



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

“OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE
ESPUMAS METÁLICAS DE Al-Mg-Cu Y Al-Cu-Mg”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

PRESENTA:

IVÁN MENDIETA MARTÍNEZ

ASESOR:

OMAR NOVELO PERALTA



CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX.

2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Jurado asignado:

Presidente: Prof. Balbina Ojeda Ramírez
Vocal: Prof. Ignacio Alejandro Figueroa Vargas
Secretario: Prof. Omar Novelo Peralta
1er. Suplente: Prof. Gabriel Ángel Lara Rodríguez
2do. Suplente: Prof. Tania Georgina Núñez Velázquez

Sitio donde se desarrolló el tema:

Laboratorio de Materiales Metálicos Avanzados, Instituto de Investigación en Materiales, UNAM, CDMX, México.

Asesor del tema:

Omar Novelo Peralta

Sustentante:

Iván Mendieta Martínez

Resumen.

Dos aleaciones de aluminio con magnesio y cobre en diferentes proporciones fueron obtenidas a partir de una fundición en un horno de inducción con atmósfera controlada para poder producir espumas por medio del método de infiltración, este método permitió la obtención de espumas metálicas de celda abierta con un tamaño de poro de alrededor de 4.75 -3.35 mm debido a la preforma de NaCl utilizada en este método por su fácil eliminación al final del proceso. A partir de la eliminación de la preforma fue posible caracterizar física y estructuralmente, mediante el cálculo de la porosidad y densidad con resultados obtenidos teórica y experimentalmente, con un picnómetro de Helio.

Después de esto las espumas producidas fueron tratadas térmicamente por medio de una solubilización y posteriormente por un envejecimiento a diferentes tiempos para después ser expuestas a un ensayo de compresión, con el fin de poder caracterizarlas mecánicamente con ayuda de las curvas esfuerzo-deformación que este ensayo proporciona. A partir de estas curvas fue posible determinar el módulo de Young, el colapso plástico y la capacidad de absorción de energía para cada tiempo de envejecimiento asignado a las probetas.

Como resultado de todas estas técnicas se encontró una similitud física y estructural entre las espumas producidas para cada aleación, mientras que con el comportamiento mecánico para las espumas de cada aleación se encontró un comportamiento similar en cuanto a un aumento de propiedades, demostrando que estas aleaciones también pueden ser envejecidas en este tipo de materiales, siendo la principal diferencia la magnitud del aumento en estas propiedades para cada aleación.

Índice.

| | |
|---|----|
| Introducción | 1 |
| Objetivos e Hipótesis | 3 |
| Capítulo 1. | |
| Antecedentes | 4 |
| 1.1 Materiales porosos..... | 4 |
| 1.2 Espumas metálicas | 5 |
| 1.3 Métodos de fabricación..... | 5 |
| 1.3.1 Metalurgia de polvos | 6 |
| 1.3.2 Fundición..... | 7 |
| 1.3.3 Infiltración | 9 |
| 1.3.4 Deposición sobre un preforma | 10 |
| 1.4 Propiedades físicas | 10 |
| 1.4.1 Densidad relativa..... | 11 |
| 1.4.2 Porcentaje de porosidad | 11 |
| 1.4.3 Propiedades mecánicas..... | 12 |
| 1.4.4 Capacidad de absorción de energía | 15 |
| 1.5 Aplicaciones..... | 17 |
| 1.5.1 Aplicaciones estructurales | 18 |
| 1.5.2 Aplicaciones funcionales | 19 |
| 1.6 Aleaciones de Al | 21 |
| 1.6.1 Efectos aleantes | 23 |
| 1.7 Aleaciones Al-Mg-Cu y Al-Cu-Mg | 24 |
| 1.7.1 Diagrama de fases | 25 |
| 1.8 Mecanismo de endurecimiento | 26 |
| 1.8.1 Aleaciones Al-Cu-Mg | 26 |
| 1.8.2 Aleaciones Al-Mg-Cu | 27 |
| Capítulo 2. Técnicas experimentales | 28 |
| 2.1. Fabricación de aleaciones..... | 28 |
| 2.2. Fundición | 28 |
| 2.3. Método de infiltración | 30 |
| 2.3.1. Preparación de la preforma | 30 |
| 2.3.2. Preparación del reactor | 31 |
| 2.3.3. Proceso de infiltración | 33 |

| | |
|---|----|
| 2.3.4. Eliminación de la preforma | 36 |
| 2.4. Microscopía óptica | 38 |
| 2.4.1. Estereoscopio | 38 |
| 2.5. Microscopía electrónica de barrido | 38 |
| 2.5.1. Espectrometría de dispersión de Rayos x (EDS) | 39 |
| 2.6. Picnometría | 40 |
| 2.7. Tratamientos térmicos | 41 |
| 2.7.1. Tratamiento de solubilización | 41 |
| 2.7.2. Tratamiento de envejecimiento | 42 |
| 2.8. Pruebas mecánicas..... | 43 |
| 2.8.1. Ensayo de compresión | 43 |
| 2.9. Análisis térmico diferencial | 44 |
| Capítulo 3. Resultados y Discusión..... | 45 |
| 3.1. Espectrometría de dispersión de energía de Rayos X (EDS) | 45 |
| 3.2. Producción de espumas | 45 |
| 3.3. Propiedades físicas..... | 47 |
| 3.3.1. Porosidad | 47 |
| 3.3.2. Microscopía óptica | 49 |
| 3.4. Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)..... | 51 |
| 3.5. Propiedades mecánicas..... | 53 |
| 3.5.1. Ensayo de compresión | 53 |
| 3.5.2. Capacidad de absorción de energía | 60 |
| Capítulo 4. Conclusiones..... | 63 |
| Referencias..... | 64 |

Índice de figuras.

| | |
|--|----|
| Figura 1.1. a) Espuma de celda cerrada, b) Espuma de celda abierta ..5 | 5 |
| Figura 1.2. Ejemplo de espuma producida por metalurgia de polvos....6 | 6 |
| Figura 1.3. Proceso de inyección de gas7 | 7 |
| Figura 1.4. Estructuras obtenidas mediante los agentes gasificantes ...8 | 8 |
| Figura 1.5. Espuma de celda abierta fabricada mediante deposición....10 | 10 |
| Figura 1.6. Curva esfuerzo-deformación típica para espumas metálicas12 | 12 |
| Figura 1.7. Curvas esfuerzo- deformación para los diferentes comportamientos.....13 | 13 |
| Figura 1.8. Representación de la absorción de energía en una curva esfuerzo-deformación17 | 17 |
| Figura 1.9. Estructura tipo "Sándwich" hecha con una espuma metálica de aluminio.....19 | 19 |
| Figura 1.10. Intercambiador de calor con estructura celular20 | 20 |
| Figura 1.11. Diagrama ternario de la aleación Al-Cu-Mg25 | 25 |
| Figura 1.12. Curva de envejecimiento de una aleación Al-Cu-Mg27 | 27 |
| Figura 2.1. Horno de inducción de atmósfera controlada.....29 | 29 |
| Figura 2.2. Cilindros obtenidos después del proceso de maquinado30 | 30 |
| Figura 2.3. Partes del reactor cubiertas con Nitruro de Boro.....32 | 32 |
| Figura 2.4. Reactor introducido al horno eléctrico, conectado al tanque de gas y a la bomba de vacío34 | 34 |
| Figura 2.5. Reactor al momento de retirarlo del horno eléctrico35 | 35 |
| Figura 2.6. Espuma obtenida mediante el proceso de infiltración35 | 35 |
| Figura 2.7. Probetas para compresión obtenidas del maquinado36 | 36 |
| Figura 2.8. Ultrasonido utilizado para la eliminación del NaCl37 | 37 |
| Figura 2.9. Probetas sin NaCl retiradas del ultrasonido37 | 37 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.10. Picnómetro utilizado para la determinación del volumen de la espuma | 40 |
| Figura 2.11. Horno tubular utilizado para el tratamiento de solubilización | 41 |
| Figura 2.12. Crisol con aceite utilizado para el tratamiento de envejecimiento..... | 42 |
| Figura 2.13. Máquina universal de pruebas mecánicas | 43 |
| Figura 3.1. Transición ocurrida durante el proceso de infiltración | 46 |
| Figura 3.2. Ejemplo de espuma metálica utilizada en la experimentación | 47 |
| Figura 3.3. Imágenes obtenidas por el estereoscopio a) Zona lateral, b) Zona central | 49 |
| Figura 3.4. Termograma de la aleación Al-Cu-Mg..... | 51 |
| Figura 3.5. Termograma de la aleación Al-Mg-Cu..... | 52 |
| Figura 3.6. Vista lateral de las probetas después del ensayo de compresión..... | 54 |
| Figura 3.7. Vista frontal de las piezas ensayadas | 54 |
| Figura 3.8. Curvas esfuerzo-deformación obtenidas para cada tiempo de envejecimiento de la aleación Al-Cu-Mg..... | 55 |
| Figura 3.9. Curvas esfuerzo-deformación obtenidas para cada tiempo de envejecimiento de la aleación Al-Mg-Cu..... | 56 |
| Figura 3.10. Curva de la Capacidad de Absorción de Energía de Al-Cu-Mg | 60 |
| Figura 3.11. Curva de la Capacidad de Absorción de Energía de Al-Mg-Cu | 61 |

Índice de tablas.

| | |
|---|----|
| Tabla 1.1. Aleaciones de fundición (ACA) | 22 |
| Tabla 1.2. Aleaciones para procesos metalmecánicos (AWA) | 23 |
| Tabla 3.1. Composiciones obtenidas..... | 45 |
| Tabla 3.2. Cantidad de NaCl removido de las dos aleaciones | 47 |
| Tabla 3.3. Parámetros estructurales de ambas aleaciones..... | 48 |
| Tabla 3.4. Propiedades estructurales de las espumas hechas con la aleación Al-Cu-Mg | 58 |
| Tabla 3.5. Propiedades estructurales de las espumas hechas con la aleación Al-Mg-Cu | 58 |

Introducción.

Los materiales celulares como las espumas metálicas han incrementado su importancia debido a las propiedades que estas proporcionan como su permeabilidad, su alta energía de absorción y su baja densidad. Estas propiedades hacen que este tipo de material tenga un gran campo de aplicaciones como filtros, intercambiadores de calor, como diseños de arte y decoración entre otras. Estos materiales deben sus propiedades a su estructura de celda, que está relacionada directamente con el tamaño y forma de los poros que se encuentran a través de toda la estructura.

Las aleaciones Al-Cu-Mg y Al-Mg-Cu, presentan cierto interés en industrias como la automotriz y aeroespacial por la ductilidad y resistencia que estos proporcionan. Estas aleaciones deben sus propiedades a la aparición de precipitados que aparecen durante un tratamiento de envejecimiento, donde al parecer la secuencia de aparición de estos precipitados en las aleaciones Al-Mg-Cu es similar a la de Al-Cu-Mg

Este trabajo se enfoca en estudiar el mecanismo de endurecimiento propio de estas aleaciones sobre el comportamiento mecánico de las espumas metálicas.

Los capítulos se encuentran ordenados de la siguiente manera:

Capítulo 1. Antecedentes. En esta sección se explicarán las bases teóricas que rigen al proyecto, abarca desde la descripción del tipo de material que es una espuma metálica, así como sus propiedades y aplicaciones, además de que se explican las características que tienen las dos aleaciones como su mecanismo de endurecimiento.

Capítulo 2. Técnicas experimentales. Este capítulo está enfocado en explicar el procedimiento que se llevó a cabo para la fabricación de las espumas, así mismo, se explicarán las técnicas realizadas para la caracterización física y estructural. Por último, se detalla el procedimiento utilizado para los tratamientos térmicos a los cuales las espumas obtenidas fueron sometidas, de igual manera su caracterización mecánica por medio del ensayo de compresión.

Capítulo 3. Resultados y discusión. En este capítulo se mostrarán los datos recaudados de las pruebas hechas a las espumas durante el procedimiento experimental, se mostrarán tablas y gráficas que representan el comportamiento que tienen los especímenes tras la experimentación, así mismo se incluyen los análisis pertinentes para cada prueba realizada.

Capítulo 4. Conclusiones. Este capítulo se enfoca en enunciar de una manera concreta lo observado en los resultados.

Objetivos.

- Fabricar espumas metálicas a partir de aleaciones Al-Cu-Mg y Al-Mg-Cu que puedan ser tratadas térmicamente.

Objetivos particulares.

- Realizar tratamientos de solubilización y envejecimiento.
- Obtener propiedades mecánicas a través de un ensayo de compresión.
- Caracterizar el tipo de porosidad y densidad de las espumas fabricadas, por medio de picnometría y observación estereoscópica.

Hipótesis.

- Al aumentar el tiempo de envejecimiento en las aleaciones las propiedades mecánicas aumentaran.
- Las porosidades y densidades de las espumas metálicas serán similares debido a el método de infiltración.

Capítulo 1. Antecedentes.

En este capítulo se definirán las bases teóricas que rigen al proyecto presentado en este trabajo, se comenzará por explicar la importancia de los materiales porosos y sus características. Después de esto se hará la relevancia a las propiedades, métodos de fabricación y las aplicaciones que estos materiales tienen hoy en día.

Posteriormente, se hará énfasis en las aleaciones de aluminio, se hará un enfoque en los efectos que tienen los elementos aleantes sobre el aluminio para correlacionarlos con las aleaciones que son propuestas en el trabajo y así dar una explicación de los mecanismos de endurecimiento que existen cuando los elementos son agregados en diferentes proporciones y en consecuencia los efectos que se generan.

1.1. Materiales porosos.

Los materiales porosos son aquellos que contienen poros sobre todo su volumen deliberadamente, dentro de esta estructura pueden estar conformados por una segunda fase, ya sea líquida o gaseosa. Estos materiales existen de forma natural en la naturaleza muchas veces desempeñando funciones estructurales como es el caso de rocas, suelos, tejidos y cerámicos.

A lo largo de la historia se ha considerado que la porosidad en un material es un defecto que afecta en las propiedades de manera adversa, de tal modo que estas disminuyen. Durante la manufactura se enfocan en eliminarla, sin embargo, los materiales porosos presentan algunas ventajas respecto a los materiales completamente sólidos; tales como: Capacidad de absorber energía al impacto a bajas tensiones, absorción de sonido, buenas propiedades mecánicas, blindaje electromagnético y amortiguamiento de vibraciones.

1.2. Espumas metálicas.

Una espuma metálica es un tipo de material celular cuya estructura es metálica y continua, los poros que constituyen su matriz son clasificados debido a la naturaleza de los mismos. Siendo así, estos pueden ser considerados como poros de celda abierta o celda cerrada.

Los poros de celda abierta (Figura 1.1a) presentan una interconexión entre sí mientras que los poros de celda cerrada (Figura 1.1b) son aislados, la naturaleza de estos repercute en las propiedades mecánicas, de igual manera en las aplicaciones a los que son expuestos.

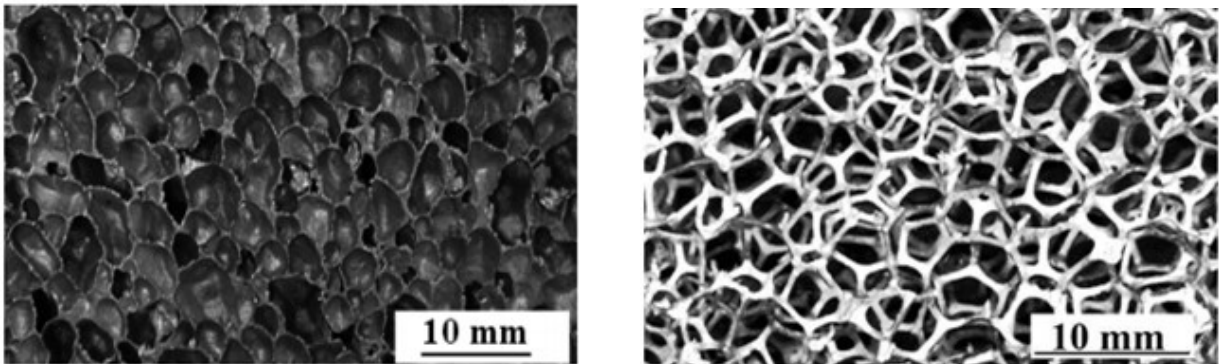


Figura 1.1. a) *Espuma de celda cerrada*, b) *Espuma de celda abierta*.

1.3. Métodos de fabricación.

Existen diferentes métodos para la producción de espumas metálicas en los cuales existen dificultades en el proceso debido a que no es posible controlar de forma precisa el tamaño de poro, la distribución y el tipo de celda obtenida, todos tienen en común parámetros como la temperatura, presión y tiempo. Hay métodos que permiten producir espumas con una mejor homogeneidad y con una calidad alta, estos procesos se limitan a sólo poder producir espumas con un tipo de celda.

Los métodos más efectivos para la producción se presentan a continuación:

1.3.1. *Metalurgia de polvos.*

Las espumas metálicas pueden ser producidas a partir de metal en polvo, este consiste en tener una mezcla del metal en polvo combinado con un agente gasificante, estos pasan por un proceso de compactación mediante la aplicación de una carga uniaxial o una extrusión. Después de esto, la mezcla es calentada hasta alcanzar una temperatura cercana al punto de fusión de la matriz, esta parte del proceso es llamada sinterización. En este punto el agente gasificante comienza una reacción de sublimación mediante el cual se forma gas, este se expande y es liberado produciendo una alta porosidad dentro de la matriz metálica en estado líquido.

Este método es beneficioso debido a que permite controlar el tamaño de poro, así como la porosidad, además, a partir de este proceso es posible la manufactura de piezas moldeadas o con geometrías complejas y una buena resistencia a fluctuaciones térmicas.

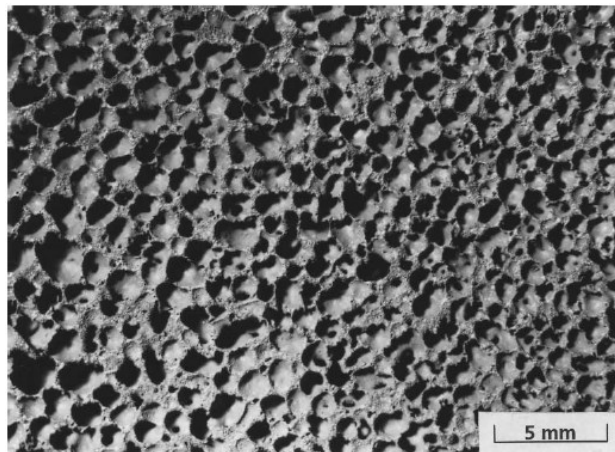


Figura 1.2. *Ejemplo de espuma producida por metalurgia de polvos.*

1.3.2. Fundición

Bajo ciertas condiciones un metal líquido puede ser adicionado con burbujas de gas, este proceso es considerado como un “espumado”, el cual puede realizarse mediante tres vías que a continuación se explican:

1) Inyección de gas.

Se trata de un proceso en donde un gas es directamente insuflado a un metal fundido. Se comienza por la preparación de un metal líquido, el cual primeramente es mezclado con carburo de silicio, óxido de aluminio u óxido de magnesio, estos son adicionados con el fin de mejorar la viscosidad del líquido, este requiere técnicas sofisticadas de mezclado y da como resultado un metal con una matriz compuesta. A partir de esta mezcla, gases como argón, nitrógeno o aire son inyectados a través de impulsores o toberas, los cuales generan burbujas finas y las distribuyen uniformemente dentro del líquido, terminada la inyección el líquido es drenado, enfriado y solidificado.

Este método permite una producción de espumas continuamente con una alta porosidad y densidad baja.

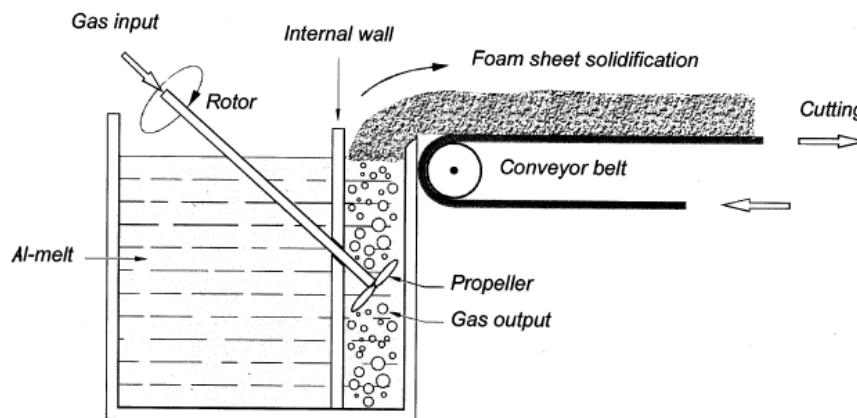


Figura 1.3. Proceso de inyección de gas. (Banhart, John. 2000)

2) Agentes gasificantes

Los agentes gasificantes son sustancias capaces de producir un gas cuando son expuestos a un aumento de temperatura, en esta técnica un agente gasificante es agregado al metal líquido el cual reaccionará y dará paso a una formación de gas dentro del metal líquido, formando así la espuma.

Al igual que en el método por inyección de gas es necesario agregar elementos que mejoran la viscosidad del metal líquido (Ca 15% w/w)

La mezcla es agitada y elevada a una temperatura arriba del punto de fusión del metal, durante esta etapa la viscosidad es monitoreada, cuando esta llega a su punto óptimo el agente es agregado, se utiliza TiH_2 como agente gasificante (normalmente 1.6% w/w). Hidrógeno es generado de la reacción del agente gasificante dentro del metal líquido, propiciando una expansión lenta y gradual del líquido, después de esto el metal es enfriado para después ser procesada, las espumas obtenidas mediante este proceso reciben el nombre de "alporas".

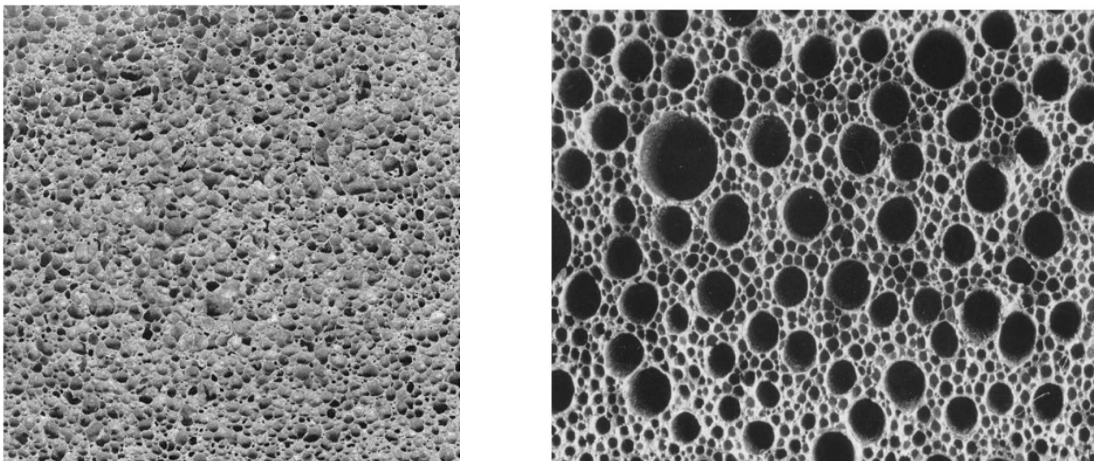


Figura 1.4. *Estructuras obtenidas mediante los agentes gasificantes.*
(Banhart, John. 2000)

3) Solidificaciones eutécticas sólido-gas o solidificación direccionada.

Este método aprovecha metales líquidos eutécticos con hidrógeno. El metal es fundido dentro de una atmósfera de hidrógeno con una presión alta (arriba de 50 atms) el resultado es un líquido homogéneo cargado con hidrógeno. A partir de este punto la temperatura es disminuida gradualmente, durante esta disminución se dará paso a la transición eutéctica formando dos fases (sólido + gas), en la etapa de solidificación el gas se volverá insoluble con la aleación y este será expulsado paulatinamente del líquido originando poros, este método permite un mejor control de la porosidad mediante la velocidad de solidificación.

1.3.3 *Infiltración.*

Este método se basa en impulsar o infiltrar un metal líquido sobre un material de sacrificio, este tipo material es denominado como preforma, durante este procedimiento el metal líquido recorrerá el espacio vacío interconectado que existe en la preforma con ayuda de una presión generada por un gas, al término de la solidificación se obtendrá un conjunto metal-preforma del cual es necesario la eliminación del material de sacrificio por métodos físicos, tras la eliminación se producirán poros debido a la ausencia de la preforma.

Este método se deriva de la fabricación de materiales compuestos de matriz metálica, este permite un mejor control del tamaño de poro, porosidad y microestructura.

En general, las propiedades obtenidas por cualquiera de estos métodos son superiores a los obtenidos por metalurgia de polvos, así como también es posible la obtención de espumas con celda abierto o cerrada.

1.3.4. *Deposición sobre una preforma*

Consiste en tener una espuma polimérica con poro abierto en la cual será depositado metal en polvo, hecho esto se procede a la sinterización en la cual el polímero será eliminado, las espumas obtenidas por este método tienen gran porosidad e interconexión.

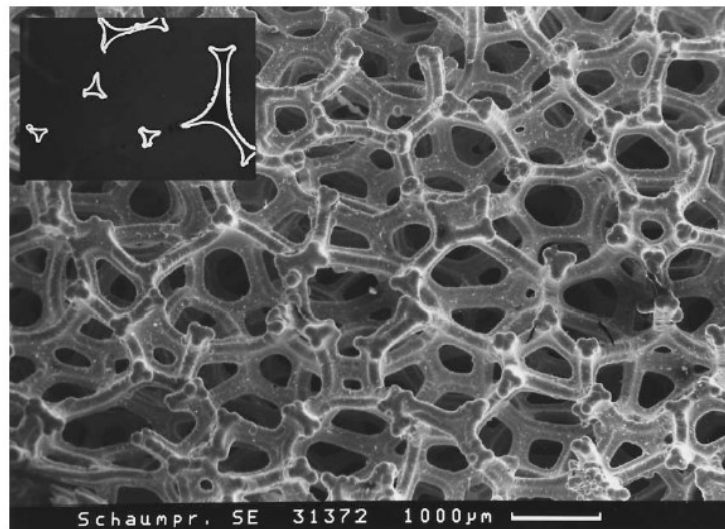


Figura 1.5. *Espuma de celda abierta fabricada mediante deposición.*

1.4. *Propiedades físicas.*

Las espumas metálicas al ser una clase de material celular son caracterizadas por tener una gran porosidad en su estructura, esta propiedad y otras como conductividad eléctrica, conductividad térmica, baja densidad y una gran absorción de energía son de principal interés para diversas aplicaciones.

1.4.1. Densidad relativa.

Este parámetro es de suma importancia debido a que con este es posible entender la naturaleza de las espumas metálicas, esta propiedad relaciona la densidad de la espuma con la de su material base y es expresada matemáticamente de la siguiente manera.

$$\rho_r = \frac{\rho^*}{\rho_m}$$

Donde:

ρ^* = Densidad de la espuma

ρ_m = Densidad del material base

1.4.2. Porcentaje de porosidad.

La porosidad (Φ) se define como la fracción total de espacios vacíos o poros que existen en un volumen, esta cantidad es expresada en decimal o en porcentaje, esta propiedad es de suma importancia debido a que esta repercute en propiedades como la conductividad térmica y eléctrica, además de que es de suma importancia para diversas aplicaciones acústicas u ópticas, o en aquellas en donde sea requerido el paso de un flujo.

La porosidad es obtenida mediante la siguiente ecuación.

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

Donde:

V_p =Volumen total de la probeta

V_s =Volumen correspondiente al sólido dentro de la probeta.

Se considera que una espuma es de baja porosidad cuando este valor es menor al 50% mientras que si el valor es mayor que este porcentaje se determina que la porosidad es alta.

1.4.3. Propiedades mecánicas.

Las propiedades mecánicas describen el comportamiento que un material adquiere con las fuerzas que son aplicadas sobre él, como lo son las fuerzas de compresión y tensión. Para las espumas metálicas el comportamiento de interés es el que tiene con respecto a las fuerzas de compresión el cual está relacionado con la porosidad, tipo de celda, anisotropía y algún otro parámetro estructural. También intervienen variables asociadas a los métodos de producción.

Este tipo de materiales es caracterizado mediante ensayos de compresión, los cuales generan curvas esfuerzo-deformación características.

Las curvas generadas muestran tres zonas específicas.

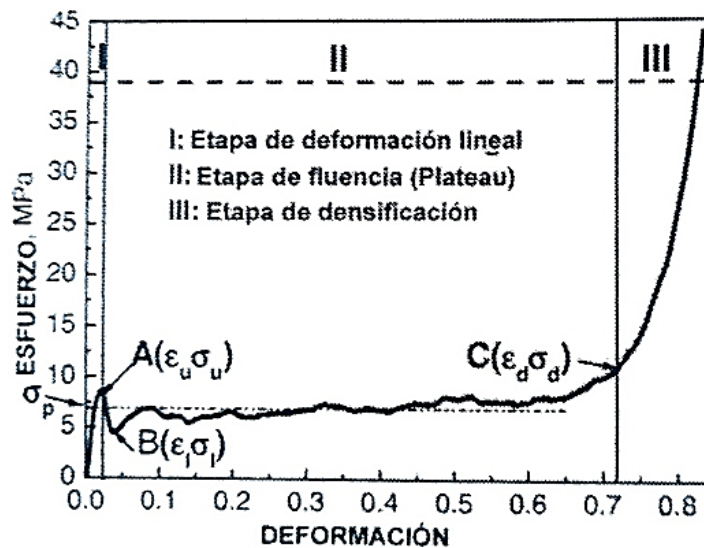


Figura 1.6. Curva esfuerzo-deformación típica para espumas metálicas.

La primera región de la curva presenta un comportamiento elástico lineal, este se muestra como una línea recta proporcional a la carga aplicada esto ocurre a bajas deformaciones, seguido de esto se muestra una segunda etapa de deformación, la cual es correspondiente a un comportamiento cuasi estático en donde existe una gran deformación respecto a una carga pequeña, esta zona es conocida como "Región de Plateau".

Finalmente llega un régimen de densificación, donde el esfuerzo necesario para la deformación incrementa. A continuación, se presentan comportamientos típicos de estos materiales:

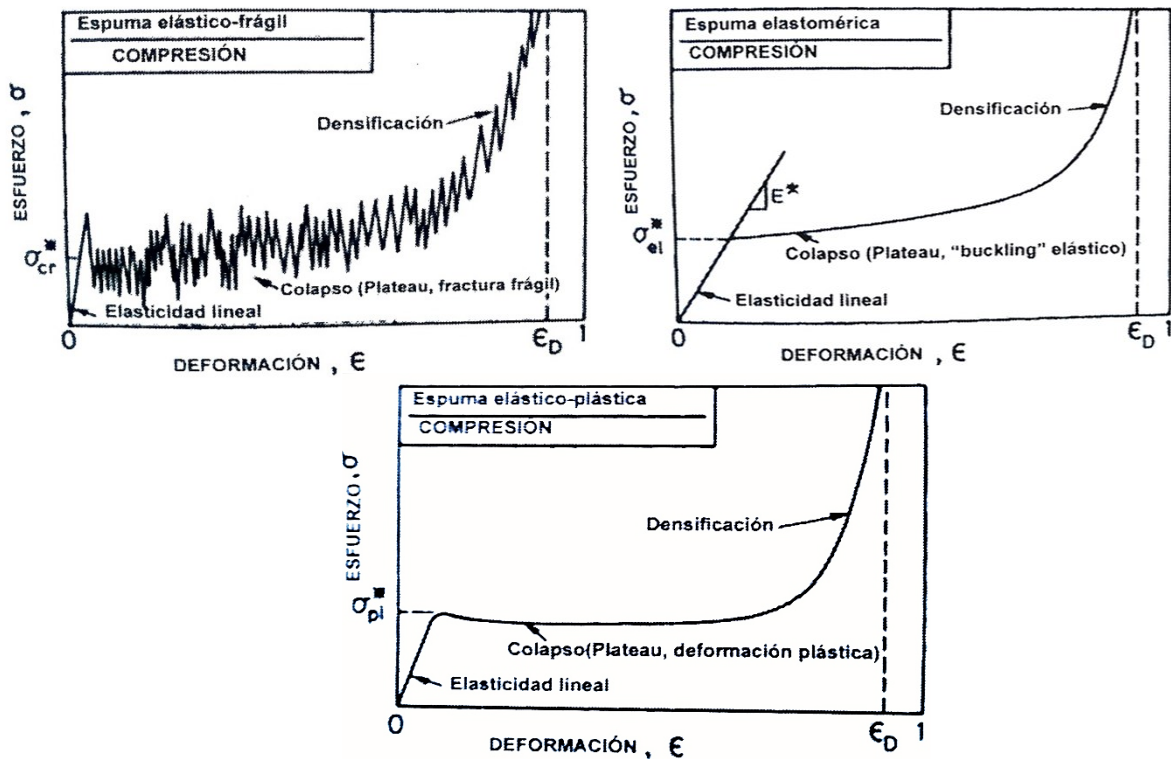


Figura 1.7. Curvas esfuerzo- deformación para los diferentes comportamientos.

Bajo el esfuerzo de compresión lo materiales porosos se pueden comportar de forma elastomérica, elástica-plástica y de manera frágil, estas diferencias son visibles a través de los mecanismos de deformación

que se presentan y son importantes para las aplicaciones estructurales, debido a que la estabilidad estructural es esencial.

En espumas elastoméricas el colapso se debe a un pandeo elástico en las paredes de la celda y este tiene posibilidad de recuperarse, en las espumas plásticas esto ocurre debido a la aparición de una deformación plástica y para el caso de las espumas frágiles las paredes de las celdas se fracturan de manera frágil sobre la región de Plateau.

-Zona lineal elástica

Sobre las propiedades más importantes en materiales se encuentra el comportamiento lineal elástico, este se encuentra descrito por el módulo de Young (E) el cual es la constante de magnitud asociada a este comportamiento y correspondiente a la pendiente en la zona lineal de la curva, esta etapa ocurre a bajas deformaciones, alrededor del 5%, y depende del tipo de celda de la espuma, siendo que en las espumas de celda cerrada existe un módulo de Young más alto que en una espuma con poro abierto, la diferencia radica principalmente en los mecanismos de deformación que hay entre estos dos tipos de celda.

Las imperfecciones estructurales que se puedan tener afectan al módulo de Young, tales como las curvaturas y los bordes de celda, hacen que este tenga una extensión más grande, otros parámetros como el tamaño y la forma de la celda no tienen un gran impacto sobre este.

- Región de Plateau

Eventualmente con el aumento de esfuerzo se presentará una deformación plástica, el cual se denomina colapso plástico, correspondiente al esfuerzo en donde comienza el colapso de las primeras paredes de las espumas para dar origen a una zona cuasi-constante.

Esta región muestra un esfuerzo que es ligeramente constante sobre un rango de deformación, este comportamiento es de gran interés para las aplicaciones que requieren una absorción de energía, interpretándose de tal manera que un esfuerzo puede ser absorbido durante un gran porcentaje de deformación.

El esfuerzo de Plateau corresponde a la media que hay entre un 20% y 40% de esfuerzo que es aplicado y la región de Plateau es la deformación correspondiente a 1.3 veces el esfuerzo de Plateau.

- Zona de densificación

Con el incremento del esfuerzo, la deformación sigue incrementando hasta el punto en el cual todas las paredes del material han colapsado y comienzan a tener contacto entre sí haciendo que el esfuerzo aumente drásticamente en un intervalo de deformación pequeño, este aumento es conocido como densificación, en esta etapa la pendiente que se presenta tiende a ser de la misma magnitud que el módulo de Young del sólido.

1.4.4. Capacidad de absorción de energía.

Es una propiedad muy importante de las espumas metálicas debido a las aplicaciones que estas pueden llegar a tener como disipadores de energía, disipadores de vibraciones mecánicas, uso de elementos estructurales como protectores contra impactos y miembros estructurales. Un buen absorbedor de energía debería soportar esfuerzos relativamente constantes sobre largas deformaciones.

Esta propiedad se considera como la energía que se absorbe por unidad de volumen en un cierto intervalo de deformación (W) y esta corresponde al área bajo la curva que existe en el diagrama esfuerzo deformación propio del material. Esta magnitud puede ser obtenida mediante la siguiente ecuación:

$$Ev = \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon$$

Donde:

σ = Esfuerzo aplicado

ε = Deformación producida

Para complementar esta propiedad también es necesario la obtención de otro parámetro para caracterizar a la absorción de energía, para esto es utilizado la eficiencia (η), este es el ratio de energía absorbida entre la energía de un material real y la energía de un material ideal, el cual se representa como:

$$\eta = \frac{1}{\sigma_{max} * \varepsilon} \int_0^e \sigma d\varepsilon$$

Donde:

σ_{max} = Esfuerzo máximo en la región de colapso

Generalmente las espumas metálicas tienen una buena capacidad de absorber energía.

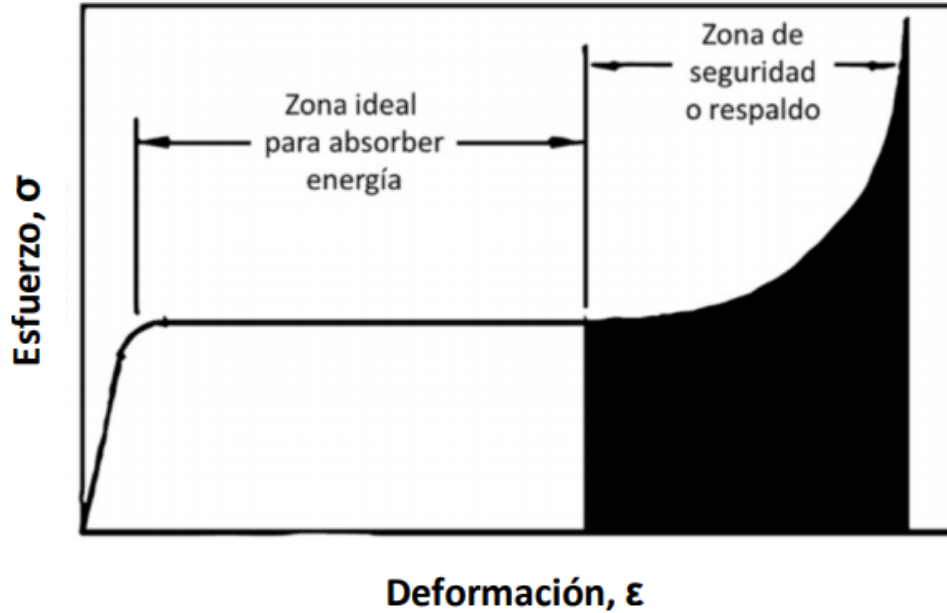


Figura 1.8. *Representación de la absorción de energía en una curva esfuerzo-deformación.*

Regularmente, se utilizan zonas de seguridad para absorber energía, debido a que la región de plateau es la zona ideal para absorber energía y aquí es donde se ha dado comienzo a una deformación plástica, lo mejor es conservar la integridad del material. Seguida se encuentra la zona de respaldo que se caracteriza por absorber una cantidad mayor de energía debido a la densificación.

1.5. *Aplicaciones.*

Se ha demostrado que las espumas metálicas tienen un amplio campo de aplicación dependiendo del rendimiento que se quiera alcanzar y la factibilidad de manufactura, sin embargo, el costo es un punto clave para la realización de estas ya que es necesario encontrar un balance costo-beneficio para poder avanzar en la fabricación, en muchos aspectos este interés puede desfavorecer a las espumas. Dependiendo del campo de aplicación el costo puede no tener tanta importancia como en el caso de las artes, diseño, medicina y deportes. Existen campos en los cuales las

espumas metálicas generan más beneficios que otros materiales y por lo tanto el costo es algo que ya no es prioridad, beneficios como su baja densidad y su gran absorción de energía son considerados para aplicaciones en las industrias automotrices, aeroespaciales y férreas, en donde la importancia de que un material sea ligero tiene un papel muy importante.

Además, debido a su naturaleza celular y las propiedades que se han mencionado, generalmente son empleadas en aplicaciones estructurales y funcionales, a continuación, se presentan las aplicaciones más recurrentes de las espumas metálicas.

1.5.1. *Aplicaciones estructurales.*

Materiales ligeros que contengan una alta rigidez son requeridos en la industria automotriz para la fabricación de construcciones ligeras, segmentos eléctricos de los autos, piezas de absorción de impactos y en algunos elementos para la reducción de ruido y un mejor control de calor. Esto hace que las espumas metálicas tengan una gran variedad de aplicaciones en este campo debido a que estas pueden proporcionar baja densidad, gran capacidad de absorber energía, aislamiento acústico y térmico y reciclabilidad, estas propiedades pueden ser aprovechadas en partes absorbentes de impacto, vigas, cajas de impacto y algunos cierres de motor. De igual manera la absorción de energía frente a los impactos, el aislamiento acústico y rigidez específica que proporcionan las espumas metálicas también son aprovechadas en la industria ferroviaria, con la diferencia de que las dimensiones son mayores.

Otra aplicación recurrente ocurre en la fabricación de estructuras tipo sándwich, las cuales se caracterizan por tener dos láminas unidas a un cuerpo central denominado como núcleo, que en este caso el núcleo está constituido de una espuma metálica, tienen como función principal

la disipación de energía contra impactos, atenuación de ruidos y son útiles como sistemas de protección contra incendios, este tipo de estructuras son consideradas para utilizarse en la industria aeroespacial y naval en sustitución de estructuras "alma alveolar".

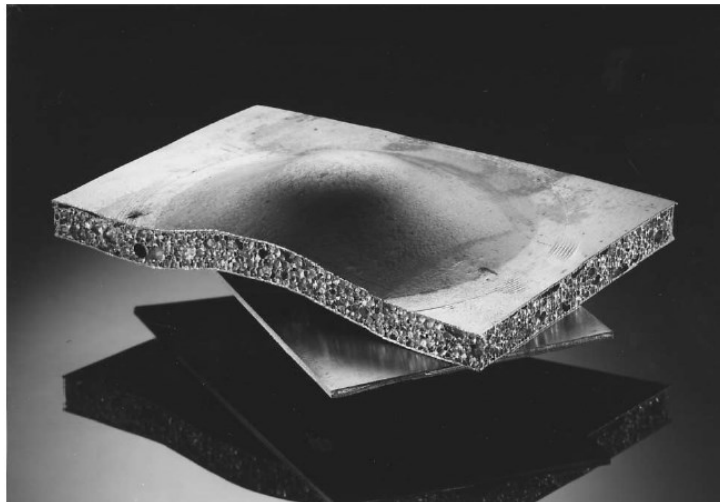


Figura 1.9. Estructura tipo "Sandwich" hecha con una espuma metálica de aluminio. (Banhart, John. 2000)

1.5.2. Aplicaciones funcionales.

1) Control acústico.

Varias aplicaciones de esta naturaleza pueden ser encontradas en la vida cotidiana, la capacidad de absorción de sonido que estas poseen permite la absorción de vibraciones impidiendo la transmisión de ondas de sonido, en las espumas de celda abierta la distribución de tamaño de poro permite que las ondas de sonido sean redireccionadas de la superficie hacia el interior para ser amortiguadas después de severas reflexiones, estas se encuentran generalmente en ciertas arquitecturas como auditorios, salas de conferencias, elevadores, rieles de los trenes, centros deportivos, etc...

2) Intercambiadores de calor.

Debido a su capacidad de soportar altas temperaturas y su buena conductividad térmica estos permiten un enfriamiento muy efectivo, espumas metálicas de celda abierta hechas de Al y Cu son las que más se emplean en la fabricación de estos, además también funcionan como sistemas de enfriamiento en motores, radiadores en torres de condensación, como intercambiadores de calor en máquinas térmicas como refrigeradores y como colectores compactos de calor que son utilizados para el enfriamiento de dispositivos electrónicos.

Las espumas de celda abierta también se utilizan en silenciadores, filtros y prototipos de reducción de ruido.

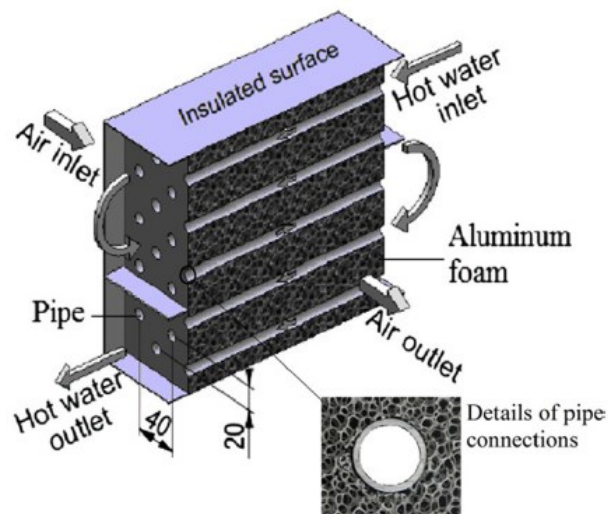


Figura 1.10. *Intercambiador de calor con estructura celular.*

3) Diseño, arte y decoración.

Su principal función es crear diferentes expectativas respecto a otros materiales, creando un contraste entre lo natural y el material celular creado por el humano. En general, en este campo existen una gran variedad de obras de las cuales es difícil tener una expectativa particular.

Las espumas son utilizadas para crear muebles, relojes, lámparas y diferentes artículos decorativos, se toman en cuenta las propiedades mecánicas y la baja densidad que estas ofrecen, estas también dan una imagen más atractiva.

Existen otras aplicaciones como en el campo electroquímico con espumas hechas de Al, Zn y Ni, que son utilizados en la purificación de agua, como electrodos y pilas, incluso en el campo biomédico con espumas hechas de Ti que proporcionan excelentes propiedades de biocompatibilidad.

1.6. Aleaciones de Al.

El aluminio es uno de los metales más abundantes sobre la tierra, este se encuentra combinado con una gran cantidad de minerales, siendo la bauxita y la criolita las principales fuentes de obtención, uno de los procesos principales mediante la cual es posible extraer aluminio consiste en la obtención de alúmina mediante el "Proceso Bayer", la materia prima obtenida en esta etapa es llevado a reducción por medio del proceso electrolítico "Hall-Heroult" , el aluminio obtenido por este procedimiento es denominado "aluminio primario" el cual se obtiene con una pureza alta, por otro lado existe el también llamado "aluminio secundario" el cual proviene de la reutilización del aluminio desechado. El aluminio es de gran aplicación industrial debido a que este proporciona una alta resistencia a la corrosión, una baja densidad con respecto a otros metales, alta

conducción térmica y eléctrica, capacidad de ser reciclado y una facilidad para alearse.

Debido a la facilidad de alearse, el aluminio tiene una alta gama de aleaciones para diferentes aplicaciones, las cuales son divididas de acuerdo con su proceso de manufactura:

- "Aluminium Cast Alloys" (ACA) o Aleaciones de fundición.
- "Aluminium Wrought Alloys" (AWA) o Aleaciones para procesos metalmecánicos.

De acuerdo con esta clasificación es sugerida una nomenclatura especial para cada una, la nomenclatura consiste en 4 dígitos, el primer dígito va del 1 al 9, este dependiendo de su principal elemento aleante, los últimos dos dígitos son referidos a la identificación de una aleación sobre un grupo, el segundo dígito indica las modificaciones que hay en la aleación. La diferencia de nomenclaturas consiste en la separación del último dígito por medio de un punto, por ejemplo: 1xxx y 1xx.x, refiriéndose a las aleaciones (AWA) y las aleaciones (ACA) respectivamente.

Principales aleantes para cada clasificación:

Tabla 1.1. Aleaciones de fundición (ACA)

| Elemento | Nomenclatura |
|--------------------------------------|--------------|
| Aluminio (99%) | 1xx.x |
| Cobre | 2xx.x |
| Silicio (Con adiciones de Cu y/o Mg) | 3xx.x |
| Silicio | 4xx.x |
| Magnesio | 5xx.x |
| Serie no utilizada. | 6xx.x |

| | |
|---------------|-------|
| Zinc | 7xx.x |
| Estaño | 8xx.x |
| Otro elemento | 9xx.x |

Tabla 1.2. Aleaciones para procesos metalmecánicos (AWA)

| Elemento | Nomenclatura |
|--------------------|--------------|
| Aluminio (99%) | 1xxx |
| Cobre | 2xxx |
| Manganeso | 3xxx |
| Silicio | 4xxx |
| Magnesio | 5xxx |
| Magnesio y Silicio | 6xxx |
| Zinc | 7xxx |
| Otro elemento | 8xxx |
| No utilizadas | 9xxx |

1.6.1. Efectos de los elementos aleantes.

Efecto del Cu. El cobre es la base para las series 2xxx y 2xx. Como principales características se tiene que estas aleaciones poseen una buena densidad y dureza, pero estas disminuyen su resistencia a la corrosión, estas aleaciones generalmente son tratadas térmicamente por medio de solubilización y envejecimiento con el fin de mejorar sus propiedades.

Además, el Cu tiene efectos sobre otras aleaciones tales como las aleaciones binarias Al-Mg en las cuales se puede mejorar la resistencia mecánica por un mecanismo de precipitación, además el Cu reduce la resistencia a la corrosión en estas aleaciones.

Efecto del Mg. El magnesio en aleaciones de aluminio es base para las series 5xxx y 5xx.x. En general el Mg provoca que el aluminio se endurezca, además de que la solubilidad que este tiene en el aluminio

permite adicionarlo en mayor proporción, el aumento en sus propiedades es debido a un endurecimiento por solución sólida, aunque también esto puede ser posible por medio de un endurecimiento por trabajo en frío, en general estas aleaciones también poseen una buena resistencia a la corrosión. Existe dificultad para obtener aleaciones tratables térmicamente ya que la precipitación de la fase Mg_3Al_2 se dificulta a menos que se le agreguen adiciones de Si, Cu o Zn para la formación del precipitado.

1.7. Aleaciones Al-Mg-Cu y Al-Cu-Mg

Las aleaciones Al-Mg-Cu son atractivas en la industria automotriz por su uso en los paneles de los automóviles debido a que se trata de una aleación de fuerza media, estas presentan un endurecimiento por envejecimiento similar a las aleaciones correspondientes a la serie 2xxx pero perteneciendo a la serie 5xxx. Generalmente las aleaciones Al-Mg son usadas en láminas para la manufactura de partes de autos por su formabilidad y resistencia, son sometidas a deformaciones en frío para después pasar por un proceso de ensamblado y pintado, estos procesos se realizan a temperaturas de entre $150^{\circ}C$ y 180° lo cual genera que las partes de automóvil pierdan los esfuerzos ganados durante la etapa de deformación en frío, es por esta razón que se busca aprovechar el "tratamiento térmico" que se aplica durante estas etapas sin perder las propiedades ganadas o de cierta forma ganarlas.

Las aleaciones Al-Cu-Mg tienen un gran interés para la industria aeroespacial y otras aplicaciones debido a su baja densidad, sus altas propiedades mecánicas y su resistencia a la corrosión. Estas son capaces de desarrollar altas propiedades mecánicas, así como retenerlas en altas temperaturas, estas aleaciones están siendo desarrolladas con el fin de obtener mejores desempeños.

1.7.1. Diagrama de fases.

Para el estudio de estas aleaciones es necesario recurrir al diagrama trifásico Al-Cu-Mg para determinar cómo es su comportamiento en conjunto.

El diagrama de fases muestra cómo es que la solubilidad del cobre decrece conforme más magnesio es adicionado en distintas temperaturas, esto se puede observar

En la siguiente representación se muestra las fases que son formadas en función de la composición de Cu y Al en un tratamiento de envejecimiento a 190°C

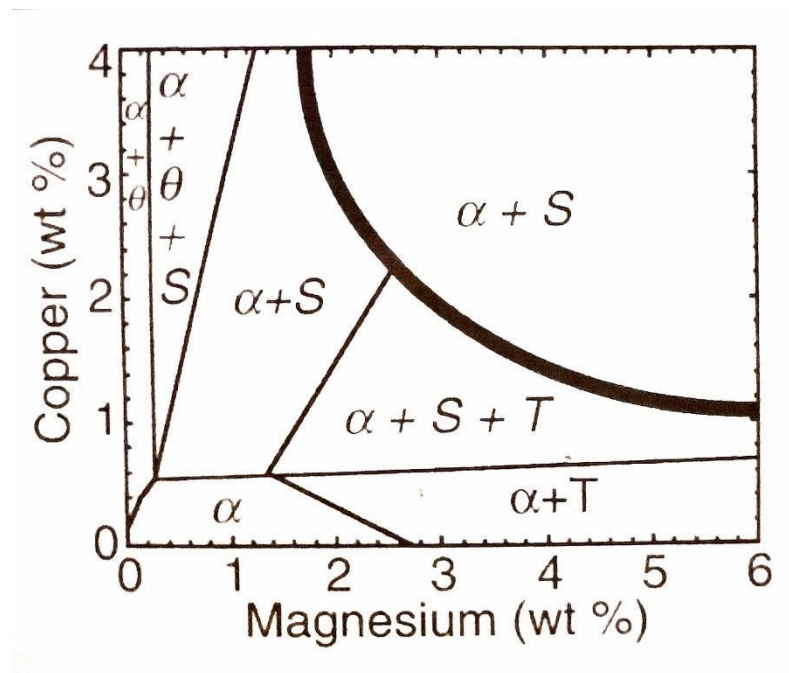


Figura 1.11. Diagrama ternario de la aleación Al-Cu-Mg. (Ringer, S. 2000)

1.8. Mecanismos de endurecimiento

1.8.1. Aleaciones Al-Cu-Mg.

Estas aleaciones se encuentran en una zona binaria del diagrama de fases ($\alpha + S$) y son conocidas por su capacidad de aumentar sus propiedades mecánicas por medio de un endurecimiento por envejecimiento.

El endurecimiento se da en dos etapas. En la primera etapa el endurecimiento ocurre rápidamente y se mantiene constante durante un periodo de tiempo prolongado, aquí al menos el 60% del endurecimiento total de envejecimiento ocurre. Después, el endurecimiento presenta una meseta que se incrementa conforme el tiempo avanza hasta llegar a un pico final, este comportamiento corresponde a la segunda etapa, en cuanto este punto es alcanzado comienza un decrecimiento de propiedades.

Existen diferentes teorías que tratan de explicar estas etapas de endurecimiento, las cuales consideran una precipitación de aglomerados de Cu y Mg, también a la formación de zonas GPB (Guiner-Preston-Bagaryastky) las cuales son asociadas con ordenamientos de corto alcance con geometría cilíndrica y a la fase S. Se hace referencia a que la aparición de estos fenómenos da origen al endurecimiento.

Se sugiere que el endurecimiento rápido es debido a que los átomos de Cu y Mg quedan atrapados dentro de las dislocaciones dando origen a una interacción soluto-dislocaciones, la formación de los aglomerados de Mg y Cu, además de que la precipitación de la fase S ocurre cuando las propiedades mecánicas se mantienen constantes para dar paso a la formación de las zonas GPB, las cuales son generadas durante la segunda etapa.

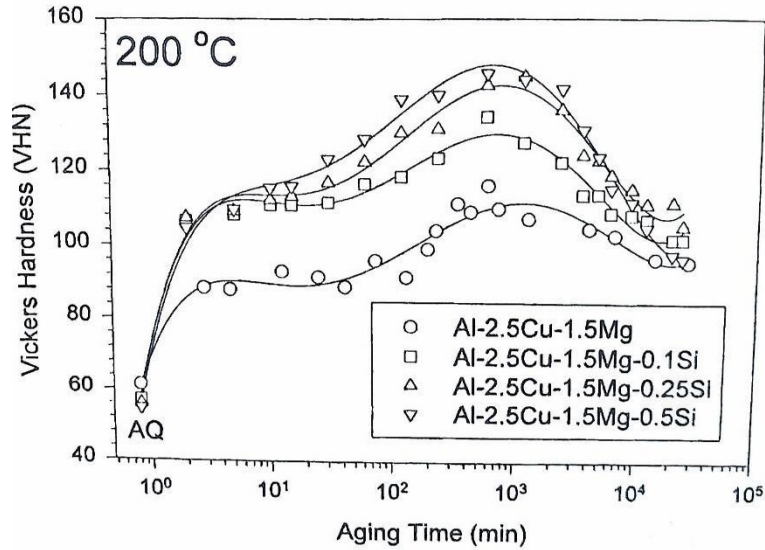


Figura 1.12. Curva de envejecimiento de una aleación Al-Cu-Mg.

1.8.2. Aleaciones Al-Mg-Cu

Las aleaciones Al-Mg-Cu se encuentran en una región ternaria del diagrama de fases ($\alpha+S+T$) por lo que la precipitación involucraría la aparición de la fase S, T y sus precursores metaestables. Sin embargo, en varios estudios comerciales la fase T no aparece y la secuencia de la precipitación sigue de igual manera al mecanismo de las aleaciones Al-Cu-Mg, aunque hay algunas diferencias dentro de la etapa de endurecimiento rápido siendo que para estas aleaciones el endurecimiento continua sin que esta se mantenga constante como en el caso de las aleaciones Al-Cu-Mg.

Capítulo 2. Técnicas experimentales.

En esta sección se describen las etapas seguidas para la producción de las espumas metálicas, desde la obtención de las aleaciones hasta la caracterización mecánica, además de las técnicas utilizadas para la realización de las pruebas de caracterización física y estructural. También se presentará el procedimiento seguido para los tratamientos térmicos aplicados y su caracterización mecánica final.

2.1. Fabricación de aleaciones.

Para la experimentación se requirió de la fabricación de dos diferentes aleaciones cuyas composiciones químicas varían en cuanto a la cantidad de Mg y Cu correspondiente con el fin de comparar los efectos que tienen las diferentes proporciones de los elementos aleantes bajo el mismo proceso.

Las composiciones químicas para las aleaciones fueron las siguientes:

Al-Mg-Cu. 4.2% Mg y 0.6% Cu

Al-Cu-Mg. 1.25% Mg y 2.1% Cu.

Para la realización de esta aleación se empleó aluminio comercial 1100, además de magnesio y cobre cuya pureza era igual a 99.9%.

2.2. Fundición.

El proceso fundición se realizó en un horno de inducción con atmósfera controlada (atmósfera de Argón), debido a la reacción que se produce entre el magnesio y el oxígeno que existe en la atmósfera, esto favorece a que no haya una pérdida considerable de magnesio y así no afectar en la composición deseada.

Para realizar la fundición dentro del horno fue necesario utilizar un crisol de grafito el cual fue limpiado antes de la fusión para evitar impurezas. Una vez fundido, el metal líquido fue colado en moldes metálicos con geometría cilíndrica.



Figura 2.1. *Horno de inducción de atmósfera controlada.*

Una vez solidificadas las aleaciones dentro de los moldes cilíndricos, son recuperados y llevados a un proceso de maquinado.

En este proceso, el objetivo es reducir el diámetro de los cilindros de aluminio y obtener una altura que se ajuste con las dimensiones del reactor y preforma deseada para la infiltración, estos son reducidos 2 mm de diámetro y se cortan a una longitud de 8 cm.



Figura 2.2. Cilindros obtenidos después del proceso de maquinado.

2.3. Método de infiltración.

2.3.1 Preparación de la preforma

Para la fabricación de espumas metálicas por medio de infiltración es necesario el uso de una preforma de sacrificio, su función principal es combinarse con el metal líquido la cual al momento de la solidificación mantendrá un solo volumen con el metal, tras su eliminación este dejará poros en la estructura como resultado. Para cumplir con esta función la preforma debe cumplir con ciertos criterios. Los cuales son:

- 1) La preforma debe tener un punto de fusión mayor al de la aleación para que pueda mantener su geometría dentro del metal líquido.
- 2) La preforma debe de ser muy fácil de eliminar de la matriz del metal.

Para el caso de infiltración fue utilizado NaCl, esto debido a que se apega a las condiciones antes mencionadas.

El NaCl alcanza un punto de fusión de 800°C, la cual es alta en comparación con las aleaciones fabricadas, cuyos puntos de fusión varían aproximadamente en 660°C.

Además, el NaCl se caracteriza por la interacción que presenta con las moléculas de agua, lo cual facilita que esta se disuelva fácilmente en este medio sin afectar a la matriz del metal.

Antes de comenzar con la fabricación es necesario realizar un proceso de cribado a la preforma, esto con el fin de mantener controlado el tamaño de los poros, las cribas utilizadas fueron de 4.75 mm y 3.35 mm, los granos atrapados en este intervalo fueron los que se utilizaron para el proceso de infiltración. Para tener granos de este tamaño fue requerido utilizar sal de mar o sal de grano.

2.3.2. Preparación del reactor.

Para la fabricación fue necesario el uso del siguiente equipo:

- Crisol hueco con forma cilíndrica
- Placas con geometría rectangular con hendiduras circulares que se ajusten a la medida de la circunferencia del crisol. Estas placas funcionan como tapas, la tapa inferior debe contener roscas. La tapa superior cuenta con un tubo integrado para facilitar el flujo de gas.
- Pernos enroscados con rondanas y tuercas para una efectiva sujeción.
- Sellos de grafito con una circunferencia equivalente a la circunferencia de las hendiduras de las placas.

Los componentes deben de cumplir con ciertas características para cumplir con su funcionamiento y estos tengan un tiempo de vida más

largo, como tener una buena resistencia a las altas temperaturas y soportar presiones altas.

Para comenzar con la preparación el crisol es lijado, lavado y secado con el fin de remover impurezas, después es recubierto con una capa de nitruro de boro sobre las paredes al interior del crisol, la función del nitruro de boro es evitar la adherencia del metal líquido con las paredes y también facilitar la remoción del metal cuando este se encuentre totalmente solidificado.

En cuanto a la fabricación de los anillos de grafito, estos deben contar con medidas de 1 mm aproximadamente, correspondiente a la circunferencia de las hendiduras que existen en las placas, estos son colocados dentro de las hendiduras con la finalidad de que no ocurra algún derrame al momento de retirar el reactor del horno.

Para el ensamblaje del reactor se requiere de los pernos, las tuercas y las rondanas, las cuales son colocadas en las esquinas de las placas.

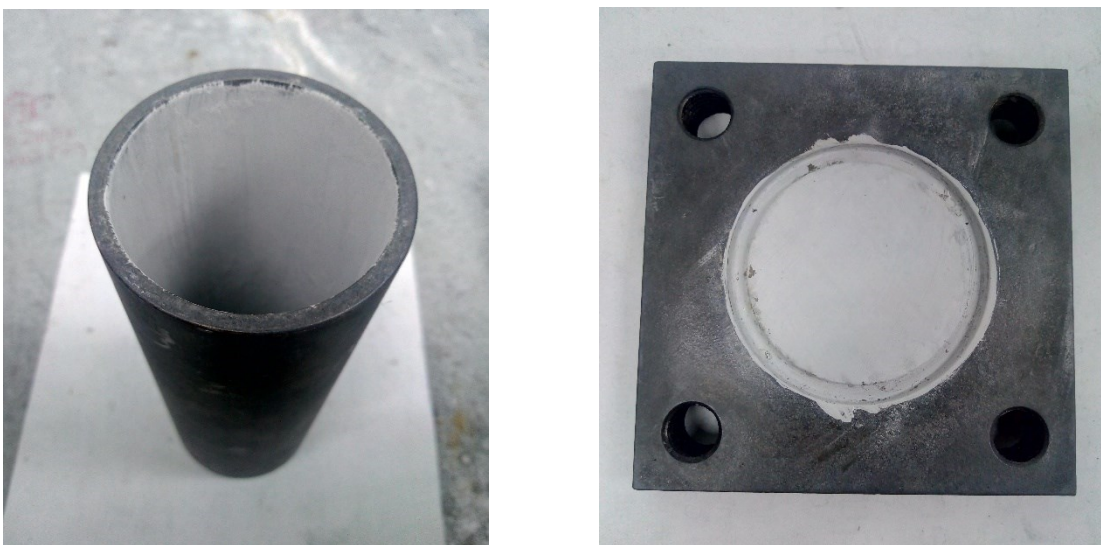


Figura 2.3. *Partes del reactor cubiertas con Nitruro de Boro.*

Para armar el sistema de infiltración dentro del crisol se coloca primero los granos de NaCl y encima se colocan los cilindros maquinados de la aleación, esto se hace con el objetivo de que al momento en que se ejerza la presión el metal líquido sea empujado hacia el NaCl y así combinar el metal líquido con la preforma.

Para terminar, se coloca la placa superior y esta es sellada con ayuda de las rondana y tuercas, la finalidad de sellar completamente el reactor es para evitar una fuga de gas, así como de líquido durante el proceso, debido a la variación de las presiones que conlleva este proceso.

La cantidad de sal colocada dentro del reactor debe ser equivalente a la cantidad esperada de infiltración, debido a que la altura del cilindro es 8 cm, se coloca la misma altura de sal, lo cual era equivalente a 300 gramos.

2.3.3. Proceso de infiltración.

Con el reactor listo se procede a colocar válvulas que están ligadas a un tanque de argón y a una bomba de vacío, debido a que la aleación contiene magnesio es necesario realizar ciclos de purgado, estos ciclos se realizan utilizando la bomba de vacío durante 5 min y después introduciendo argón durante otros 5 minutos, este proceso se repite tres veces, cerrando la entrada de argón cuando se aplica el vacío y cerrando la entrada de vacío cuando se introduce el gas, se hace para evitar que el argón sea succionado del sistema.

Terminados los ciclos de purga se procede a introducir el reactor al horno eléctrico, este debe estar previamente encendido, la temperatura utilizada en el horno fue de 780°C, esto con el fin de que la aleación se funda sin que la preforma alcance su temperatura de fusión.

La presión requerida para la fundición de la aleación de 0.5 bar durante una hora posteriormente se eleva la presión a 1.2 bar durante 25 minutos con el objetivo de que el metal se infiltre.



Figura 2.4. *Reactor introducido al horno eléctrico, conectado al tanque de gas y a la bomba de vacío.*

Terminado el proceso de infiltración se retira el reactor del horno, se coloca sobre una placa de cobre y se deja enfriar hasta llegar a temperatura ambiente. Al dejarla sobre la placa de cobre el calor se direcciona hacia el interior del crisol y así evitar la formación de un rechupe sobre la zona infiltrada.



Figura 2.5. *Reactor al momento de retirarlo del horno eléctrico.*

Cuando la aleación está totalmente solidificada se extrae del reactor, obteniendo un cilindro con metal infiltrado y NaCl.



Figura 2.6. *Espuma obtenida mediante el proceso de infiltración.*

La espuma obtenida se someterá a un proceso de maquinado en torno para obtener probetas que se someterán a pruebas de compresión.

Las medidas requeridas para el ensayo son de 2 cm de altura y de 2.54 cm de diámetro.



Figura 2.7. *Probetas para compresión obtenidas del maquinado.*

Las espumas obtenidas fueron pesadas antes de continuar con el siguiente procedimiento.

2.3.4. *Eliminación de la preforma.*

El NaCl es un compuesto que es fácil de disolver en agua debido a su naturaleza iónica, esto beneficia a este proceso ya que el agua no influye de manera corrosiva a la aleación y así se evita que sus propiedades se vean afectadas.

Las probetas fueron colocadas en un vaso de precipitados con agua desionizada y después en un ultrasonido por alrededor de 40 minutos para disolver el NaCl. El agua fue cambiada en varias ocasiones debido a que se tornaba con un color gris además de que la concentración de iones Cl^- aumentaba en la solución y esta podía generar efectos corrosivos en la espuma.

Pasado el tiempo de permanencia en el ultrasonido las probetas se dejaron secar. Las probetas se pesaron nuevamente para determinar una

relación entre el peso inicial y el peso final obtenido después de la remoción de la preforma.



Figura 2.8. *Ultrasonido utilizado para la eliminación del NaCl.*



Figura 2.9. *Probetas sin NaCl retiradas del ultrasonido*

2.4. *Microscopia óptica.*

2.4.1. *Estereoscopio*

El estereoscopio se trata de un microscopio óptico el cual permite la observación de las muestras sin necesidad de una previa preparación, esto ayuda a poder caracterizar las espumas una vez removida la preforma.

Como se mencionó previamente las espumas pueden clasificarse dependiendo de la naturaleza de los poros, las cuales son:

- Poro abierto
- Poro cerrado

Por este motivo se debe de clasificar el tipo de poro obtenido mediante el proceso de infiltración, es necesario considerarlo ya que esto afecta a las propiedades mecánicas.

Además, es necesario comprobar el tamaño de los poros obtenidos para corroborar que estos coincidan con el tamaño de la preforma agregada, asegurando que el tamaño de los poros sean lo más homogéneos posibles.

Se observaron en un estereoscopio las espumas ya con la preforma retirada, estas fueron observadas con un aumento de 10x.

Para la comparación del tamaño de poro fue requerida una rejilla de cobre, cuya medida es de 3 mm de diámetro, la rejilla fue colocada en diferentes posiciones sobre el diámetro de las espumas metálicas.

Para terminar, se obtuvieron imágenes de diferentes zonas de las probetas.

2.5. *Microscopia electrónica de barrido.*

La microscopia electrónica de barrido se caracteriza por usar un haz de electrones en lugar de luz, para lograr la extracción del haz de electrones es necesario tener un cátodo y un ánodo por el cual se genere una diferencia de potencial y así lograr la extracción, a diferencia de la microscopia óptica el haz de electrones permite tener mayores aumentos para la observación de muestras, así como, generar diferentes señales por las cuales se pueden tener mayor información de una muestra, tales como:

- Electrones retro dispersados
- Electrones secundarios
- Espectrometría de dispersión de energía de Rayos X (EDS)

Para la parte experimental es necesario conocer la composición química de las aleaciones obtenidas, por lo cual se requiere la caracterización por medio de rayos X

2.5.1 *Espectrometría de dispersión de energía de Rayos X (EDS)*

Cuando la muestra es alcanzada por un haz de electrones estos emiten una radiación conocida como "Rayos X característicos" este tipo de radiación es única para cada elemento lo cual permite gráficas su identificación. Los resultados obtenidos son que indican una distribución de los elementos a través de una sección de la muestra.

Para efectuar la prueba se realizaron cortes a los remanentes generados por la producción de las espumas, obteniendo piezas rectangulares, esto para las dos aleaciones.

Las muestras fueron sometidas a un desbaste mecánico sobre una de sus caras, con el uso de lijas sucesivas de tamaño 240, 320, 400

hasta llegar a 600, se procuró que las piezas mantuvieran su segunda superficie recta.

2.6. *Picnometría.*

El picnómetro es un equipo cuya función principal es la medición del volumen y densidad de una sustancia, ya sea sólida o líquida. Esto es requerido ya que se necesita conocer la porosidad obtenida durante el proceso de infiltración.

El picnómetro de helio tiene la característica de hacer mediciones de alta precisión mediante el desplazamiento del gas. El gas es inyectado para posteriormente ser retirado, esto se repite durante varios ciclos.

Debido a que los datos que se requieren para la obtención de la porosidad es el volumen de la matriz sin la preforma, solo se requirió de las espumas con la preforma eliminada.



Figura 2.10. *Picnómetro utilizado para la determinación del volumen de la espuma.*

Después de la debida calibración del equipo, las muestras fueron colocadas en el equipo y este se puso en marcha, los ciclos asignados para cada fueron 5, de las cuales el volumen promedio de las mediciones indica la cantidad de metal que se tiene tras la eliminación de la preforma, esto nos indica la cantidad de poros formados.

2.7. Tratamientos térmicos.

2.7.1. Tratamiento de solubilización.

Para obtener una composición química más homogénea en las espumas y disolver los precipitados presentes se realizó un tratamiento de solubilización en un horno tubular.

El horno se elevó a una temperatura de 550 °C, las probetas fueron introducidas con un tiempo de permanencia de 1 hora. Terminado el tiempo de permanencia las probetas se templaron en un balde con agua.



Figura 2.11. *Horno tubular utilizado para el tratamiento de solubilización.*

2.7.2. *Tratamiento de envejecimiento.*

Terminado el tratamiento de solubilización el objetivo es realizar un tratamiento de envejecimiento para comprobar que las espumas obtenidas de las aleaciones que se estudian tengan un aumento en sus propiedades al igual que pasa en estado sólido.

Las probetas se sometieron a tiempos cortos de 0, 3 y 10 minutos, también a tiempos largos de 3, 6 y 24 horas. Terminado el tiempo de permanencia las probetas fueron sacadas del horno y se templaron inmediatamente en un balde de agua fría.

Debido a los largos tiempos de permanencia que las probetas necesitaban permanecer dentro de la mufla, las piezas podían presentar corrosión por altas temperaturas debido a esto fue necesario sumergir las probetas en aceite. Este aceite cumplía con la característica de no evaporarse a la temperatura de 200°C lo cual, permite proteger la matriz de las espumas.



Figura 2.12. *Crisol con aceite utilizado para el tratamiento de envejecimiento.*

Las piezas se colocaron en un crisol de acero inoxidable, con un nivel considerable de aceite, para un mejor manejo de las probetas estas fueron envueltas en papel aluminio.

Al momento en que las piezas fueron retiradas fueron sometidas a un temple en agua fría, posteriormente estas fueron lavadas y secadas.

2.8. Pruebas mecánicas.

2.8.1. Ensayo de compresión

El ensayo de compresión consiste en la aplicación de una carga axial creciente y gradual sobre una probeta cuyas dimensiones deben guardar una relación longitud/diámetro de 0.8. Esta carga es aplicada a una velocidad de deformación determinada y hasta un porcentaje límite de deformación de la probeta. Al final del ensayo se tiene como resultado una curva esfuerzo-deformación.



Figura 2.13. *Máquina universal de pruebas mecánicas.*

Las condiciones para la realización del ensayo fueron los siguientes.

-Velocidad de 0.5 mm/min

-80% de deformación de la probeta.

Las probetas utilizadas deben cumplir con las dimensiones que van de acuerdo con la norma ASTM E9 89a para ensayo de compresión, las dimensiones indicadas por la norma son de 20 mm de altura y 2.54 cm de diámetro.

Para la realización del ensayo las probetas fueron secadas y etiquetadas con respecto al tiempo de tratamiento térmico cumplido.

2.9. Análisis Térmico Diferencial (DSC)

Es una técnica en la cual una diferencia de energía es impuesta entre una sustancia y un material de referencia, las cuales son controladas mediante un programa de temperatura, al final se obtienen curvas DSC en las cuales se muestran transiciones que hay en el material durante el calentamiento o la solidificación.

Las muestras utilizadas para esta prueba fueron extraídas del material sobrante en la fabricación de las espumas metálicas. Se cortaron muestras pequeñas en forma cuadrangular, con un peso aproximado de 0.15 g.

Las muestras fueron sometidas a un desbaste mecánico con el fin de que estas tuvieran una superficie totalmente plana. Para cada aleación fueron preparadas 3 muestras respectivamente.

Capítulo 3. Resultados y Discusión.

Este capítulo está enfocado en los resultados obtenidos en las pruebas descritas anteriormente, partiendo de las composiciones químicas obtenidas a partir del proceso de fundición para así seguir con los resultados experimentales de caracterización física y estructural, para después finalizar con los efectos vistos de los tratamientos térmicos sobre las espumas para cada aleación y su caracterización mecánica.

3.1. Espectrometría de dispersión de energía de Rayos X (EDS)

Para conocer la composición química de las aleaciones obtenidas a partir de la fundición fue necesario el uso de esta técnica, las composiciones obtenidas se muestran a continuación:

Tabla 3.1. Composiciones obtenidas.

| Aleación | Cu | Mg | Si |
|----------|------|------|-------|
| Al-Cu-Mg | 2.06 | 1.27 | 0.034 |
| Al-Mg-Cu | 0.59 | 4.28 | 0.039 |

Con los resultados proporcionados podemos constatar que las aleaciones obtenidas concordaron con la composición química esperada para el Mg y Cu, además, de algunas otras impurezas, por lo cual podemos esperar que las espumas producidas contengan cierta composición.

3.2. Producción de espumas

A continuación, se presentan las características físicas que se obtuvieron al finalizar el proceso de infiltración.

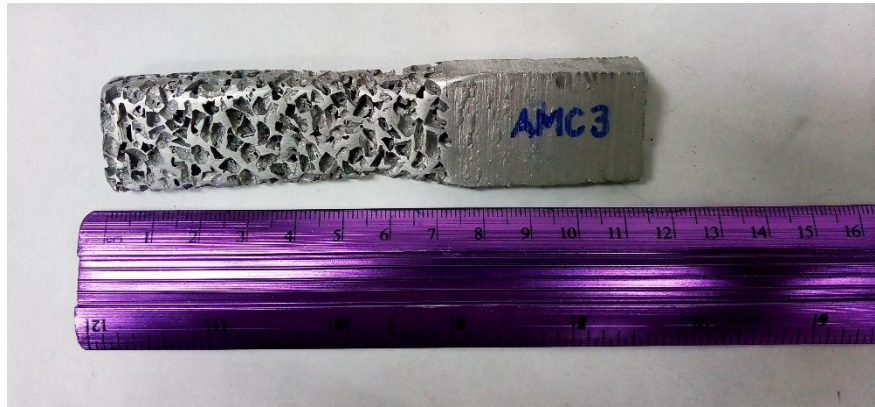


Figura 3.1. *Transición ocurrida durante el proceso de infiltración.*

Como se observa en la figura 3.1 existe una transición de metal sólido a metal con poros, la imagen muestra como la cantidad de preforma utilizada afecta a la cantidad de metal infiltrado quedando un remanente de metal sólido, en el cual se da paso a la formación de un rechupe al final de la solidificación, además, se puede notar que la porosidad es relativamente homogénea a lo largo de la zona donde el metal fue infiltrado, lo cual garantiza cierta similitud de las piezas que se obtienen después del proceso de maquinado.

De acuerdo con la norma ASTM E9 89a, las probetas obtenidas para el ensayo de compresión deben conservar una relación de 0.8 entre su longitud y el diámetro, en la figura 3.2 se observan las espumas obtenidas para este ensayo.

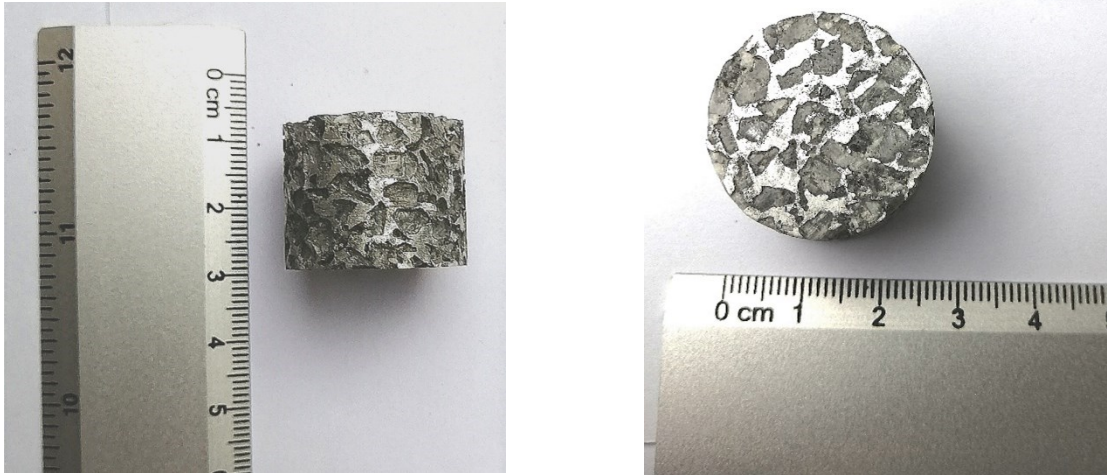


Figura 3.2. Ejemplo de espuma metálica utilizada en la experimentación.

La cantidad de espumas maquinadas tuvo un requisito mínimo de 6 piezas para cada tiempo de tratamiento y para cada aleación, de las cuales todas cumplían con las dimensiones requeridas por la norma.

3.3. Propiedades físicas

3.3.1 Porosidad.

Las probetas obtenidas durante el proceso de infiltración fueron pesadas antes y después de la eliminación de la preforma, esto con el fin de conocer la cantidad de NaCl que había quedado atrapada dentro de la matriz.

Tabla 3.2. Cantidad de NaCl removido de las dos aleaciones.

| Aleación | Masa inicial [g] | Masa final [g] | NaCl removido[g] | Volumen final s/NaCl [cm ³] |
|----------|------------------|----------------|------------------|---|
| Al-Cu-Mg | 21.28 | 9.57 | 11.71 | 3.42 |
| Al-Mg-Cu | 22.02 | 10.11 | 11.91 | 3.66 |

Para el caso de las espumas fabricadas con la aleación Al-Cu-Mg, la cantidad de NaCl retirada representa un 55.03% mientras que para la

aleación Al-Mg-Cu este tiene un valor de 54.09% con respecto al peso inicial de las espumas, estos resultados muestran que la cantidad de metal que es infiltrado es menor que la cantidad de preforma, mientras el NaCl es aprovechado en su totalidad existe gran parte de metal que puede ser reutilizado.

En sí las espumas de ambas aleaciones presentan una cierta similitud en la cantidad de NaCl que fue retirada de la matriz, en comparación, las masas obtenidas, así como el volumen tampoco presentan una gran diferencia por lo cual es correcto asumir que el método de fabricación ofrece resultados homogéneos para ambas aleaciones en cuanto a características físicas de las espumas.

Tabla 3.3. Parámetros estructurales de ambas aleaciones.

| Aleación | Densidad de la espuma [g/cm ³] | Densidad relativa | Porosidad T [%] | Porosidad R [%] |
|----------|--|-------------------|-----------------|-----------------|
| Al-Cu-Mg | 0.895 | 0.33 | 66 | 66.25 |
| Al-Mg-Cu | 1.0 | 0.37 | 62.3 | 64.0 |

Como se puede observar en la tabla 3.3 , las espumas presentan bajas densidades y porosidades relativamente altas, estas espumas son consideradas de alta porosidad debido a que rebasan el 50% que propone este parámetro como fue mencionado antes, es posible corroborar que mientras la porosidad aumenta la densidad de la espuma decrece o será menor y esto ocurre simplemente porque una alta porosidad indica que la cantidad de poros obtenidos es mucho mayor a la cantidad de metal en la matriz, como se muestra en la tabla 3.2 la cantidad de NaCl retirado fue mayor que la cantidad de metal infiltrado. Para el caso de ambas aleaciones, presentan ciertas diferencias, siendo que las espumas

fabricadas de Al-Cu-Mg son un poco más ligeras que las que están hechas de Al-Mg-Cu, estas porosidades presentaron una dispersión de +/- 3% de las espumas obtenidas para cada aleación debido al empaquetamiento y la morfología de la preforma, además las porosidades para las espumas de Al-Cu-Mg muestran una mejor consistencia en su porosidad teórica y real, mientras que para el caso de las espumas que fueron fabricadas con la aleación Al-Mg-Cu ocurre el caso contrario, existe una pequeña dispersión entre su porosidad teórica y real, esto no tiene tanta relevancia ya que los resultados siguen mostrando que estas son menores a las presentadas de Al-Cu-Mg y no existe una diferencia significativa.

3.3.2. Microscopía óptica.

Con el uso de un estereoscopio fue posible obtener imágenes de las superficies de las espumas, con el fin de tener una mejor visión de los poros obtenidos y su interconexión, para corroborar el tipo de celda que predomina en la matriz, así como, tener un campo de visión más amplio con la forma y tamaño de los poros.



Figura 3.3. *Imágenes obtenidas por el estereoscopio a) Zona lateral, b) Zona central.*

Mediante las imágenes obtenidas en el estereoscopio se puede visualizar, por el alcance de la luz, que los poros obtenidos presentan una interconexión en la mayoría de los poros esto por la profundidad de zonas oscuras que se aprecian, por lo cual se define que las espumas obtenidas mediante este proceso son de celda abierta.

Las rejillas colocadas permiten la comparación de su tamaño con el de los poros, lo que se observan son poros con menor y mayor tamaño, estos poros no son homogéneos debido a la preforma, siendo que el NaCl es un cristal amorfo, la orientación en la que los granos se encontraban al momento de la infiltración definió la zona observada por el microscopio. Sin embargo, los poros no presentan una gran diferencia en comparación con la rejilla por lo cual podemos asumir que el intervalo de los tamaños de granos corresponde al utilizado en el proceso de cribado, teniendo a la rejilla de cobre como un tamaño medio de estos.

3.4. Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

Esta técnica permite la obtención del comportamiento cinético de los precipitados que aparecen durante el tratamiento térmico. Las figuras 3.4 y 3.5 muestran los termogramas obtenidos para ambas aleaciones.

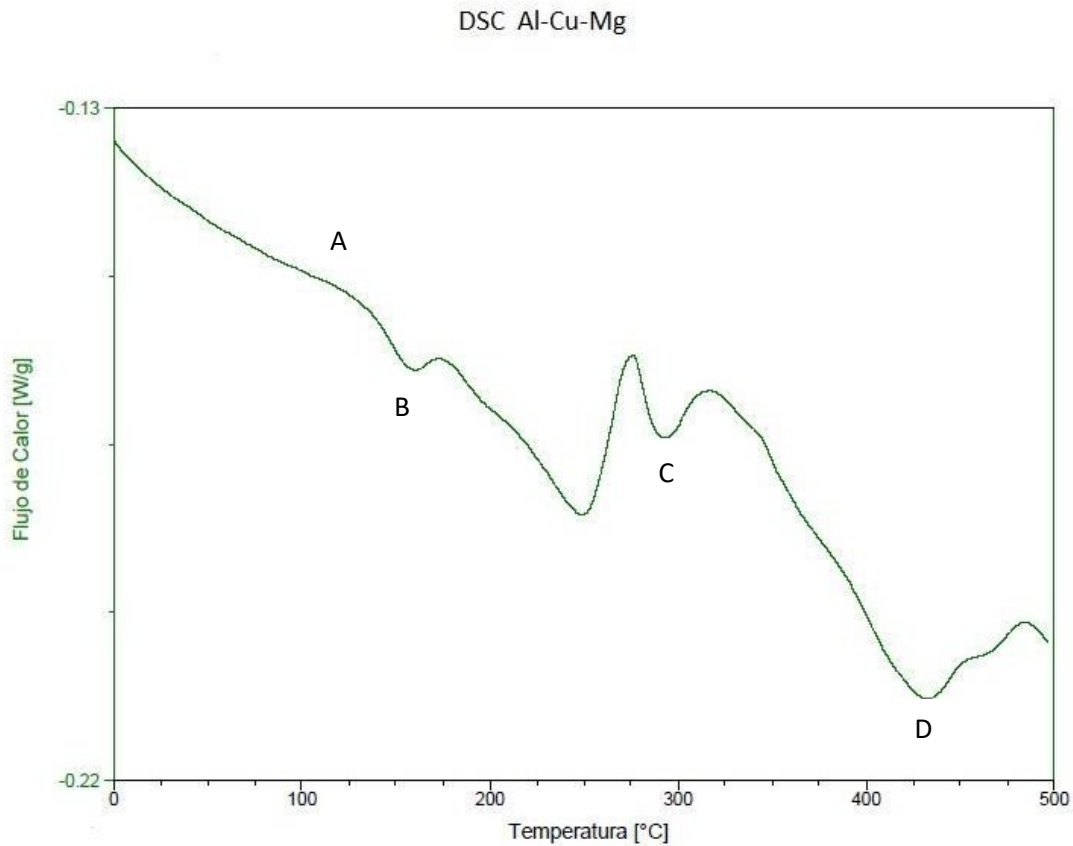


Figura 3.4. Termograma de la aleación Al-Cu-Mg.

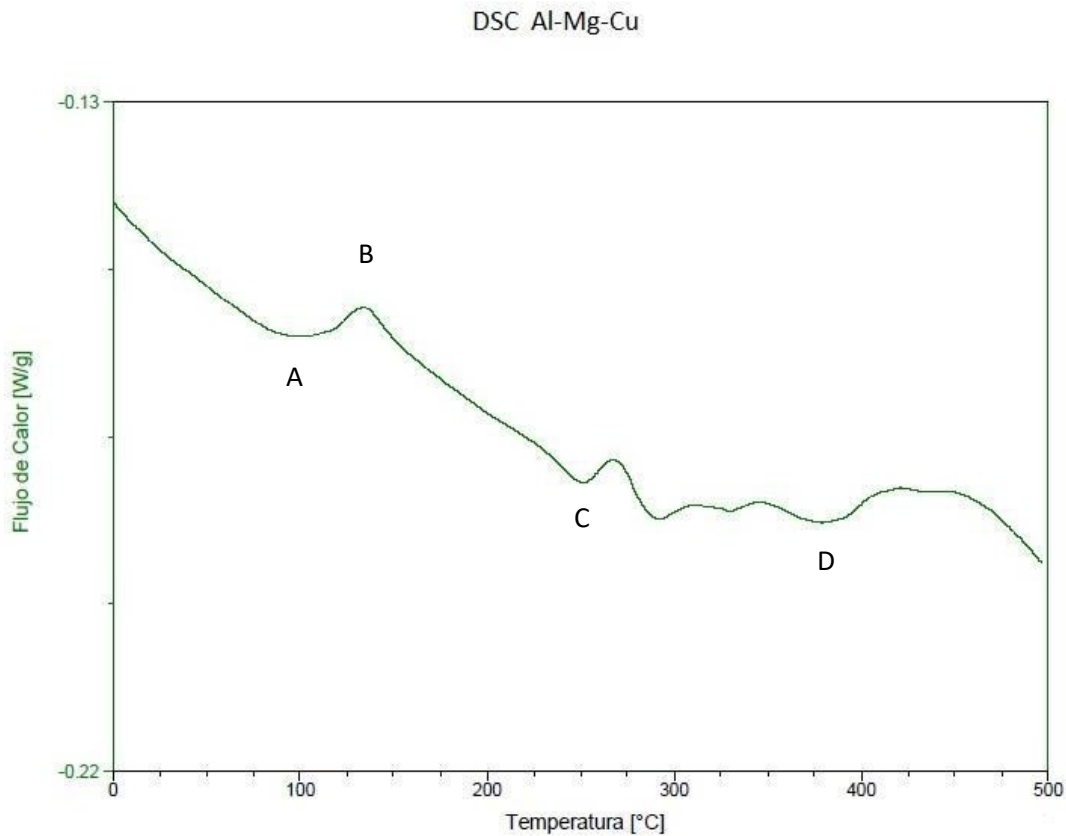


Figura 3.5. *Termograma de la aleación Al-Mg-Cu.*

Los termogramas obtenidos muestran las transformaciones que obtiene la aleación por medio de picos exotérmicos o endotérmicos, en el caso de un elemento puro, un termograma relacionado a este no tendría por qué presentar este tipo de picos, para el caso de estas aleaciones se observa que ambas presentan algunas similitudes.

En la figura 3.4 se muestra el termograma de la aleación Al-Cu-Mg en donde se muestran diferentes picos, para el caso del pico A puede ser relacionado con la formación de los aglomerados de Mg o Cu mientras que el pico B es relacionado con la disolución de estos aglomerados y la aparición parcial de las zonas GPB. Para el pico C existen dos reacciones

simultáneas las cuales son asociadas a dos variantes de la fase S (Al_2CuMg) y por último el pico D muestra una disolución de esta fase.

Para el caso del termograma asociado a la aleación Al-Mg-Cu. En el pico A puede estar relacionado con la aparición de los aglomerados, siendo así, el pico B está asociado a la precipitación de las zonas GPB, mientras que el pico C se relaciona con la disolución de estas. La transición que se muestra en el pico D está relacionada a la aparición y disolución de la fase S.

Como se observa, ambos termogramas presentan ciertas diferencias en cuanto a las reacciones que se llevan a cabo, sin embargo, ambas presentan diferentes picos los cuales son asociados al mecanismo de endurecimiento que se presentan en estas dos aleaciones, lo cual indica que las espumas obtenidas con estas aleaciones posiblemente puedan presentar este fenómeno y en consecuencia un aumento en las propiedades mecánicas.

3.5. Propiedades mecánicas

3.5.1. Ensayo de compresión.

El ensayo de compresión es necesario para la obtención de parámetros fundamentales en el estudio de las espumas metálicas como el Módulo de Young (E), el colapso plástico y la capacidad de absorción de energía (W) a partir de curvas esfuerzo-deformación generadas por este ensayo



Figura 3.6. *Vista lateral de las probetas después del ensayo de compresión.*



Figura 3.7. *Vista frontal de las piezas ensayadas.*

En el caso de ambas aleaciones se observó que las espumas alcanzaron una deformación de 60 - 80%, sin embargo, las espumas con un tiempo de envejecimiento menor a 1 hora fueron completamente compactadas, mientras que las espumas sometidas a tiempos mayores de 1 hora comenzaron a presentar desprendimiento de material, este

desprendimiento no afecta de manera severa en el comportamiento mecánico de las espumas, de tal modo que en las curvas obtenidas en la figura 3.7 no se observa alguna interferencia, este desprendimiento puede ser provocado por el incremento de las propiedades mecánicas, siendo así, a tiempos más largos de envejecimiento existe tal aumento que en consecuencia fragiliza las paredes del material reduciendo a la vez su ductilidad.

En las figuras 3.8 y 3.9 se presentan las curvas esfuerzo-deformación obtenidas para cada aleación

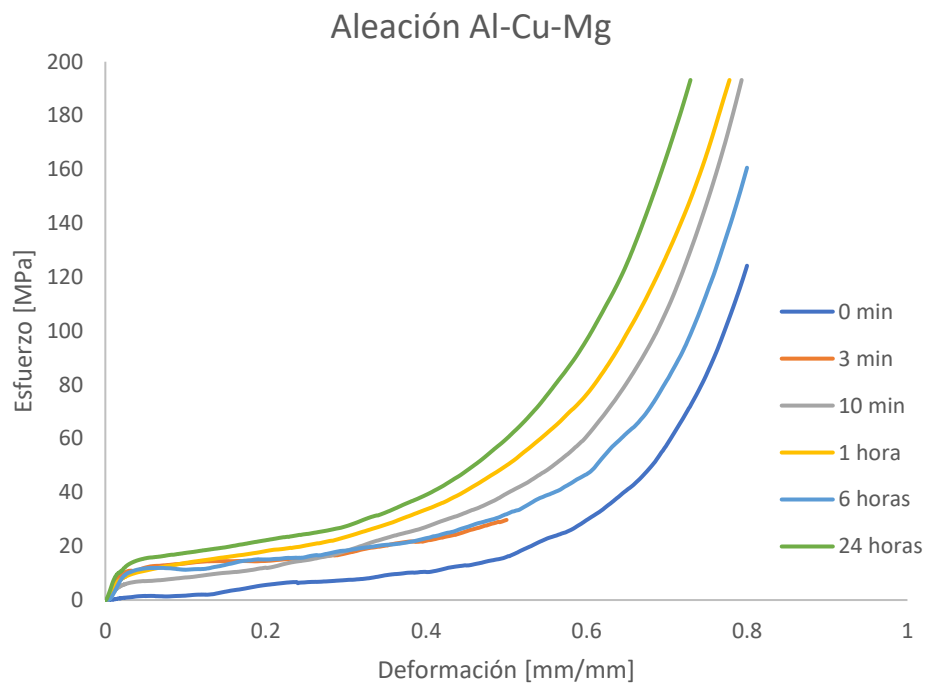


Figura 3.8. Curvas esfuerzo-deformación obtenidas para cada tiempo de envejecimiento de la aleación Al-Cu-Mg.

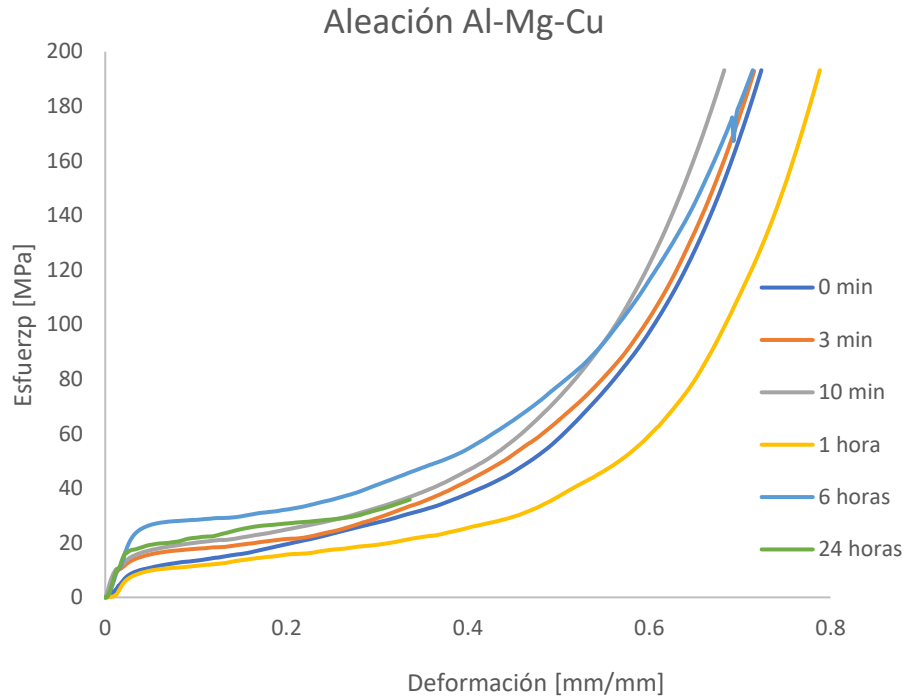


Figura 3.9. Curvas esfuerzo-deformación obtenidas para cada tiempo de envejecimiento de la aleación Al-Mg-Cu.

Las curvas generadas en el ensayo de compresión coinciden con los comportamientos típicos de estos materiales, mostrando la región lineal, la región de Plateau y por último la densificación.

Las espumas hechas con la aleación Al-Cu-Mg presentan una ligera separación entre las curvas respecto a tiempo de envejecimiento dado, lo cual se asocia al endurecimiento de las aleaciones, estas curvas presentan un incremento gradual conforme el tiempo de envejecimiento aumenta, siendo la curva correspondiente al tiempo de 24 horas la que presenta un esfuerzo mayor que los otros, existe la excepción de las curvas con tiempo de 3 minutos y 6 horas, ya que estas comienzan con su etapa cuasi lineal en una tendencia diferente respecto a los demás, los tiempos de 0 min, 10 min, 6 y 24 horas cumplen con la tendencia esperada.

Para el caso de las espumas Al-Mg-Cu coincide con el mismo comportamiento que las espumas de Al-Cu-Mg, teniendo un incremento gradual de los esfuerzo conforme el tiempo de envejecimiento aumenta, esta aleación de igual manera presenta excepciones en los tiempos de 1 y 24 horas, en el caso del primer tiempo se observa que este no tiene ningún tipo de incremento y queda por debajo de la curva correspondiente a la solución sobresaturada, para el caso de 24 horas se tiene que la curva no alcanza el 80% de deformación además de tener un punto de colapso más bajo que el tiempo de 6 horas.

Generalizando, ambas aleaciones presentan un comportamiento similar respecto a los tiempos de tratamiento, obteniendo una tendencia ascendente en propiedades mecánicas, además se observa que en la mayoría de los casos conforme el tiempo de envejecimiento aumenta la deformación máxima correspondiente a la densificación disminuye siendo que en los tiempos mayores estas deformaciones son cercanas al 60%, esto se atribuye a la pérdida de ductilidad causada por el endurecimiento. Las curvas obtenidas sugieren que existe un incremento en las propiedades mecánicas debido al tratamiento de envejecimiento.

Las curvas esfuerzo-deformación ofrecen una visión general del comportamiento obtenido por el tratamiento de envejecimiento, sin embargo, a partir de estas es necesario obtener las propiedades mecánicas correspondientes para cada tiempo y cada aleación con el fin de obtener una mejor interpretación de las curvas, estas son obtenidas tomando como referencia a la norma ISO 13314 de ensayos en metales porosos, las cuales se presentan en las tablas 3.5 y 3.6.

Tabla 3.4. Propiedades estructurales de las espumas hechas con la aleación Al-Cu-Mg.

| Al-Cu-Mg | | | | | |
|----------------|-------|-----------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| Tiempo T.T [s] | | Colapso plástico [MPa] [mm/mm] | Esfuerzo de Plateu [MPa] | Región de Plateu [MPa] [mm/mm] | Módulo de Young [MPa] |
| 1 | 0 | $\sigma=0.65$ $\epsilon=0.019$ | 7.83 | $\sigma=10.18$ $\epsilon=0.38$ | 49.83 |
| 2 | 180 | $\sigma=7.17$ $\epsilon=0.012$ | 17.94 | $\sigma=23.32$ $\epsilon=0.39$ | 802.55 |
| 3 | 600 | $\sigma=3.78$ $\epsilon=0.012$ | 18.40 | $\sigma=23.92$ $\epsilon=0.34$ | 384.7 |
| 4 | 3600 | $\sigma=4.47$ $\epsilon=0.009$ | 25.19 | $\sigma=32.74$ $\epsilon=0.39$ | 710.84 |
| 5 | 21600 | $\sigma=8.07$ $\epsilon=0.02$ | 17.32 | $\sigma=22.51$ $\epsilon=0.39$ | 562.44 |
| 6 | 93600 | $\sigma=8.43$ $\epsilon=0.12$ | 28.86 | $\sigma=37.51$ $\epsilon=0.39$ | 858.33 |

Tabla 3.5. Propiedades estructurales de las espumas hechas con la aleación Al-Mg-Cu.

| Al-Mg-Cu | | | | | |
|----------------|-------|------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| Tiempo T.T [s] | | Colapso plástico [MPa] [mm/mm] | Esfuerzo de plateu [MPa] | Región de plateu [MPa] [mm/mm] | Módulo de Young [Mpa] |
| 1 | 0 | $\sigma=7.29$ $\epsilon=0.022$ | 27.82 | $\sigma=36.17$ $\epsilon=0.38$ | 412.95 |
| 2 | 180 | $\sigma=7.59$ $\epsilon=0.0094$ | 30.01 | $\sigma=39.01$ $\epsilon=0.37$ | 937.01 |
| 3 | 600 | $\sigma=8.63$ $\epsilon=0.009$ | 33.79 | $\sigma=43.93$ $\epsilon=0.38$ | 1064 |
| 4 | 3600 | $\sigma=4.5$ $\epsilon=0.018$ | 19.78 | $\sigma=25.71$ $\epsilon=0.40$ | 580.55 |
| 5 | 21600 | $\sigma=20.63$ $\epsilon=0.027$ | 41.89 | $\sigma=54.46$ $\epsilon=0.40$ | 997.28 |
| 6 | 93600 | $\sigma=9.59$ $\epsilon=0.012$ | 30.24 | $\sigma=34.31$ $\epsilon=0.27$ | 1097.1 |

La zona lineal de las espumas es descrita por el módulo de Young, el cual se presenta a deformaciones bajas, en el caso de ambas aleaciones se observa un incremento de este parámetro conforme el tiempo de envejecimiento fue aumentando, para ambos casos, el módulo de Young más alto corresponde al tiempo de 24 horas aunque en las dos aleaciones hay excepciones ya que algunas probetas no siguieron la misma tendencia, como es el caso de las espumas con tiempos de 3 minutos y 6 horas de la aleación Al-Cu-Mg. Como se observa en la figura 3.8 (de la misma manera en la aleación Al-Mg-Cu) se presenta un declive de propiedades a partir del tiempo correspondiente a 1 hora, como se aprecia en la figura 3.9 esta probeta no tuvo el mejor comportamiento posible mientras que la segunda excepción corresponde al tiempo de 6 horas donde sí existe un endurecimiento pero esto no es mayor al tiempo de 10 minutos a partir de este punto se da paso a un incremento mayor para el siguiente tiempo, como fue mencionado antes, estas aleaciones pueden presentar un endurecimiento constante antes de alcanzar el segundo pico de endurecimiento este comportamiento sugiere que en el tiempo de 6 horas el primer pico de endurecimiento se ha alcanzado y que en el siguiente tiempo ha comenzado a endurecer nuevamente.

El colapso plástico corresponde al límite en donde se da la transición de la zona lineal a el comportamiento cuasi estático, igual que el módulo de Young este aumenta conforme el tiempo de tratamiento incrementa, teniendo las mismas excepciones para la aleación Al-Cu-Mg, mientras que para la aleación Al-Mg-Cu, en el tiempo de 24 horas este disminuye drásticamente debido al colapso temprano de las paredes.

A partir del cálculo del área que existe bajo las curvas de los ensayos de compresión es posible obtener la energía que es capaz de absorber una espuma metálica conforme la deformación incrementa, las energías obtenidas se presentan a continuación.

3.5.2. Capacidad de absorción de energía.

Se presentan las curvas obtenidas a partir del cálculo de las integrales para cada curva esfuerzo-deformación hasta un 60% de deformación.

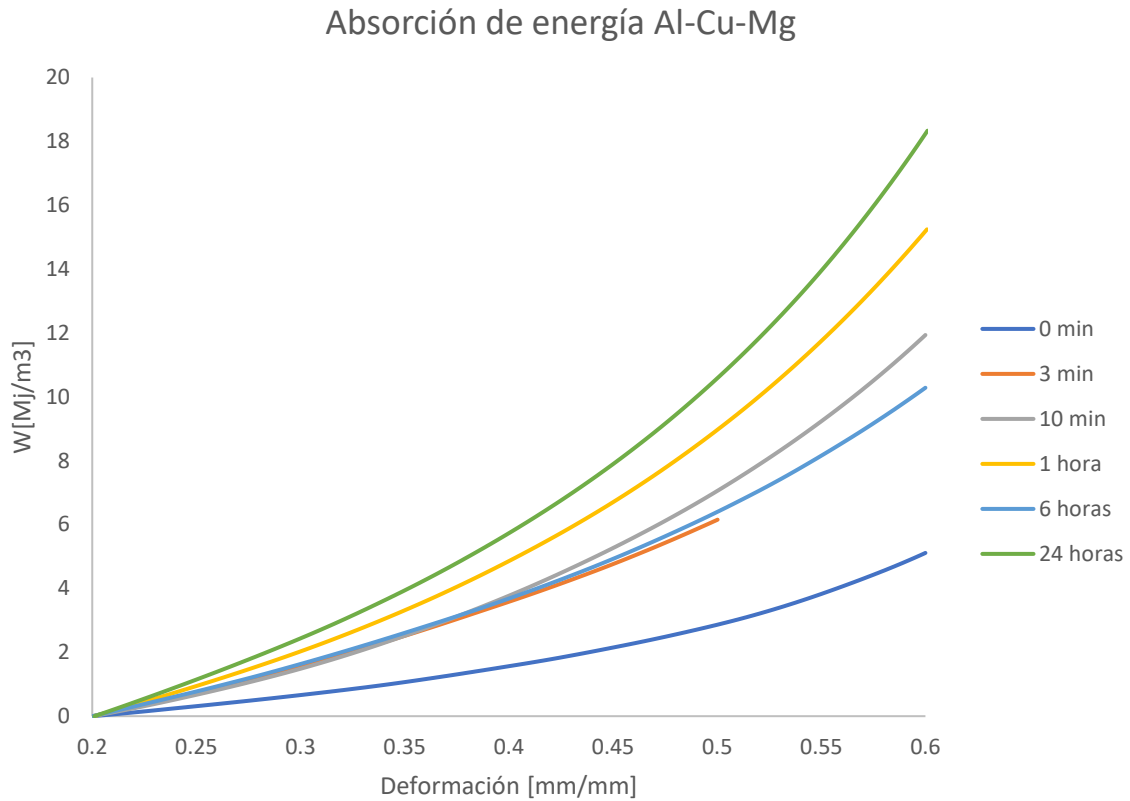


Figura 3.10. *Curva de la Capacidad de Absorción de Energía de Al-Cu-Mg.*

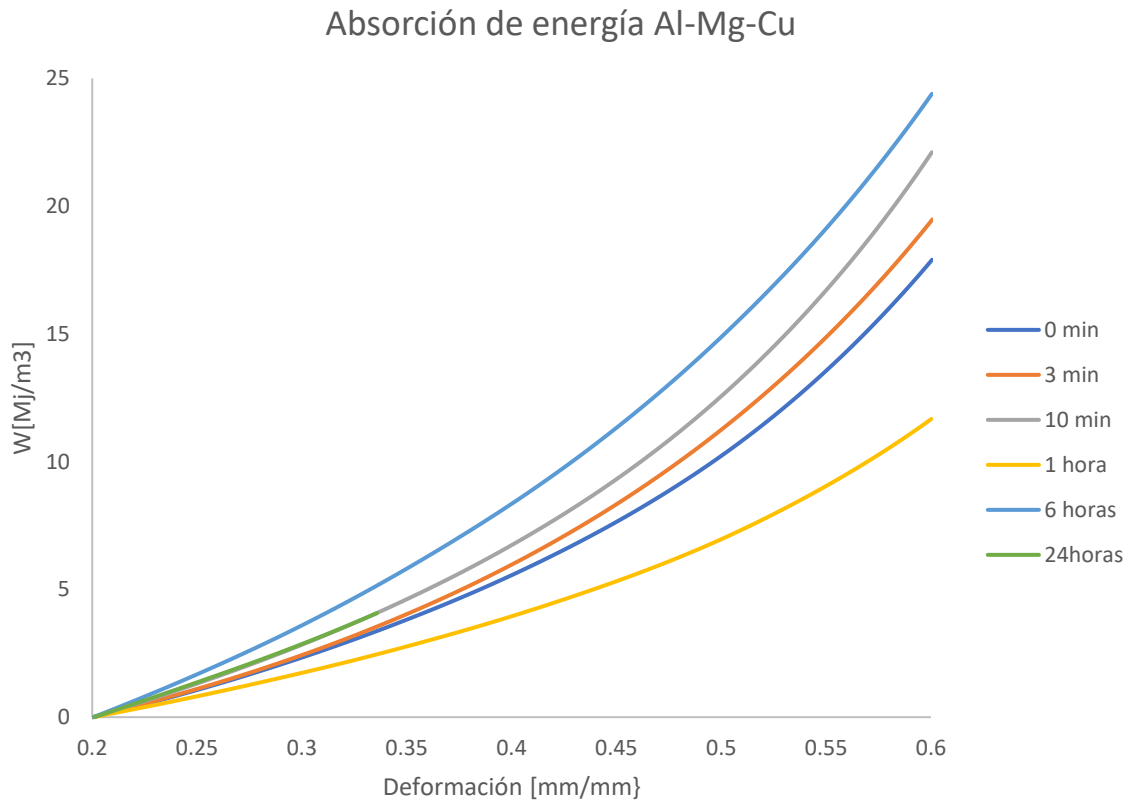


Figura 3.11. *Curva de la Capacidad de Absorción de Energía de Al-Mg-Cu.*

Las energías fueron calculadas hasta un 60% de deformación para cada aleación. Los resultados obtenidos muestran cierta similitud con los obtenidos en los ensayos de compresión, siendo que existen excepciones con algunas probetas, tales como las espumas con tiempos de 1 y 24 horas para el caso de Al-Mg-Cu y 6 horas para las espumas de Al-Cu-Mg, siendo que en estos tiempos no hay una tendencia similar a las que se presentan en los demás tiempos en este caso presentando un comportamiento decreciente.

En la figura 3.10 se observa que hay un aumento en la absorción de energía conforme el tiempo de envejecimiento es mayor, siendo la probeta de 24 horas la que presenta el mayor valor.

Para el caso de las espumas de la aleación Al-Mg-Cu sigue la misma tendencia que el caso anterior, pero con la excepción de que en este caso la probeta que presenta una mayor energía absorbida corresponde a la del tratamiento de 6 horas.

Aunque ambas presentan similitud en la tendencia, estas se diferencian en cuanto a la cantidad de energía que absorben, se aprecia que las espumas Al-Mg-Cu absorben más energía con tratamientos de menor tiempo que las Al-Cu-Mg. En este caso se puede afirmar que el aumento en las propiedades mecánicas afecta proporcionalmente a la cantidad de energía que puede ser absorbida por las espumas.

Capítulo 4. Conclusiones.

- Las aleaciones Al-Cu-Mg Y Al-Mg-Cu obtenidas a partir del horno de inducción cumplieron con las composiciones químicas requeridas para la fabricación de espumas metálicas por el método de infiltración, las cuales pudieron ser tratadas térmicamente.
- El método de infiltración permite tener espumas metálicas de celda abierta con un tamaño de poro dependiente del tamaño de la preforma utilizada, además este método permite tener porosidades y densidades pequeñas que no difieren tanto por el tipo de material utilizado.
- Ambas espumas muestran un aumento en sus propiedades mecánicas conforme el tiempo de tratamiento térmico incrementa sin embargo las espumas fabricadas con la aleación Al-Mg-Cu presentan mayores propiedades y estas son alcanzadas en menor tiempo.
- La capacidad de absorción de energía aumenta respecto al incremento de las propiedades mecánicas, para el caso de las dos aleaciones estudiadas, la aleación Al-Mg-Cu es la que presenta mayor capacidad de absorción de energía con tiempos cortos de tratamiento térmico.
- Existen más parámetros que pueden ser estudiados con respecto a estas dos aleaciones dependiendo de las aplicaciones que éstas puedan desempeñar mientras tanto en cuanto a un desempeño estructural las espumas producidas con estas dos aleaciones pueden tener un buen desempeño.

Referencias.

1. Granados, Mauricio. "Producción y caracterización de espumas metálicas de Al y Mg de poro abierto". Tesis (Maestro en ciencia e ingeniería), CDMX, México. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Investigaciones en Materiales, 2018. 11-38 p.
2. Lefebvre, Louis y Banhart, Jonh, "Porous metals and metallic foams: current status and recent developments", advanced engineering material, 2008.
3. Gubieza, J. Chinh, N.Q. Horita, Z. Langdon, T.G. "Effect of Mg addition on microstructure and mechanical properties of aluminium", Material science & engineering, 2004.
4. Ringer, Simon P. Caraher, Sally and Polmear, Ian. "Response to comments on cluster hardening in an aged Al-Cu- Mg alloy", Pergamon, 1998.
5. Radmilovic, V. Kilass, R. Dahmen, U. Shiflet, G. "Structure and morphology of S-phase precipitates in aluminium. Pergamon. 1999.
6. Gouma, P.I. Loyd, D.J. Mills, M.J. "Precipitation processes in Al-Mg-Cu alloys", Materials science & engineering. 2001.
7. Ratchev, P. Verlinden, B. De Smet, P. Van Houtte, P. "Precipitation Hardening of an AL-4.2 wt% Mg-0.6 wt% Cu Alloy", Pergamon, 1998.
8. Ratchev, P. Verlinden, B. De Smet, P. Van Houtte, P. "Effect of cooling rate and preeformation on the precipitation hardening of an Al-4.2wt% Mg-0.6wt% Cu alloy", Pergamon, 1997.
9. Ratchev, P. Verlinden, B. Van Houtte, P. "S' pase precipitation in Al-4wt% Mg-1wt% Cu alloy", Pergamon. 1993.

10. Ringer, Simon. P. Hono, Kazuhiro. Sakurai, Toshio. Polmear, Ian. "Cluster Hardening in an aged Al-Cu-Mg alloy" Pergamon. 1996.
11. Molina-Ramírez, O.D. "Caracterización Microestructural y Mecánica de Espumas Metálicas de Aluminio Fabricadas por un Nuevo Proceso de Infiltración" (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México. 2015.
12. Trinidad, Javier. Iñigo, marco. Attuebarrena, Gurutze. Wendt, Joachim. "Processing of Magnesium Porous Structures by Infiltration Casting for Biomedical Applications", Advanced engineering material, 2014.
13. Novelo, Omar. "Correlación entre microestructura y propiedades mecánicas en aleaciones Al-Mg-Cu", Tesis (Doctor en ingeniería mecánica), Ciudad de México, México. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Investigaciones en Materiales, 2011. 19-31p.
14. Azamar, Farid. "Estudio de permeabilidad a altas presiones de espumas de aluminio", Tesis (Maestría en ciencia e ingeniería de materiales), Ciudad de México, México. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Investigaciones en Materiales, 2019. 4-20, 37-50 p.
15. ASM speciality handbook. "Aluminium and Aluminium Alloys". ASM International.
16. Verhoeven J. "Fundamentals of physical metallurgy." John Wiley. 1975. EUA.
17. Mondolfo. L.F. "Aluminium Alloys: Structure and Properties". Butterworth. (1976). UK.

18. Gibson, L.J., "Mechanical Behavior of Metallic Foams. Annual Review Materials Science", 2000. 30: p. 200-219.
19. Pal, L., P.D. Fleming and M. Joyce, "A Simple Method for Calculation of the Permeability Coefficient of Porous Media". Tappi Journal, 2006. 5(9).
20. ASTM International, 2009. "E9-89a Standard Test Methods for Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature", ASTM International, Estados Unidos.
21. Banhart, J., Manufacture, "Characterization and Application of Cellular Metals and Metal Foams". Progress in Materials Science, 2001. 46: p. 554-629.
22. Gibson, L.J. and M.F. Ashby, "Cellular Solids Structure and Properties". 2nd ed. 1999: Cambridge University Press.
23. Ringer, S.P- "Microstructural Evolution and Age Hardening in Aluminium Alloys: Atom Probe Field-Ion Microscopy and Transmission Electron Microscopy Studies" . 2000.
24. Gubieza, J. Chinh N.Q. "Effect of Mg addition on microstructure and mechanical properties of aluminium". Materials Science a Engineering. 2004.
25. Jena, A.K, Gupta A.K. "A differential scanning calorimetric investigation of precipitation kinetic in the Al-1.53 wt% Cu-0.79 wt% Mg alloy" Pergamon . 1988.
26. Radmilovic, V. Kilaas, R. "Structure and morphology of s-phase precipitates in aluminium" Pergamon. 1999.
27. Ber, L.V. "Accelerated artificial ageing regimes of commercial aluminium alloys. I. Al-Cu-Mg alloys". Materials Science a Engineering. 2000.

28. Garcia, Francisco. "Commercial applications of metal foams: their properties and production" MDPI. 2015.
29. Trinidad, J. Iñigo, M. "Processing of magnesium porous structures by infiltration casting for biomedical applications". Advance Engineering Materials. 2014.
30. Banhart, J. "Manufacturing routes for metallic foams". Solidification Science.

Parte de este trabajo fue publicado.

Novelo Peralta, O. Figueroa I.A. Mendieta I. "Mechanical behavior of heat-treated Al-Cu-Mg open cell foams". Material Letters. 2020.