudios.

A mi abuela Sofía Catalina Hernández Aguilar, por su cariño y cuidados desde siempre.

A mi hermana Kenia Geraldin Figueroa Blanco, por ser mi compañera de vida y por tratar de darle un buen ejemplo como hermana mayor.

A mi tía Patricia Guadalupe Blanco Hernández, por confiar en mi sabiduría para terminar mi carrera, por su disposición y consejos.

A mi novio Guadalupe Daniel Ávila Rubio, por su invaluable apoyo y compañía durante este proceso, por motivarme a dar lo mejor de mí como persona y futura profesionalista.

Agradezco a todas esas personas que han creído en mí y que me han ayudado en esta etapa de mi vida.

# Índice

<b>Introducción</b> .....	1
<b>Capítulo 1. Marco teórico</b> .....	4
1.1. Espumas metálicas.....	7
1.2. Métodos de producción de espumas.....	11
1.3. Aplicaciones de las espumas metálicas.....	13
1.4. Propiedades físicas y mecánicas.....	15
1.5. Magnesio como material de ingeniería ligero.....	20
1.6. Litio.....	23
1.7. Sistema Mg-Li.....	24
<b>Hipótesis</b> .....	26
<b>Objetivos</b> .....	26
<b>Capítulo 2. Desarrollo experimental</b> .....	27
2.1. Preparación y composición química de la materia prima.....	27
2.2. Fundición de aleaciones.....	28
2.3. Maquinado de probetas.....	29
2.4. Fabricación de las espumas.....	31
2.5. Proceso de infiltración.....	33
2.6. Remoción de la preforma.....	36
2.7. Preparación metalográfica de las muestras.....	39
2.8. Difracción de rayos X.....	40
2.9. Picnometría de helio.....	41
2.10. Ensayo de dureza.....	42
2.11. Ensayo de compresión.....	44

<b>Capítulo 3. Resultados y discusión</b> .....	47
3.1. Fundición de aleaciones.....	47
3.2. Maquinado de probetas.....	48
3.3. Remoción de la preforma.....	51
3.4. Preparación e interpretación metalográfica.....	55
3.5. Fluorescencia de rayos X.....	57
3.6. Difracción de rayos X.....	58
3.7. Picnometría de helio.....	60
3.8. Ensayo de dureza.....	62
3.9. Ensayo de compresión.....	63
<b>Capítulo 4. Conclusiones</b> .....	71
<b>4. Trabajo futuro</b> .....	72
<b>5. Bibliografía</b> .....	73



## Índice de figuras

Figura 1. Tipo de celda o poro, (a) Espuma de poro abierto y (b) Espuma de celda cerrada.....	8
Figura 2. Etapas del proceso de infiltración, (a) Componentes del sistema, (b) Fusión y aplicación de la presión de infiltración, y (c) formación del material compuesto.....	13
Figura 3. Principales aplicaciones de las espumas en función del tipo de celda.....	14
Figura 4. Región transversal de un tubo compuesto por una espuma.....	15
Figura 5. Curva $\sigma$ - $\epsilon$ para determinar la capacidad de absorción de energía.	17
Figura 6. Mecanismo de deformación en espumas metálicas.....	18
Figura 7. Comparación de las curvas $\sigma$ - $\epsilon$ a compresión correspondientes a un metal sólido y en espuma metálica.....	19
Figura 8. Diagrama de fases para el sistema Mg-Li.....	25
Figura 9. Preparación de materia prima, (a) Corte del lingote de Mg, (b) Determinación de la masa de las placas y (c) Pesaje de la viruta de Mg para completar la carga.....	27
Figura 10. Espectrómetro de fluorescencia de rayos X.....	28
Figura 11. Horno de inducción, (a) por fuera y (b) por dentro, con carga en el crisol.....	29
Figura 12. Maquinado de lingotes en el torno.....	30
Figura 13. Corte de lingotes.....	30
Figura 14. Obtención de las muestras en bulto, (a) Corte de la base del lingote, (b) División de la pieza en 6 partes y (c) Muestras de la periferia y centro del lingote.....	31
Figura 15. Preparación de la preforma, (a) Trituración. (b) Colocación en cribas para su clasificación.....	31
Figura 16. Cribado y clasificación del tamaño de partícula.....	32

Figura 17. (a) Componentes del sistema de fabricación de espumas y (b) Ensamble del crisol.....	34
Figura 18. Sistema de válvulas e infiltración.....	35
Figura 19. Etapas después de la infiltración. (a) Salida de la espuma del horno, (b) solidificación y (c) enfriamiento.....	36
Figura 20. Diagrama de Pourbaix para el sistema Mg-H <sub>2</sub> O a 25 °C.....	37
Figura 21. Preparación de la disolución. (a) Medición de pH y (b) Comparación con la escala para determinar el valor.....	37
Figura 22. Etapas de la disolución en las espumas, (a) Agitación magnética y (b) Ultrasonido.....	38
Figura 23. Piezas en la pulidora, (a) Desbaste de espumas y (b) Pulido de las muestras en bulto.....	39
Figura 24. Microscopio óptico utilizado.....	40
Figura 25. Difractrómetro en funcionamiento.....	41
Figura 26. Picnómetro de helio.....	42
Figura 27. Durómetro Vickers.....	43
Figura 28. Ensayo de dureza en las todas las muestras. (a) Periferia de la muestra en bulto, (b) Centro de la muestra en bulto y (c) Espuma metálica.....	43
Figura 29. Máquina universal de ensayos mecánicos Instron 8802.....	44
Figura 30. Máquina universal de pruebas mecánicas Instron 5500R.....	45
Figura 31. Dimensiones bajo norma para las espumas metálicas, (a) Altura y (b) Diámetro.....	46
Figura 32. Espuma metálica montada en la máquina universal de ensayos mecánicos.....	46
Figura 33. Extracción de probetas en la prensa.....	47
Figura 34. Cilindros producidos por fundición de Mg y Mg-Li.....	47
Figura 35. (a) Espuma dentro del crisol y (b) Probeta extraída del crisol.....	48

Figura 36. Cilindros careados, (a) Altura de 18 cm y (b) Diámetro de 6.2 cm después del maquinado.....	49
Figura 37. Maquinado del lingote, (a) Muestra montada en el torno y (b) Cilindro careado.....	49
Figura 38. Obtención de muestras, (a) Corte del lingote y (b) Maquinado de la espuma.....	50
Figura 39. Corte de las espumas, (a) Después del maquinado y (b) Material compuesto de NaCl+Mg(Li).....	51
Figura 40. Espuma metálica de Mg-Li.....	54
Figura 41. Muestras en bulto pulidas y atacadas, (a) Mg y (b) Mg-Li.....	55
Figura 42. Microestructura de la periferia de las muestras en bulto a 50X, (a) Mg y (b) Mg-2.5% at. Li.....	56
Figura 43. Microestructura del centro de las muestras en bulto a 50X, (a) Mg y (b) Mg-2.5% at. Li.....	56
Figura 44. Microestructuras de espumas metálica a 50X, (a) Mg y (b) Mg-Li.	57
Figura 45. Difractograma para la muestra en bulto de Mg.....	59
Figura 46. Difractograma para la muestra en bulto de Mg-2.5% Li.....	60
Figura 47. Probetas en bulto montadas en la máquina de ensayos, (a) Mg y (b) Mg-Li.....	63
Figura 48. Probetas en bulto a la mitad del ensayo, (a) Mg y (b) Mg-Li.....	63
Figura 49. Probetas en bulto al término del ensayo, (a) Mg y (b) Mg-Li.....	64
Figura 50. Curva $\sigma$ - $\epsilon$ para muestras de Mg-Li en bulto.....	66
Figura 51. Curva $\sigma$ - $\epsilon$ para muestras en bulto de Mg.....	67
Figura 52. Espuma de Mg antes y después del ensayo de compresión.....	68
Figura 53. Espuma de Mg-Li antes y después del ensayo de compresión....	68
Figura 54. Curva $\sigma$ - $\epsilon$ para espumas base Mg al 80% de deformación.....	69
Figura 55. Curva $\sigma$ - $\epsilon$ para espumas base Mg al 20% de deformación.....	70

## Índice de tablas

Tabla 1. Designación ASTM para aleaciones de Mg.....	6
Tabla 2. Denominación ASTM para tamaño de partícula de los poros en espumas.....	8
Tabla 3. Propiedades del Mg puro.....	21
Tabla 4. Propiedades del Li puro.....	23
Tabla 5. Porosidad de las espumas de Mg tras disolverlas (para todas las pruebas).....	52
Tabla 6. Entalpía de reacción y entropía para sales a 298 K.....	53
Tabla 7. Masa y porosidad de las espumas metálicas con los parámetros adecuados de fabricación .....	54
Tabla 8. Composición del lingote de Mg a través de FRX.....	57
Tabla 9. Composición de la viruta de Mg a través de FRX.....	58
Tabla 10. Propiedades físicas de las muestras en bulto.....	61
Tabla 11. Propiedades físicas de las espumas.....	62
Tabla 12. Dureza Vickers de las muestras en bulto y espumas.....	62
Tabla 13. Propiedades mecánicas en las muestras en bulto.....	65
Tabla 14. Propiedades mecánicas en las espumas metálicas.....	69

## Abreviaciones y símbolos

<i>ASTM</i>	American Society for Testings and Materials	<i>P</i>	Porosidad
<i>Mg</i>	Magnesio	$\sigma$	Esfuerzo uniaxial
<i>Li</i>	Litio	$\epsilon$	Deformación
<i>Mg-Li</i>	Magnesio-Litio	$\phi$	Porcentaje de porosidad
<i>Al</i>	Aluminio	$V_p$	
<i>H<sub>2</sub></i>	Hidrógeno gaseoso	$V_s$	Volumen del sólido
<i>O<sub>2</sub></i>	Oxígeno gaseoso	<i>Torr</i>	Torricheli
<i>N<sub>2</sub></i>	Nitrógeno gaseoso	<i>MPa</i>	Megapascal
<i>Ar</i>	Argón	<i>%at.</i>	Porcentaje atómico
<i>Bi</i>	Bismuto	<i>%masa</i>	Porcentaje en masa
<i>Cu</i>	Cobre	<i>bcc</i>	estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo
<i>Cd</i>	Cadmio	<i>fcc</i>	estructura cristalina cúbica centrada en las caras
<i>RE</i>	Rare Earths (tierras raras)	<i>hcp</i>	Estructura cristalina hexagonal compacta
<i>Fe</i>	Hierro	$^{\circ}\text{C}$	Grado Celsius
<i>Th</i>	Torio	$\text{cm}^3$	Centímetro cúbico
<i>Zr</i>	Zirconio	<i>m</i>	masa
<i>Mn</i>	Manganeso	<i>g</i>	Gramo
<i>Ni</i>	Níquel	<i>kg</i>	Kilogramo
<i>Pb</i>	Plomo	<i>NaCl</i>	Cloruro de sodio
<i>Ag</i>	Plata	<i>He</i>	Helio
<i>Cr</i>	Cromo	$\rho$	Densidad

<i>Si</i>	Silicio	$\rho_t$	Densidad teórica
<i>Sn</i>	Estaño	$\rho_e$	Densidad experimental
<i>Y</i>	Itrio	$\rho_r$	Densidad relativa
<i>Sb</i>	Antimonio	$\rho_f$	Densidad de la espuma
<i>Zn</i>	Zinc	$\rho_a$	Densidad de la aleación
<i>HNO<sub>3</sub></i>	Ácido nítrico	<i>SiC</i>	Carburo de silicio
<i>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O</i>	Etanol	<i>MgO</i>	Óxido de magnesio
<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	Alúmina	<i>L/D</i>	Relación longitud entre diámetro
<i>TiH<sub>2</sub></i>	Hidruro de titanio	<i>E<sub>v</sub></i>	Energía absorbida por unidad de volumen
<i>MgCO<sub>3</sub></i>	Magnesita	$\bar{x}$	Promedio
<i>MgCO<sub>3</sub>*CaCO<sub>3</sub></i>	Dolomita	<i>t</i>	Tonelada
<i>KCl*MgCl<sub>2</sub>*6H<sub>2</sub>O</i>	Carnalita	<i>cm</i>	Centímetro
<i>kgf</i>	Kilogramo-fuerza	<i>mm/min</i>	Milímetro/minuto
<i>kN</i>	Kilo-Newton	<i>mN</i>	Mili-Newton
<i>LiCl</i>	Cloruro de Litio	$\Delta G$	Energía libre de Gibbs
$\Delta H_{rxn}$	Entalpía de reacción	$\Delta S$	Entropía
$\Delta G_{NaCl}$	Energía libre del cloruro de sodio	$\Delta G_{LiCl}$	Energía libre del cloruro de litio
<i>K</i>	Kelvin	<i>cal</i>	caloría

## Introducción

Actualmente, la necesidad de producir materiales reduciendo el impacto ambiental es cada vez más importante. Es por esto que los metales como el Mg son una buena opción para satisfacer esta demanda, debido a su buena capacidad de reciclaje y de maquinarse. No obstante, considerando en el cálculo la masa para producirlo a través de diferentes materias primas, el consumo energético es mayor si se compara con otros metales; por el contrario, si se toma en cuenta el volumen de materia prima ganada, el Mg necesita menor energía que metales como el Al o Zn, compitiendo incluso con materiales poliméricos.

Además, la optimización de métodos de recirculación puede incrementar la producción de aleaciones de Mg disminuyendo cantidad de energía eléctrica requerida, y, por lo tanto, los costos. Lo anterior, abre la posibilidad de que en un futuro cercano, las aleaciones de Mg sustituyan a las de Al. [1] Gracias a la ciencia e ingeniería de materiales han sido posibles numerosas innovaciones con el uso de aleaciones base Mg. Sin embargo, aún faltan requerimientos por cubrir, y mediante investigación se puede subsanar cada uno de ellos.

- *Desarrollo de las aleaciones de Mg:* Es un foco de interés debido a su creciente mercado, incrementando la competitividad con otros materiales, y por lo tanto, la necesidad de fabricar aleaciones que mejoren las propiedades ya conocidas, los cuales lo han hecho el metal más apto para diversas aplicaciones.
- *Producción tecnológica:* Los principales métodos de manufactura, casi siempre se adaptan en función del uso al que se destinará el material fabricado. Esta demanda va de la mano con el desarrollo del material, ya que no sería posible si no existieran métodos innovadores y rentables para la producción a gran escala y mecanización de las aleaciones.
- *Solidificación rápida:* Este es un punto de interés importante cuando existen materiales que aún están en desarrollo. Como sabemos, la solidificación es

el proceso que tiene lugar después de la fusión, y tiene efectos considerables en la estructura. Puede ocurrir dentro o fuera del equilibrio termodinámico. Cuando este proceso tiene lugar aceleradamente, suele ser fuera del equilibrio, produciendo fases metaestables, granos extremadamente finos, así como una sobresaturación de elementos en la matriz metálica, y una alta pureza de los materiales.

- *Materiales compuestos*: los compósitos base Mg ofrecen propiedades como alta resistencia a la tracción y a la cedencia, buena respuesta a procesos de trabajado en caliente y también la resistencia a la abrasión es una propiedad que se puede adecuar al uso destinado gracias al módulo de Young del material. Como ejemplo se ello se tiene a las aleaciones reforzadas con fibras cerámicas.
- *Corrosión y protección*: reducir la susceptibilidad a la corrosión en las aleaciones de Mg debe tenerse en cuenta desde la producción del material; esto es posible con la reducción de contenidos críticos de Fe, Cu y Ni han tenido un efecto positivo ya que no son capaces de lograr una capa pasiva como lo hace el Ni por ejemplo en los aceros inoxidable.
- *Reciclaje*: aunque los residuos de la producción primaria y la chatarra pueden ser utilizados para continuar manufacturando material, se debe de tener en cuenta que existen factores que impiden su uso directo en el proceso de fundición, por ejemplo, la presencia de óxidos e impurezas en la pedacería que puedan reaccionar con el metal líquido, debido al carácter reactivo del Mg con el O<sub>2</sub>. El reciclaje de este metal ha aumentado considerablemente en virtud de producirlo secundariamente aminorando el daño al ambiente como con la producción secundaria de aleaciones base Al. [1]

Cuando estas demandas queden cubiertas, el mercado y producción del Mg crecerán como ningún otro metal. Por otra parte, pero continuando con el desarrollo de materiales, en una época contemporánea a la del auge para el Mg (1930-1950) surge interés en las espumas metálicas (1940). La primera forma de producirlas, fue



a través de la vaporización de elementos en aleaciones de bajo punto de fusión gracias a la patente de Sosnick. [2]

Fue hasta un par de décadas subsecuentes, que se patentaron otros métodos que incluían la inyección de metal en los intersticios con partículas para su posterior eliminación, o bien, mediante una descomposición térmica que libere gas. Desafortunadamente, la investigación y la producción para los materiales celulares fue muy deficiente hasta el inicio de la década de los 90's, en donde se alcanza un auge. Por esta razón, se consideran como materiales relativamente nuevos y aptos para usarse en diferentes sectores industriales, aunque hasta la fecha se siguen haciendo esfuerzos para optimizar el procesamiento y la calidad para ampliar su mercado. [3]

En general, los materiales celulares son livianos y poseen alta resistencia; un punto importante es que pueden producirse a partir de cerámicos, polímeros y metales, siendo estos últimos los más socorridos. Ahora bien, un metal celular puede ser visto como un material heterogéneo compuesto de una fase gaseosa y por supuesto, una metálica. De este principio parte la producción de espumas metálicas, teniendo elevada tenacidad, maquinabilidad, rigidez, conductividad térmica y eléctrica, capacidad de amortiguación y absorción de energía. [4]

Es importante saber que todas las propiedades que pueden obtenerse de un material de este tipo, están en función de las características de los poros y algunas son más sensibles a la microestructura. Lamentablemente, casi todo lo que se conoce sobre espumas metálicas está referido a las aleaciones base Al. Por tal motivo, vale la pena continuar con el desarrollo de estos materiales utilizando otros elementos para generar la matriz metálica. [5]

# Capítulo 1. Marco Teórico

Las aleaciones de Mg destacan por ser excelentes para componentes estructurales. Son de interés comercial principalmente para los sectores automotriz y aeronáutico, ya que ofrecen una buena relación resistencia/peso, siendo competitivas con las aleaciones base Al. [6] Gracias a que tienen buena maquinabilidad y procesabilidad, es posible manufacturar partes complicadas de una manera sencilla a través de fundición a presión. Las piezas coladas y maquinadas poseen buena soldabilidad utilizando gases inertes. Otro aspecto interesante, es que tiene inclusive mayor capacidad de amortiguación que el hierro colado; por ello, se usan para reducir emisiones de sonido, e incrementar el tiempo de vida de máquinas y equipos. [1]

Por otra parte, existen limitantes en las aplicaciones de estas aleaciones, tales como su baja resistencia a la corrosión y capacidad para trabajarlas en frío. Al colarlas, la contracción durante la solidificación es aproximadamente del 4% y del 5% durante el enfriamiento. Este alto valor se atribuye a su alto coeficiente de expansión (superior en un 10% al del Al), lo conduce a tener microporosidad y tenacidad relativamente baja. Sin embargo, el Mg es el primer elemento en considerarse cuando el bajo peso específico es la propiedad más importante, ya que su resistencia específica es competitiva con la del acero y el Al. [4]

Las propiedades de las aleaciones de Mg dependen en gran medida de los aleantes principales así como de tratamientos térmicos previos. Sin embargo, se recurren a mecanismos de endurecimiento por precipitación o a través de solución sólida para incrementar las propiedades mecánicas. La formación de la solución sólida depende de las diferencias entre los radios atómicos de los elementos que conforman la aleación. En esta investigación se utilizó este método para generar una solución sólida intersticial de Li en Mg. [1] [4]

Por otra parte, en el endurecimiento por precipitación se involucra la solubilidad de un elemento en la matriz a bajas temperaturas y la estabilidad de la fase intermetálica con cierto contenido de Mg, la cual incrementa con la electronegatividad del elemento que actúa como solvente. El endurecimiento por envejecimiento o endurecimiento por precipitación se produce por una secuencia de transformaciones de fase que lleva a una dispersión uniforme de precipitados coherentes a nano escala en una matriz más dúctil y blanda. Una ventaja de este tipo de endurecimiento es que puede usarse para aumentar la resistencia a la fluencia (límite elástico) de numerosos metales por medio de tratamientos térmicos relativamente sencillos y sin crear cambios significativos en la densidad del material. [7]

La identificación de las aleaciones de Mg a nivel mundial está regida por la denominación ASTM B275, en donde cada aleación está designada con 2 letras que indican a los aleantes principales en orden decreciente de concentración, y cuando estas son iguales, se ordenan alfabéticamente. Enseguida hay 2 cifras redondeadas de cada término con su porcentaje en peso. La última letra en esta clasificación, muestra la etapa de desarrollo de la aleación. En la mayoría de los casos, las letras con las que se designa cada una, significa el grado de pureza. Por ejemplo, la aleación AZ91D, contiene 9% de Al (A) y 1% de Zn (Z). Su etapa de desarrollo es 4 (D). Su equivalencia con la norma DIN corresponde a la aleación MgAl9Zn1. Por otra parte, en la tabla 1 se presentan las abreviaciones con base en la norma ASTM B275 que corresponden a cada elemento. [1]

Tabla 1. Designación ASTM B275 para aleaciones de Mg. [1]

<b>Letra de abreviación</b>	<b>Elemento aleante</b>
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
Y	Sb
Z	Zn

La selección del sistema de aleación estará en función de las propiedades que demande el componente. Sin embargo, es necesario alearlo con elementos que favorezcan los procesos de deformación plástica a temperatura ambiente, debido a que el Mg tiene una estructura cristalina hexagonal compacta (hcp). Con un aleante como el Li, se disminuye el parámetro de red y aumenta la cantidad de sistemas de deslizamiento (el Mg sólo tiene 3), y la estructura cambia a cúbica centrada en el cuerpo (bcc), facilitando los procesos de conformado mecánico. En aleaciones base Mg, la deformación plástica ocurre cuando el material llega al esfuerzo de cedencia e inicia el movimiento de las dislocaciones en dirección paralela a los planos

cristalográficos. Otro mecanismo de deformación implica la generación de un plano simétrico con dos zonas, en donde una de ellas refleja al cristal inicial, conocido como “plano de maclado”. La formación de maclas está asociada a un esfuerzo cortante. [8][9]

## **1.1. Espumas metálicas**

Son materiales celulares (estructuralmente conformado por celdas) con alta porosidad (arriba del 50%), y bajo peso específico. Están compuestas por una fase sólida que corresponde a la matriz metálica, y otra fase conformada por poros distribuidos aleatoriamente en el sólido. Son ideales para aplicaciones ingenieriles que requieran menor densidad (sin sacrificar resistencia mecánica) que el metal equivalente en bulto, es decir, en su forma sólida sin poros. Una propiedad importante de las espumas es que absorben energía mecánica y la disipan al igual que las vibraciones. [8]

De acuerdo con el proceso de manufactura, se pueden clasificar en espumas de celda abierta o cerrada. [10] En las de celda abierta existen interconexiones entre los poros, teniendo homogeneidad en la forma y tamaño de éstos (figura 1a). Las espumas de celda cerrada no tienen conectividad entre poros, y regularmente son asimétricos, aunque esto depende del material o método utilizado para generar la porosidad (figura 1b). [3]

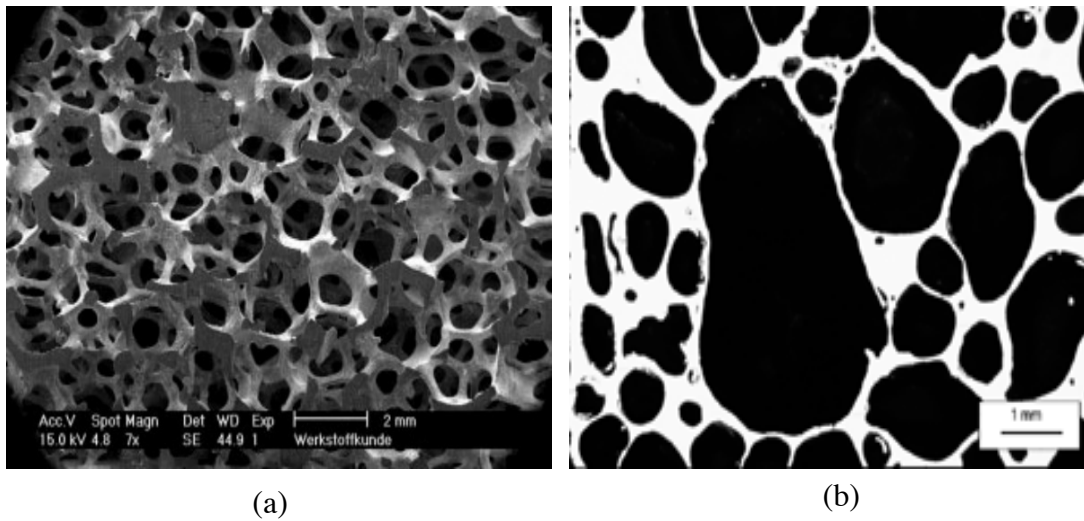


Figura 1. Tipo de celda o poro, (a) Espuma de poro abierto y (b) Espuma de celda cerrada. [3]

Otro parámetro importante en las espumas, es el tamaño de poro: chico (P1), intermedio (P2) y grande (P3). En la tabla 2 se presentan los intervalos que comprende cada tamaño según la norma ASTM E11. [11] En este trabajo se utilizó el poro intermedio (P2) considerando el límite inferior del tamaño de partícula (2 mm), porque al no haber un intervalo de tamaños, el poro es más uniforme en dimensión, distribución, morfología, y por lo tanto, en sus propiedades.

Tabla 2. Denominación ASTM E11 para tamaño de partícula de los poros en espumas. [11]

Poro (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

Las espumas de celda cerrada presentan un módulo de Young más alto que las de celda abierta. Es común fabricar este tipo de espumas con aleaciones de Al a gran escala. Espumas con este tipo de celda son recomendables para soportar bajas cargas de compresión, mas no de flexión porque entonces el material falla al fracturarse tempranamente, y los efectos podrían contrarrestarse con un tamaño de poro más uniforme y pequeño (recomendablemente hasta 1 mm). [3]

Debe tenerse en cuenta que las paredes en las espumas se fragilizan cuando contienen películas de óxido desde el proceso de manufactura, o incluso restos de las partículas que se adicionan para mejorar la fluidez del metal líquido, teniendo un efecto negativo en las propiedades mecánicas. Además, deben tenerse en cuenta factores como el tipo de horno y molde, debido a que en el calentamiento del material si se produce desde el estado líquido, ya que esto influye en el proceso de espumado, y por lo tanto, en la obtención de espumas metálicas de alta calidad. [12]

Una desventaja de producirlas así, es que existen variables termodinámicas que son difíciles de controlar en el sistema durante la formación de la espuma, y más cuando se trata de utilizar metales tan reactivos como el Mg y sus aleaciones. [13] Por ejemplo, la existencia de etapas intermedias en la transferencia de energía; el molde se calienta directamente y le transfiere energía a la matriz metálica por conducción al haber algunos puntos de contacto entre ambas partes. Conforme la temperatura del sistema incrementa, es más favorable la transferencia de energía a través de los mecanismos de conducción y radiación cuando la temperatura sobrepasa el punto de fusión del material. [3]

Cuando se empieza a formar la espuma, la transferencia por conducción disminuye, y por ende, la conductividad térmica del material también lo hace, reduciendo considerablemente el flujo de calor. El sistema logra alcanzar la estabilidad estructural y termodinámica cuando se enfría por debajo de la temperatura de

*solidus*. Durante el enfriamiento del sólido, tienen lugar mecanismos muy complejos como ocurre en las etapas de calentamiento y solidificación. [3]

La formación de una espuma metálica generalmente parte de la interacción de burbujas de gas en el metal líquido. Sin embargo, al requerir demasiada energía superficial para dar lugar a la interfase metal/gas, es un sistema fuera del equilibrio, que tiende a reducir la energía interna mediante la superficie; por esta razón, la estructura celular en una espuma es desordenada y está en función del tiempo, de variables termodinámicas, incluso mecánicas. La evolución de la estructura en una espuma se logra por 3 mecanismos:

- 1) Coalescencia de las burbujas de gas de forma poliédrica.
- 2) Difusión del gas para pasar de burbujas pequeñas a grandes.
- 3) Colocación de las burbujas hacia abajo y superficialmente en la espuma como consecuencia de la gravedad. [3]

Cabe mencionar que si el gas se inyecta para formar la espuma, los mecanismos anteriores no aplican al formar directamente las burbujas, aunque, la forma de éstas depende de la viscosidad del metal líquido y del tamaño de la burbuja, el cual generalmente es grande. No es recomendable producir espumas de un material puro debido a que en estado líquido no sería posible formar la espuma por la rapidez con la que se efectúan los procesos. Además, es necesario adicionar aditivos que contribuyan a generar las membranas celulares duraderas y a estabilizar el sistema. [3]

#### *1.1.1. Caracterización microestructural*

Las técnicas metalográficas convencionales se utilizan para caracterizar la estructura en las espumas metálicas. Con microscopía óptica y electrónica, aunadas al análisis cuantitativo de las microestructuras, se obtiene información como el grosor de la pared celular, el tamaño y orientación de los poros, etc. [12] Un reto importante para las técnicas de caracterización es el análisis de los componentes



celulares. Casi cualquier especificación que determina la calidad que tienen estos componentes, está dada por la densidad. Una estimación más precisa de este parámetro se logra a través de pycnometría de helio, al ser un método de caracterización basado en el principio de Arquímedes y la ley de Boyle. [14]

## 1.2. Métodos de producción de espumas

Los procesos de manufactura más comunes para fabricar espumas alternan variables termodinámicas como temperatura y presión. También se consideran parámetros como el tiempo, tamaño, composición, disponibilidad y costo de los materiales. [15]

- Depósito electroquímico: mediante soluciones iónicas (electrolitos) se depositan partículas metálicas en espumas hechas de polímeros para sinterizarlas. Este método produce espumas de celda abierta con alta porosidad. [14]
- Metalurgia de polvos: utiliza polvos metálicos de morfología regular (esferas) o irregular con un gasificante para su compactación y sinterización a una temperatura más baja a la de fusión del metal. Alcanzada esa etapa, ocurre la formación del gas mediante sublimación, entonces es liberado y dilatado. Las propiedades obtenidas con este método suelen ser inferiores a las de cualquier otro, ya que no es posible controlar la porosidad ni el tipo de celda resultante. Otra limitante es que los polvos metálicos tienen un costo elevado. [10]
- Solidificación direccionada: en una solución eutéctica en estado líquido se agrega hidrógeno en forma de gas ( $H_2$ ) a altas presiones, descendiendo la temperatura y por lo tanto la solubilidad del  $H_2$  en el metal líquido, formando poros uniformes en el material. Se necesita de un sistema de enfriamiento y una placa de cobre para favorecer la solidificación (en una dirección

preferencial) y enfriamiento controlado para aumentar la porosidad con el control de la velocidad de ambas etapas. [10][16]

- Fundición: se añade un gas que puede provenir del aire, o bien, insuflando Ar o N<sub>2</sub> controlando la solidificación y enfriamiento del material para obtener espumas de poro cerrado mediante el espumado de la muestra. Este proceso tiene lugar inyectando gas al metal líquido previamente preparado con SiC o MgO a fin de mejorar la fluidez. [15] [17]
- Gasificantes: es similar al proceso anterior, porque se añaden elementos que disminuyan la viscosidad del metal en estado líquido y posteriormente, se adiciona el agente gasificante (generalmente TiH<sub>2</sub>), el H<sub>2</sub> generado es el que genera la fase porosa una vez que el metal se enfrió. [17]
- Fundición-infiltración: se producen espumas metálicas con la fusión de la matriz metálica usando una placa de cobre para que durante la solidificación el rechupe quede en la parte de arriba de la pieza, sin afectar a la espuma. Se utiliza presión de un gas inerte (generalmente Ar) para infiltrar una preforma sólida (comúnmente sales) en el metal líquido, la cual produce los poros tras su remoción. Con este proceso se logran espumas de celda abierta con propiedades mecánicas superiores a las de otros métodos, además de una porosidad alta con el tamaño de poro deseado, por lo que es uno de los más socorridos. [5]

Los procesos de replicación desde una perspectiva metalúrgica, siempre han funcionado para producir piezas que parecieran imposibles con otros métodos. En el caso de las espumas metálicas, no es la excepción, aunque la replicación se refiere a replicar los poros en una espuma de celda abierta a través de 3 pasos; preparación de un material de sacrificio removible (preforma), infiltración del material que es desplazado hacia la parte inferior del sistema como consecuencia de la fuerza aplicada mediante presión para dar lugar a un material compuesto base NaCl con Mg y Li (figura 2); por último, con la eliminación de la

preforma a través de lixiviación, se genera en el material un porcentaje de porosidad de por lo menos 55%. [15]

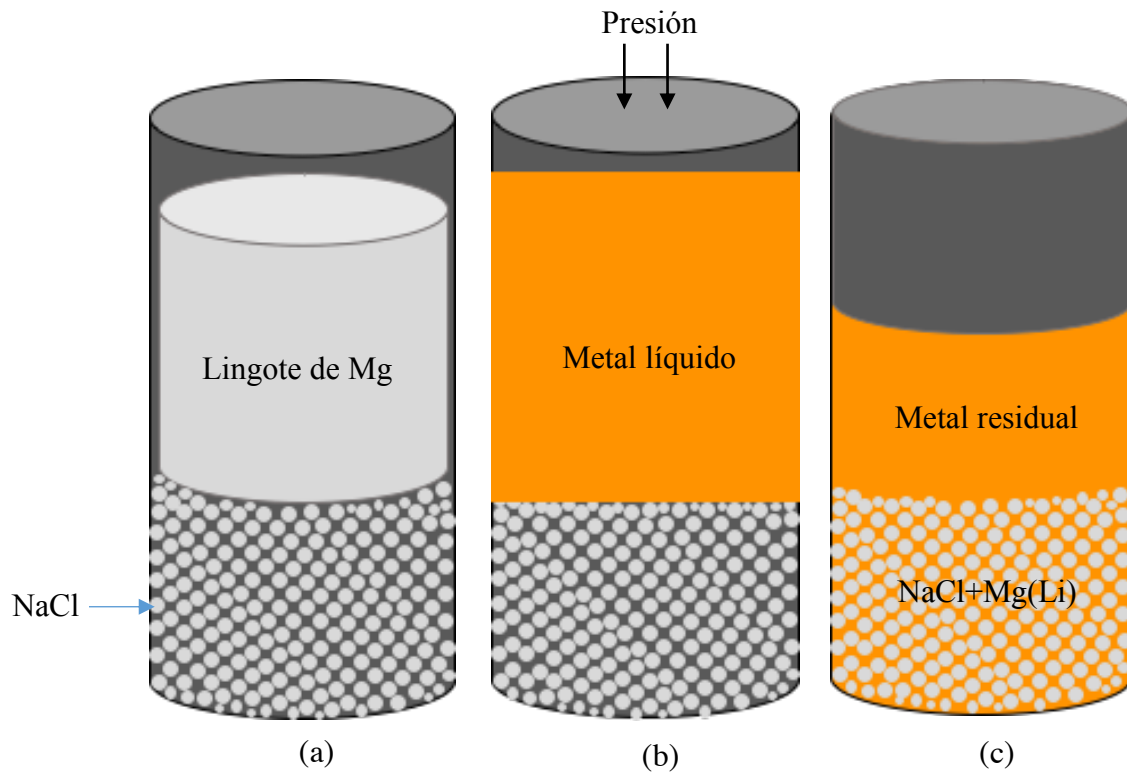


Figura 2. Etapas del proceso de infiltración, (a) Componentes del sistema, (b) Fusión y aplicación de la presión de infiltración, y (c) formación del material compuesto.

### 1.3. Aplicaciones de las espumas metálicas

Son requeridas principalmente para fabricar componentes con volúmenes muy grandes pero con aproximadamente 40% del peso que tendrían si fueran completamente sólidos, lo que hace de estos materiales celulares la primera opción para manufacturar estructuras ingenieriles, además de ser una manera rentable para obtenerlos. La figura 3 proporciona un esquema que muestra ejemplos donde se utilizan espumas metálicas con base en la clasificación ya expuesta para la porosidad. [8]

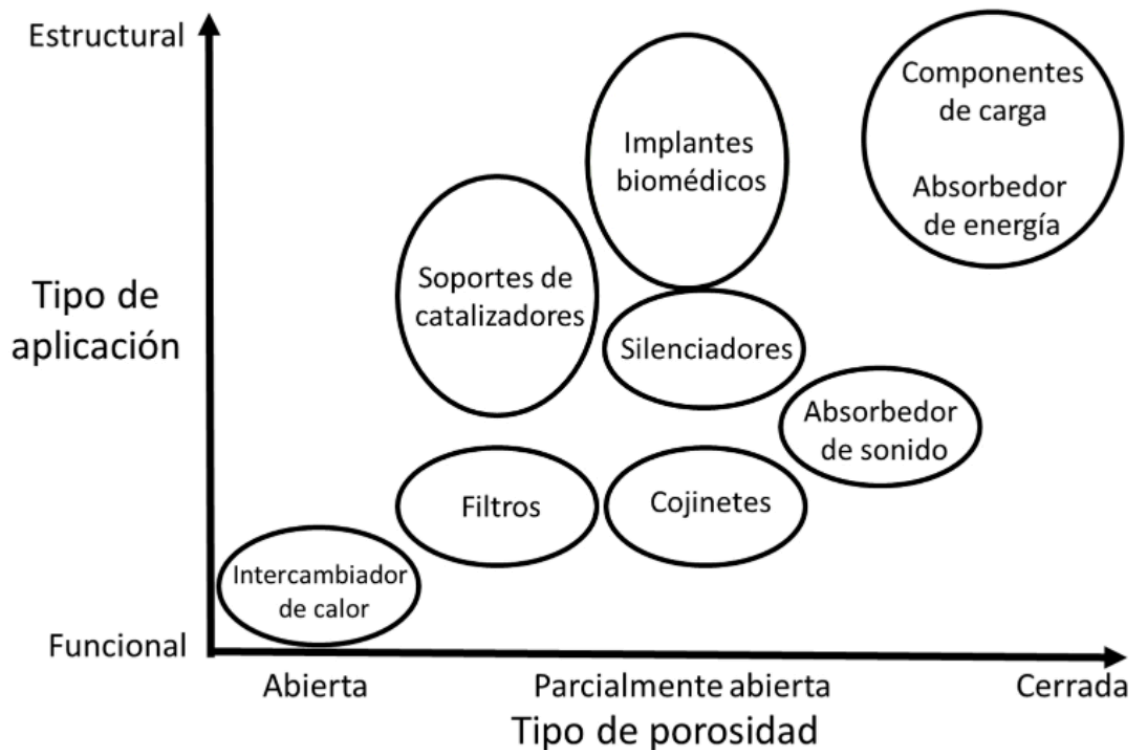


Figura 3. Principales aplicaciones de las espumas en función del tipo de celda. [8]

La permeabilidad es una propiedad característica de las espumas de celda abierta, y tiene una relación directamente proporcional con el tamaño de poro, es decir, aumenta cuando el tamaño de poro es mayor. [8]

Con espumas de celda cerrada se producen componentes de carga, barreras térmicas, aislantes de sonido y disipadores de energía e impacto; por ejemplo, dentro del sector militar, las espumas de Al absorben el impacto de las balas en chalecos, al ser socorridas por su bajo peso y alto amortiguamiento. Aunque el interés principal en este tipo de materiales porosos de baja densidad es del sector automotriz y aeroespacial al ser ideales para fabricar componentes grandes que sean capaces de absorber y disipar la energía en un amplio intervalo de deformación. [13]

Existen factores que interfieren en la energía que puede absorber el material, por ejemplo, el tipo de celda y aleación con la que está hecha la espuma, y por lo tanto, su densidad, repercuten en el desempeño del componente. Es imprescindible cerciorarse de que los valores de  $E_v$  sean altos, isotrópicos y que su comportamiento en la curva esfuerzo-deformación sea cuasi constante. En la figura 4 se ilustra un modelo compuesto por una espuma metálica en su interior, apto para aplicaciones de transporte. [18]

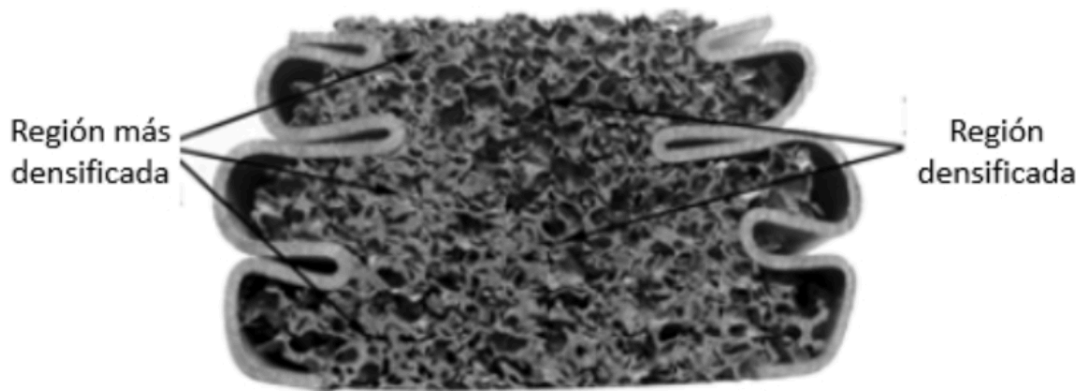


Figura 4. Región transversal de un tubo compuesto por una espuma. [18]

En el caso específico de las aleaciones base Mg, investigaciones a la fecha [13] demuestran que son útiles para reducir la contaminación atmosférica ya que actúan como captadores de  $\text{CO}_2$  a través de espumas que tienen una capa de  $\text{MgO}$  con determinado espesor, humedad relativa y temperatura de operación. Sin embargo, factores relacionados con la espuma y el tipo de porosidad influyen en la concentración a capturar. [8]

#### 1.4. Propiedades físicas y mecánicas

Las espumas metálicas (independientemente del tipo de celda), presentan una buena combinación entre alta rigidez y deformabilidad aunado a una baja densidad. Sin embargo, las propiedades ópticas y otras como la conductividad térmica y eléctrica dependen principalmente de la porosidad. La porosidad en espumas

metálicas puede ser de dos tipos: absoluta (considera el volumen de los poros en celda abierta o cerrada) y efectiva (volumen de los poros abiertos). Se determina con el porcentaje que ocupan los poros en el material, el cual debe ser superior al 50% para cumplir con los parámetros de un producto entregable. Con la ecuación 1 se calcula el porcentaje de porosidad. [12]

$$\phi = \frac{V_p - V_s}{V_p} \times 100 \quad 1$$

Donde:

$\phi$ : porcentaje de porosidad

$V_p$ : volumen de la probeta

$V_s$ : volumen sólido de la espuma

A través de ensayos mecánicos (tracción y compresión) se determinan puntos importantes en la curva esfuerzo deformación como el esfuerzo de cedencia, el último esfuerzo de tracción, además del módulo de Young y Poisson. Al calcular el área bajo la curva se determina la capacidad de absorción de energía. En esta integral definida, la variable independiente es la deformación plástica (ecuación 2). [19]

$$E_v = \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad 2$$

Donde:

$E_v$ : energía absorbida por unidad de volumen

$\sigma$ : esfuerzo aplicado

$\varepsilon$ : deformación plástica

En la figura 5 se presenta una curva esfuerzo-deformación que describe cómo es el comportamiento mecánico típico de una espuma metálica. La primera zona corresponde a la elástica, y muestra la relación lineal que existe entre el esfuerzo de compresión aplicado y el nivel de deformación. [19]

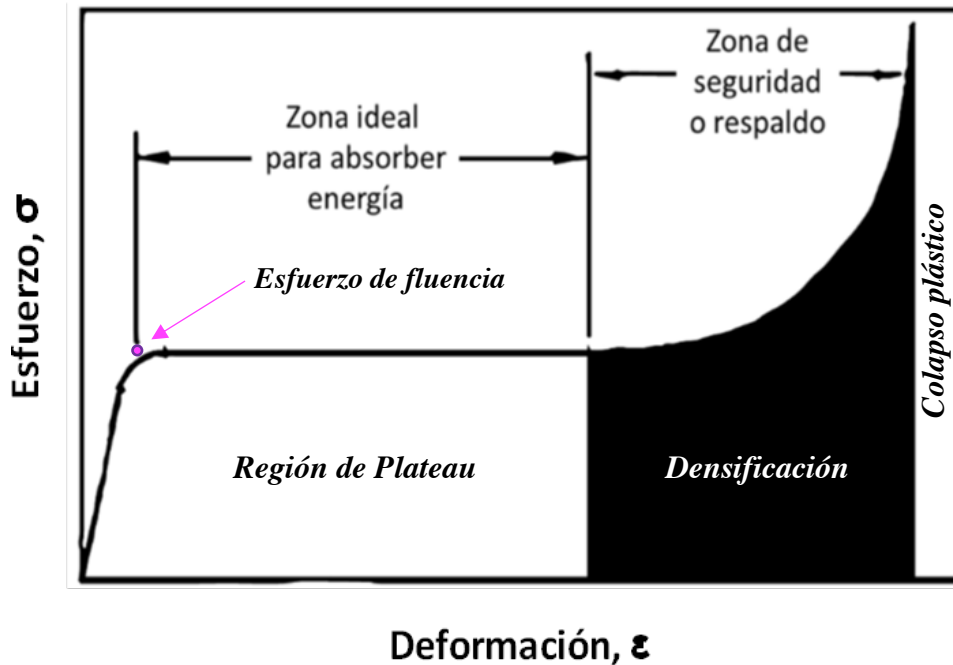


Figura 5. Curva  $\sigma$ - $\epsilon$  para determinar la capacidad de absorción de energía. [19]

La región “Plateau” corresponde a la zona ideal para absorber energía desde el esfuerzo de fluencia, hasta la zona de seguridad en donde el material absorbe energía en el punto de rotura al término de la deformación plástica. Tiene un comportamiento mecánico estable; la capacidad de absorber energía de las espumas en esta zona es prácticamente constante al requerir menor carga para deformar en mayor medida el material porque conserva sus propiedades estructurales. En algún punto de esta etapa comenzará el colapso plástico así como de las paredes en la espuma. [10]

La última región pertenece a la etapa de densificación, en donde la deformación ocurre en menor medida y sólo bajo la acción de cargas elevadas, por lo que no es representativo en su comportamiento. [29] Finalmente, las paredes de la espuma

pierden su integridad y colisionan unas con otras, lo que hace que la carga aplicada para comprimir el material sea mayor para lograr continuar con la deformación plástica. [17] La absorción de energía que presentan las espumas es un proceso eficiente gracias al correcto control que hay en la absorción de la energía cinética mediante el esfuerzo aplicado. La figura 6 muestra un esquema para las 3 etapas descritas anteriormente. [20]

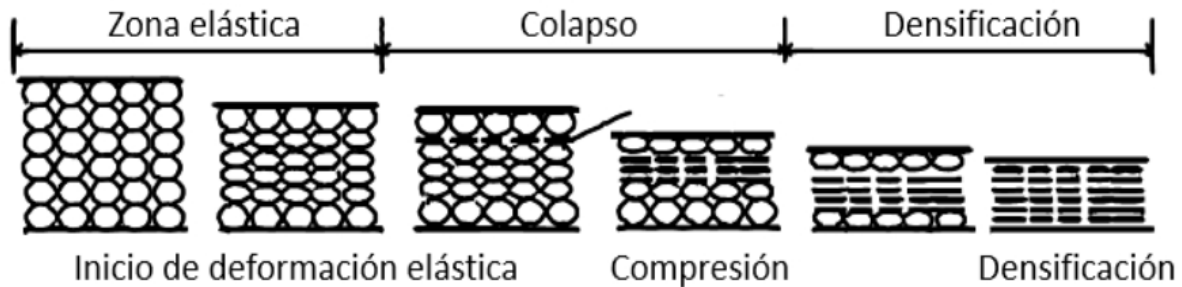


Figura 6. Mecanismo de deformación en espumas metálicas. [20]

En la figura 7 se presenta la comparación entre las curvas esfuerzo-deformación de compresión teóricas para una muestra en bulto y una espuma metálica. La finalidad de colocarlas en un mismo diagrama es visualizar que tienen una respuesta muy diferente ante la aplicación de cargas de compresión, y por lo tanto, repercute en la cantidad de energía que absorbe cada muestra. [8]

Las variables en la figura 7 expresan:

$\sigma_{pl}^{**}$  : *esfuerzo de compresión máximo alcanzado por el material sólido (bulto)*

$\varepsilon_1^{**}$  : *deformación elástica del material sólido (en bulto)*

$\varepsilon_2^{**}$  : *deformación plástica del material sólido (en bulto)*

$\sigma_{pl}^*$  : *esfuerzo de compresión máximo alcanzado por la espuma metálica*

$\varepsilon_1^*$  : *deformación elástica de la espuma metálica*

$\varepsilon_2^*$  : *deformación plástica de la espuma metálica*



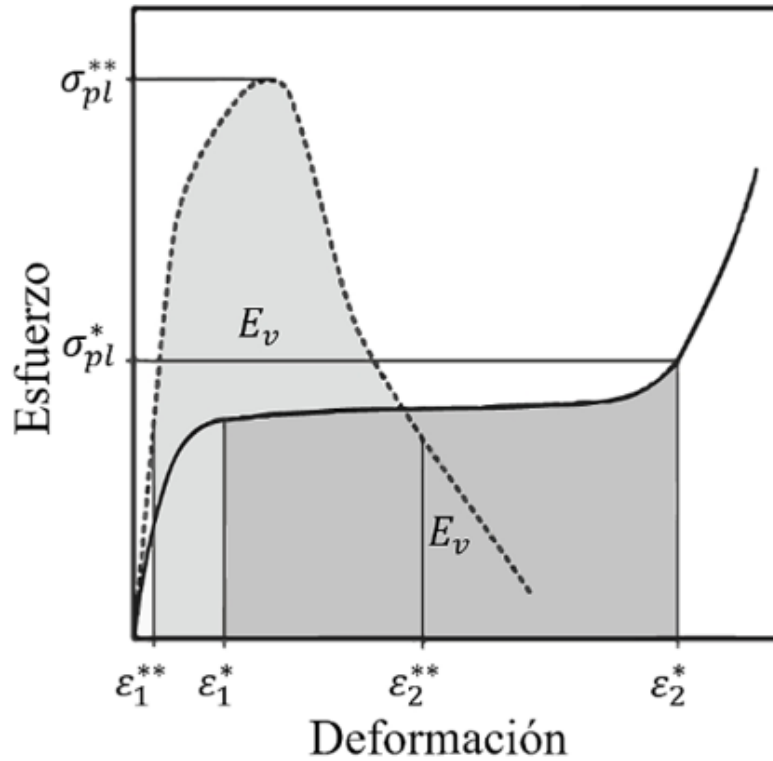


Figura 7. Comparación de las curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  a compresión correspondientes a un metal en sólido y en espuma. [8]

Por otra parte, una propiedad física que relaciona la densidad en los dos tipos de muestra bajo estudio, es la densidad relativa, expresándose como el cociente (ecuación 3) de la densidad de la espuma metálica entre la densidad de la aleación con la que se manufacturó. [17]

$$\rho_r = \frac{\rho_f}{\rho_a}$$

3

Donde:

$\rho_r$ : Densidad relativa

$\rho_f$ : Densidad de la espuma metálica

$\rho_a$ : Densidad de la aleación

La densidad relativa es muy importante para las espumas metálicas, al ser una propiedad relaciona la fracción de volumen del metal y del gas. Los metales celulares, idealmente deberían presentar valores de densidad relativa inferiores a 0.3. Sin embargo, en casos reales, las espumas típicamente tienen un intervalo de densidades relativas mayores que 0.3 pero menores que 1. [17]

La densidad de los metales porosos, en unidades absolutas o como densidad relativa, es su principal atractivo. Otra característica importante es la arquitectura celular de estos materiales, al poder tener heterogeneidad en propiedades como la densidad, como consecuencia de las fluctuaciones en la arquitectura de la espuma. [19]

### **1.5. Magnesio como material de ingeniería ligero**

Descubierto en 1774, el Mg es un metal del grupo de los alcalinotérreos. En la naturaleza, ocupa el sexto lugar en abundancia y conforma el 2% de la corteza terrestre. Este metal se encuentra naturalmente en los minerales: magnesita  $MgCO_3$  (27% Mg), dolomita  $MgCO_3 \cdot CaCO_3$  (13% Mg) y carnalita  $KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$  (8% Mg). Posee una alta capacidad para conformarse, soldarse, y amortiguarse. Sin embargo, no es viable someterlo a deformación en frío. [1]

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. El Mg puro (como otros metales por sí solos) tiene pocas aplicaciones ingenieriles. La mejora de sus propiedades físicas, mecánicas, estructurales y químicas se hace principalmente con el efecto de elementos aleantes. En la tabla 3 se presentan algunas propiedades para este elemento metálico. [4]

Tabla 3. Propiedades del Mg puro. [1]

<b>Estructura cristalina</b>	Hexagonal compacta (hcp)
<b>Densidad</b>	1.738 g/cm <sup>3</sup>
<b>Masa atómica</b>	24.305 g/mol
<b>Radio iónico</b>	0.65 Å
<b>Electronegatividad</b>	1.31
<b>Módulo de Young</b>	45 GPa
<b>Último esfuerzo de tensión</b>	80-180 MPa
<b>Elongación de fractura</b>	1-12%
<b>Punto de fusión</b>	650 °C
<b>Punto de ebullición</b>	1090 °C
<b>Capacidad calorífica específica</b>	1.05 kJ/(kg*K)
<b>Calor de fusión</b>	195 kJ/kg
<b>Conductividad térmica</b>	156 W/(m*K)
<b>Coefficiente linear de expansión</b>	26x10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>
<b>Contracción (sólido-líquido)</b>	4.2%
<b>Conductividad eléctrica específica</b>	22.4 m/(Ω*mm <sup>2</sup> )
<b>Potencial normal</b>	-2.37 V

El inicio de la producción de componentes de Mg fue a finales de la década de 1930, (exactamente en 1939) y desde entonces se implementaron piezas de Mg provenientes de fundición en automóviles; el ejemplo más famoso de ello, es el Volkswagen Beetle, en donde se utilizaron alrededor de 21000 t de aleaciones de Mg en 1960. [21] Con base en el éxito alcanzado al utilizar Mg, Volkswagen consumió alrededor de 42000 t de este material en 1972. [22]

Desafortunadamente, con el cambio de motores enfriados por aire a enfriados por agua, se redujo significativamente el uso de este metal. [22] Además, las pocas aleaciones disponibles eran de alta pureza, es decir, tenían un contenido alto de Mg y por lo tanto, su baja resistencia a la corrosión fue el factor principal que impidió

otras aplicaciones; es por eso que actualmente se continúa la investigación para contrarrestar el efecto de la corrosión en la matriz de Mg. [23]

Hoy en día, su desarrollo continúa principalmente en los sectores automotriz y aeroespacial para disminuir el peso en los componentes de sus vehículos y al mismo tiempo satisfacer las demandas ambientales para reducir el precio y las emisiones de combustible. Por ejemplo, en el Mercedes-Benz SLK la tapa del tanque de combustible se hizo a partir de una aleación de Mg, y la importancia del material con la que fue fabricado es que esta pieza se encarga de soportar la carrocería y ser la separación entre el asiento trasero y la cajuela. [21] Anteriormente, esta unión se daba a partir de soldadura de acero y aluminio y una pieza de fundición que contrarrestara el peso. Otras piezas que destacaron y lo posicionaron como la principal opción para fabricar esos componentes automotrices con algunos ejemplos incluyen:

- ✓ Caja de cambios en Volkswagen Passat, Audi A4 [22]
- ✓ Portón interior trasero en el vehículo Volkswagen Lupo hecho con la aleación AM50 [22]
- ✓ Paneles en Audi A8 [22]
- ✓ Marcos de asiento en el vehículo Buick park Avenue/Le Sabre [22]
- ✓ Volantes en Toyota lexus, Celica, Carina y Corolla [22]
- ✓ Llantas en porsche Carrera RS [22]

Aunque, el protagonismo de este material lo tengan las autopartes, sus aplicaciones se extienden a otros sectores, como al informático, en donde se requieren componentes de espesor delgado y por lo tanto ligeros, además de que el Mg posee resistencia a la radiación electromagnética. [21] Una ventaja adicional, es que sustituye a polímeros que no se han podido reciclar satisfactoriamente, teniendo un efecto positivo en el impacto ambiental que otro tipo de materiales no alcanzan a cubrir. [1]

## 1.6. Litio

Es el elemento metálico más ligero de la tabla periódica. A pesar de su ligereza extrema, no tiene aplicaciones ingenieriles por sí solo debido a su alta reactividad y por no tener carácter metálico. Sin embargo, puede utilizarse como elemento aleante para producir soluciones sólidas en materiales metálicos. Sus principales aplicaciones radican en baterías. En la tabla 4 se muestran un conjunto de propiedades para este metal alcalino. [24]

Tabla 4. Propiedades del Li puro. [24-26]

<b>Estructura cristalina</b>	Cúbica centrada en el cuerpo (bcc)
<b>Densidad</b>	0.53 g/cm <sup>3</sup>
<b>Masa atómica</b>	6.941 g/mol
<b>Radio iónico</b>	0.68 Å
<b>Electronegatividad</b>	0.98
<b>Último esfuerzo de tensión</b>	15 MPa
<b>Temperatura crítica</b>	2950 °C
<b>Punto de fusión</b>	180.54 °C
<b>Punto de ebullición</b>	1342 °C
<b>Capacidad calorífica específica</b>	2.997 J/(g*°C)
<b>Calor de fusión</b>	137 J/g
<b>Conductividad térmica</b>	71.2 W/(m*K)
<b>Calor de formación</b>	159.3 kJ/mol
<b>Calor de vaporización</b>	19460 J/g
<b>Resistividad eléctrica</b>	8.4 x10 <sup>-6</sup> Ω*cm
<b>Potencial normal</b>	-3.02 V

## 1.7. Sistema Mg-Li

Tal como lo indica la tabla 3, la estructura cristalina del Mg es hexagonal compacta, así que la solubilidad del Li en la fase  $\alpha$ Mg es relativamente alta, hasta 5.5% masa y 17% at. [27], y, con base en el diagrama de fases de la figura 11, se necesita 11% masa para formar la fase. Por debajo de 225 °C sólo es posible el deslizamiento del plano basal  $\{0001\}$   $\langle 1120 \rangle$ , junto con el de la macla piramidal  $\{1012\}$   $\langle 1011 \rangle$ . Generalmente, las aleaciones de colada y el Mg puro muestran una tendencia a la fragilización y a fallas intercristalinas, así como a fracturas en zonas con maclas o  $\{0001\}$  planos basales con granos grandes. arriba de 225 °C, nuevos planos basales  $\{1011\}$  son formados y el Mg muestra un buen comportamiento mecánico, por lo que es recomendable efectuar procesos de deformación plástica por encima de esa temperatura. [1]

El Mg es el elemento con mayor carácter metálico más ligero, es decir, su radio atómico es pequeño, en su red cristalina tiene espacio suficiente para colocar en los intersticios átomos más pequeños, como los del metal más ligero (Li), para formar una solución sólida intersticial que eleva la resistencia y ductilidad del material. El diagrama de fases para este sistema (figura 8) muestra la variación de la densidad en función del porcentaje de Li; la densidad de la aleación en composiciones desde 0.1-30% at. de Li, oscila entre 1.74-1.47 g/cm<sup>3</sup>, y es aproximadamente un 36% inferior con respecto al Al. En composiciones inferiores al 5.7% masa de Li, se tiene una fase ( $\alpha$ -Mg) de estructura cristalina hcp. Con adiciones mayores al 11% masa de Li, la estructura cristalina cambia a bcc. Debe tenerse en cuenta que la cantidad de Li no debe exceder del 16% masa, porque la ductilidad alcanzada a esa composición disminuye la resistencia mecánica y la buena capacidad de amortiguación. Además, cuando el contenido de Li es superior al 30% masa, la estructura cristalina cambia a fcc (cúbica centrada en las caras). [4]

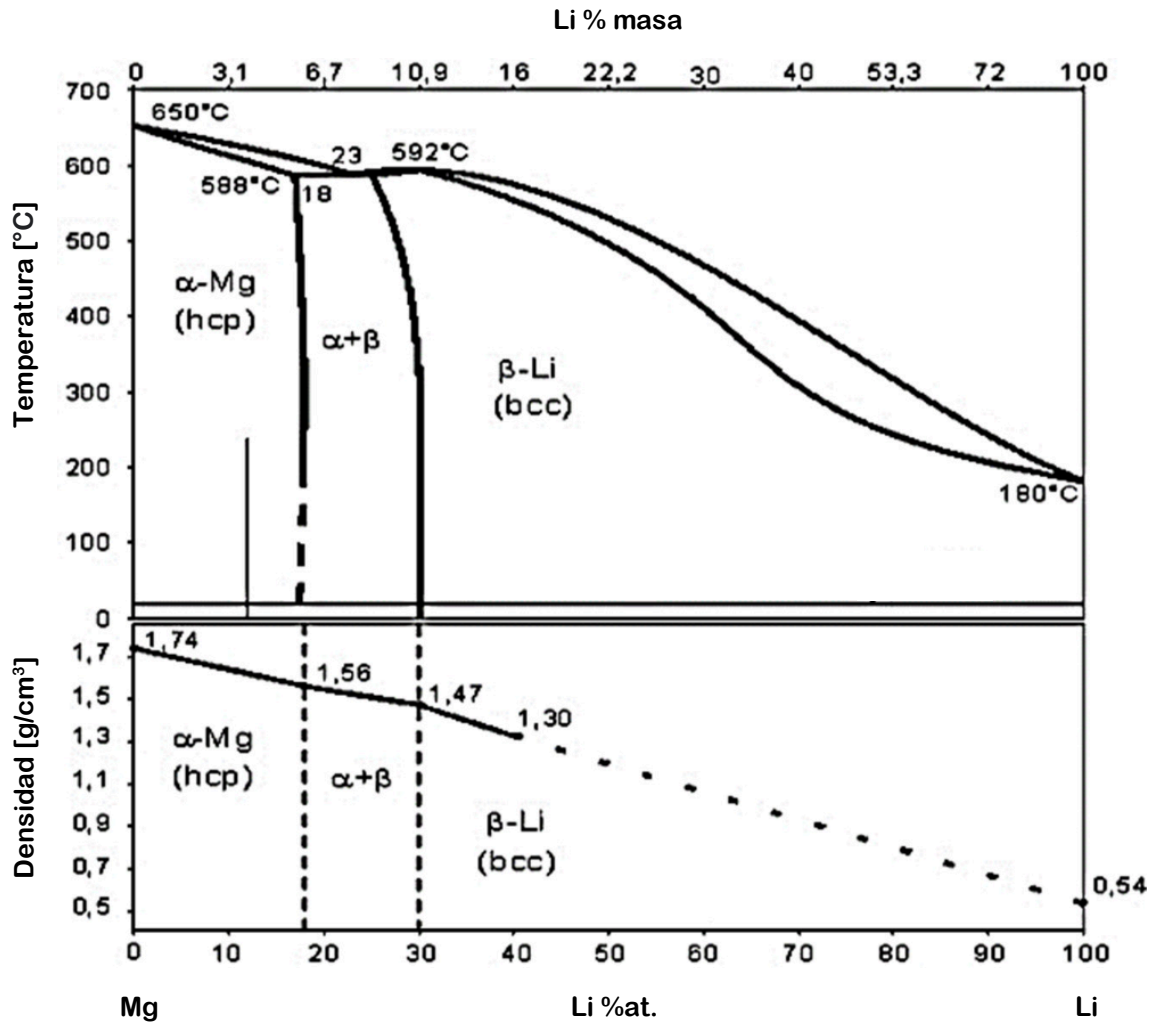


Figura 8. Diagrama de fases para el sistema Mg-Li. [6]

Otros métodos para mejorar sus propiedades incluyen tratamientos térmicos (recocido, normalizado, etc.), procesos de conformado mecánico (forja, laminación, extrusión, etc.) y formando sistemas de aleación más complejos, adicionando en cantidades específicas de elementos que promuevan el endurecimiento por precipitación. [6] El Al es un elemento ampliamente utilizado para reforzar las aleaciones de Mg-Li mediante la generación de soluciones sólidas y compuestos intermetálicos. [28]

Es preciso conocer todo sobre este sistema de aleación por permitir fabricar un material metálico que ofrece una elevada ligereza sin sacrificar resistencia. Hoy en día se continúa investigando el efecto real del Li en la matriz de Mg, porque, como sucede con otros elementos aleantes, se debe determinar en qué cantidades es conveniente adicionarlo para que no tenga un efecto negativo. Otro problema que existe al utilizar Li, es su carácter reactivo; aunque sea posible producir espumas metálicas ultraligeras, la inestabilidad de este elemento limita su uso en aplicaciones más prometedoras, por ejemplo, en la medicina, donde sería apropiado fabricar implantes porosos lo menos densos posibles. [1] [4]

### **1.- Hipótesis**

Las propiedades físicas, químicas y mecánicas en las espumas de Mg serán homogéneas al tener un solo tamaño de poro e incrementarán al adicionar Li, por lo que absorberán una mayor cantidad de energía.

### **1.- Objetivos**

*Objetivo general:*

- 1) Analizar las propiedades en espumas metálicas de celda abierta para determinar sus ventajas sobre sus equivalentes en bulto.

*Objetivos particulares:*

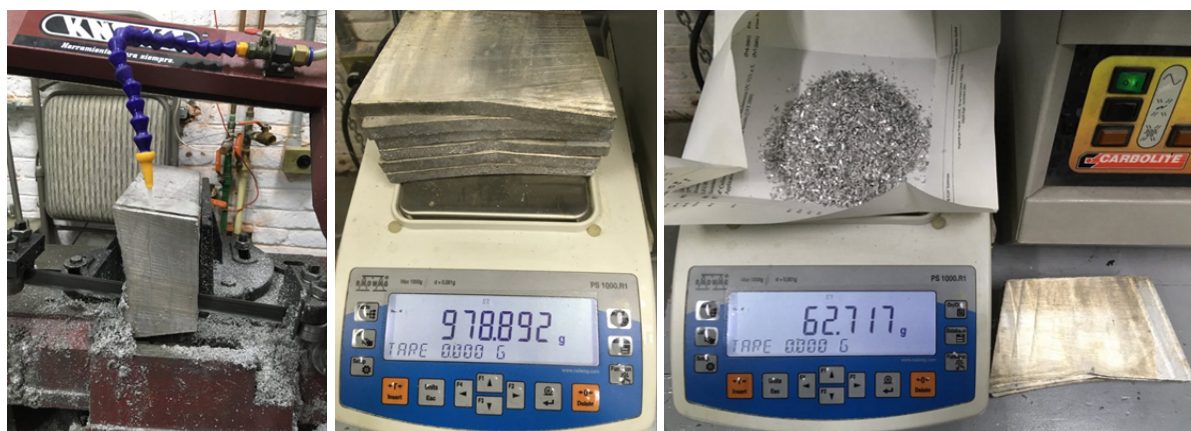
- 1) Obtener los parámetros óptimos para fabricar espumas de celda abierta base magnesio con tamaño de poro intermedio por el método de fundición/infiltración.
- 2) Determinar el efecto de una pequeña adición de litio en las propiedades de espumas metálicas de Mg-Li con el fin de compararlas mediante técnicas de caracterización.



## Capítulo 2. Desarrollo experimental

### 2.1. Preparación y composición química de la materia prima

Se calculó la cantidad de materia prima para un crisol cilíndrico a través de su volumen, requiriendo para cada carga 1078.6 g de Mg y 8.146 g de Li. Se fabricaron lingotes de Mg y de una aleación de Mg-Li con 2.5% at. De Li. Después, se cortaron y pesaron placas de Mg a partir de un lingote para emplearlo como materia prima, La carga del horno se ajustó con viruta de Mg, esto se muestra en la figura 9.



(a)

(b)

(c)

Figura 9. Preparación de materia prima, (a) Corte del lingote de Mg, (b) Determinación de la masa de las placas y (c) Pesaje de la viruta de Mg para completar la carga.

Para conocer la pureza del Mg con el que se prepararon las aleaciones, se realizó un análisis químico elemental por fluorescencia de rayos X con un espectrómetro marca Bruker modelo Titan S1 (figura 10). Finalmente, con la técnica “magnesium alloys” se tomaron 3 mediciones en diferentes zonas de las placas provenientes del lingote para obtener un resultado estadístico confiable. También se midió la pureza en muestras de viruta de Mg.

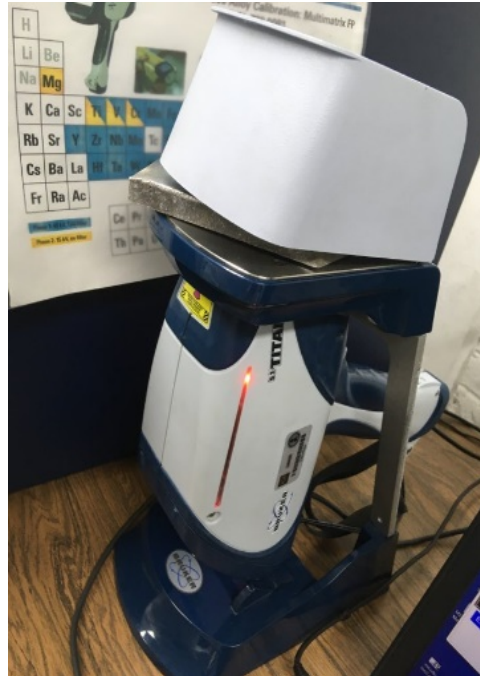
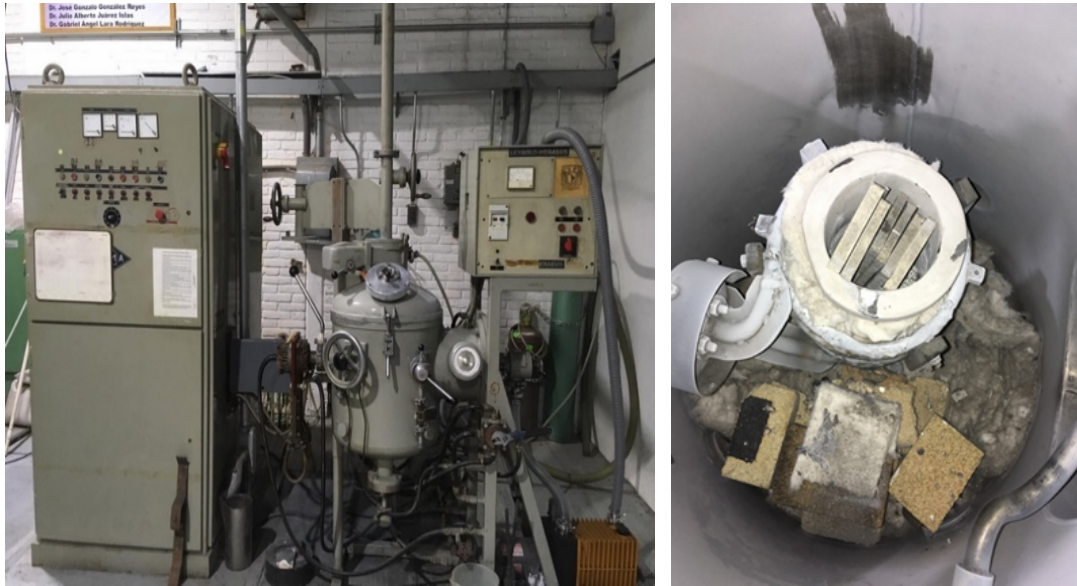


Figura 10. Espectrómetro de fluorescencia de rayos X.

## 2.2. Fundición de aleaciones

La carga se introdujo en el crisol (figura 11a), este se ingresó al horno de inducción marca Leybold-Heraeus modelo LK8 (figura 11b) y se purgó generando un vacío de  $1 \times 10^{-2}$  Torr, y después se suministró argón de alta pureza; este proceso se realizó por triplicado para tener una atmósfera inerte. La fusión se realizó durante 20 minutos aproximadamente, controlando los parámetros del proceso, principalmente la potencia y frecuencia del horno. Cabe mencionar que el proceso de colada se realizó dentro del horno, por lo que no hay riesgo de ignición al no existir contacto del metal líquido con el  $O_2$  durante su solidificación y enfriamiento.



(a)

(b)

Figura 11. Horno de inducción, (a) equipo completo y (b) cámara de fundición

### 2.3. Maquinado de probetas

Se llevó a cabo el maquinado de las probetas obtenidas por fundición usando el torno marca SANDU modelo WM210V-G (figura 12), con la finalidad de remover las impurezas del proceso de manufactura, ya que los óxidos son perjudiciales al refundir el material. Además, se mejoró el acabado superficial y se redujo el diámetro de las muestras. Subsecuentemente, en una cortadora marca KNOVA modelo KN SCM-712 se cortaron los cilindros previamente maquinados (figura 13) para obtener muestras cilíndricas de 6 cm de altura y 6.2 cm de diámetro. Las probetas con estas dimensiones se utilizaron para la producción de las espumas metálicas.



Figura 12. Maquinado de lingotes en el torno.



Figura 13. Corte de lingotes.

Se cortó la base del lingote, (figura 14a) para generar una pieza pequeña que se montó en la cortadora marca TROJAN modelo CT-250S (figura 14b) para obtener 6 muestras: 4 de la zona central y 2 de la región periférica de las muestras en bulto. En la figura 14c se ejemplifica lo anterior.

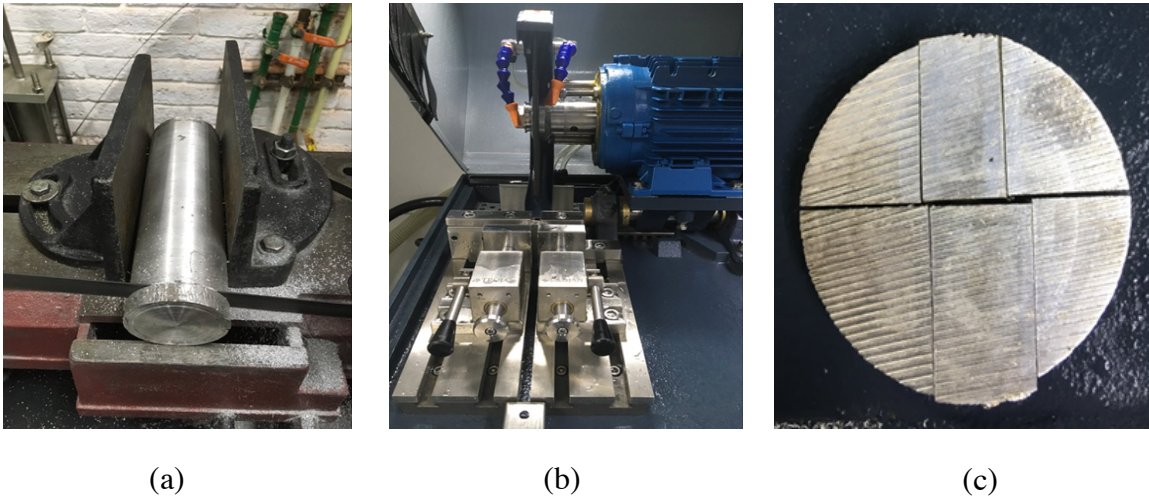


Figura 14. Obtención de las muestras en bullo, (a) Corte de la base del lingote, (b) División de la pieza en 6 partes y (c) Muestras de la periferia y centro del lingote.

#### 2.4. Fabricación de las espumas

Por otra parte, las espumas base Mg se hicieron a través del método fundición-infiltración de la aleación en estado líquido en una preforma sólida de sacrificio conformada por granos de NaCl bajo condiciones controladas. Primero, se preparó el material de sacrificio, triturando manualmente los granos de NaCl para reducir el tamaño de los cristales (figura 15a) y se pusieron en las cribas para tamizarlos (figura 15b).



Figura 15. Preparación de la preforma, (a) Trituración. (b) Colocación en cribas para su clasificación.

Se clasificaron los granos de NaCl para obtener la denominación 10 ASTM (tabla 1). Se utilizaron las cribas correspondientes a los límites superior e inferior del intervalo en ese poro (2.38 mm en la parte superior y 2.00 mm en la inferior), colocando la base y la tapa, como se muestra en la figura 16. Se realizó el tamizado manualmente para separar los cristales de NaCl retenidos en la criba de 2 mm de abertura.



Figura 16. Cribado y clasificación del tamaño de partícula.

Un componente imprescindible para la fabricación de espumas metálicas, son los empaques de grafito. Su importancia radica en que sellan el sistema para prevenir fugas en el mismo, impidiendo el paso del oxígeno proveniente del exterior y evitando derrames de metal en estado líquido. Tienen que elaborarse con cuidado, ya que no deben estar dañados o incompletos para que puedan cumplir su función.

## 2.5. Proceso de infiltración.

Una vez que estuvieron listas las probetas de las aleaciones base Mg, la preforma y los empaques de grafito, se procedió a ensamblar en un banco el sistema para fabricar las espumas, que consta de los componentes presentados en la figura 17.

- Platos (superior e inferior): El plato inferior se monta en el banco y con el superior se sella el sistema en la parte superior.
- Empaques de grafito: se ponen en las ranuras de los platos, a manera de que embonen adecuadamente, actuando como un sello.
- Crisol: Colocado encima del plato inferior, por dentro se sitúa la preforma y encima el lingote del material.
- Espárragos: Conectan ambos platos, se introducen en los huecos correspondientes de éstos, cuidando que no se giren al cerrar el sistema.
- Rondanas: se ponen dentro de los espárragos por encima del plato superior.
- Tuercas: al girarlas y apretarlas, cierran el sistema completamente.
- Preforma (NaCl): Se sitúa en la parte inferior del crisol.
- Cilindro de la aleación de Mg: Su función es generar la matriz metálica de la espuma.

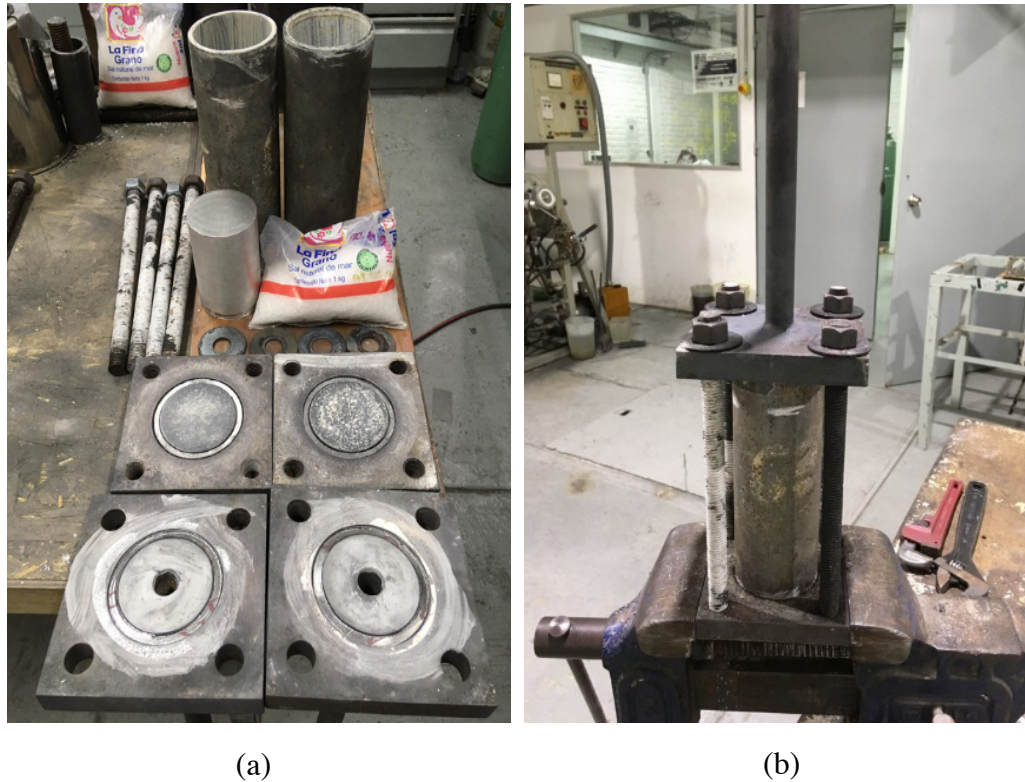


Figura 17. (a) Componentes del sistema de fabricación de espumas y (b) Ensamble del crisol.

Es importante mencionar que al apretar las tuercas cuando se está sellando el sistema, se debe hacer diagonalmente para asegurar que el plato superior baje constantemente y así no dañar los empaques, ya que, si esto sucede, se tendría que ensamblar nuevamente cambiándolos porque en éstos recae toda la responsabilidad desde el proceso de fusión. En la figura 17b se muestra cómo queda el reactor de las espumas ensamblado.

El sistema de válvulas con manómetro se acopló al crisol para realizar la purga del sistema; este proceso consiste en aplicar succión para generar vacío buscando eliminar el  $O_2$  y las impurezas presentes, posteriormente se introduce gas Ar a una presión controlada, repitiendo este ciclo tres veces para garantizar una atmósfera inerte al interior del crisol. El manómetro debe mantener constante la presión al cerrar la válvula del sistema. Después se ingresa al horno precalentado a  $750\text{ }^\circ\text{C}$



facilitando la infiltración de la preforma en la matriz de Mg. En la figura 18 se ilustran y señalan los componentes del sistema necesarios para la elaboración de espumas metálicas.

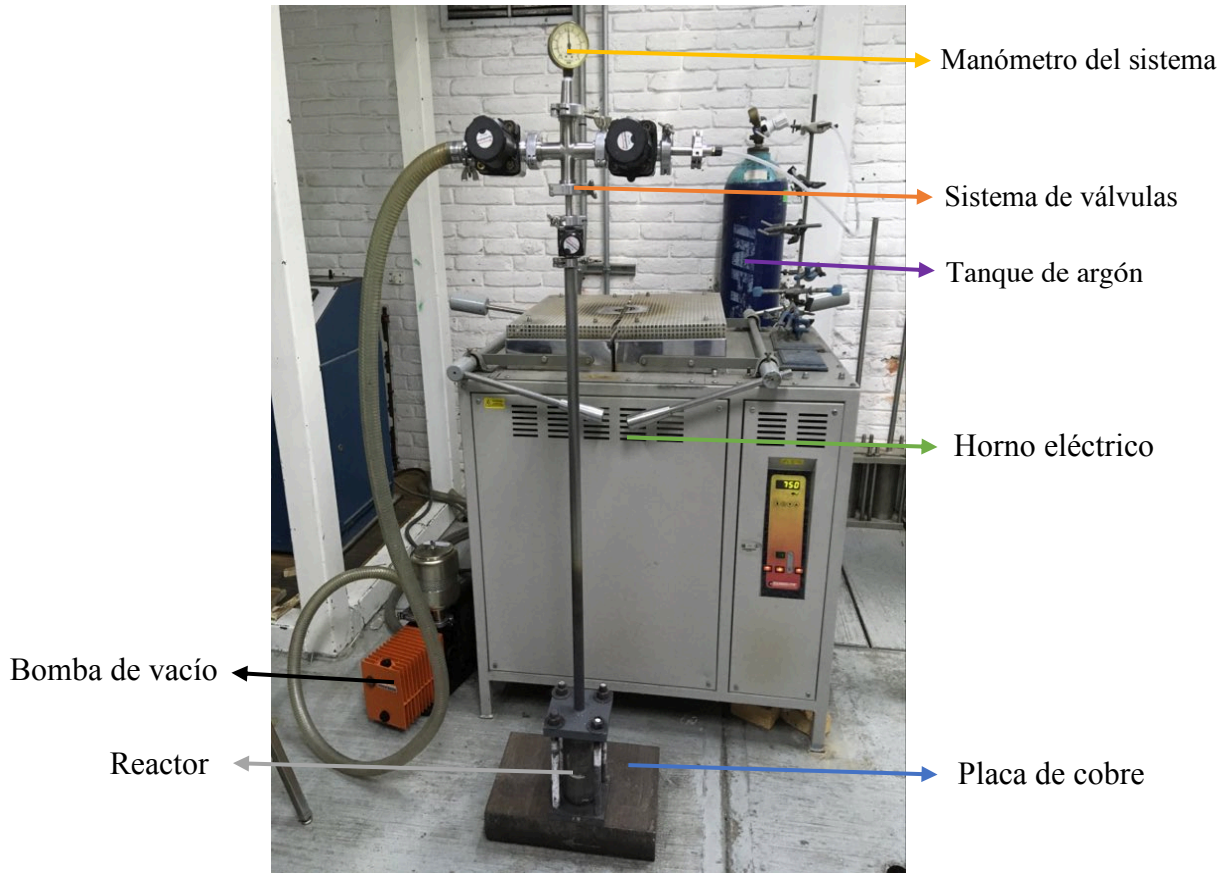
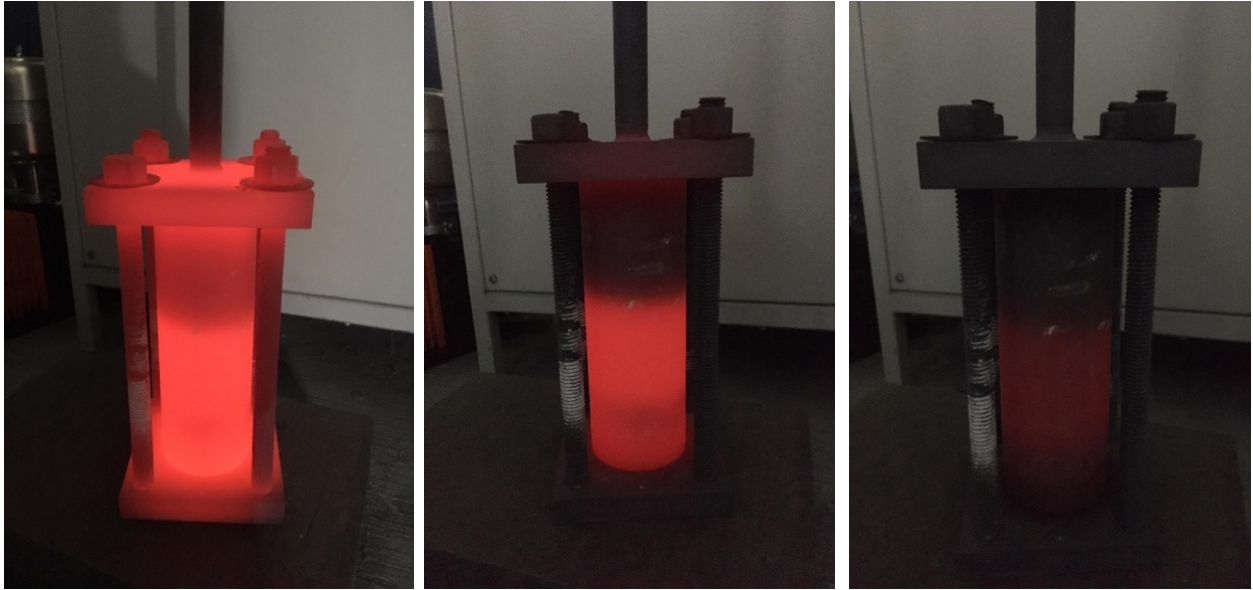


Figura 18. Sistema de válvulas e infiltración.

Después de asegurar que el sistema no tuviera fugas, se introdujo el reactor al horno. La presión durante la fusión fue modificada según la prueba realizada. En algunos casos se hizo vacío durante los primeros 10 minutos, y en otros, se mantuvo abierta la válvula del argón situando el valor de la presión en 0.5 bar. En las últimas pruebas sólo se realizaron las purgas tres veces y se cerraron ambas válvulas durante el proceso de fusión, abriendo la de argón que es la que aporta la presión de infiltración. En la figura 19 se muestran las diferentes etapas que tiene la espuma, a los 3 y 5 minutos al salir del horno, solidificando en la placa de cobre, eliminando el rechupe en el centro del material compuesto de NaCl+Mg(Li).



(a)

(b)

(c)

Figura 19. Etapas después de la infiltración. (a) Salida de la espuma del horno, (b) solidificación y (c) enfriamiento.

## 2.6. Remoción de la preforma

Para obtener la espuma metálica con buen acabado superficial y bajo peso específico, fue necesario eliminar la preforma. Esto se llevó a cabo lixiviando el material compuesto principalmente de Mg y NaCl después del proceso de infiltración. Para disolver el Mg, se trabajó en medio básico porque de acuerdo con la figura 20, con pH alcalino (entre 9 y 14) ocurre la pasivación del Mg.

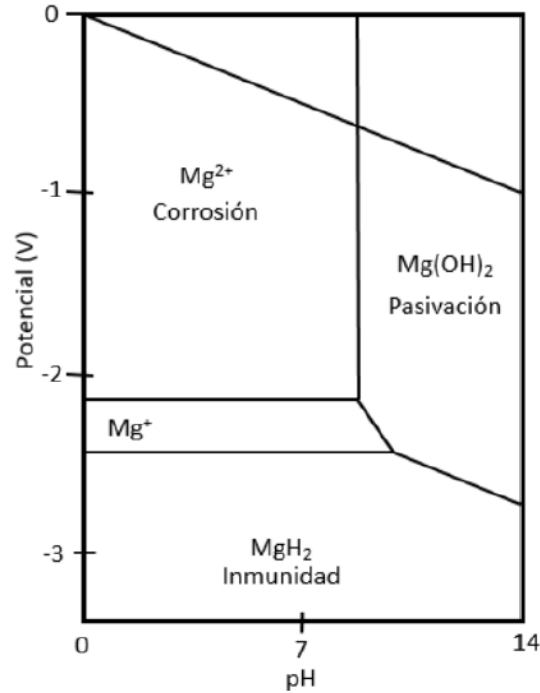
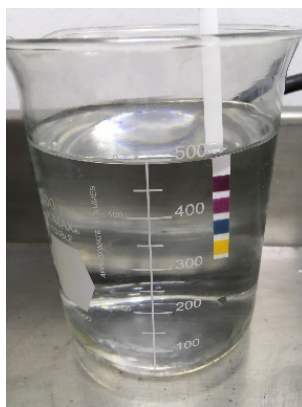


Figura 20. Diagrama de Pourbaix para el sistema Mg-H<sub>2</sub>O a 25 °C. [23]

Se preparó una disolución compuesta por 4.1 g de NaOH por litro de agua destilada. Se sumergió una tira de papel pH marca Fluka en la disolución para medir el pH (figura 21a), y el pH se determinó comparando la escala de colores con la tira de papel seca (figura 21b) para evitar variaciones en los tonos y por lo tanto se determinó que el valor de pH fue más cercano a 13.



(a)

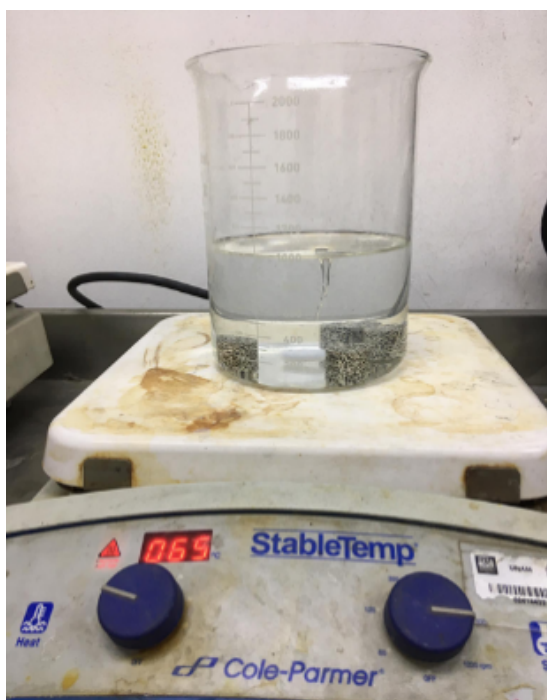


(b)

Figura 21. Preparación de la disolución. (a) Medición de pH y (b) Comparación con la escala para determinar el valor.

Consecutivamente, se agregaron 500 ml de esta disolución alcalina en un vaso de precipitados (que contenía las espumas en su interior), y, utilizando un agitador magnético marca Cole-Parmer modelo StableTemp empezó la disolución de la preforma mediante un vórtice generado a una velocidad de 700 rpm. La disolución se cambió cada vez que se observaba el agua turbia para evitar su saturación. Se incrementó la temperatura a 65 °C, con la finalidad de acelerar el proceso mostrado en la figura 22a.

Posteriormente, en el vaso con las espumas se vertió más disolución para alcanzar el nivel de operación del ultrasonido marca Cole-Parmer modelo 8890 empleado para disolver la preforma en el interior de las muestras a través de vibraciones (figura 22b). Finalmente, las espumas se colocaron en etanol en baño ultrasónico durante 15 minutos para remover impurezas. El tiempo total de disolución fue de 1 hora.



(a)



(b)

Figura 22. Etapas de la disolución en las espumas, (a) Agitación magnética y (b) Ultrasonido.

## 2.7. Preparación metalográfica de las muestras

Se realizó la preparación metalográfica de las muestras en bulto y en las espumas metálicas. Para ello, se utilizó una pulidora marca PRESI modelo minitech 250 SP1. El desbaste grueso se hizo con los grados de lija: 240, 320, y 600. El desbaste fino con las granulometrías: 1200, 2400 y 4000. La figura 23a muestra esta etapa de la metalografía en las espumas.

Para pulir las muestras se usó un paño,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en polvo de 1 micrómetro (pulido grueso), de 0.03 micrómetros (pulido fino) y un abrasivo compuesto por partículas de diamante en suspensión para quitar las rayas en el material y lubricarlo, ya que el agua oxida con facilidad al Mg (figura 23b). Por último, las piezas se colocaron en un vaso de precipitados con etanol dentro de un baño ultrasónico marca Cole-Parmer modelo 8890 durante 15 minutos para remover los residuos de alúmina mediante las vibraciones del equipo.

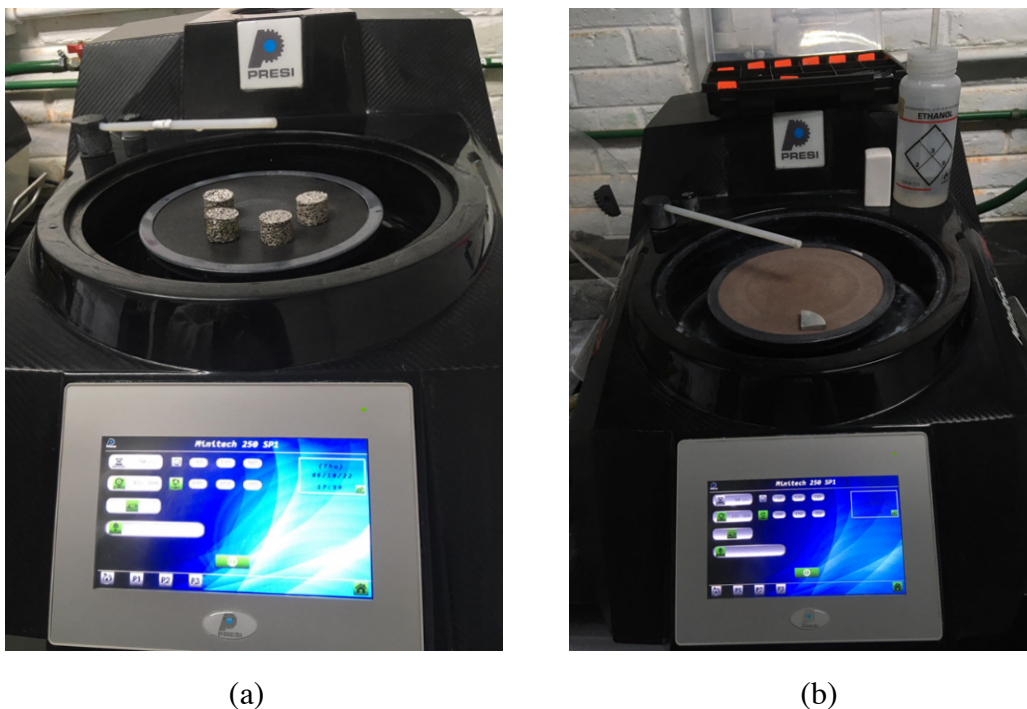


Figura 23. Piezas en la pulidora, (a) Desbaste de espumas y (b) Pulido de las muestras en bulto.

Para el revelado químico de las piezas pulidas, se preparó una disolución de ácido nítrico en alcohol, con 4 ml de  $\text{HNO}_3$  y 108 ml de etanol. [29] El reactivo se preparó en la campana de extracción y las muestras se atacaron por inmersión durante 10 segundos. Al término del revelado, se enjuagaron con etanol y secaron con aire para la toma de microestructuras en un microscopio óptico marca AmScope modelo T1A (figura 24).



Figura 24. Microscopio óptico utilizado.

## 2.8. Difracción de rayos X

Es una técnica semicuantitativa que se realizó con la finalidad de obtener la estructura cristalina del material e identificar las fases en las muestras en bulto, mediante interferencias producidas cuando las ondas se curvean (frente de onda) y dispersan al encontrar un obstáculo. Se utilizó un difractorómetro marca SIEMENS modelo D5000 (figura 25). Las piezas se colocaron en el porta muestras con plastilina para alinearla.



Figura 25. Difractómetro en funcionamiento.

## 2.9. Picnometría de helio

Esta técnica determina volúmenes en materiales sólidos continuos (muestras en bulto) o porosos (espumas). Se usó un picnómetro marca Quantachrome instruments modelo ultrapyc 1200e (figura 26) que usa He de alta pureza, porque al ser el elemento con el radio atómico más pequeño y un gas muy inerte, se tiene una mayor precisión en las mediciones. Su funcionamiento consiste en medir la variación de la presión en el sistema para determinar el volumen. Digitando la masa de la muestra antes de cada corrida, calcula la densidad usando el volumen que determina el equipo.



Figura 26. Picnómetro de helio.

## 2.10. Ensayo de dureza

Las muestras en bulto y las espumas de cada composición 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, el cual se muestra en la figura 27. Para todas las muestras, se utilizó una carga de 0.025 kgf (245.2 mN), durante 15 segundos, utilizando un indentador punta diamante para generar la huella a medir y determinar la microdureza en cada zona de las muestras en bulto y de las espumas metálicas tal como se muestra en la figura 28. Se hicieron 10 mediciones en cada muestra, siguiendo los parámetros de la norma ASTM E384 “método de prueba estándar para microdureza de materiales”. [30]



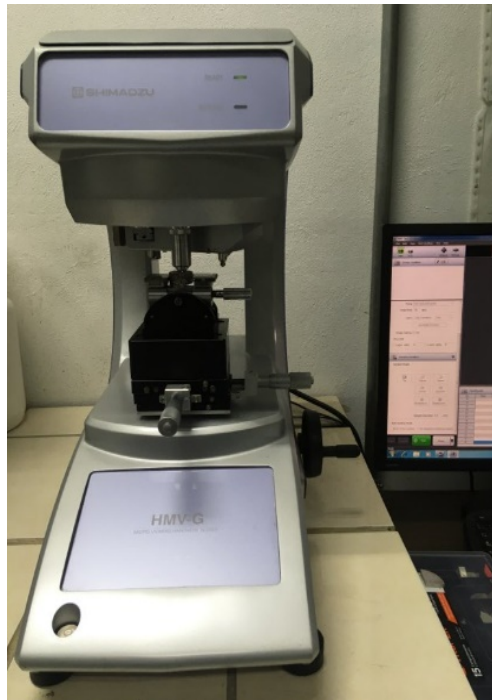
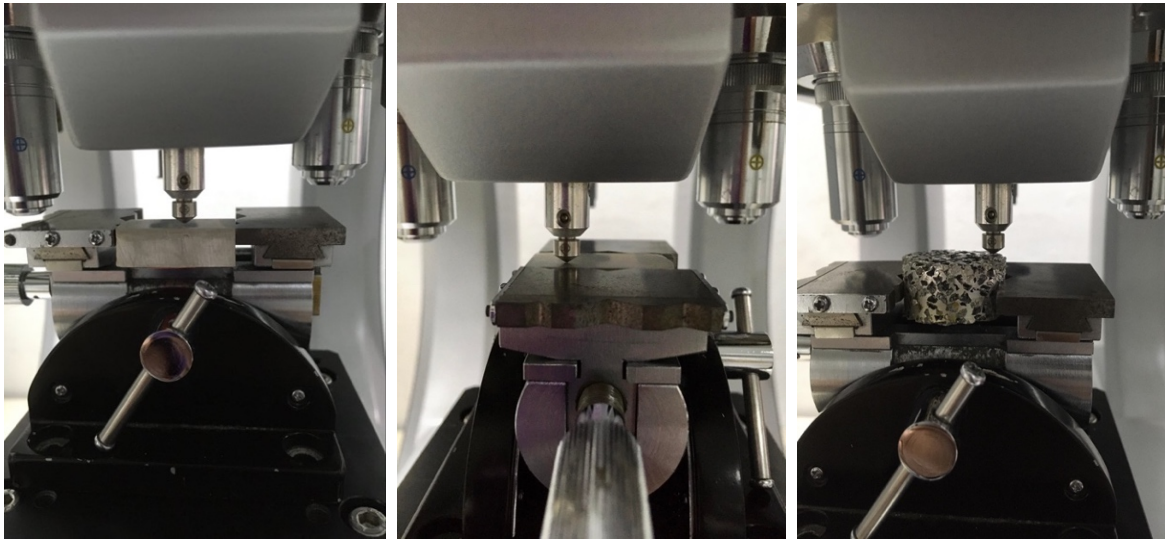


Figura 27. Durómetro Vickers.



(a)

(b)

(c)

Figura 28. Ensayo de dureza en las todas las muestras. (a) Periferia de la muestra en bulto, (b) Centro de la muestra en bulto y (c) Espuma metálica.

## 2.11. Ensayo de compresión

Se realizó el ensayo de compresión uniaxial en las probetas de ambas aleaciones, con el objetivo de obtener las propiedades mecánicas mediante las curvas esfuerzo-deformación. Primero, se montaron las muestras en bulto de Mg y Mg-Li en una máquina universal de ensayos mecánicos marca Instron, modelo 8802 (figura 29), este equipo tiene una carga máxima de 250 kN a una velocidad de deformación de 0.5 mm/min.



Figura 29. Máquina universal de ensayos mecánicos Instron 8802.

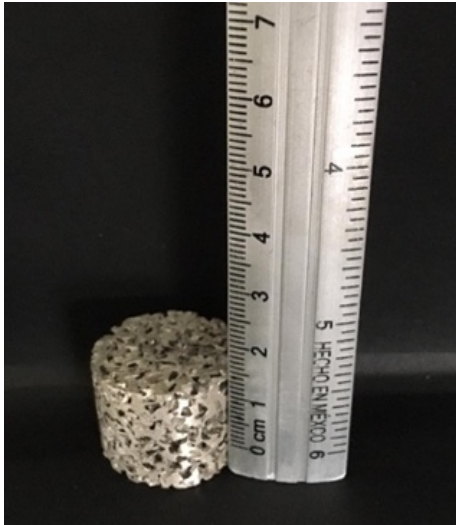
Para generar las curvas esfuerzo-deformación de las espumas, se efectuó el ensayo en una máquina universal de pruebas mecánicas marca Instron modelo 5500R (figura 30), aplicando una carga de 10 kN, se trabajó a la misma velocidad de 0.5 mm/min, hasta alcanzar una deformación del 80%. Al montar la pieza, si el espécimen hiciera contacto con algún desnivel, éste alinea la muestra para que

quede completamente paralela; esto asegura un resultado confiable. Se utilizaron máquinas universales distintas porque las muestras en bulto necesitan una mayor cantidad de carga para ser deformadas, y primero se efectuó el ensayo en las espumas metálicas en el equipo que suministra menos carga. El ensayo se hizo bajo la norma ASTM E9 “métodos de prueba estándar para ensayos de compresión de materiales metálicos” [31], cumpliendo la relación  $L/D= 0.8$ , teniendo un diámetro de 25.4 mm y una altura inicial de 20 mm, tal como se ilustra en la figura 31.

Se montó la muestra en el equipo (figura 32) y con la curva esfuerzo-deformación se determinaron propiedades mecánicas como el esfuerzo de cedencia, el esfuerzo a la rotura y la energía máxima de absorción en diferentes porcentajes de deformación. Se ensayaron tres probetas a temperatura ambiente con el fin de evaluar la reproducibilidad del comportamiento mecánico de las espumas.



Figura 30. Máquina universal de pruebas mecánicas Instron 5500R.



(a)



(b)

Figura 31. Dimensiones bajo norma para las espumas metálicas, (a) Altura y (b) Diámetro.

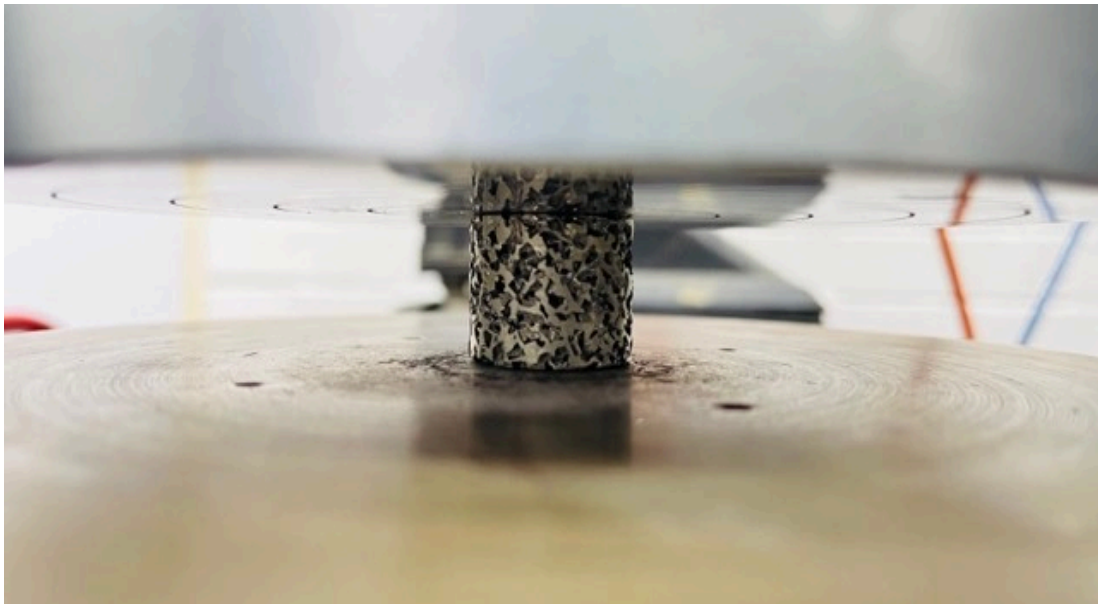


Figura 32. Espuma metálica montada en la máquina universal de ensayos mecánicos.

## Capítulo 3. Resultados y discusión

### 3.1. Fundición de aleaciones

Los cilindros de Mg y Mg-Li fueron extraídos del crisol con una prensa hidráulica marca MIKEL'S modelo TK4 (figura 33). Las dimensiones de las probetas de colada fueron aproximadamente de 18 cm de altura (figura 34) y 6.3 cm de diámetro. Las probetas de las espumas tuvieron el mismo diámetro, pero una menor altura, oscilando entre 10 y 12 cm (figura 35b).



Figura 33. Extracción de probetas en la prensa.



Figura 34. Cilindros producidos por fundición de Mg y Mg-Li.

Después del enfriamiento, en todas las muestras (dentro del crisol), se observó que en la base quedó el metal infiltrado (figura 35a). Para extraer las probetas, fue necesario utilizar la prensa hidráulica (figura 33). En la figura 35b se muestra el rechuce en la parte superior del lingote, siendo un resultado esperado ya que es poco probable que este defecto se ubique en la espuma.

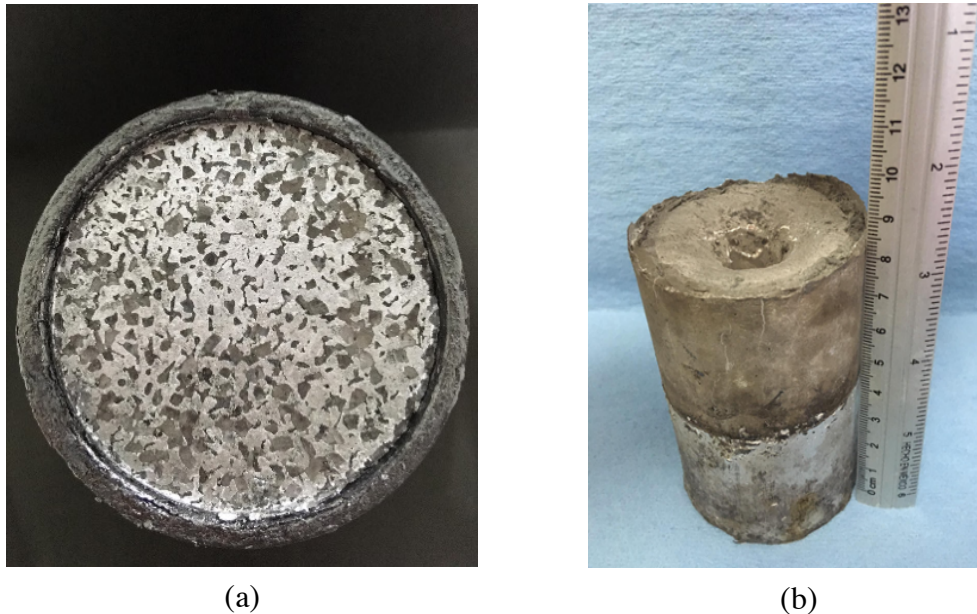
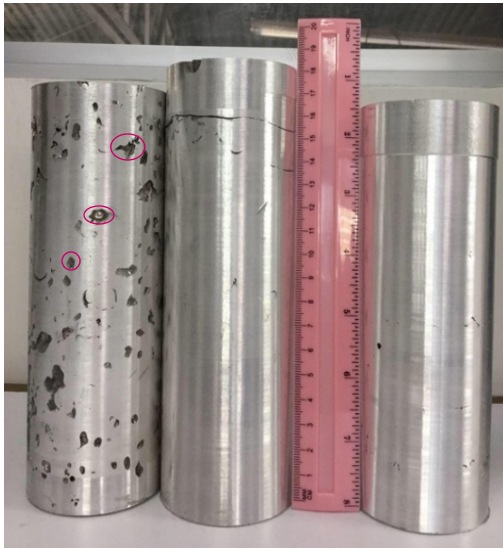


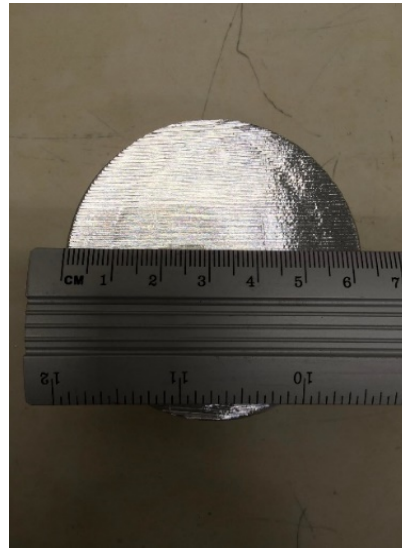
Figura 35. (a) Espuma dentro del crisol y (b) Probeta extraída del crisol.

### 3.2. Maquinado de probetas

Con el careado de las probetas se redujo el espesor y diámetro de los cilindros, además, este proceso eliminó los óxidos e impurezas generados durante la fusión de las aleaciones. El rechuce quedó en la parte superior de los cilindros (figuras 34 y 35b), no obstante, se observa la presencia de defectos por contracción líquido-sólido en algunas probetas maquinadas (marcados en la figura 36), lo cual se atribuye a la colada al interior del horno, donde no es posible controlar la solidificación del material. Sin embargo, no es un factor crítico tener estos poros, ya que los defectos generados en la primera fusión del material en el interior de la pieza desaparecieron en el proceso de infiltración. El maquinado de las espumas permitió determinar visualmente si tuvo lugar este proceso (figura 37).



(a)



(b)

Figura 36. Cilindros careados, (a) Altura de 18 cm y (b) Diámetro de 6.2 cm después del maquinado.



(a)

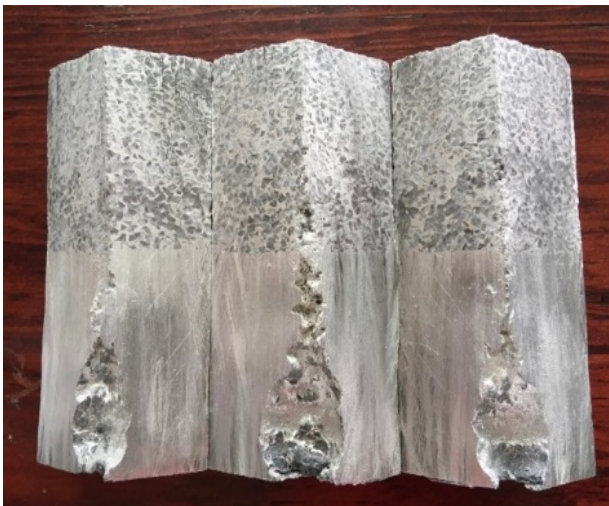


(b)

Figura 37. Maquinado del lingote, (a) Muestra montada en el torno y (b) Cilindro careado.

Para generar las dimensiones requeridas en las espumas, cada cilindro se cortó en 3 partes, y se montó cada una de ellas en el torno para su maquinado (figura 38). Tras realizar los cortes en la probeta, se observa que los cristales de NaCl quedaron dispersos en la matriz de Mg (figura 38a). Esto indica que el material tuvo una buena respuesta al proceso de infiltración, principalmente por la temperatura de operación (750 °C), 100 °C arriba del punto de fusión del Mg, esta temperatura fue con el objetivo de disminuir la viscosidad en el material y aumentar la fluidez para facilitar la infiltración de la preforma, sin llegar al punto de fusión de ésta (800 °C).

De igual modo, se observa que el rechupe afectó la zona donde sólo hay Mg, lo cual es deseable, porque así no se afecta la integridad de la espuma. La placa de Cu favoreció que la contracción líquido-sólido ocurriera en la parte superior, que es la última en solidificar. De acuerdo con la figura 29b, donde se muestra que en la base del reactor se observa una tonalidad anaranjada más oscura, indicando que en esa zona (perteneciente a la espuma) hay una menor temperatura, y que durante el enfriamiento del sólido la parte inferior es la primera en ponerse oscura, o bien, en enfriar (figura 29c).



(a)



(b)

Figura 38. Obtención de muestras, (a) Corte del lingote y (b) Maquinado de la espuma.



En la figura 39, se muestran las probetas con las dimensiones requeridas obtenidas después de tornearse el material compuesto de NaCl+Mg(Li), porque el NaCl sirve como refuerzo, es por eso que se maquinan antes de llevar a cabo la eliminación de la preforma.



(a) (b)  
Figura 39. Corte de las espumas, (a) Después del maquinado y (b) Material compuesto de NaCl+Mg(Li).

### 3.3. Remoción de la preforma

La disolución en medio básico fue exitosa para las espumas fabricadas con con los parámetros: 0.5 bar de presión de fusión hasta 1.5 bar de infiltración durante 15 minutos. En ambas muestras se logró un buen acabado superficial, destacando la espuma de Mg-Li (figura 46). Se asegura que fue una buena disolución porque la preforma de NaCl se removió en los niveles esperados, no hubo reacción del NaOH con la preforma, por lo que no existió el encapsulamiento del NaCl o la formación de algún material compuesto en las interconexiones. El tiempo de remoción de la preforma fue bajo, además de que no es necesario utilizar grandes cantidades de la disolución, ya que la mayor concentración de la preforma que se elimina ocurre

en la primera etapa de la lixiviación. En la tabla 7 se presentan las masas de las espumas antes y después de la eliminación de la preforma, además del porcentaje de porosidad calculado con la ecuación 1.

En la tabla 5 se reúnen todas las pruebas realizadas para determinar los parámetros idóneos de fabricación de las espumas metálicas de Mg. Se indican las variables de tiempo y de presión de infiltración. Los experimentos iniciaron desde presión de vacío ( $10^{-3}$  Torr), aumentándola en cada prueba hasta completar todo el espectro del manómetro, empleando presión de Ar para infiltrar, suministrándola de manera gradual en las presiones más altas, es decir, 1.5, 1.8 y 2 bar. Los valores reportados son el promedio de 3 muestras representativas de cada prueba.

Tabla 5. Porosidad de las espumas de Mg tras disolverlas (para todas las pruebas).

<b>Condición inicial de presión</b>	<b>Presión de infiltración [bar]</b>	<b>Tiempo de infiltración [min]</b>	<b>Masa con NaCl [g]</b>	<b>Masa sin NaCl [g]</b>	<b>Porosidad [%]</b>
Desde vacío	0	25	19.174	9.353	51.220
	0.1	25	19.043	8.671	54.466
	0.2	25	18.891	8.347	55.815
	0.3	25	18.752	8.136	56.613
	0.4	25	18.605	8.543	54.082
	0.5	25	18.417	10.074	45.300
	1	25	19.086	13.810	27.643
	1.5	25	19.346	12.052	37.703
	2	25	19.553	11.315	42.132
Desde Ar manteniéndola en 0.5 bar	2	15	16.598	10.646	35.860
	1.5	15	17.855	12.106	32.198
	1.8	20	17.867	11.289	38.816
	2	25	17.889	10.003	44.083
0.5 bar	1.5	15	17.910	6.194	65.416

Como se puede observar, la porosidad más elevada se obtuvo en la última prueba, es por esto que se utilizaron los mismos parámetros para producir la de Mg-Li. Por otra parte, en la tabla 6 se presentan los valores de  $\Delta H$  de reacción y  $\Delta S$  a temperatura ambiente (25 °C o bien, 298 K) del LiCl y NaCl.

Tabla 6. Entalpía de reacción y Entropía para sales a 298 K [32]

Compuesto	$\Delta H_{rxn}$ [cal/mol]	$\Delta S$ [cal/mol]
NaCl	-98620	17.24
LiCl	-96900	14.17

Se procedió a calcular el valor de  $\Delta G$  para ambas sales a esa temperatura, según la ecuación 4.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad 3$$

$$\Delta G_{NaCl} = -\left(98620 \frac{cal}{mol}\right) - (298 K)\left(17.24 \frac{cal}{mol}\right) = -103757.52 \frac{cal}{mol}$$

$$\Delta G_{LiCl} = -\left(96900 \frac{cal}{mol}\right) - (298 K)\left(14.17 \frac{cal}{mol}\right) = -101122.66 \frac{cal}{mol}$$

Debe recordarse que la energía libre es un criterio termodinámico que sirve para saber qué tan estable es un sistema. Esta es la razón del cálculo, por lo que, al tener un valor menor de  $\Delta G$  para el NaCl, implica que es un compuesto más estable a temperatura ambiente. Por lo tanto, se especula que a 750 °C se forma LiCl durante el proceso de infiltración, al ser este compuesto menos estable 298 K.

Tabla 7. Masa y porosidad de las espumas metálicas con los parámetros adecuados de fabricación.

<b>Espuma</b>	<b>Masa con NaCl [g]</b>	<b>Masa sin NaCl [g]</b>	<b>Porosidad [%]</b>
Mg	17.910	6.194	65.416
Mg-2.5% at. Li	18.564	6.479	65.099

De acuerdo con la tabla 7, las espumas se infiltraron adecuadamente suministrando al sistema 1.5 bar de presión durante 15 minutos; con estos parámetros se obtuvo la porosidad más elevada y el mejor acabado superficial (figura 40), lo que las hace un producto entregable.



Figura 40. Espuma metálica de Mg-Li.

### 3.4. Preparación e interpretación metalográfica

En la figura 41 se presentan las zonas periféricas y centrales de las muestras en bulto para ambas composiciones después del revelado químico. En la figura 41a se muestran granos grandes y equiaxiales de Mg, y en la figura 41b se nota una disminución en el tamaño de grano a nivel macroscópico con la adición de Li, teniendo una zona columnar (en la periferia) y una equiaxial (en el centro) de ambas muestras.

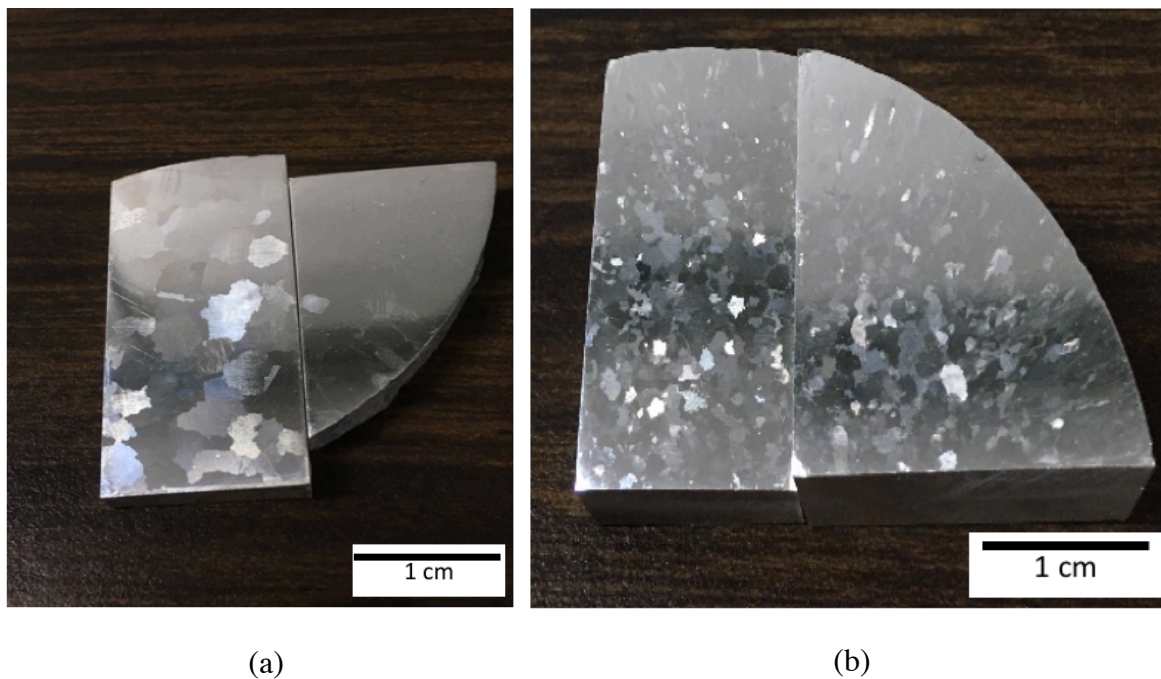


Figura 41. Muestras en bulto pulidas y atacadas, (a) Mg y (b) Mg-Li.

En las microestructuras correspondientes a la periferia de las aleaciones, se observa la presencia de maclas (marcadas en la figura 42), como una posible respuesta a la solidificación y enfriamiento del Mg, producidas por algún esfuerzo cortante durante las contracciones que sufre el material durante los cambios en la microestructura. Este comportamiento es característico y más notorio en la muestra de Mg puro, además, el tamaño de grano es grande y las maclas se encuentran concentradas en el límite de grano (figura 42a).

En la muestra de Mg-Li (figura 42b) existe un tamaño de grano más pequeño y menos equiaxiales que los de Mg. Con base en otras investigaciones, se observa que el Li actúa como un refinador. Además de que promueve la cristalización columnar del Mg. [33]

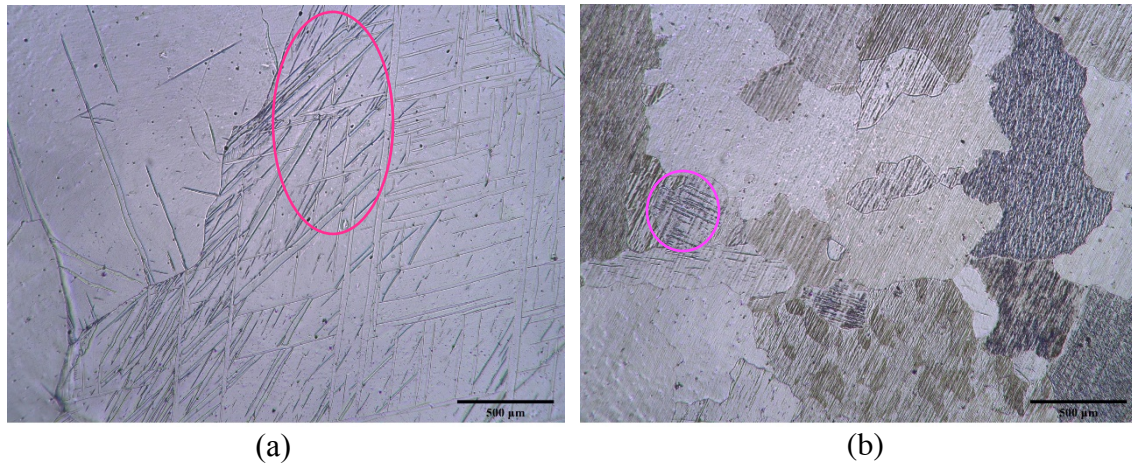


Figura 42. Microestructura de la periferia de las muestras en bulto a 50X, (a) Mg y (b) Mg-2.5% at. Li.

En la figura 43 se tienen las muestras del centro para ambas aleaciones. Nuevamente, se corrobora el comportamiento estructural de la refinación del grano en la muestra que contiene Li, aunque en estas muestras el tamaño de grano es ligeramente más grande porque la solidificación fue más lenta en la zona central.

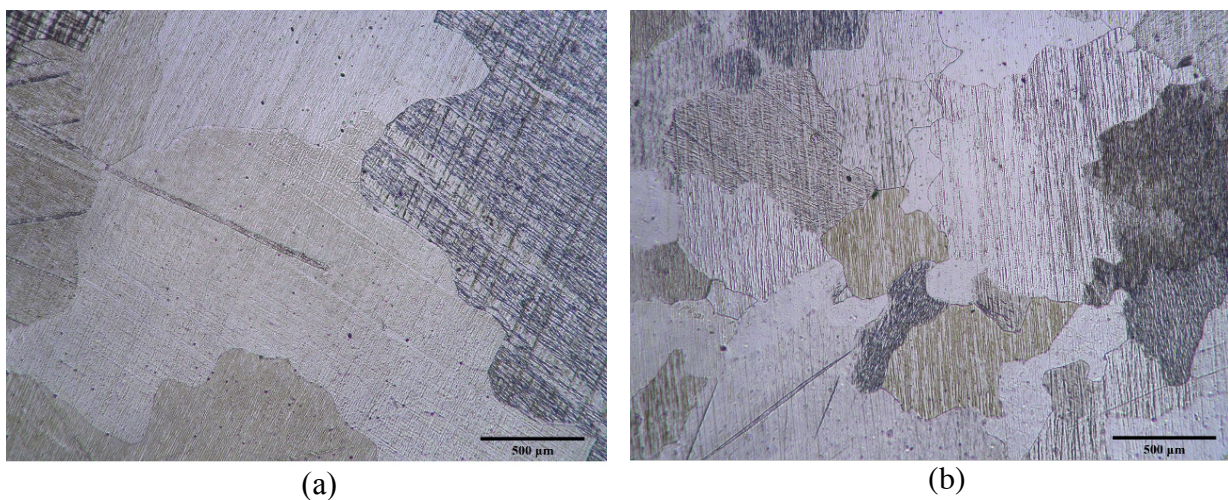


Figura 43. Microestructura del centro de las muestras en bulto a 50X, (a) Mg y (b) Mg-2.5% at. Li

En la figura 44 se presentan las microestructuras correspondientes a las espumas, en donde se observa que la microestructura difiere con las de las muestras en bulto, pero son muy similares en las espumas sin importar la composición. Se observan los poros (en negro) y sus interconexiones. La microestructura corresponde a la fase  $\alpha$ Mg, ya que es la única fase que se alcanza a ver y es la que se espera de acuerdo con el diagrama de fases en el sistema Mg-Li.

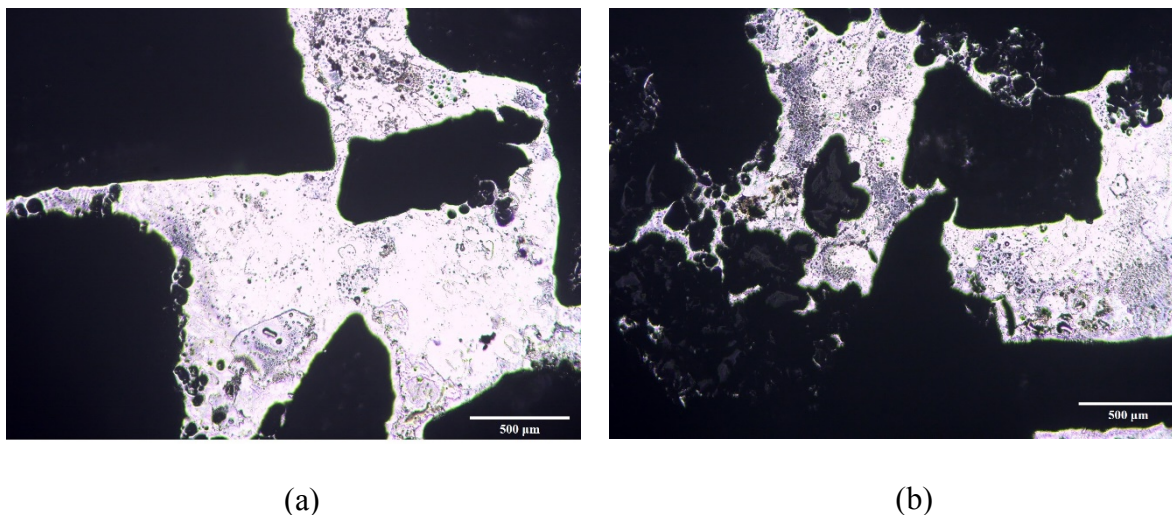


Figura 44. Microestructuras de espumas metálicas a 50X, (a) Mg y (b) Mg-Li.

### 3.5. Fluorescencia de rayos X

El lingote de Mg usado como materia prima principal en la fabricación de las aleaciones mediante fundición, tuvo un alto contenido de Mg y la presencia de Si y Mn como impurezas (tabla 8). Al resultar elevada la pureza en la materia prima, se logró la composición deseada para los lingotes base Mg realizados mediante fundición.

Tabla 8. Composición del lingote de Mg a través de FRX.

<i>Metal base</i>	<i>Impurezas</i>	
<b>%Mg</b>	<b>%Si</b>	<b>%Mn</b>
99.91	0.03	0.01

Por otra parte, en la tabla 9 se observa que la viruta presentó 5 veces más impurezas de Si, con trazas totales de 6 elementos, resultando menos puro; por tal motivo, se utilizó sólo para ajustar y completar la carga que no fue posible agregar en forma de lingote. Para la fusión de las espumas, se prescindió de la viruta, porque al aplicar vacío durante la purga del sistema, pudo ocurrir la succión de las partículas de Mg y la obstrucción del sistema de válvulas.

Tabla 9. Composición de la viruta de Mg a través de FRX.

<i>Metal base</i>	<i>Impurezas</i>					
<b>%Mg</b>	<b>%Si</b>	<b>%Fe</b>	<b>%Mn</b>	<b>%Cr</b>	<b>%Ni</b>	<b>%Ti</b>
99.47	0.15	0.05	0.05	0.03	0.01	0.01

### 3.6. Difracción de rayos X

Para las dos aleaciones (muestras en bulto) , se obtuvieron los planos cristalográficos de la fase  $\alpha$ Mg correspondientes a los picos característicos de ambos difractogramas. Las fases de Li no fueron detectadas mediante esta técnica de caracterización, debido a que con la cantidad agregada de este elemento, este elemento se ubica en forma de solución sólida intersticial. En la figura 45 se encontraron en total 8 planos para el Mg, teniendo mayor intensidad en los 2 primeros picos.



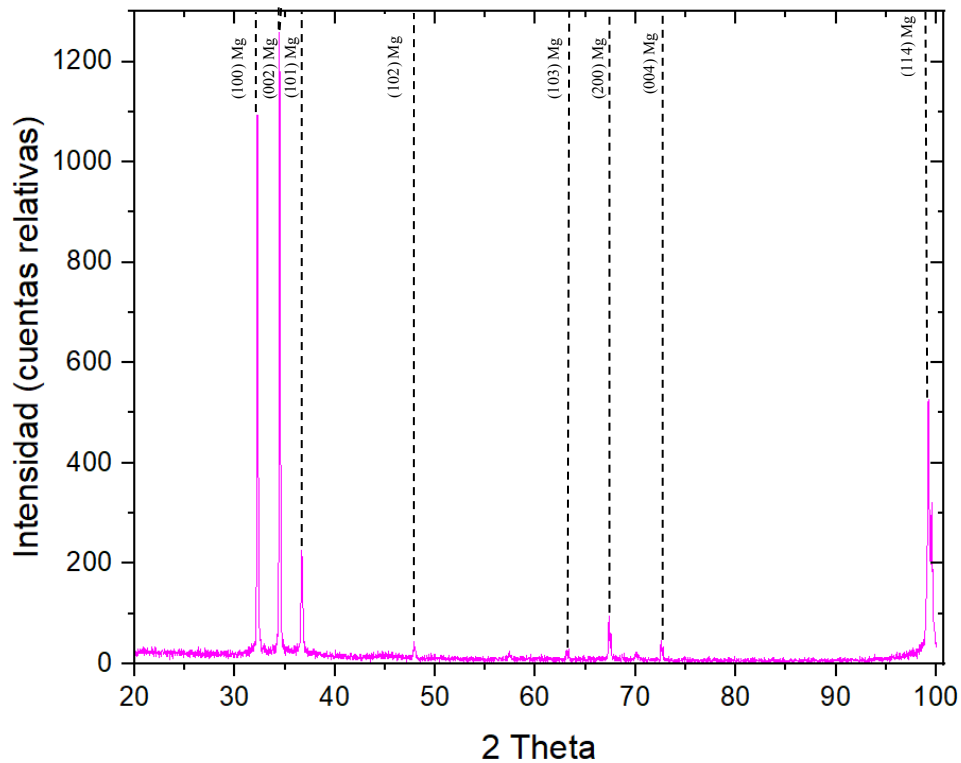


Figura 45. Difractograma para la muestra en bulto de Mg.

En el difractograma de la muestra de Mg-Li (figura 46) se observa que el pico en la posición 32.39 en el eje “x” ( $2\theta$ ) alcanzó una mayor intensidad, pasando de 1100 cuentas relativas a 1750 aproximadamente, convirtiéndolo en el de mayor altura e intensidad del difractograma. Por otra parte, el pico de la posición 34.627 de la figura 45 pasó de 1250 cuentas relativas a 200, disminuyendo significativamente en el caso del Mg-Li. También se observa que desapareció el pico de la posición 72.830, por lo que el plano (004) no existe en la muestra de Mg-Li.

Sin embargo, se encontraron 4 planos adicionales que no se presentan en el difractograma de Mg (figura 44) en las posiciones 57.6119 (110), 68.9552 (112), 70.3172 (201) y 97.0827 (211). El pico de la posición 48.0597 incrementó su intensidad en aproximadamente 150 cuentas relativas en la aleación de Mg-Li. Por último, se encontró que el pico de la posición 99.602 pasó de 500 cuentas relativas

(figura 45) a sólo 200 (figura 46). Al comparar ambas aleaciones, se comprueba la existencia de la solución sólida intersticial, correspondiente a la fase  $\alpha$ Mg.

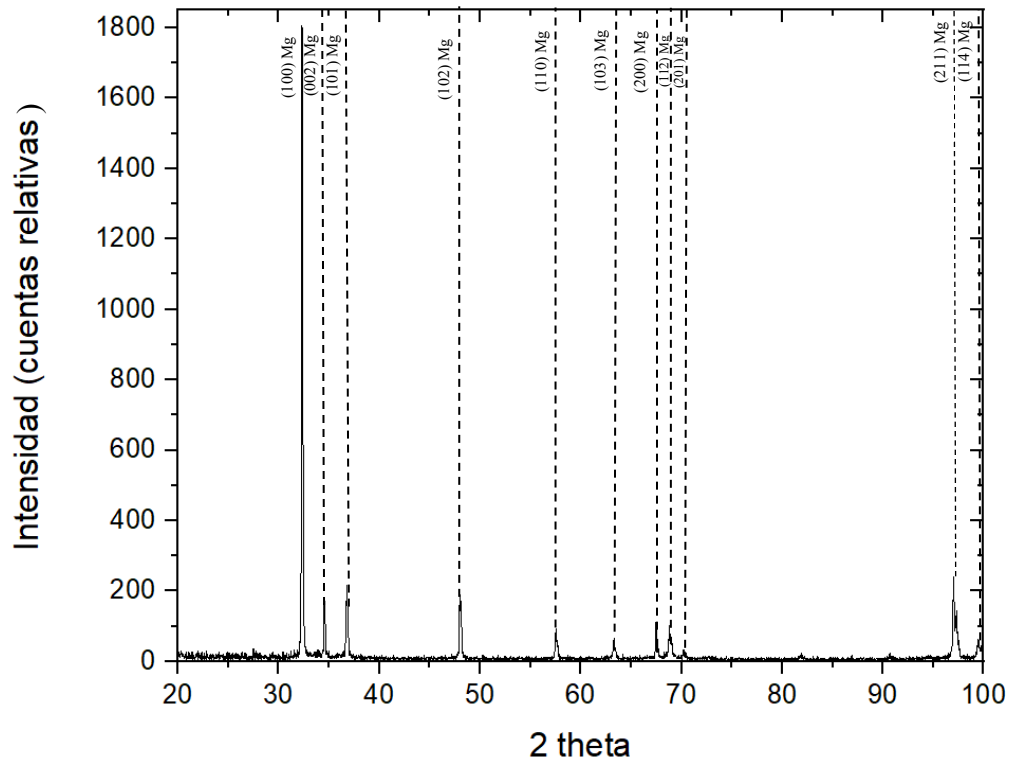


Figura 46. Difractograma para la muestra en bulto de Mg-2.5% at. Li.

### 3.7. Picnometría de helio

Esta técnica de caracterización fue importante para determinar la presencia de Li con la disminución de la densidad. Se realizó para las muestras en bulto y en espuma de ambas aleaciones. En la tabla 10, se muestran los resultados obtenidos mediante picometría de He, para 3 muestras de las dos aleaciones bajo estudio. Además, se realizaron los cálculos teóricos para el volumen de las probetas, el cual fue un valor teórico constante de  $10.134 \text{ cm}^3$  ya que todas las muestras, independientemente de la aleación, tuvieron las mismas dimensiones conservando la relación  $L/D= 0.8$ , lo anterior para que los valores sean comparativos entre los dos tipos de muestra.

Tabla 10. Propiedades físicas de las muestras en bulto.

Probeta		m[g]	v[cm <sup>3</sup> ]	$\rho_t$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_e$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\sigma^2$
Mg	1	17.701	10.1537	1.747	1.743	0.0152
	2	17.728	10.170	1.749	1.743	0.0023
	3	17.410	10.011	1.718	1.739	0.0009
Mg-Li	1	17.480	10.043	1.725	1.740	0.0187
	2	17.530	10.155	1.730	1.726	0.0036
	3	17.576	10.117	1.734	1.737	0.0031

El valor promedio para las densidades obtenidas mediante picnometría para la muestra de Mg fue 1.742 g/cm<sup>3</sup>, lo cual coincide con la densidad reportada en la literatura para este material, y se consideró como la densidad de la aleación con la que fue fabricada la espuma, ya que es un valor más certero que el calculado teóricamente (como masa entre volumen) de las muestras. El promedio de la densidad Mg-Li corresponde a 1.734 g/cm<sup>3</sup>, este valor se toma para esta aleación y concuerda con lo esperado a pesar de ser pequeña la adición de Li.

En la tabla 11, se presentan los valores obtenidos para el volumen y densidad de las espumas. Al comparar las muestras, en la de Mg-Li es menor que en la de Mg, tal como se esperaba. Por otra parte, en otro trabajo de investigación [25], con un contenido de Li del 12% masa, la densidad del material alcanza un valor de 1.62 g/cm<sup>3</sup>, y la densidad del Mg coincide con el valor determinado experimentalmente mediante picnometría de He, es decir, 1.74 g/cm<sup>3</sup>. Con esto se sustenta la veracidad de las mediciones y la congruencia que existe al reducir la densidad con una pequeña adición de Li, así como la posibilidad que disminuya tras incrementar la cantidad de este elemento en la matriz de Mg.

Tabla 11. Propiedades físicas de las espumas.

<b>Espuma</b>	<b>m[g]</b>	<b>v[cm<sup>3</sup>]</b>	<b><math>\rho_e</math> [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b><math>\rho_r</math> [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b><math>\sigma^2</math></b>
Mg	6.211	3.3127	1.7883	1.0265	0.0067
Mg-Li	6.837	3.9701	1.7221	0.9931	0.0012

### 3.8. Ensayo de dureza

De acuerdo con la tabla 12, la dureza fue una propiedad que se mantuvo independientemente de la presentación de la muestra (bulto o espuma). Esta se incrementó en la periferia de las muestras en bulto; este comportamiento fue más notorio en la aleación de Mg-Li, lo cual es de esperarse ya que es donde ocurre más rápido la solidificación del material, y por lo tanto, se obtiene un grano más pequeño que le confiere dureza y resistencia al material.

Tabla 12. Dureza Vickers de las muestras en bulto y espumas.

<b>Aleación</b>	<b>Muestra</b>		<b>Dureza Vickers (HV)</b>
Mg	Bulto	Zona periférica	41
		Zona centro	38
	Espuma metálica		43
Mg-2.5% at. Li	Bulto	Zona periférica	60
		Zona centro	43
	Espuma metálica		40

### 3.9. Ensayo de compresión

En la figura 47 se muestran las probetas del material completamente sólido montadas y alineadas previamente a la aplicación de la carga.

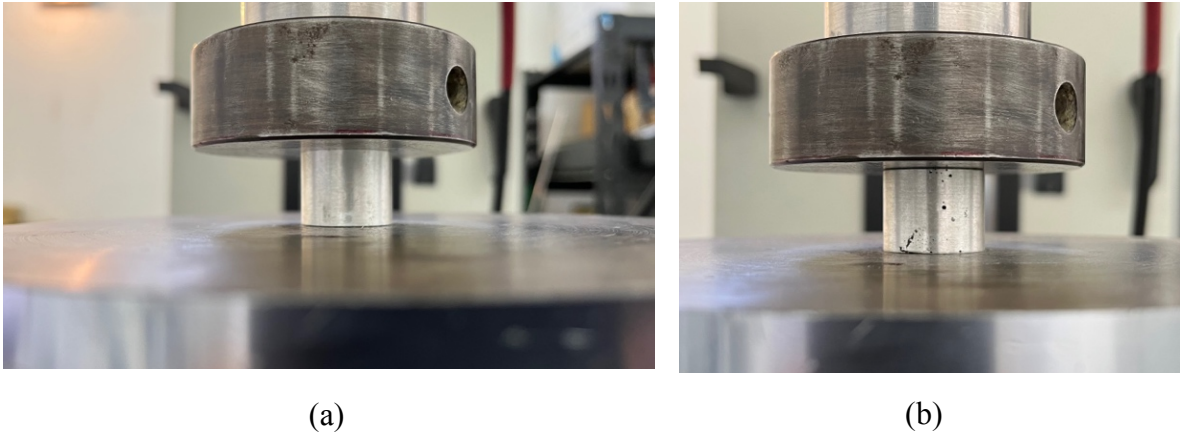


Figura 47. Probetas en bulto montadas en la máquina de ensayos, (a) Mg y (b) Mg-Li.

En la figura 48 se presentan las muestras a la mitad de la deformación, es decir, cuando el equipo aplicó la mitad de la carga al material durante el ensayo.

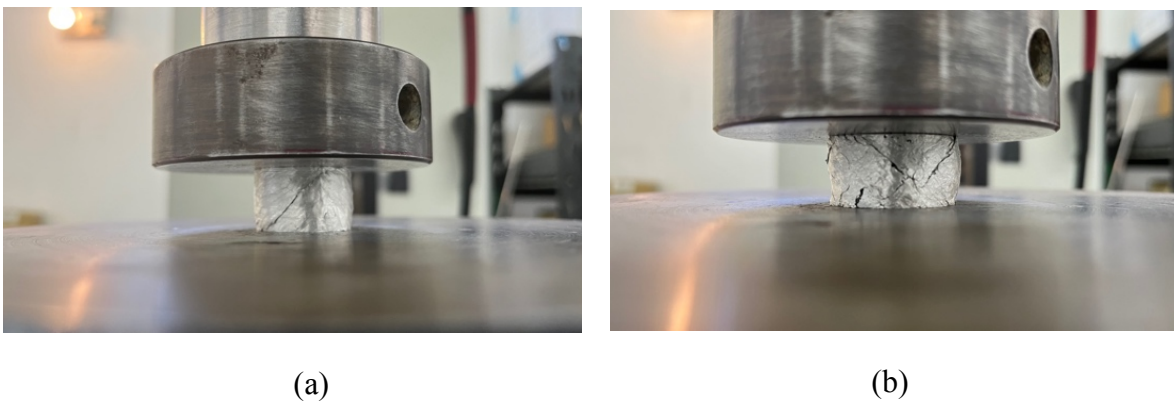
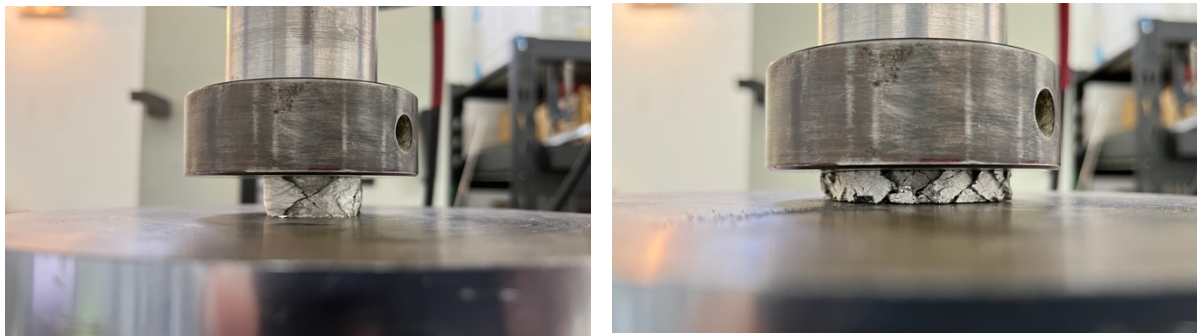


Figura 48. Probetas en bulto a la mitad del ensayo, (a) Mg y (b) Mg-Li.

Por último, en la figura 49 se tienen las probetas totalmente comprimidas una vez que el equipo alcanzó su carga máxima, por lo que no llegaron al 80% de deformación plástica, los valores más altos son cercanos al 70%, los cuales se visualizan en la curva esfuerzo deformación para cada probeta en las figuras 50 y 51. El porcentaje máximo de deformación que alcanzaron las muestras de Mg fue del 68%, mientras que las de Mg-Li fue del 69%, lo que indica que ambas aleaciones soportaron prácticamente la misma carga, no obstante, como se observa en la figura 49b, la probeta de Mg-Li tuvo un mayor abarrilamiento y agrietamiento. Por lo tanto, es más frágil al tener propiedades mecánicas superiores a las de la muestra de Mg, esto de acuerdo con la tabla 12, donde se presentan las propiedades mecánicas obtenidas para las muestras en bulto a través del ensayo de compresión.



(a)

(b)

Figura 49. Probetas en bulto al término del ensayo, (a) Mg y (b) Mg-Li.

Tabla 13. Propiedades mecánicas en las muestras en bulto.

Probeta		Esfuerzo de cedencia [MPa]	Último esfuerzo de compresión [MPa]	Absorción de energía al 50% de la deformación [J]
Mg	1	166.337	423.78	786.781
	2	180.489	423.833	815.399
	3	177.620	420.821	810.542
	$\bar{x}$	174.815	422.811	804.240
Mg-Li	1	178.379	428.910	831.228
	2	169.606	424.910	826.017
	3	174.543	422.706	771.692
	$\bar{x}$	174.176	425.509	809.646

Como puede observarse, las probetas que constan sólo de una fase sólida continua tienen propiedades mecánicas muy elevadas y, de manera general, en ambas aleaciones son muy similares. Estas muestras sí tienen zona plástica en la curva esfuerzo-deformación, lo que incrementa significativamente el esfuerzo de compresión, y la capacidad de absorción de energía, a pesar de que sea un valor reportado al 50%.

Se debe de tener en cuenta que las propiedades obtenidas en las muestras en bulto y en las espumas no son comparativas entre sí, ya que en materiales sólidos continuos siempre se tendrán propiedades mecánicas mayores. Sin embargo, se hizo el ensayo en ambos casos porque las espumas se hicieron a partir de las aleaciones en bulto, y es por ello que vale la pena analizar los dos comportamientos. En la figura 50 se presenta la curva esfuerzo-deformación para la aleación de Mg-Li, mientras que en la figura 51, el de las muestras de Mg puro.

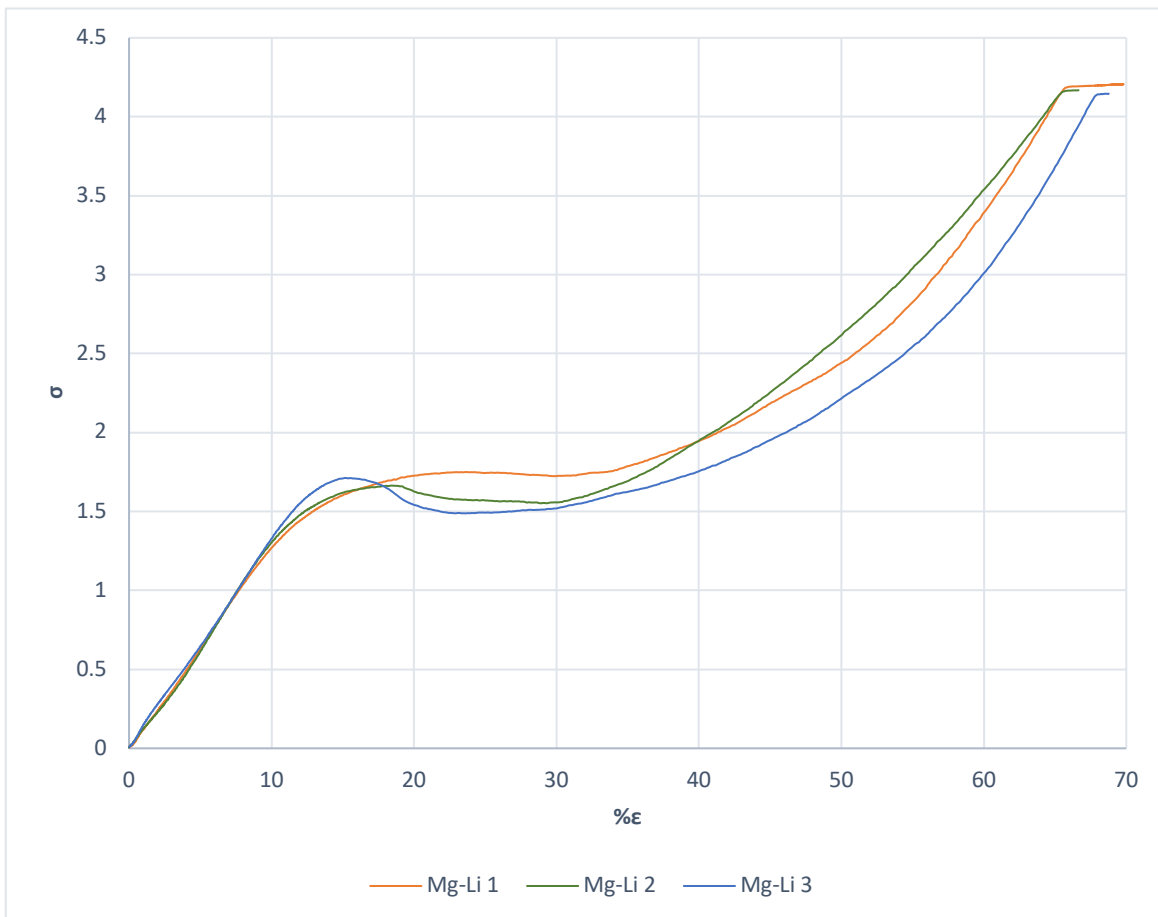


Figura 50. Curva  $\sigma$ - $\epsilon$  para muestras de Mg-Li en bulto.



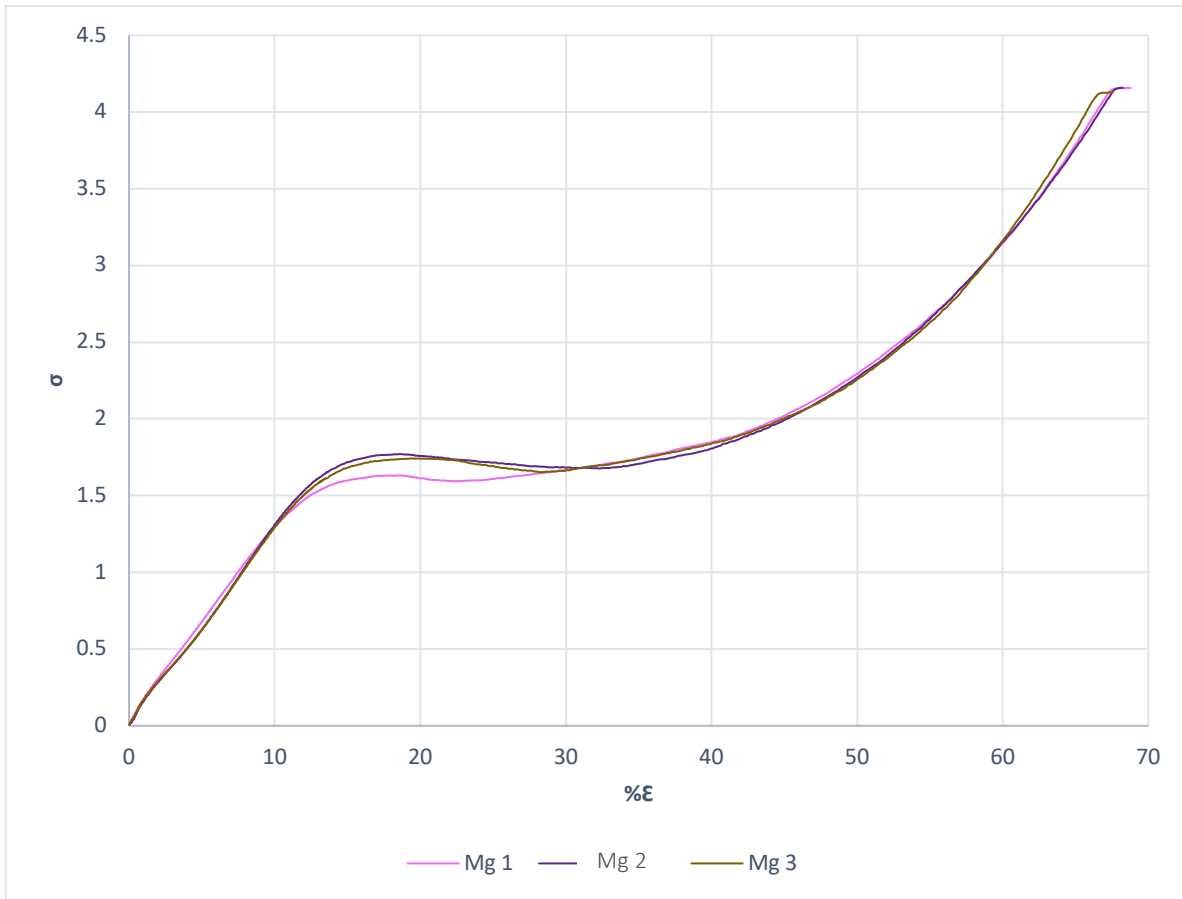


Figura 51. Curva  $\sigma$ - $\epsilon$  para muestras en bulto de Mg.

En las figuras 52 y 53 se muestran ambas espumas antes y después del ensayo de compresión. La espuma de Mg no se desintegró como la de Mg-Li, este mismo comportamiento se observa en las muestras en bulto, aunque a diferencia de las espumas, sus propiedades mecánicas decrecen en espumas de Mg-Li.

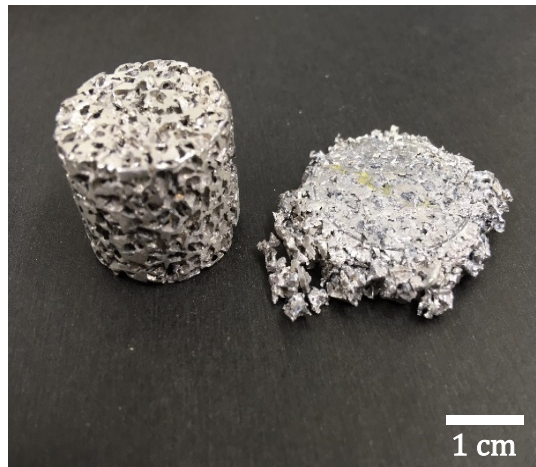


Figura 52. Espuma de Mg antes y después del ensayo de compresión.

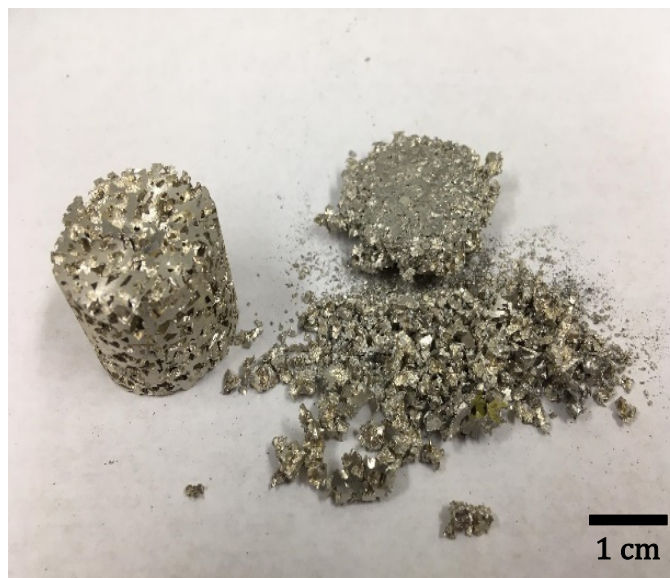


Figura 53. Espuma de Mg-Li antes y después del ensayo de compresión.

En la tabla 14 se presentan las propiedades mecánicas más importantes obtenidas mediante el ensayo de compresión hasta el 80% de deformación plástica, ya que por encima de ese nivel de deformación, no se obtendrían valores significativos en las propiedades mecánicas al tener que aplicarse una carga mayor debido a la compactación del material. En la figura 54 se muestra la curva esfuerzo-deformación para ambas muestras.

Tabla 14. Propiedades mecánicas en las espumas metálicas.

Espuma	Tenacidad [MPa]	Esfuerzo de cedencia [MPa]	Último esfuerzo de compresión [MPa]	Absorción de energía [J]
Mg	18.753	122.499	122.499	190.045
Mg-Li	10.356	1.669	82.102	104.950

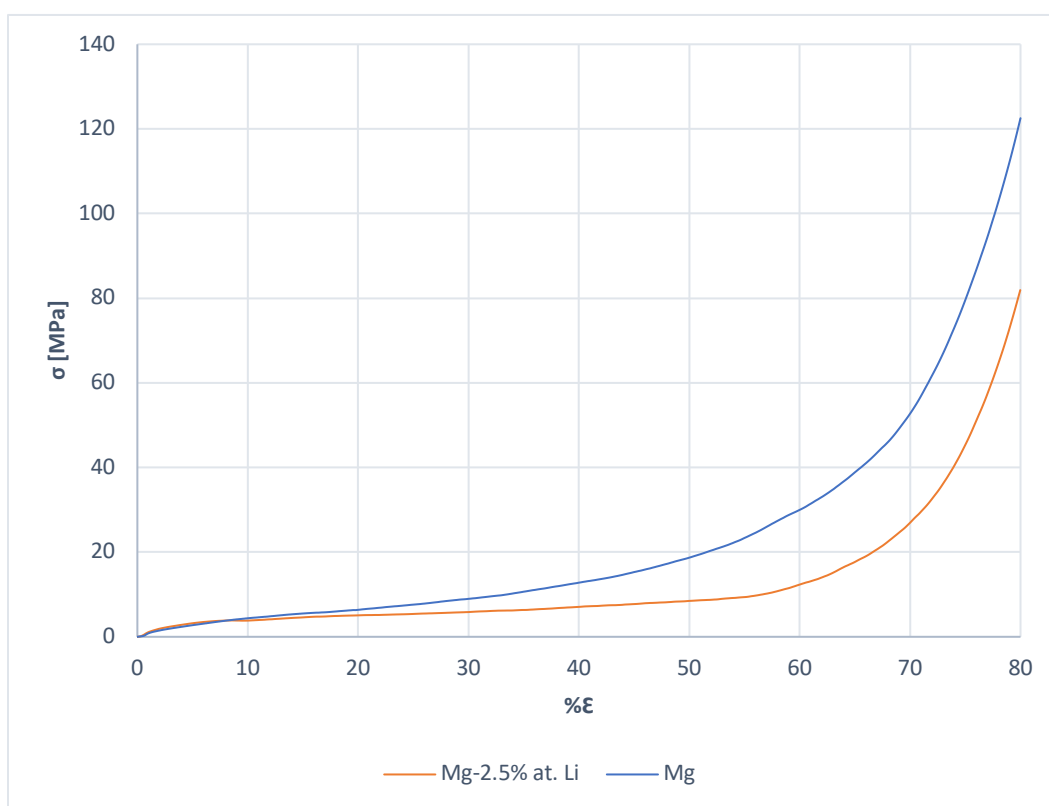


Figura 54. Curva  $\sigma$ - $\epsilon$  para espumas base Mg al 80% de deformación.

En el caso de la espuma de Mg, el esfuerzo de cedencia es igual al último esfuerzo de compresión, y por lo tanto, al de rotura. En su curva esfuerzo deformación (figura 54), no existe una región correspondiente a la zona plástica porque a pesar de aplicar la carga máxima no fue posible rebasar el esfuerzo de cedencia. También se observa que la curva correspondiente al Mg está por encima de la de Mg-Li,

además, el área bajo la curva (tenacidad) es casi el doble de la de Mg-Li. Por lo tanto, se tiene un comportamiento mecánico superior en las espumas de Mg, esto se corrobora con los valores obtenidos con la prueba de compresión de la tabla 14.

En la figura 55 se muestra una zona específica del ensayo, hasta el 20% de deformación. Se observa que cuando inicia la deformación de las espumas, la de Mg-Li tiene mayores propiedades mecánicas; este comportamiento termina al 8% de deformación, con casi 4 MPa de carga uniaxial aplicada. Por lo tanto, las espumas de Mg-Li tienen mejor comportamiento mecánico en la zona elástica, observado en la curva esfuerzo-deformación. Otro factor a considerar, es el tipo de poro, porque al ser irregular en morfología, las puntas son acumuladores de esfuerzo, reduciendo las propiedades mecánicas. De igual forma, teniendo partículas pequeñas, es más probable el riesgo de fragmentación desde el proceso de tamizado.

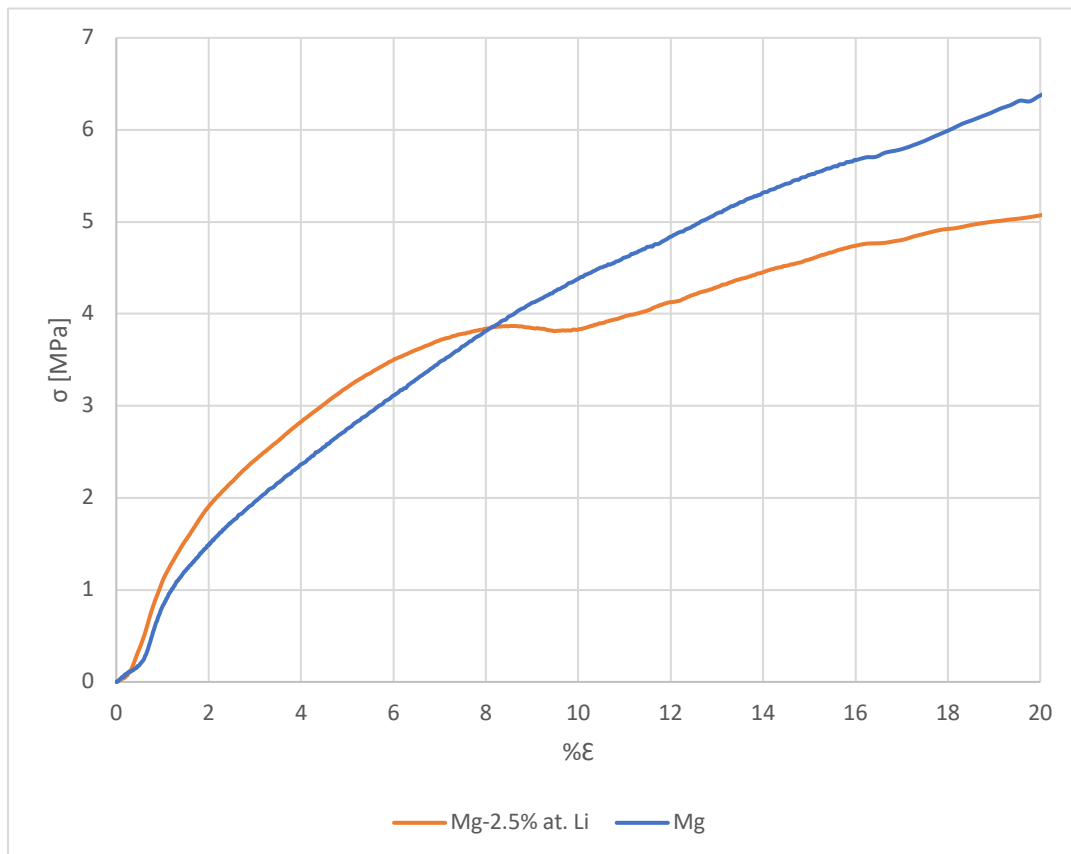


Figura 55. Curva  $\sigma$ - $\epsilon$  para espumas base Mg al 20% de deformación.

## Capítulo 4. Conclusiones

1. Los parámetros adecuados para fabricar espumas base Mg de celda abierta fueron: presión y temperatura de fusión de 0.5 bar a 750 ° C durante 1 hora, y presión de infiltración de 1.5 bar durante 15 minutos.
2. El Li actúa como un refinador de grano en aleaciones base Mg.
3. Las propiedades mecánicas en las espumas de Mg-Li pueden mejorarse sin sacrificar ligereza con un tratamiento térmico o adicionando aleantes a este sistema binario.
4. Las espumas de Mg-Li absorbieron una menor cantidad de energía con respecto a las de Mg puro.
5. Una técnica de caracterización fundamental para comprobar la existencia de Li en aleaciones base Mg, es la picnometría de He.
6. Las adiciones de Li en aleaciones base Mg mejoran las propiedades físicas y químicas, aunque tienden a disminuir las mecánicas.
7. La desventaja de utilizar Li como elemento aleante es que no es posible detectarlo con la mayoría de técnicas de caracterización química elemental, presentando mayor dificultad cuando se encuentra en pequeñas cantidades.
8. Las propiedades de las espumas dependen del tipo, forma, tamaño y distribución del poro.
9. Algunas propiedades dependen principalmente de la microestructura y del tipo de celda.
10. El comportamiento mecánico en las espumas metálicas es menor en poros pequeños y asimétricos.
11. Al reducir el tamaño de grano adicionando Li, se fragilizó la aleación y disminuyendo sus propiedades mecánicas.
12. Es necesario realizar tratamientos térmicos para modificar la estructura del material y contrarrestar el efecto negativo que aporta el Li.
13. Las espumas de Mg-Li absorben menor cantidad de energía que las de Mg.
14. Las propiedades mecánicas en las muestras en bulto siempre son mayores que en las espumas metálicas, por lo que no son comparativas pero sí

necesarias para conocer el comportamiento de la aleación a partir de la cual se producen las espumas.

15. El uso de espumas metálicas sobre sus equivalentes en bulto casi siempre es más conveniente debido a que sólo se requiere alrededor del 40% de material, lo que disminuye el costo y el peso.
16. El Li incrementa la resistencia a la corrosión y mejora el acabado metálico en las espumas.

#### **4. Trabajo futuro**

- Realizar tratamientos térmicos en las espumas producidas durante este trabajo, se propone un recocido para mejorar la ductilidad y comparar el efecto en la de Mg-Li con respecto a la de Mg. Se propone T6, solución tratada térmicamente con un envejecimiento artificial.
- También, sería conveniente utilizar otro elemento aleante en la matriz de Mg para formar una solución sólida sustitucional, siguiendo las reglas de Hume-Rothery. Como ejemplo de lo anterior, se propone al Al para incrementar las propiedades mecánicas, así como la resistencia a la corrosión, y al mismo tiempo, no tener modificaciones importantes en la ligereza de las espumas base Mg. Se recomienda en un intervalo de 3-9% masa de Li, ya que este elemento en exceso promueve la formación de la fase  $Mg_{17}Al_{12}$  con un borde de grano interdendrítico, reduciendo significativamente la resistencia y ductilidad.
- Realizar más técnicas de caracterización estructural, por ejemplo ICP de masas para determinar cuantitativamente el porcentaje atómico o en peso del elemento aleante, además para descartar la presencia de impurezas en la aleación de Mg-Li que puedan fragilizar el material.
- Generar espumas metálicas a partir de un sistema de aleación ternario base Mg y analizar el efecto de cada elemento añadido en las propiedades.

## 5. Bibliografía

- [1] Kainer, K. U. *Magnesium Alloys and Technology*. Wiley-VCH, 2003.
- [2] Sosnick, B. *US Patent 2 434 775*, IWRV.
- [3] Degischer, H.P., and Kriszt B. *Handbook of Cellular Metals: Production, Processing, Applications*. Wiley-VCH, 2002.
- [4] Henry, G.P., and Hunt, W. H. *Advances in Magnesium Alloys and Composites*. The Minerals, Metals and Materials Society, 1988.
- [5] Elizondo, E.M., Barari, F., Woolley, R., and Goodall, R. *Casting Protocols for the Production of Open Cell Aluminum Foams by the Replication Technique and the Effect on Porosity*.
- [6] Rahulan, N., and Sundararaman G., Kumaran S. *Mechanical behavior of Mg-Li-Al alloys*. Department of Metallurgical and Materials Engineering, National Institute of Technology, Tiruchirappalli, 620015, India, 2018.
- [7] Askeland, D. *Ciencia e Ingeniería de Materiales*. Cengage Learning, México 2011.
- [8] Cristóbal, M. *Producción y Caracterización de Espumas Metálicas de Al y Mg de Poro Abierto*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, 2018.
- [9] Callister, W. *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*, cuarta edición, Editorial Reverte, España, 2007.
- [10] Azamar, M. *Estudio de la permeabilidad a altas presiones de espumas de Al*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, 2019.
- [11] ASTM International. *E11-04, Standard Specification for Wire Cloth and Sieves for Testing Purposes*, ASTM International. Estados Unidos, 2004.
- [12] Gibson, L.J. and Ashby, M.F. *Cellular Solids Structure and Properties*. 2nd ed. Cambridge University Press, 1999.
- [13] Velasco, M. *Espumas de Magnesio Puro con Porosidad Interconectada como Captadores Químicos Estructurales de CO<sub>2</sub>*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, 2017.

- [14] Liu, P.S. and Chen, G.F. *Porous Materials Processing and Applications*. 1st ed. Tsinghua University Press, 2014.
- [15] Shi, T., Chen, X., Cheng, Y., and Li, Y. *Foaming Process and Properties of 6063 Aluminum Foams by Melt Foaming Method*. *Materials Transactions*, 2017.
- [16] Yuan, L., Chen, X., Huawei Z., and Yanxiang, L. *Directional Solidification of Metal Gas Eutectic and Fabrication of Regular Porous Metals*. China Foundry, 2005.
- [17] Mendieta, I. *Obtención y caracterización mecánica de espumas metálicas de Al-Mg-Cu y Al-Cu-Mg*. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, 2022.
- [18] Zhang, C., Feng, Y., and Zhang, X. *Mechanical properties and energy absorption properties of aluminium foam filled square tubes*. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20(8), China, 2009.
- [19] Valencia, A., *Las Espumas Metálicas*. Revista Cintex, 2013.
- [20] Yilong, L., Guibao, Q., Yang, Y., Xuwei L., and Chenguang, B. *Preparations and Compressive Properties of Magnesium Foams*. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016.
- [21] ASM International. *Handbook of Metallography and Microstructures*. Vol. 9, 2004.
- [22] Hollrigl, F., Just, E., Kohler, J., and Melzer, H. J., *Magnesium im Volkswagenwerk*. *Metall* 34 12, 1980.
- [23] Guang, S. *Corrosion of Magnesium Alloys*. Woodhead Publishing Limited, 2011.
- [24] Ross, R. *Metallic Materials Specification Handbook*. Fourth Ed., London, 1992.
- [25] Alok, N. *The Metals Databook*. McGraw-Hill, New York, 1997.
- [26] Lide, D. *Handbook of Chemistry and Physics*. Ed. CRC 80th Edition, CRC Press, Boca Raton, FL, 1999.
- [27] ASM International. *Handbook of Metallography and Microstructures*. Vol. 9, 2004.



- [28] Guo, B., and Xiao, D. *Deformation behavior and constitutive model for dual-phase Mg–Li alloy at elevated temperatures*. College of Materials Science and Engineering, 2016.
- [29] Hanwu D., Wang, L. *Effect of Y on microstructure and mechanical properties of duplex Mg–7Li alloys*. Journal of alloys and compounds, 2010.
- [30] ASTM International. *E384-99, Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials, ASTM International*. Estados Unidos, 1999.
- [31] ASTM International. *E9-89a, Standard Test Methods for Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature*. ASTM International, Estados Unidos, 2009.
- [32] Kubaschewski, O, and Alock, B. *Metallurgical Thermochemistry*. 5th Ed. Pergamon Press, Oxford, 1979.
- [33] Mordike, B.L., and Kainer, K.U. *Magnesium alloys and their applications*. Ed. Werkstoff., Germany, 1998.