



OBTENCIÓN DE METALES CELULARES (ESPONJAS DE ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061) CON GRADIENTE DE POROSIDAD, FABRICADAS MEDIANTE INFILTRACIÓN DE PREFORMAS DE SAL BAJO PRESIÓN DE VACÍO

Por: Julio Mauricio Quintero Cadavid

John Enrique Zúñiga Molina

Director: Héctor Sánchez Stepha.

Codirector: Irvin Jadway Castro N.

Tesis para obtener título de ingeniero de materiales.

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA DE MATERIALES

SANTIAGO DE CALI

2012

Aprobado por el comité de tesis

Firma Del Director

Firma Del Evaluador

DEDICATORIA

A mi madre por su gran apoyo incondicional a Ximena Peláez, por su apoyo, amor y comprensión, a mis compañeros y profesores por su acompañamiento durante mi formación profesional, a mi padre por sus enseñanzas, a mis hermanos por ponerme siempre por encima de cualquier persona y a Luis Fernando Guerra por enseñarme el valor de la dedicación y enseñarme que solo se necesita una oportunidad en la vida para triunfar y lograr las metas propuestas. Gracias a todos por su presencia en mi vida, con mucho cariño para todos ustedes. Julio M. Quintero

RESUMEN

En esta investigación se estudió la obtención de metales celulares con gradiente de porosidad por el método de infiltración por presión de vacío de preformas solubles de NaCl (IPS) a partir de una aleación de aluminio de la serie 6000. Para este fin se procedió a diseñar y construir un dispositivo (horno), que permitiera la producción de esponjas metálicas mediante un proceso continuo. La fundición del metal, así como la infiltración por presión de vacío (presiones negativas) del material en la preforma se realiza al interior del dispositivo. Este trabajo se realizó en varias etapas:

- Diseño y constitución de un equipo para obtener el material celular a escala de laboratorio.
- Implementación de un proceso para obtener partículas de sal, más regulares y casi esféricas.
- Caracterización del material mediante ensayos mecánicos de compresión uniáxial y microdureza.
- Caracterización del material macro y microestructuralmente.

Para la generación de la preforma de sal con gradiente de porosidad controlado se procedió, en primera instancia, a mejorar la morfología de la sal por medio de un proceso de fundido y posterior enfriamiento por impacto como lo hicieron Gallego, J., E; Valencia, C, A. [3], luego se produjo el gradiente de porosidad con la ayuda de cilindros de acetato concéntricos con el molde, seguido se realizó la infiltración del metal fundido en la preforma, por último el material conformado por la matriz de aluminio y NaCl fue sometido a un baño en agua destilada con agitación, permitiendo así la disolución de la sal, y revelando la estructura porosa del material celular.

Se utilizaron tres tamaños de partícula para la producción del gradiente de porosidad de la preforma, para esto se llevó a cabo un tamizaje de las partículas de sal, para lo cual se usaron los tamices, 30, 20, 16, 12, 10 y 8, de los cuales, los tamaños de partícula retenidos en los tamices 20, 16 y 12 fueron los escogidos para la producción de las probetas con gradiente de porosidad debido a el mejor comportamiento que presentaron estos tamaños de partícula en cuanto a las variables del proceso y a la mejor conformabilidad de las probetas.

Las esponjas fueron caracterizadas microestructuralmente a través de microscopia óptica y microscopia electrónica de barrido (SEM), los ensayos mecánicos fueron de compresión uniáxial y de microdureza Vickers, a probetas con y sin tratamiento térmico.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	4
INTRODUCCIÓN.....	10
OBJETIVOS.....	12
Objetivo general.....	12
Objetivos específicos.....	12
Capítulo 1. ESTADO DEL ARTE.....	13
1.1 Metales celulares, interés.....	13
1.1.1 ¿Que son los materiales celulares?.....	15
1.1.2 Esponjas y espumas metálicas, diferencias.....	15
1.1.3 Aplicaciones generales de los materiales celulares.....	16
1.1.4 Esponjas de aluminio.....	19
1.2 Procesos de producción de metales celulares.....	19
1.2.1 Proceso de rellenos removibles (asistido por presión de vacío)	20
1.3 Tipos de rellenos activos.....	21
1.3.1 Preformas solubles de sal (NaCl).....	21
1.3.2 Disolución de las preformas removibles.....	21
1.3.3 Metal de la matriz.....	22
Capítulo 2. PROCESAMIENTO DE LAS ESPONJAS DE LA ALEACION DE ALUMINIO 6061, DISEÑO Y PUESTA EN MARCHA DEL EQUIPO PARA EL PROCESO DE IPS.....	23
2.1 Introducción.....	23
2.2 Materias primas, caracterización y resultados.....	23
2.3 Diseño y descripción del equipo de infiltración.....	27
2.3.1 Diseño y descripción del proceso.....	30
2.4 Proceso de infiltración por presión de vacío (IPS).....	31
2.5 Selección de las variables de infiltración.....	33
2.5.1 Selección de la temperatura de trabajo.....	33

2.5.2 Selección de la presión de infiltración.....	35
2.5.3 Disolución de la preforma.....	36

Capítulo 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA LA CARACTERIZACION Y EVALUACION DE LAS ESPONJAS DE ALUMINIO 6061..... 37

3.1. Métodos de caracterización morfológica y microestructural.....	37
3.1.1. Densitometría.....	37
3.1.2. Análisis morfológico.....	38
3.1.3. Composición química de las esponjas de aluminio.....	39
3.1.4. Análisis metalográfico.....	39
3.1.5. Tratamiento térmico.....	39
3.2. Métodos de caracterización de propiedades mecánicas.....	40
3.2.1. Prueba de compresión uniaxial.....	40
3.2.2. Prueba de microdureza Vickers.....	41

Capítulo 4. Caracterización y evaluación de las propiedades de las esponjas de aleación aluminio 6061 con gradiente de porosidad obtenidas por el método IPS..... 42

4.1. Resultados morfológicos y metalográficos.....	42
4.1.1. Densitometría.....	42
4.1.2. Macro estructura: morfología de las esponjas de aluminio con gradiente de porosidad....	43
4.1.3. Análisis puntual de la composición química de las esponjas.....	45
4.1.4. Metalografía: análisis microestructural de las esponjas de aluminio.....	46
4.2. Ensayos mecánicos, resultados.....	51
4.2.1. Microdureza Vickers.....	51
4.2.2. Comportamiento mecánico bajo carga de compresión uniáxial	52

Capítulo 5. Discusión y análisis de resultados..... 55

5.1. Análisis morfológico y microestructural de las esponjas con gradiente de porosidad.....	55
5.1.1. Densitometría.....	55
5.1.2. Análisis morfológico, macroestructura.....	57
5.1.3. Análisis morfológico, microestructura.....	59
5.2. Comportamiento mecánico, análisis.....	59
5.2.1. Microdureza Vickers.....	59
5.2.2. Ensayo de compresión uniáxial.....	60
Capítulo 6. Conclusiones y trabajos futuros.....	64
6.1. Conclusiones.....	64
6.2. Trabajos futuros.....	65
6.3. Referencias.....	65

LISTADO DE FIGURAS

Capítulo 1. ESTADO DEL ARTE.

Fig. 1.1 Comunicaciones por año presentadas en el Meatfoam [6].

Fig. 1.2. Micrografía SEM, a) espuma metálica (porosidad cerrada) [12], b) esponja metálica (porosidad abierta) [13].

Fig. 1.3. Cono espacial [14].

Fig. 1.4. Aplicaciones de los materiales celulares [16].

Fig. 1.5. Caja de impacto de Metcomb [14].

Fig. 1.6. a) Preforma de sal, b) Fundición e infiltración del metal fundido por presión de vacío ejercida en la tubería, c) Disolución de la preforma, d) Obtención del metal celular con porosidad interconectada.

Capítulo 2. PROCESAMIENTO DE LAS ESPONJAS DE LA ALEACION DE ALUMINIO 6061, DISEÑO Y PUESTA EN MARCHA DEL EQUIPO PARA EL PROCESO DE IPS

Fig. 2.1. Fusión de la sal en un crisol de acero por exposición a llama directa [3].

Fig.2.2. Obtención de las esferas de sal mediante solidificación por impacto [3].

Fig. 2.3. Imagen SEM la gráfica a) muestra las partículas de sal con morfología casi esférica, la gráfica b) muestra el área inspeccionada y el espectro.

Fig. 2.4. Subsistema de calentamiento (GoogleSketchUp).

Fig. 2.5. Subsistema de fusión y acople para ejercer la presión de vacío (GoogleSketchUp).

Fig. 2.6. Acople con filtro de acero inoxidable (GoogleSketchUp).

Fig. 2.7. Bomba de vacío PHEIFFER (laboratorio de materiales Universidad del Valle).

Fig. 2.8. Partículas de sal seleccionadas para la obtención del gradiente de porosidad.

Fig. 2.9. Preforma de sal sinterizada, muestra el contacto íntimo entre las esferas de sal.

Fig.2.10. Procedimiento para la formación del gradiente de porosidad, a) figura superior donde se muestra el diseño del procedimiento (GoogleSketchUp), b) figura inferior donde se muestra el molde real usado para la infiltración.

Fig. 2.11. Elementos de acople y equipo ensamblado para la realización del proceso de infiltración.

Fig. 2.12. Disposición del equipo durante el proceso de fusión del metal de la matriz.

Fig. 2.13. Distancia entre el crisol y el molde con respecto a las resistencias de calentamiento (GoogleSketchUp).

Fig. 2.14. Disolución de la preforma por el método de agitación magnética.

Capítulo 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA LA CARACTERIZACION Y EVALUACION DE LAS ESPONJAS DE ALUMINIO 6061

Fig. 3.1. Ensayo de compresión.

Capítulo 4. Caracterización y evaluación de las propiedades de las esponjas de aleación aluminio 6061 con gradiente de porosidad obtenidas por el método IPS

Fig.4.1. a) y b) estéreo-microscopia de la preforma de sal constituida por partículas casi esféricas, c), d) y e) muestran el compuesto NaCl/Al después del proceso de infiltración.

Fig.4.2. La figura a), muestra la gradación de los poros, haciéndose estos de mayor tamaño hacia el centro de la probeta, la figura b), muestra la interconectividad propia de las esponjas metálicas.

Fig.4.3. gradiente de porosidad axial de las esponjas de aluminio, el tamaño de partícula aumenta del exterior hacia el centro, teniendo en el exterior partículas de 0.68-1.18 mm, intermedia de 1.18-1.40 mm y en el centro de 1.68-2.00 mm.

Fig. 4.4. La figura a) muestra el área observada a la que se le hizo el barrido, la gráfica b) muestra el espectro de la composición de las esponjas de aluminio para la probeta.

Fig.4.5. Probetas preparadas para análisis metalográfico con y sin tratamiento térmico.

Fig. 4.6. Diagrama AlSiMg.

Fig.4.7. Curva de calentamiento tratamiento térmico T6 realizado a las esponjas de aluminio con gradiente de porosidad.

Fig. 4.8. Microestructura probeta 1 sin TT. 200x.

Fig. 4.9. Microestructura probetas 2 y 3 sin TT, 200x.

Fig. 4.10. Microestructura probeta 4 sin TT, 200x.

Fig. 4.11. Microestructura probetas 3 y 4 sin TT, 500x.

Fig.4.12. Microestructura probetas 1" y 2" con TT, 100x.

Fig4.13. Microestructura probeta 1" con TT, 200x.

Fig. 4.14. Microestructura probetas 3" y 4" con TT, 200x.

Fig. 4.15. Microestructura probetas 3" y 4" con TT, 500x.

Fig. 4.16. Huella de indentación dejada por el microdurómetro después de realizado el ensayo.

Fig.4.17. Curvas esfuerzo - deformación para esponjas con gradiente de porosidad de aleación de aluminio 6061, la gráfica a) muestra la curva para las probetas sin tratamiento térmico (ST), la gráfica b) muestra las curvas obtenidas para las probetas con tratamiento térmico (TT).

Fig. 4.18. Graficas esfuerzo-deformación probetas con y sin tratamiento térmico.

Capítulo 5. Discusión y análisis de resultados.

Fig.5.1. La estereomicroscopia a), muestra los puntos de contacto entre las partículas de sal esféricas, mientras que la b), muestra que el contacto entre partículas de sal con morfologías irregulares no se da en un solo punto [5], c) muestra una imagen SEM que corrobora que la interconectividad de las esponjas es de forma puntual.

Fig. 5.2. La grafica a) muestra la partículas de sal casi esféricas con las que se constituyó la preforma, b) se ve el compuesto Al/NaCl una vez infiltrado el material, c) se observa la morfología de los poros donde se puede ver la fiel copia de las partículas de sal, d) esponja elaborada a partir de una preforma con partículas d morfología irregular [5].

Fig. 5.3. Modelos de arreglos de las celdas en los Metales Celulares [5].

Fig.5.4. Curva típica de esfuerzo deformación para MC.

Fig. 5.5. Bandas de deformación y aspecto de falla en esponjas bajo cargas de compresión: a) muestra las bandas de deformación de una probeta sin TT, b) y c) muestran las bandas de deformación de las probetas con TT.

LISTADO DE TABLAS

Capítulo 1. ESTADO DEL ARTE.

Tabla. 1. Áreas de aplicación de las esponjas metálicas [5].

Capítulo 2. PROCESAMIENTO DE LAS ESPONJAS DE LA ALEACION DE ALUMINIO 6061, DISEÑO Y PUESTA EN MARCHA DEL EQUIPO PARA EL PROCESO DE IPS

Tabla. 2. Composición en peso de la aleación de aluminio 6061 usada como material matriz [3].

Tabla. 3. Tamaños de partícula y tamices usados.

Tabla. 4. Composición química de la sal obtenida por el método de EDS.

Capítulo 4. Caracterización y evaluación de las propiedades de las esponjas de aleación aluminio 6061 con gradiente de porosidad obtenidas por el método IPS

Tabla. 5. Datos de densidad aparente, densidad relativa y porcentaje de porosidad.

Tabla. 6. Composición química de la esponja de aluminio por el método de EDS.

Tabla.7. Identificación metalografía de las fase presentes en la aleación 6061.

Tabla.8. Resultados obtenidos del ensayo de Micro Dureza Vickers (Probetas sin TT).

Tabla.9. Resultados obtenidos del ensayo de Micro Dureza Vickers (Probetas con TT).

Tabla. 10. Datos obtenidos del ensayo de compresión.

Tabla. 11. Porcentaje de deformación probetas sin tratamiento térmico.

Tabla. 12. Porcentaje de deformación probetas tratadas térmicamente.

INTRODUCCIÓN

La ciencia de materiales, como ciencia establecida para el estudio de los mismos, se ha constituido exitosamente desde el punto de vista de diseño y producción de nuevos materiales a partir de

materiales base y combinaciones de los mismos, etc. Debido a estos avances logrados por esta ciencia y a la demanda de propiedades específicas para determinadas aplicaciones, la ciencia de materiales, ha permitido la aparición y desarrollo de los metales celulares, materiales que debido a sus características, son de gran importancia al momento de cubrir ciertas necesidades aplicativas en las que se requiere una combinación de propiedades tanto mecánicas y físicas como químicas, que solo son posibles de obtener debido a la estructura misma de los metales celulares. Es por esta estructura propia del metal celular que su uso y aplicación ha tenido éxito, sin ser estas las únicas aplicaciones para este tipo de materiales, tanto en la absorción de energía y transferencia de calor como en estructuras de automoción y aeronáutica, sin descartar su posible y exitosa aplicación en el campo de la medicina (biocompatibilidad).

Debido a las características que brindan los metales celulares y a su gran acogida por la comunidad investigativa de la ciencia de materiales, los metales celulares se han constituido como fuente de investigación y estudio desde años atrás, pues, han llamado la atención de los investigadores que se han centrado en establecer mejoras en los procesos de fabricación, caracterización y ampliación del campo de aplicación de los mismos. Durante el desarrollo de las investigaciones en materiales celulares, se ha hecho mayor énfasis en el estudio de espumas metálicas (poros cerrados) que en esponjas metálicas (poros abiertos e interconectados), lo que indica que debe fortalecerse la investigación en estas últimas para así establecer con mayor propiedad características como el porcentaje de porosidad, morfología, distribución y tamaño de los poros y para efectos de este trabajo, evaluar la respuesta del material al estar constituido por diversos tamaños de poro (gradiente de porosidad), punto de gran importancia que debe ser estudiado desde su procesamiento, caracterización y evaluación.

Al llevarse a cabo el estudio de esponjas metálicas con variación en la distribución de tamaño de poro (gradiente de porosidad), se hace necesario buscar rutas de fabricación poco costosas y versátiles que permitan tanto la buena obtención del material celular, como su reproducibilidad, es por esto que se ha determinado para efectos de esta investigación, contar con el proceso de infiltración en preformas solubles por presión de vacío (IPS), proceso que consiste, en la fabricación de una preforma, usando como material de la preforma partículas de sal común-Cloruro de Sodio (NaCl), a las cuales se les realizó un tratamiento adicional que permitió obtener morfologías casi esféricas; luego de la constitución de la preforma, ésta es infiltrada con el metal fundido a través de los espacios interparticulares, para posteriormente a la solidificación del metal, proceder a tomar el compuesto hecho de aluminio/NaCl y llevarlo a un baño en el cual se realizara la disolución de la sal, permitiendo así que se revele la estructura porosa en la matriz de aluminio.

Para la fabricación de las esponjas metálicas con gradiente de porosidad, se llevaron a cabo los siguientes pasos:

- 1 Diseño y fabricación de un equipo, que permitió fundir e infiltrar el metal en el interior del mismo, sin exponer el material en estado fundido a la atmósfera externa previniendo que se presenten defectos de fundición como la junta fría al momento de infiltrar, que podría

darse durante el proceso de transportar el metal líquido del lugar de fundición a el lugar de infiltración.

- 2 Obtención casi esférica de las partículas de NaCl, por medio de la fusión de las misma y posterior goteo a alturas preestablecidas sobre una base metálica antiadherente; el impacto genera la dispersión y solidificación de las partículas con morfologías más regulares y de diferentes tamaños, a las partículas se les realizo un tamizado para obtener los tamaños de partícula apropiados para la generación del gradiente de porosidad.
- 3 Infiltración del metal líquido en la preforma asistido por presión de vacío, presión brindada por una bomba de vacío conectada al extremo externo de la tubería del equipo, tubería que conecta al molde con la bomba en su parte inferior, mientras el molde en sí está conectado al crisol donde se funde el material por un acople de discos de acero inoxidable 304.
- 4 Disolución de la sal del material en un baño de agua, para de esta manera revelar la estructura porosa de la matriz de aluminio.

Es de vital importancia resaltar que el proceso de infiltración asistido por presión de vacío es un proceso que se ha estudiado desde comienzos de 1960, pero debido a la poca aplicación que se le dio este proceso se dejó excluido en su uso por varios años, aproximadamente hace una década este proceso ha vuelto a ser llamativo para los investigadores debido a la viabilidad que representa al momento de llevar a cabo la realización y obtención de esponjas metálicas de matriz de aluminio, lo cual ha interesado y motivado trabajos importantes en la fabricación de este tipo de materiales, ya que el aluminio y sus aleaciones, son considerados materiales de gran relevancia a nivel ingenieril, pues debido a su bajo punto de fusión y su capacidad para fluir es un material apto para realizar esponjas metálicas por el método de IPS.

Debido a la importancia de los materiales celulares en la ciencia de materiales y por lo enunciado anteriormente se ha impulsado el deseo de realizar esta tesis con el fin de aportar conocimiento relevante al área de las esponjas de aluminio, permitiendo así estructurar una mejor teoría en el tema, estableciendo mejoras en las preformas solubles, observando la influencia que tiene el gradiente de porosidad en el material (motivo de mayor importancia en esta investigación) y observando cuales son las mejores variables de proceso.

OBJETIVOS

Objetivo General

- Producir y caracterizar esponjas metálicas de aluminio con gradiente de porosidad por infiltración en preformas de sal.

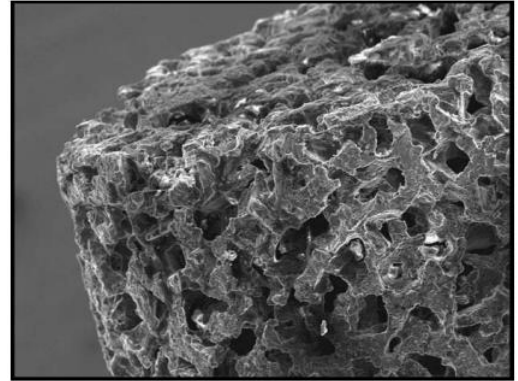
Objetivos Específicos

- Diseñar y construir un equipo para la obtención de esponjas de aluminio 6061 (aleación Al-Mg-Si) por infiltración en preformas de sal.

- Mejorar la morfología de las partículas de sal (partículas casi esféricas) por medio de solidificación por impacto.
- Producir esponjas metálicas de aluminio con gradiente de porosidad (tres tamaños de partícula).
- Caracterizar a través de ensayos mecánicos las esponjas metálicas de aluminio producidas, tales como: compresión y microdureza.
- Caracterizar las esponjas metálicas de aluminio a través de técnicas ópticas como, microscopía óptica (MO) y microscopía electrónica de barrido (MEB).

CAPÍTULO 1.

ESTADO DEL ARTE



1. ESTADO DEL ARTE

Los metales celulares son una nueva clase de materiales, que aunque no han sido caracterizados en su totalidad, son materiales con bajas densidades, con propiedades únicas tanto físicas como mecánicas, térmicas, eléctricas y acústicas. Estos materiales ofrecen un potencial para la producción de estructuras ligeras, para la absorción de energía, conductividad térmica, y en algunos casos su fabricación es económica [36], la obtención de estos materiales permite obtener porosidades tanto estocásticas como periódicas y en algunos casos es posible la formación de un gradiente de porosidad por medio de la producción de estructuras tipo sándwich [36] (estructura laminar y no se han obtenido materiales con gradiente de porosidad como un sólido enteramente constituido, finalidad de este trabajo de grado).

El estado del arte de los metales celulares (MC), tema a tratar en este capítulo, pretende exponer datos acerca de su historia, por qué se han convertido en fuente de investigación y desarrollo a nivel mundial, identificar la diferencia que se tiene de los MC debido a su porosidad ya sea ésta abierta o cerrada, los métodos de fabricación y las rutas de caracterización convencionales para este tipo de materiales, sin dejar de lado las posibles aplicaciones que estos materiales pueden tener.

1.1 Metales celulares, interés.

El uso de metales celulares data de la década de 1940, desde esta época ya se pueden encontrar registros y patentes que establecían la conformación de metales celulares, tal es el caso de la pa-

tente realizada por Sosnick [1], quien realizó un proceso mediante el cual creaba una aleación de dos metales que diferían ampliamente en su punto de fusión, dicha condición la utilizó para vaporizar el metal de menor punto de fusión y dar lugar así a la estructura porosa del material de mayor punto de fusión. Sin embargo, no es sino hasta aproximadamente 50 años atrás que se le empezó a dar la importancia requerida a estos materiales y a los métodos de fabricación y aplicación de los mismos, sobre todo en los años 90.

A partir de los años 90 se pone en auge la investigación de los MC por parte de las universidades y las industrias, produciendo una gran cantidad de investigaciones, artículos y patentes que se caracterizaron por estudiar métodos de obtención y producción de los MC, así como su caracterización y potencial aplicación. La mayor parte de las investigaciones y las más avanzadas que se han llevado acabo sobre este tipo de materiales se han desarrollado en países industrializados como Alemania, Francia, Italia, Estados Unidos, Japón, Inglaterra y Canadá, sin embargo, en Latinoamérica también se han realizado trabajos sobre MC con resultados muy satisfactorios, como es el caso del trabajo realizado en el Instituto de Investigación en Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México [2], que realizó la producción de MC por medio de infiltración de metal líquido por gravedad en preformas de sal, con matriz de una aleación de zinc-aluminio-cobre (zinalco). Y como en el caso de nuestro país, Colombia, que ha contribuido con estudios en el tema muy satisfactorios como los realizados por, Gallego *et al* [3], Gómez. M. [4], resaltando sobre todo el trabajo realizado por Fernández, G[5], de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín.

Es necesario esclarecer que la mayoría de investigaciones y trabajos realizados en este tema han ido en aumento de forma exponencial (Fig. 1.1), hecho reportado por el congreso Metfoam [6], evento realizado en Alemania que ha contado con la participación de investigadores en el tema de MC.

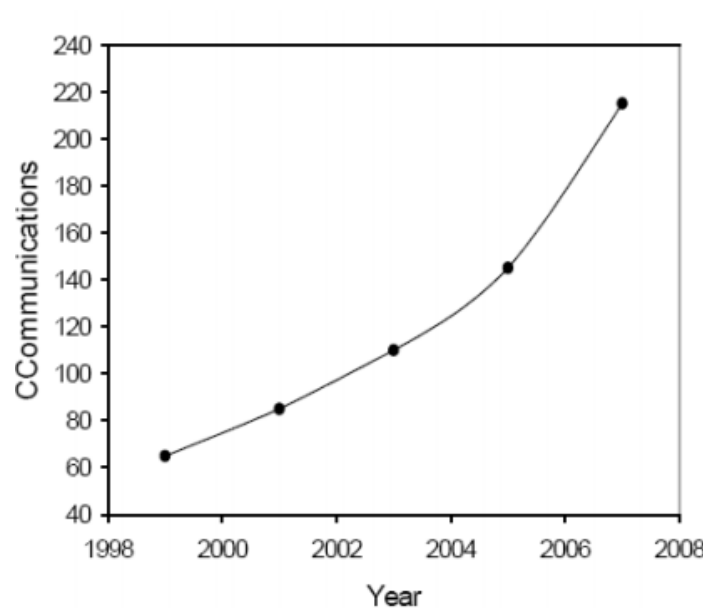


Fig. 1.1 Comunicaciones por año presentadas en el Meatfoam [6].

1.1.1 ¿Qué son los metales celulares?

Los metales celulares son materiales innovadores que poseen combinaciones únicas de propiedades físicas y mecánicas. En este sentido, es posible encontrar metales celulares con alta capacidad de absorción de energías de deformación, buena conductividad térmica y muy baja densidad. Las características brindadas tanto por el metal de la matriz como por su estructura porosa convierten a los metales celulares en materiales multifuncionales [7]. Entre las aplicaciones más relevantes, es posible encontrar su uso en seguridad pasiva vehicular, aligeramiento de estructuras, paneles para absorción de sonido y vibraciones, intercambiadores de calor, soportes para catálisis, entre otras [Banhart, J., 2004] [7].

1.1.2 Esponjas y espumas metálicas, diferencias.

Estudiar la estructura y las propiedades de los materiales ha permitido la obtención de materiales y equipos con prestaciones tecnológicas cada vez más altas, pues saber cómo responde un material ante distintos agentes externos permite mejorar las condiciones de trabajo. En los últimos años la investigación de espumas y esponjas metálicas ha cobrado gran interés, debido a que su estructura porosa confiere una combinación única de propiedades, que brindan un amplio rango de aplicaciones estructurales y funcionales. [8-9].

Existe alguna confusión sobre el término espuma metálica, pues se usa de manera general aunque los materiales descritos no son muchas veces espumas metálicas en el sentido estricto de la palabra. Debe distinguirse entre materiales celulares, metales porosos, espumas metálicas sólidas y esponjas de metal. Los primeros se refieren a un cuerpo metálico que tenga cualquier clase de vacíos gaseosos dispersos en él; en el segundo caso los poros son generalmente redondos y aislados unos de otros, que usualmente corresponden al 70% del material; los terceros son una clase especial de materiales celulares que se originan en una espuma metálica líquida o sólida donde la porosidad es cerrada; por último, las esponjas metálicas se refieren a una morfología especial de metal celular con vacíos interconectados. [10].

Los metales celulares son sólidos altamente porosos que se pueden obtener por diversos procesos de producción, a partir de los cuales se pueden fabricar esponjas y espumas metálicas (Fig. 1.2.), que difieren significativamente en sus propiedades. En las esponjas la respuesta elástica lineal se debe a la curvatura de las paredes, para la cual se presentan diferentes modelos de deformación y en las espumas la parte de las paredes de la celda y el aire u otro gas dentro de ellas es comprimido [11].

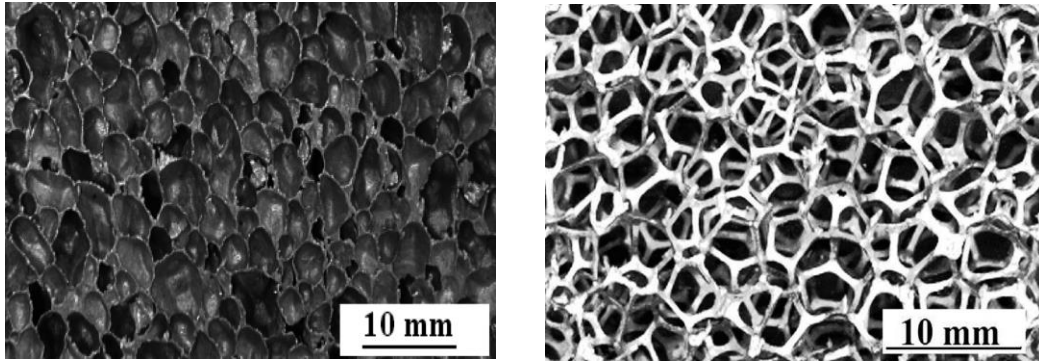


Fig. 1.2. Micrografía SEM, a) espuma metálica (porosidad cerrada) [12], b) esponja metálica (porosidad abierta) [13].

1.1.3 Aplicaciones generales de los materiales celulares.

Los materiales metálicos celulares, a pesar de su lento desarrollo, han mostrado un abanico de propiedades que los diferencia de los demás materiales, debido a la combinación de las propiedades del metal, en conjunto con las que brinda una estructura celular, los hace muy atractivos para aplicaciones en la industria automovilística, aeroespacial (figura 1.3. [14]), biomecánica y en el sector de la construcción, estableciendo así a los metales celulares como materiales importantes para la solución a problemas particulares en donde otro tipo de materiales no serían tan eficientes. Las propiedades de este tipo de materiales se dan teniendo en cuenta factores del material como la morfología y cantidad de poros, el estado microestructural requerido del metal o aleación, el procesamiento y además un extra que viene dado por la economía en su elaboración [14,15].

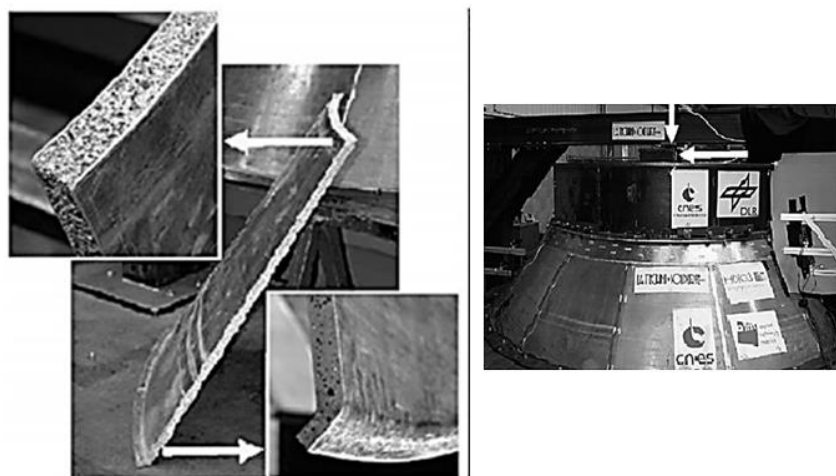


Fig. 1.3. Cono espacial [14].

Los metales celulares se dividen en dos tipos de estructuras; de poro cerrado (espumas), que comúnmente se usa en aplicaciones estructurales, y de poro abierto (esponjas), que es utilizada por sus propiedades específicas en aplicaciones funcionales (Figura 1.4 [16,17]).

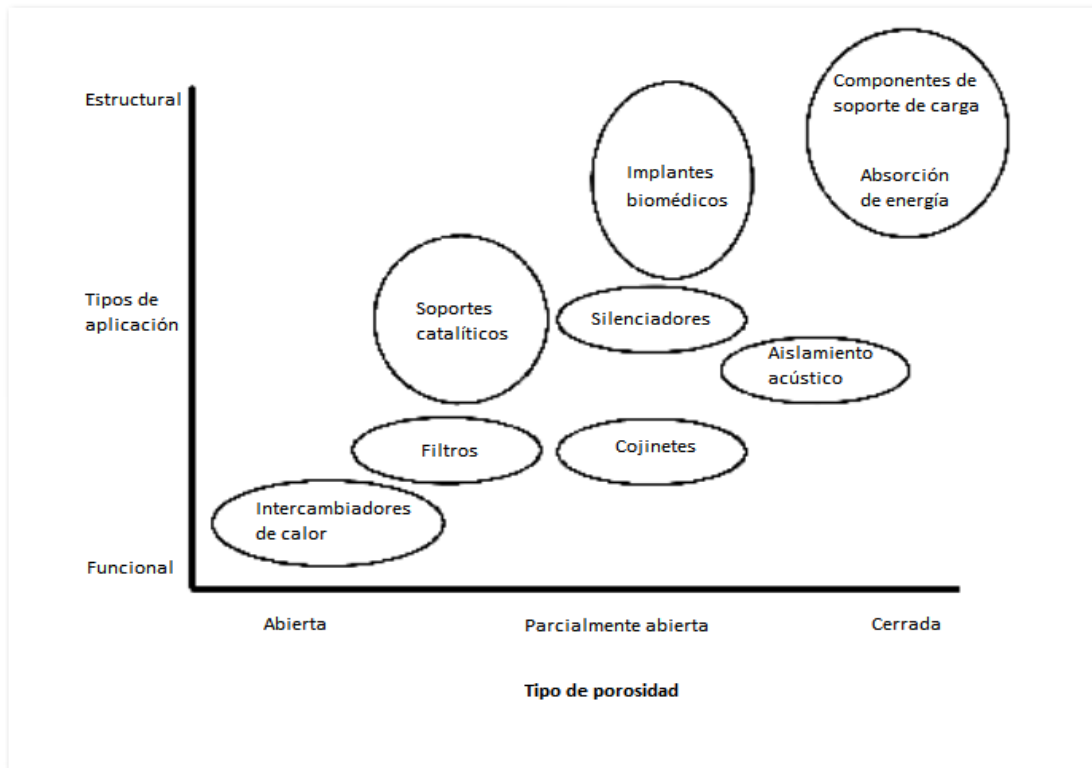


Fig. 1.4. Aplicaciones de los materiales celulares [16].

Aplicaciones estructurales: la distribución de estructuras celulares a través de todo el material aumenta su momento de inercia total, Generando una resistencia específica superior en comparación con el material sólido. Estas propiedades hacen de los MC, materiales útiles para aplicaciones automotrices y aeroespaciales, entre otras.

Tomando el caso de la industria automotriz, junto con la necesidad de disminuir el gasto de combustible, por lo que se hace necesario tomar medidas que permitan la reducción del peso en los automóviles. Los metales celulares ofrecen una solución posible para algunos de estos problemas, en su mayor parte las espumas de aluminio son usadas en la industria automotriz, dado que una estructura de peso ligero sirve como amortiguador de sonido y energía al mismo tiempo, es decir, las espumas metálicas se presentan como una solución multifuncional [9, 16, 17].

Intercambiadores de calor: la resistencia a la corrosión combinada con una gran área superficial y una pared de celda de un material con alta conductividad térmica, hacen de las esponjas metálicas materiales ideales para el uso en intercambiadores de calor. Las estructuras de celda cerrada tienen una conductividad térmica muchos más baja, que brinda un buen blindaje térmico [17].

Resistencia a la corrosión y filtros de alta temperatura: el aluminio tiene buena resistencia a la oxidación y a muchas formas de ataque químico. Las esponjas metálicas son excelentes en la detención de las llamas en ambientes como los tubos de longitud y las cajas de ventilación. Ambos son a prueba de fuego y muy permeables. Pueden también ser utilizados en aplicaciones de protección a explosiones [17].

Aplicaciones acústicas: la capacidad de amortiguación de las espumas de aluminio ha demostrado ser un orden de magnitud superior a la del metal sólido. Las espumas también se han utilizado como material en donde su aplicación requiera la poca o nula propagación del sonido, “aislantes acústicos”, pues dentro de las estructuras porosas, el sonido se atenúa por la vibración y la fricción. La absorción del sonido es de vital importancia en aplicaciones específicas [17].

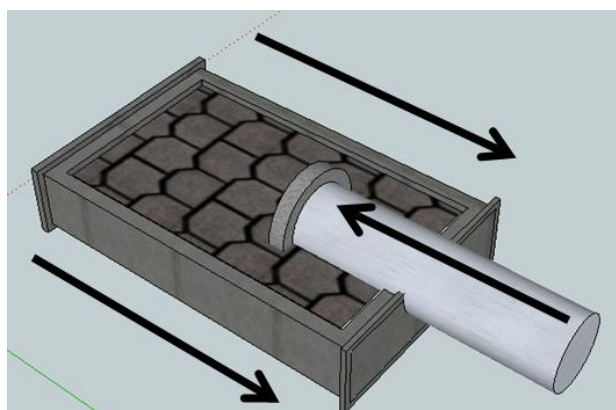


Fig. 1.5. Caja de impacto de Metcomb [14].

Tabla. 1. Áreas de aplicación de las esponjas metálicas [5].

Campo de aplicación	Material	Producto, dispositivo, proceso	Propiedades útiles
Estructuras livianas.	Metal y aleaciones.	Elementos estructurales súper livianos y resistentes al calor.	Alta relación del módulo y resistencia con respecto a la densidad.
Elementos de estructura compuesta.	Metal y aleaciones.	Materiales compuestos de dos y tres capas de panales.	Rigidez, baja densidad, compactibilidad con los materiales de relleno.
Filtración.	Metal, aleaciones y cerámicos.	Elementos varios para filtros (gases, líquidos, metales fundidos).	Baja resistencia hidráulica, superficie incrementada, resistencia térmica, estabilidad en medio activo.
Condensación de coproducidos.	Metal, aleaciones y cerámicos.	Dispositivos para la separación de gases y fases condensadas.	Alta permeabilidad, estabilidad química, mojabilidad.
Transferencia de calor y disipadores de calor.	Metal y aleaciones.	Intercambiadores de calor compactos, elementos de enfriamiento.	Estructura con espacios interporos, conductividad térmica de una base, baja resistencia a la hidráulica.
Electrólisis.	Metal, aleaciones y carbón.	Electrólisis de agua, soluciones, electro pulido, extracción de iones metálicos.	Alta superficie específica, permeabilidad.
Elementos acumuladores y combustibles.	Níquel y plata.	Acumuladores eléctricos de mayor capacidad.	Alta porosidad abierta, conducción eléctrica.
Catálisis.	Metal, aleaciones y cerámicos.	Soportes para catálisis.	Alta superficie específica, permeabilidad, resistencia térmica, resistencia mecánica.
Dispositivos de calentamiento.	Metal y aleaciones resistentes al calor.	Elementos de calentamiento, calentadores de gas, vaporizadores.	Alta permeabilidad a los gases, conductividad eléctrica, resistencia térmica, porosidad interconectada.
Barrera contra el fuego y explosión.	Metal y aleaciones.	Particiones de tubos, mezcladores, exhostos.	Permeabilidad al gas, alta porosidad interconectada.
Acústicos.	Metal, aleaciones y cerámicos.	Paneles de absorción de sonido, elementos de sistema acústico.	Estructura de espacios porosos, resistencia térmica y a la vibración.
Aislamiento magnético, absorción de ondas electromagnéticas.	Metal, aleaciones y cerámicos.	Elementos de protección en fuentes pulsadas de campos electromagnéticos.	Estructura de espacios porosos, baja densidad.
Amortiguación de pulsos mecánicos y acústicos.	Metal, aleaciones y cerámicos.	Amortiguador de ondas la superficie de los recipientes, absorción de energía en sistemas de seguridad de automóviles.	Estructura de poros, rigidez, porosidad, capacidad de ser deformado a un bajo voltaje permanente con absorción de energía.
Biotecnología.	Metal, aleaciones y cerámicos.	Plataforma para cultivar sistemas biológicamente activos.	Alta porosidad, superficie específica, estabilidad química.
Ajuste de gases y flujos de líquidos.	Metal, aleaciones y cerámicos.	Canales de venteo, sensores de presión.	Baja resistencia hidráulica, uniformidad de estructura porosa.
Potencia y óptica de precisión.	Cobre, invar, carburo de silicio.	Reducción de peso, plataforma óptica.	Permeabilidad, conductividad térmica, bajo calor específico.

1.1.4. Esponjas de aluminio.

En el panorama actual el aluminio hace parte de muchas investigaciones en diferentes áreas de la ciencia de los materiales y el campo de los materiales celulares no será la excepción debido a que el aluminio reúne características que sumadas a la estructura porosa, brinda propiedades para aplicaciones funcionales y estructurales, debido a que el aluminio y sus aleaciones se les reconoce por su baja densidad, logrando una ligereza adicional en la forma de esponja, además el aluminio presenta elevada conductividad térmica y eléctrica con buena resistencia a la corrosión en algunos ambientes, haciendo a las esponjas metálicas de aluminio un material idóneo para aplicaciones como intercambiadores de calor y filtros, entre otros. Además por su baja temperatura de fusión y elevada temperatura de ebullición lo hace un material funcional para el proceso de fundición y mejor para ser utilizado en distintos métodos de producción de esponjas entre ellos el del presente trabajo (IPS), dado a que su temperatura de fusión está por debajo de la temperatura de fusión de la sal, cumpliendo así con uno de los requisitos para ser utilizado en este proceso con un preforma de NaCl.

Por lo anterior el aluminio reúne una serie de propiedades mecánicas excelentes dentro del grupo de los metales no féreos, siendo uno de los metales más usados en la

18 actualidad, además el valor agregado que le añade la posibilidad de aleaciones las cuales mejoran ciertas propiedades en comparación con el aluminio puro, siendo la aleación 6061 la que se eligió para ser el metal de la matriz de esta tesis, una aleación compuesta básicamente por Al-Mg-Si, donde los elementos aleantes le proporcionan resistencia mecánica media, buena conformabilidad y producen un aumento en la resistencia a la corrosión, con la posibilidad adicional de tratarse térmicamente por envejecimiento artificial aumentando las propiedades mecánicas, por todos esto las esponjas de aluminio presentan un gran interés de acuerdo con las propiedades brindadas por el material matriz y la estructura porosa del material celular.

1.2 Procesos de producción de metales celulares.

El tipo de procesamiento para la obtención de MC depende del tipo de material celular que se desee realizar, espuma metálica o esponja metálica.

Espumas metálicas: este tipo de materiales al ser materiales celulares de porosidad cerrada son producidos por diversas técnicas como:

- Metalurgia de polvos [18,19].
- Inyección de gas en el material fundido [20, 21].
- Espumado por agentes espumantes [22, 23, 24, 25].
- Solidificación eutéctica en el material fundido saturado por hidrogeno [26, 27].

Esponjas metálicas: al requerirse porosidad interconectada para este tipo de materiales, la forma de producción puede ser cualquiera de las siguientes:

- Fundición por microfundición (Investmentecasting) [28, 29].
- Deposición de vapor o electrodeposición [30, 31].
- Infiltración de rellenos removibles [32, 33].

Debido al interés fundamental de esta investigación, solo se procederá a realizar la descripción del proceso de esponjas metálicas por medio de infiltración en rellenos removibles asistido por presión de vacío (específicamente preformas de NaCl).

1.2.1 Proceso de rellenos removibles asistido por presión de vacío.

Para este tipo de proceso, por medio del cual se obtienen esponjas metálicas, son necesarios básicamente tres pasos que permitirán la buena obtención del material celular, la Fig. 1.7 muestra los pasos que se deben seguir al momento de realizar esponjas metálicas por el proceso de IPS, los requerimientos del proceso son los siguientes:

1. Preparación del molde con materiales de relleno, de naturaleza orgánica o inorgánica que, acomodados y/o sinterizados, dan lugar a la preforma con poros interconectados.

En el desarrollo de este paso es muy importante la selección de la materia prima para la preforma y del material metálico a infiltrar. Es necesario tener en cuenta que no exista reacción entre estos, el material de la preforma debe resistir las condiciones del proceso, para lo cual es importante que la temperatura de fusión de la preforma esté por encima de la temperatura de fusión del metal de modo que durante el proceso de infiltración del metal líquido no se produzca la fusión de la preforma, además, se debe tener en cuenta que al momento de realizar la disolución de la preforma es necesario que se mantenga la integridad de la matriz metálica.

2. Infiltración de la preforma con el metal fundido.

Para el llenado de las preformas, dependiendo del tamaño de las partículas y el tamaño de la pieza a llenar, es requerida una presión mínima de inyección, por lo cual se han desarrollado métodos que van desde la infiltración por gravedad hasta métodos más especializados como infiltración con sistemas hidráulicos tipo pistón, presión externa con gas inerte, presión positiva con aire y presión de vacío. Cabe resaltar, en el caso de infiltración por presión de vacío, que la determinación del valor de la presión necesaria para la buena infiltración del metal fundido es inversamente proporcional al tamaño de partícula, es decir, a menor tamaño de partícula es necesaria una presión de vacío mayor.

3. Remoción de la preforma.

Una vez se ha obtenido el material compuesto metal/preforma solidificado y enfriado, se procede a la remoción de la preforma mediante disolución de manera que permita obtener la esponja metálica. Los metales celulares obtenidos mediante la técnica de infiltración pueden alcanzar porosidades de un 55 a un 98% y densidades relativas entre 0.3 y 0.5, la figura 1.7 ilustra tanto la infiltración de material, como la disolución de la preforma.

a)

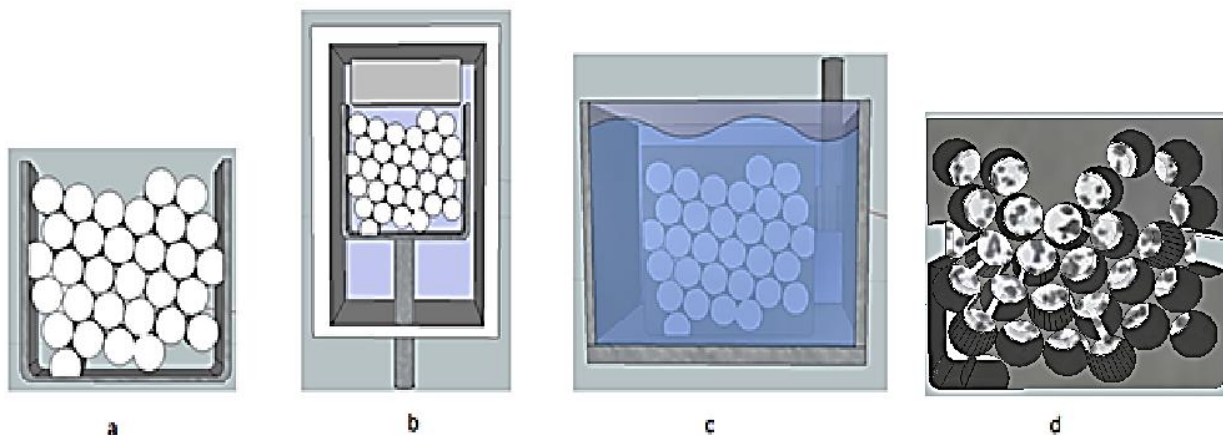


Fig. 1.6. a) Preforma de sal, b) Fundición e infiltración del metal fundido por presión de vacío ejercida en la tubería, c) Disolución de la preforma, d) Obtención del metal celular con porosidad interconectada.

1.3 Tipos de rellenos activos.

Para realizar el proceso de obtención de esponjas metálicas por medio de infiltración en preformas solubles a partir de metales líquidos, se encuentran varias opciones de preforma, para las cuales se debe tener en cuenta, primero, que deben ser removibles, no deben generar reacciones con el material matriz de la esponja y deben resistir las condiciones del proceso, como es necesario en este caso, la preforma debe mantener su integridad durante la fundición del aluminio; segundo, las preformas pueden ser elaboradas de diversos materiales orgánicos e inorgánicos, según el proceso y tipo de material que se desea realizar, tales como sales solubles, gránulos de arena, esfera cerámicas y mezcla de aditivos poliméricos.

La remoción del material a partir del cual se hace la preforma se realiza por distintos mecanismos, por disolución en agua o en diferentes solventes, disolución por ultrasonido, entre otros, la selección de uno u otro mecanismo depende de las características de las partículas usadas en la preforma, entre las que se destacan las generadas a partir de sal [5].

1.3.1 Preformas solubles de sal (NaCl).

El NaCl o sal común es un material que debido a características importantes como su alto punto de fusión, fácil manipulación, inocuidad frente a la salud humana, fácil disolución en agua, fácil asequeabilidad y economía, es un material que ha permitido su uso como relleno removible para la generación de metales celulares, pues permite para el caso de algunas aleaciones que no exceden su punto de fusión, la buena obtención de esponjas metálicas, debido a que es un material que mantiene su estabilidad frente a las variables del proceso.

1.3.2 Disolución de las preformas removibles.

Aunque la información disponible en la literatura es limitada, los métodos de disolución para preformas han sido estudiados, reportando resultados favorables para la obtención de esponjas metálicas; los métodos de disolución para remover preformas solubles, van desde disolución en agua hasta pirolisis térmica [34], según sea el material de relleno.

1.3.3 Metal de la matriz.

La fabricación de metales celulares por el método de infiltración abarca gran cantidad de materiales metálicos como el magnesio, la aleación Zinc-Aluminio-Cobre (zinalco) y en especial, aleaciones de aluminio. Para este trabajo de tesis se utilizará la aleación de aluminio (Aluminio 6061), aleación compuesta básicamente por Al-Mg-Si, donde los elementos aleantes proporcionan resistencia media, buena conformabilidad y producen un aumento en la resistencia a la corrosión, con la posibilidad de ser tratada térmicamente por envejecimiento, obteniendo a partir de ellas esponjas con una amplia gama de aplicaciones de acuerdo con las propiedades del material matriz [4], usada tanto por Gómez, M., como por Gallego, J., E; Valencia, C, A. [3], esto con la intención de contrastar mejor los resultados y ver la influencia del gradiente de porosidad en el material matriz, además de seguir con el tratamiento de mejora morfológica de la sal de la preforma.

Capítulo 2.

DISEÑO Y PUESTA EN MARCHA DEL EQUIPO PARA EL PROCESO DE IPS.



2.1 Introducción.

El proceso de IPS para obtención de metales celulares con porosidad abierta es un método que tiene sus inicios en el proceso de infiltración de preformas solubles, IPS es el proceso mediante el cual en esta tesis se pretende obtener esponjas metálicas usando como material para la preforma NaCl e infiltrando el metal líquido por medio de presión de vacío, dando lugar finalmente a la esponja metálica. En éste capítulo se describe la selección y caracterización de las materias primas, el procesamiento de las esponjas de aleación de aluminio mediante la técnica de IPS, se describe el diseño del equipo y el establecimiento de los parámetros de proceso.

2.2. Materias primas, caracterización y resultados.

El trabajo investigativo producto de esta tesis, que pretende continuar los trabajos realizados por Gallego, J., E; Valencia, C, A. [3] y Gómez. M. [4] Ingenieros de materiales de la Universidad del Valle quienes realizaron la caracterización de las materias primas obteniendo los resultados siguientes:

Aleación de aluminio: el material seleccionado para este estudio es una aleación aluminio-silicio AISI 6061, con un contenido de silicio entre el 0.4 y el 0.8% es el elemento de aleación más importante dentro de las aleaciones de aluminio para fundición, ya que promueve un aumento de la

fluidez en los metales fundidos y su capacidad de alimentación en los moldes, además de servir como refuerzo mecánico del aluminio. En la tabla 2. Se muestra su composición en peso [3].

Tabla 2. Composición en peso de la aleación de aluminio 6061 usada como material matriz [3].

Al	Si	Cu	Mg	Cr
97.9%	0.6%	0.28%	1%	0.2%

Cloruro de sodio (NaCl): Como es sabido, y como se ha descrito anteriormente, el cloruro de sodio es ampliamente usado como material soluble en la preparación de preformas para la obtención de materiales celulares por el método de IPS, en este trabajo se usó sal común para la preparación de la preforma, dando una característica adicional a la materia prima, que consistió en el mejoramiento de su morfología, pasando de una morfología cubica a una casi esférica, el proceso de mejora de la morfología se realizó suministrando llama directa con un soplete de oxiacetileno (El NaCl tiene una temperatura de fusión de 801°C), el cual permitió el cambio de fase de solido a líquido en un lapso de 20 a 30 segundo como se muestra en la figura 2.1 [3].

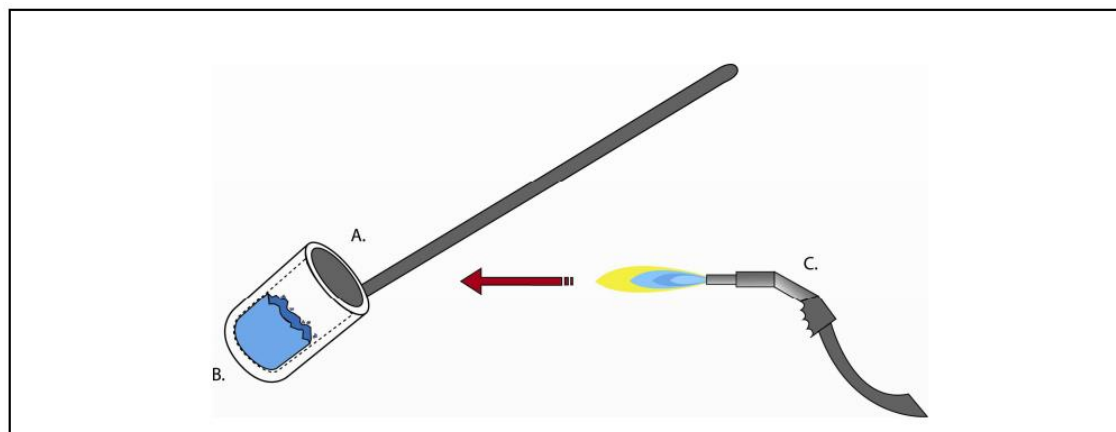


Fig. 2.1. Fusión de la sal en un crisol de acero por exposición a llama

directa [3].

Luego de la fusión del NaCl, se procedió a gotearlo sobre una placa de acero inoxidable, figura 2.2, en la cual por medio de la solidificación por impacto, el material tomaba la forma casi esférica, la literatura revelaba que la variación en los diámetros de las esferas obtenidas es inversamente proporcional a la altura de goteo [3], lo que se comprobó y verificó sin embargo, durante la experimentación y obtención de las esferas de sal, se pudo establecer que la variación del diámetro de cada esfera más que depender de la altura, dependía de la cantidad de material, NaCl, en estado líquido que se dejara derramar sobre la lámina de acero, es decir, se pudo establecer que entre más material se dejara caer “chorro”, se tenían diámetros de partícula mayores, y si por el contrario, se dejaba gotear, se tenían diámetros mucho menores. Esto fue valioso en la fabricación de las

esferas, pues permitió establecer una altura de vertido del material líquido (aproximadamente 40 cm de altura) sobre la lámina, haciendo necesario sólo la dosificación del material necesario para la formación de las esferas según los diámetros deseados.

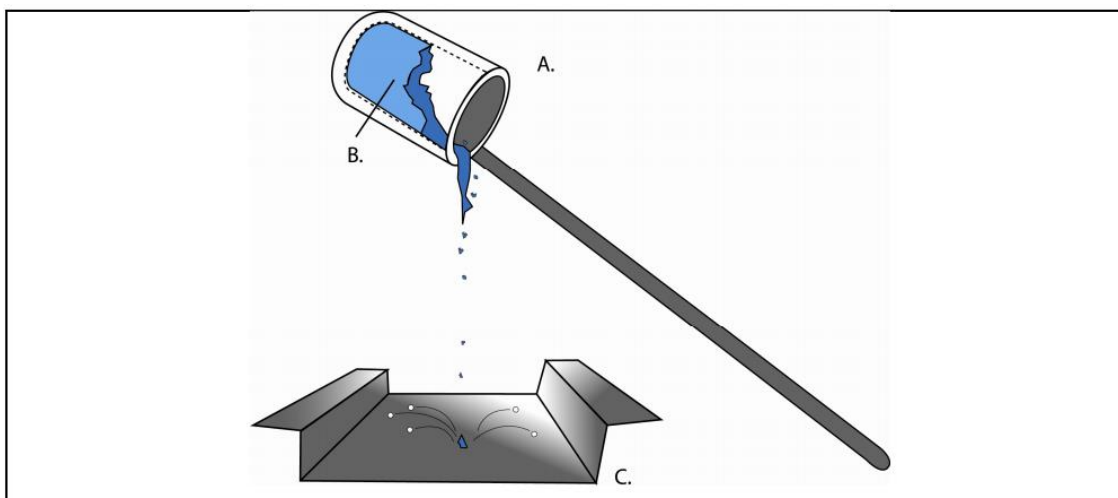


Fig.2.2. Obtención de las esferas de sal mediante solidificación por impacto [3].

Luego de la conformación de las esferas de sal, se procedió a realizar el respectivo análisis granulométrico que permito la selección tanto de los tamaños adecuados de partículas para la generación del gradiente de porosidad, como, la selección de las esferas en mejor estado y que por inspección visual se veían con mejor condición esférica. Para esto se hizo uso de determinados tamices y se obtuvieron los siguientes tamaños de partícula la tabla 3 muestra los tamaños de partícula retenidos por cada tamiz.

Tabla 3. Tamaños de partícula y tamices usados.

Nº Malla	Tamaño de abertura (mm)	Tamaño de grano retenido
8	2,36	2,36-3,35
10	2,00	2,36-2
12	1,68	2,00-1,68
16	1,18	1,40-1,18
20	0,85	1,18-0,85
30	0,60	0,85-0,60

Microscopia de barrido electrónico (SEM): Mediante un microscopio marca JEOLJSM-6490LV, se realizó el análisis químico, morfológico y de tamaño promedio de las partículas de NaCl. En la figura. 2.3. Puede observarse las imágenes obtenidas por SEM, para las partículas de sal con morfología casi esférica. La tabla 4. Ilustra la composición química obtenida por EDS para cada una de las muestras mencionadas.

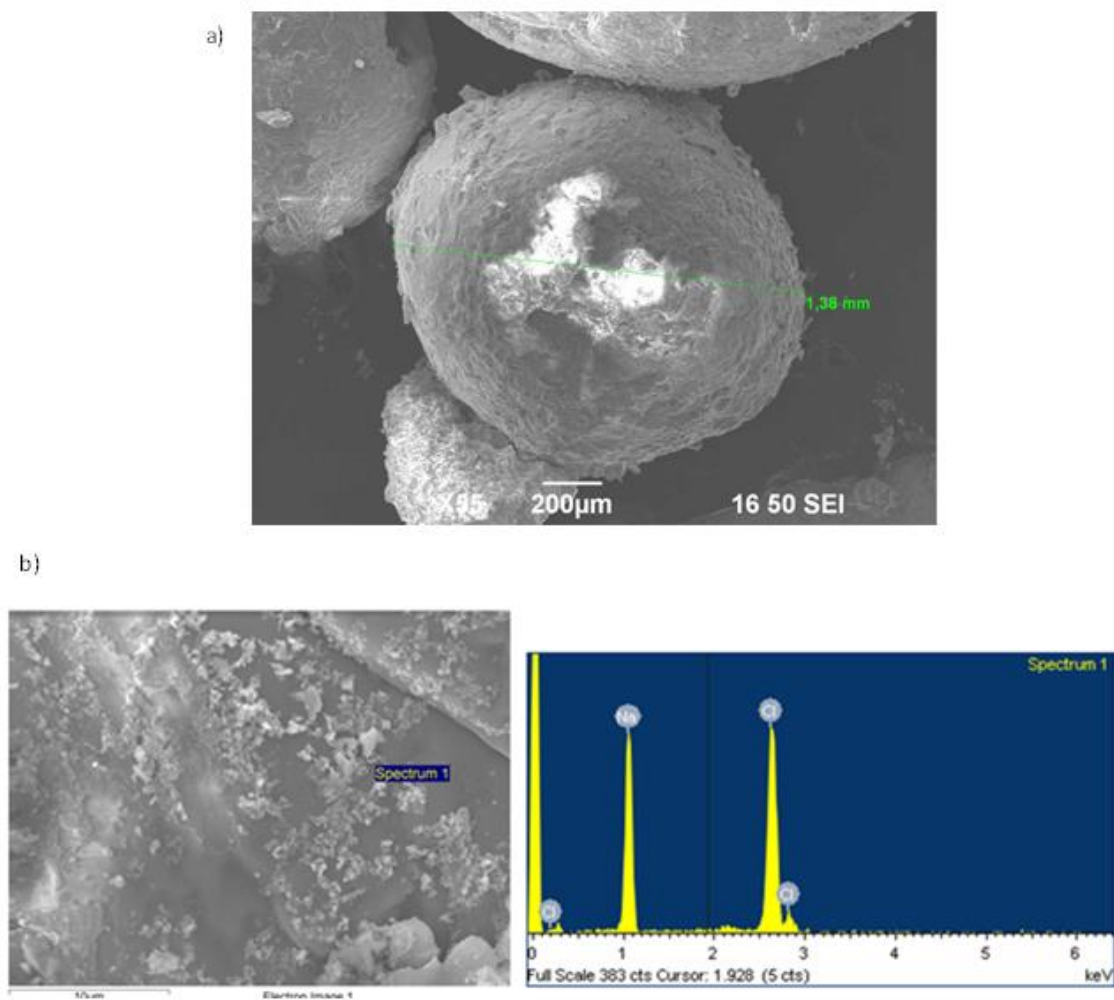


Fig. 2.3. Imagen SEM la gráfica a) muestra las partículas de sal con morfología casi esférica, la gráfica b) muestra el área inspeccionada y el espectro.

Tabla 4. Composición química de la sal obtenida por el método de EDS.

	Peso%	Atómico%
Na	36.65	47.16
Cl	63.35	52.84

2.3. Diseño y descripción del equipo de infiltración.

Para llevar a cabo el desarrollo de metales celulares por medio del proceso de IPS, se procedió a realizar el diseño, fabricación y puesta en marcha de un equipo que permitiera la obtención del material deseado por medio de presión de vacío, se llevó a cabo la fabricación del dispositivo basado en el equipo fabricado por Fernández, P. [5].

El equipo está constituido por tres sub-sistemas, que constituyen con su acople, el dispositivo como tal, los sistemas que componen el dispositivo y sus funciones son los siguientes:

- **Sistema de calentamiento.**

El sistema de calentamiento eléctrico, mostrado en la figura 2.4, constituido por un cilindro de acero inoxidable, desmontable, es un sistema al interior del cual se encuentran las resistencias de calentamiento encargadas de brindar la temperatura de fusión del metal, así como de proveer la temperatura de precalentamiento de la preforma soluble, con lo cual, se evita el choque térmico al momento de la infiltración y se controla la cantidad de agua que pudiera ser absorbida por la sal debido a su alto carácter higroscópico. Esta parte del sistema está conformada por un cilindro de ladrillo refractario, encargado tanto del aislamiento como del soporte de las resistencias de calentamiento, que a su vez está contenido al interior del cilindro de acero inoxidable que hace de carcaza; este cilindro cuenta con una compuerta ubicada en la parte superior que permite el fácil acceso al material fundido, pues según lo que reporta la literaturas [5], [7], es necesario poder tener acceso al material en estado líquido para realizar la remoción de la escoria del material y así evitar inclusiones en el resultado final.

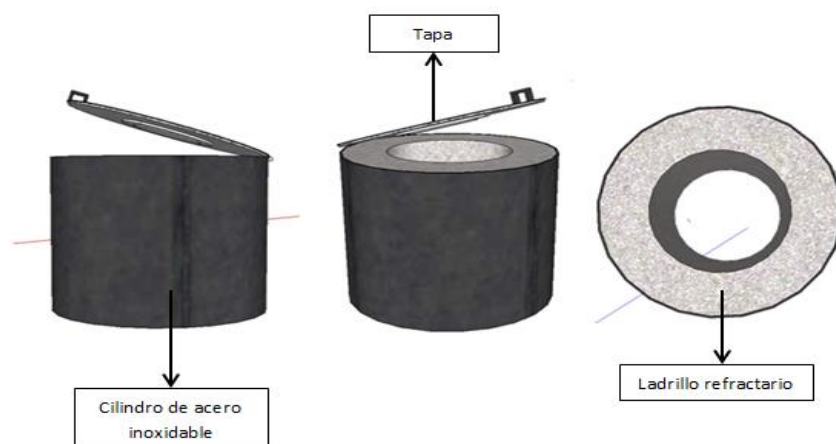


Fig. 2.4. Subsistema de calentamiento (GoogleSketchUp).

- Sistema de fusión y tubería de acople.** Para esta parte del sistema, mostrada en la figura 2.5, y teniendo en cuenta la recomendación de Fernández, P. [5]. Se decidió usar un crisol de carburo de silicio que además de permitir la buena fusión del material y es más estable químicamente frente a la temperatura de trabajo. Para la otra parte del sistema se usó como molde un cilindro de acero de bajo carbono, el cual está acoplado al crisol por un lado y a la tubería de presión por el otro; para el acople se usaron dos discos y una tubería de 3/4 ", todos de acero inoxidable 304, material escogido por su mayor estabilidad química frente a los cloruros; en el extremo externo de la tubería se encuentra la conexión establecida para el sistema de refrigeración de los gases que llegan a la bomba de vacío, ya que la temperatura de trabajo de la bomba oscila entre 70 y 100°C, además de la necesidad de bajar la temperatura de los gases, fue necesario tomar medidas sobre la posibilidad de que el material se filtrara por la tubería y llegara a dañar la bomba, debido a esto, se decidió que la manguera para el sistema de refrigeración fuera de un material polimérico para de esta forma proteger la bomba, dado el caso hipotético de que parte del metal líquido pasara a través de la tubería, con lo que se esperaba que si el material se filtrase, la manguera polimérica se fundiría antes de que el material pudiera llegar a la bomba y dañarla, además de esta precaución, también se pensó en otros métodos que permitieran el buen cuidado de la bomba de vacío, dado esto, se adicionó al diseño del acople, un filtro de acero inoxidable en la parte superior del sistema de la tubería con el objetivo de impedir el paso del metal fundido en dirección a la bomba, como lo muestra la figura 2.6 .

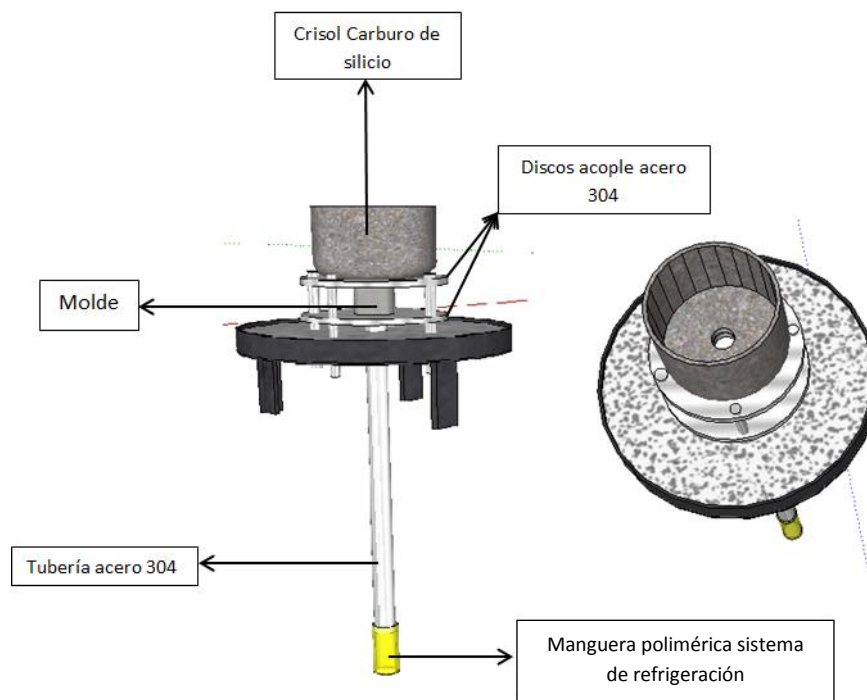


Fig. 2.5. Subsistema de fusión y acople para ejercer la presión de vacío (GoogleSketchUp).

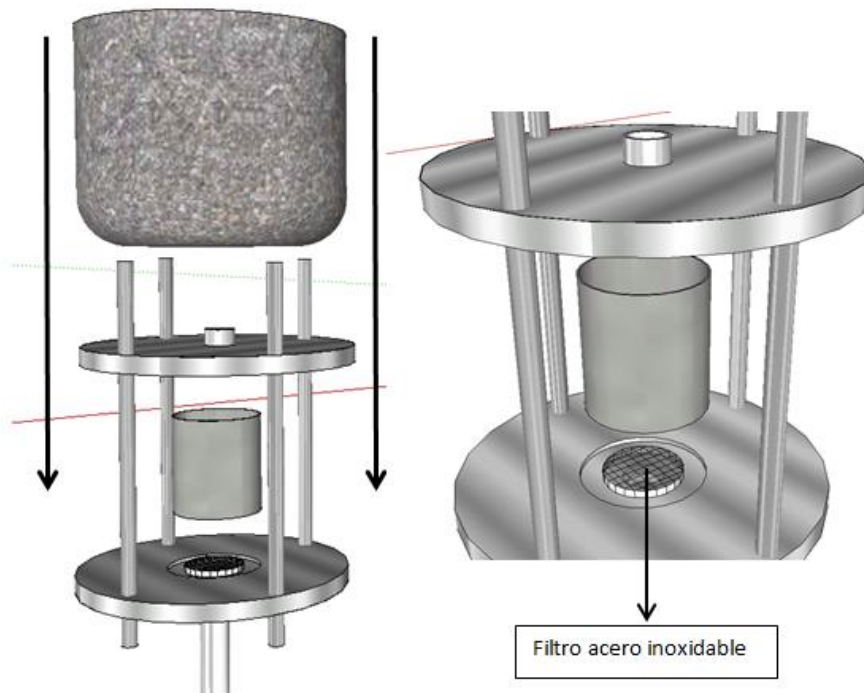


Fig. 2.6. Acople con filtro de acero inoxidable (GoogleSketchUp).

- **Sistema de vacío.**

Este sistema está constituido por la conexión que va desde la parte inferior del horno, hasta, el lugar de conexión de la bomba de vacío, y la bomba de vacío como tal, como muestra la figura 2.7. Para obtener la presión de vacío, se usó una bomba PFEIFFER de paletas rotativas DUO 2.5 del laboratorio de materiales.



Fig. 2.7. Bomba de vacío PFEIFFER (laboratorio de materiales Universidad del Valle).

2.3.1 Diseño y descripción del proceso.

Para el procesamiento y obtención de metales celulares con porosidad interconectada, interés de la presente investigación, se hizo uso del proceso de IPS asistido por presión de vacío, usando como material de la preforma NaCl, material al cual por medio de un proceso de fusión y posterior solidificación con impacto (proceso explicado en el apartado 2.2), se le mejoro la morfología, obteniendo morfologías casi esféricas, para el metal de la matriz, se usó aluminio de la serie 6000. Este proceso se realizó en varias etapas:

- **Preparación del molde:** Procedimiento de limpieza del molde.
- **Selección de las partículas de sal:** Se seleccionaron los tamaños de partícula más adecuados para la producción del gradiente como lo muestra la figura 2.8.

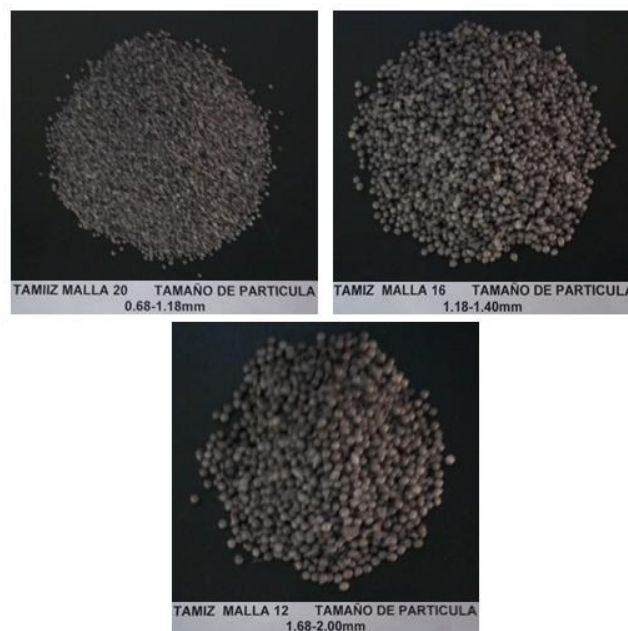


Fig. 2.8. Partículas de sal seleccionadas para la obtención del gradiente de porosidad.

- **Constitución de la preforma con gradiente de porosidad:** El NaCl (de morfología casi esférica), fue depositado en el molde, teniendo en cuenta la constitución del gradiente de porosidad y el contacto entre las esferas figura 2.9.



Fig. 2.9 Preforma de sal sinterizada, muestra el contacto íntimo entre las esferas de sal.

- **Infiltración:** Por medio de la presión de vacío, se infiltró el material matriz en la preforma.
- **Disolución de la preforma:** Una vez enfriada y maquinada la probeta, se disuelve la preforma en un solvente propicio (agua destilada).

2.4. Proceso de infiltración por presión de vacío (IPS).

- **Preparación del molde:** El primer paso que se realizó en la preparación del molde, fue la limpieza del mismo, la cual se hizo por decapado con ácido clorhídrico facilitado por el laboratorio de recubrimientos duros de la escuela materiales de la Universidad del Valle, permitiendo así la obtención de un molde limpio libre de óxidos, contaminantes, entre otros, el cual, posteriormente se recubrió con una capa de grafito en polvo, material escogido por sus cualidades lubricantes, que sirvió como agente desmoldante de la probeta constituida.
- **Constitución de la preforma con gradiente de porosidad:** Para este paso fue de vital importancia la generación del gradiente de porosidad, característica de gran relevancia en esta investigación, para esto, se usaron cilindros de acetato concéntricos con el diámetro del molde, que al ser expuestos a la temperatura de trabajo fueron erradicados de la preforma, dando lugar al gradiente de porosidad y a la interconexión de las esferas de sal de los diferentes tamaños. La constitución del gradiente se realizó como se muestra en la figura 2.10a y 2.10b, en donde se depositaron las esferas de sal de menor a mayor tamaño en forma radial, dejando las esferas de menor tamaño en la parte de mayor radio con respecto del centro del molde, y las de mayor tamaño ubicadas al centro del molde, produciendo así un gradiente de porosidad con tres tamaños de partícula.

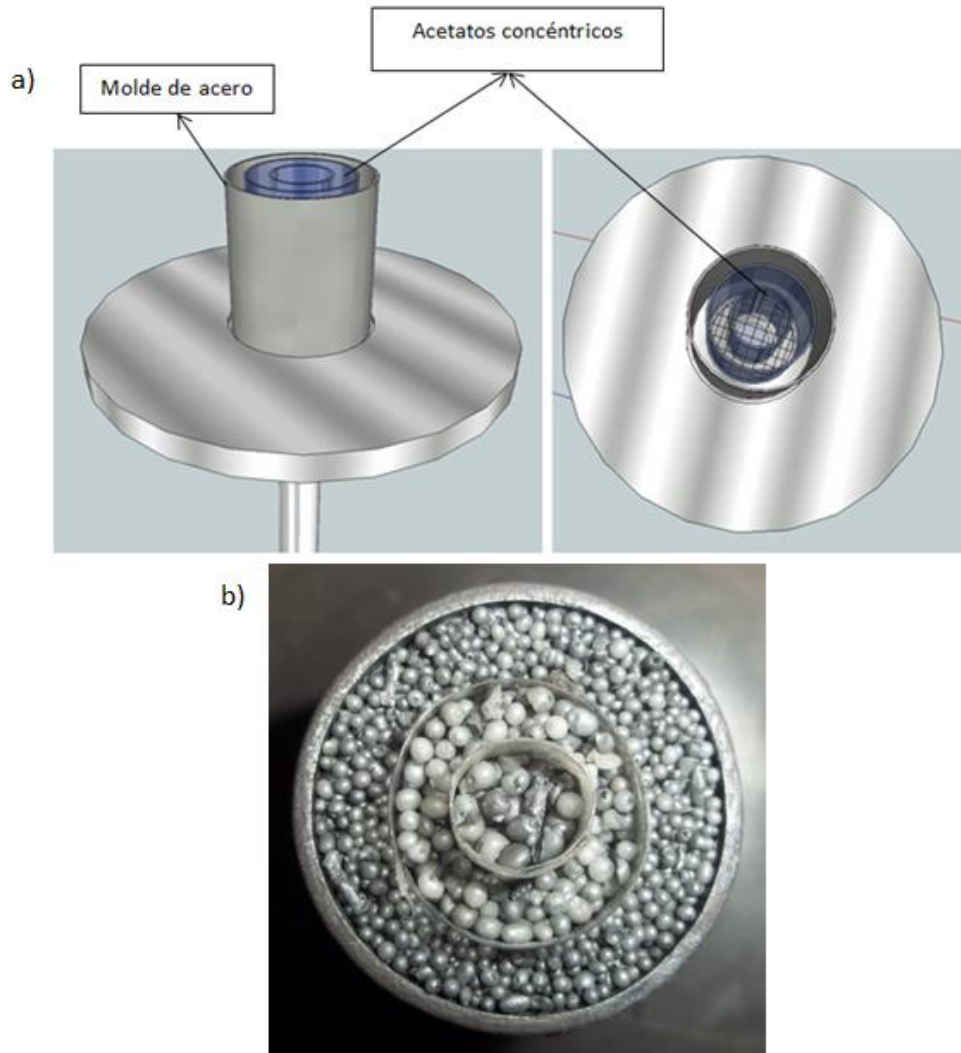


Fig.2.10. Procedimiento para la formación del gradiente de porosidad, a) figura superior donde se muestra el diseño del procedimiento (GoogleSketchUp), b) figura inferior donde se muestra el molde real usado para la infiltración.

- **Acople de los subsistemas que conforman el equipo:** Una vez limpio el molde y constituida la preforma de sal, se procedió a acoplar todas las partes que conforman el sistema, el acople se realizó usando varillas roscadas de acero inoxidable, que con su apropiado ajuste y con la buena ubicación de los filtros y el molde, el equipo tuviera mínimas o nulas pérdidas de presión, es decir, que el sistema quedara totalmente sellado para mantener la presión de infiltración Fig. 2.11.

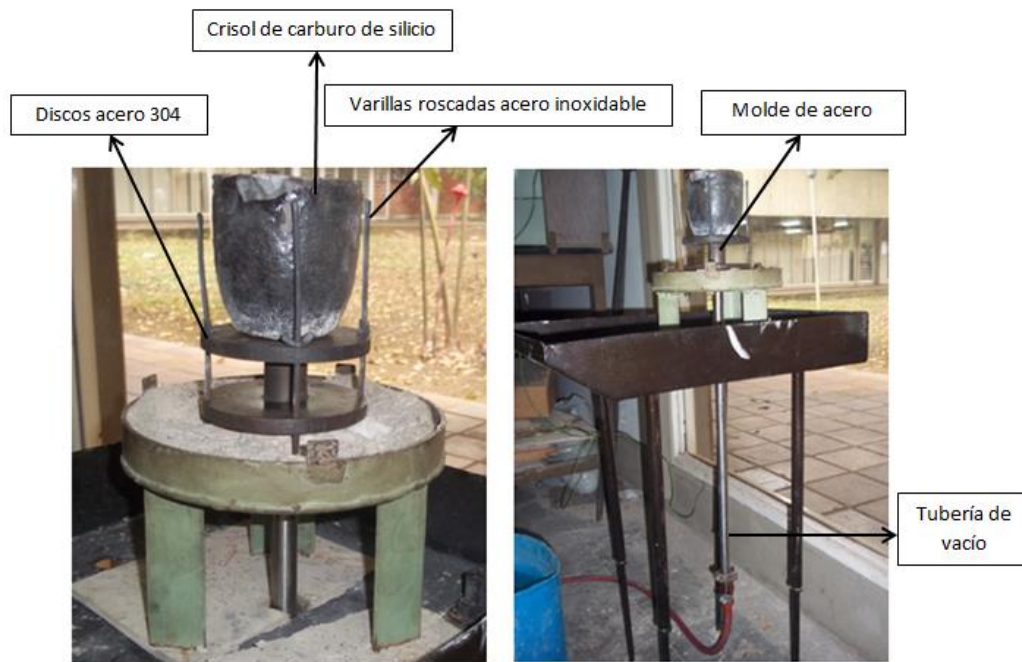


Fig. 2.11. Elementos de acople y equipo ensamblado para la realización del proceso de infiltración.

2.5 Selección de las variables de infiltración.

Para la determinación de las variables de infiltración, importantes en el procesamiento de MC por el método de IPS asistido por presión de vacío, las cuales son, temperatura de trabajo (temperatura que debe alcanzar el dispositivo para la fusión del material), tiempo de sostenimiento (tiempo que tarda el material en alcanzar el estado líquido en la totalidad de la masa) y la presión de infiltración (presión encargada de la infiltración del material en la preforma de NaCl), se decidió proceder de forma experimental, ya que el dispositivo es un equipo diseñado y conformado en su totalidad por los autores de este trabajo, lo que hacía necesario la calibración del equipo y la adecuación del mismo sobre la marcha, de ser necesario, en el procesamiento de los MC.

2.5.1. Selección de la temperatura de trabajo.

Para la obtención de la temperatura de trabajo, no solo se tuvo en cuenta la temperatura de fusión del aluminio, 660°C aproximadamente, para el caso de la aleación 6061 usada en este trabajo, si no que por medio de experimentación se logró especificar que, más que la necesidad de fundir el aluminio, se debía tener en cuenta la capacidad de infiltración del mismo en la preforma, estableciendo que la mejor fluidez del material al interior del dispositivo se dio entre 690°C -710°C, tomando como temperatura de infiltración 710°C, temperatura que se alcanzó en un lapso de veinte minutos y fue medida por medio de una termocupla ubicada en la parte superior central del crisol figura 2.12, logrando así la conformación total de la probeta a ensayar. Cabe resaltar que mientras el dispositivo alcanza la temperatura deseada, el aumento de la misma sirvió para remo-

ver los acetatos usados para la conformación del gradiente de porosidad y el agua que pudiera tener la preforma de sal debido a su alto carácter higroscópico.

Se probaron diversos intervalos de temperatura de trabajo, a los cuales se les denoto como caso 1, 2 y 3, cada una arrojando resultados específicos que permitieron la estimación y calibración de los valores necesarios para la buena conformación de las probetas, los datos arrojados fueron los siguientes:

1. Caso 1: temperaturas entre 660 y 680°C, el material no estaba lo suficientemente fluido como para conformar la probeta en su totalidad.
2. Caso 2: temperaturas entre 690 y 710°C, a esta temperatura el material adquiría una fluidez adecuada para la buena conformación de la probeta.
3. Caso 3: temperaturas mayores a 720°C, el material se filtraba por la tubería de presión de vacío, averiando la manguera polimérica, es decir, se obtenía una fluidez del material superior a la adecuada.

Otra variable importante que está ligada a la temperatura de trabajo, es el tiempo de sostenimiento, que hace alusión al tiempo necesario para que toda la masa de aluminio utilizada (22,8 gr de Al en este trabajo), esté en estado fundido y con una temperatura homogéneamente distribuida en todo el caldo, el tiempo que tomo para que toda la masa estuviera fundida en el caso 2, caso en el que el aluminio conformaba mejor la probeta y sin filtraciones hacia la tubería, fue de 30 minutos, a su vez este tiempo de sostenimiento fue necesario para que el aluminio fluyera sin solidificarse al dirigirse hacia la preforma (como sucedía en el caso 1), pues la diferencia de diámetros entre el crisol y el molde y la distancia de los mismos frente a las resistencias de calentamiento hacían que la temperatura censada por la termocupla solo fuera la temperatura a la que estaba el crisol, permitiendo así saber que la temperatura del molde y la preforma eran menores debido a la mayor distancia que debía recorrer el calor (convección), figura 2.13 para calentar el molde y por tanto era necesario más tiempo de exposición a esta temperatura para que al fluir el material no se generara perdida de calor que pudiera solidificarlo al momento de conformar la probeta.

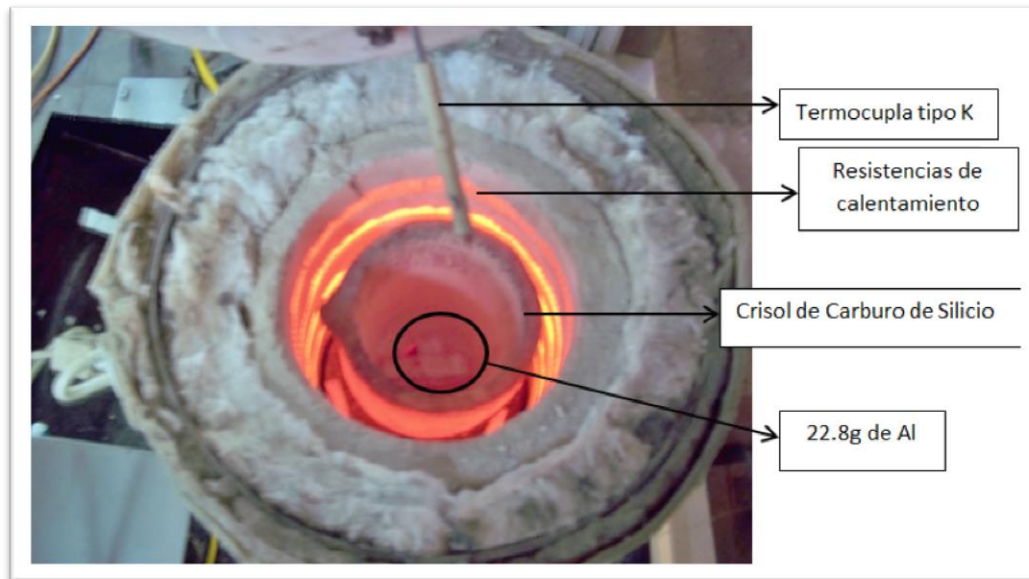


Fig. 2.12. Disposición del equipo durante el proceso de fusión del metal de la matriz.

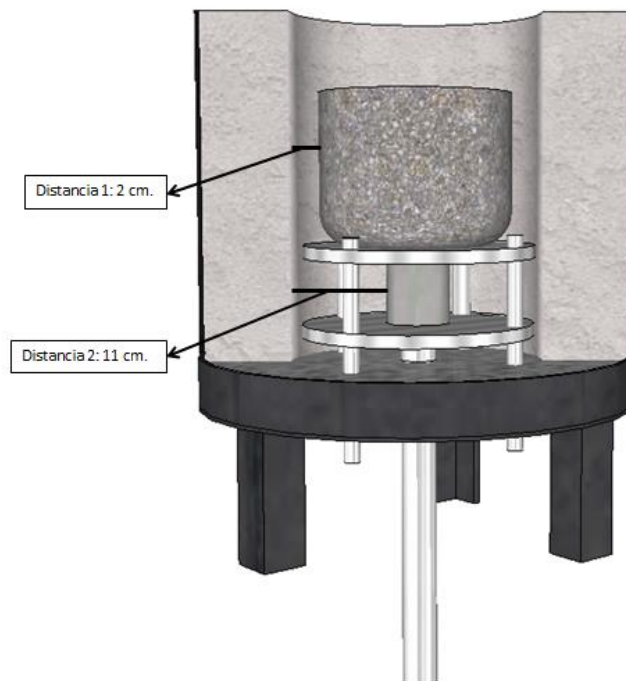


Fig. 2.13. Distancia entre el crisol y el molde con respecto a las resistencias de calentamiento (GoogleSketchUp).

2.5.2 Selección de la presión de infiltración.

El proceso de IPS asistido por presión de vacío, como su nombre lo indica, tiene como característica fundamental la asistencia de una presión negativa, presión que conlleva a la infiltración del metal fundido en la preforma removible, esta variable se determinó experimentalmente, estableciendo de esta forma que el valor de la presión necesaria para la buena conformabilidad del MC con gradiente de porosidad, aplicando el caso 2, oscilara entre 338 a 280 mbar, es decir, 33,8 a 28,0 kPa, cabe resaltar en este aspecto, que la presión requerida para la conformabilidad de las probetas con gradiente de porosidad no fue una constante como lo reportan algunos autores [3], [5], esto debido a la dependencia inversa de la presión con el tamaño de partícula y a la variación axial del tamaño de las partículas al interior del molde.

2.5.3 Disolución de la preforma.

La disolución de la probeta se realizó por el método de agitación magnética con aplicación de temperatura en el agua 60°C aproximadamente (agua destilada, aproximadamente 400 ml), figura 2.14, donde se expuso el compuesto Al/NaCl a este proceso durante 30 minutos, luego de los cuales se realizaba cambio de agua y se repetía el proceso, este procedimiento del cambio de agua se realizó tres veces por probeta.

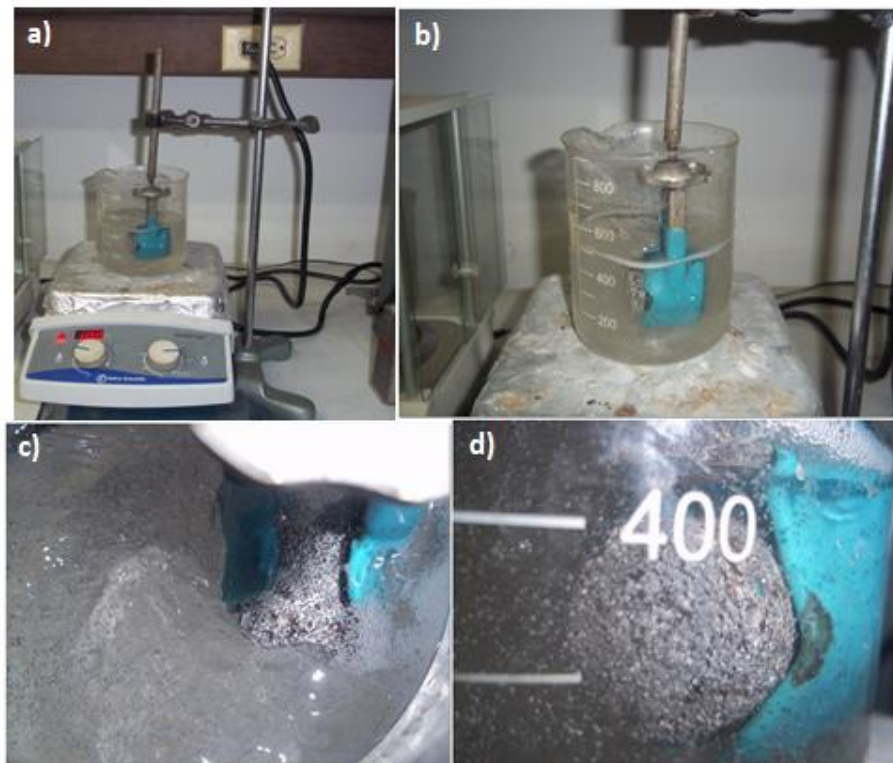


Fig. 2.14. Disolución de la preforma por el método de agitación magnética.

Capítulo 3.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA LA CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LAS ESPONJAS DE ALUMINIO 6061.



3.1 Métodos de caracterización morfológica y microestructural.

En el presente capítulo, se describen los diferentes ensayos y metodologías empleadas para la caracterización morfológica, física, microestructural y comportamiento mecánico de las esponjas de aleación de aluminio obtenidas mediante el proceso IPS asistido por presión de vacío.

3.1.1 Densitometría

Uno de los primeros parámetros a determinar en cuanto a la conformación volumétrica de la esponja metálica es su densidad relativa y porcentaje de porosidad. La metodología para obtener dichos valores, se describe a continuación:

1. Se pesa la muestra para obtener el valor de la masa de la misma (g).
2. La determinación del volumen de la muestra V (cm^3), se realiza obteniendo las medidas propias de la probeta y reemplazando los valores respectivos en la fórmula para el volumen de un cilindro, ya que la probeta en cuestión es un cilindro perfecto geométricamente hablando.
3. Se calculó la densidad de la esponja ρ_s (g/cm^3) mediante la división de la masa por el volumen según la ecuación 1.

$$\rho_s = \frac{V}{m} \quad [\text{gcm}^{-3}] \quad (1)$$

4. El valor de la densidad de la esponja (ρ_s) se relaciona a la densidad del metal en sólido de la matriz (ρ_m), para de esta forma obtener la densidad relativa (ρ_r) de la esponja metálica mediante la ecuación 2. La densidad relativa suele expresarse en porcentaje o fracción (adimensional).

$$\rho_r = \rho_s / \rho_m \quad (\text{adimensional}) \quad (2)$$

5. Ahora, si se considera que una esponja metálica está conformada por dos fases, una de las cuales es el metal matriz y la otra son los poros, la porosidad V_p puede definirse como el complemento de la densidad, como se escribe en la ecuación 3.

$$V_p = 1 - \rho_r \quad (\text{adimensional}) \quad (3)$$

3.1.2 Análisis morfológico.

El análisis morfológico permite determinar la conformación macroestructural del material en cuestión, en este caso una esponja metálica, lo que hace que este tipo de análisis sea bastante interesante, ya que permite esclarecer cómo está constituida la esponja en relación al tamaño, morfología y distribución de los poros. Para este caso en especial y dado que para este tipo de análisis se tiene varias técnicas propicias para el mismo, se decidió realizar algunas técnicas de microscopía, que se procederá a describir:

- Microscopía óptica: Para determinar algunos aspectos inherentes a la morfología de las celdas, tales como su distribución, tamaño e interconectividad, se procedió a usar un microscopio óptico marca Olympus, modelo U-CTR-30-2 y un estereomicroscopio Micrometrics.
- Microscopía electrónica de barrido (SEM): Mediante un microscopio marca JEOLJSM-6490LV se realizó el análisis de la forma, tamaño y distribución de los poros en las esponjas de aluminio fabricadas.

3.1.3 Composición química de las esponjas de aluminio.

Para la determinación de la composición química de la espuma obtenida en este trabajo de investigación y esclarecer si se encontraban rastros de la preforma NaCl o de hierro debido a la posible difusión de este elemento aportado por las partes componentes del equipo (acero inoxidable 304), se recurrió a la técnica EDS.

3.1.4 Análisis metalográfico.

Es un método bastante efectivo para conocer las características del metal mediante la interpretación de la información que revela la microestructura antes y después del tratamiento térmico T6 realizado a las probetas.

Preparación metalografía: se tomaron 10 muestras, 5 con tratamiento térmico y 5 sin tratamiento térmico y se prepararon de la siguiente forma.

El pulido de las probetas se hizo de la siguiente manera:

- Pulido inicial en papeles abrasivos en el siguiente orden sucesivo: #180, 240, 320, 400, 500, 600, 1000, 1200.
- Pulido intermedio en paño con partículas de alúmina de 1.0 micras a baja velocidad.
- Pulido final en paño con partículas de alúmina de 0.3 micras a alta velocidad.

Al terminar el pulido se realizó una observación preliminar en este estado y luego se procedió al ataque químico para la identificación de los micros constituyentes, para lo cual se utilizó el reactivo de Poulton.

3.1.5 Tratamiento térmico.

Un tratamiento térmico, en sentido amplio de la palabra, se refiere al calentamiento y enfriamiento de los metales en estado sólido, para modificar sus propiedades mecánicas, su estructura metalográfica o eliminar tensiones residuales [5]. Para consideración de este trabajo y debido a la aleación usada (aluminio 6061), se estableció el sometimiento de la probeta a un tratamiento térmico de envejecimiento artificial T6, tratamiento térmico recomendado por *The Aluminium Association* para las aleaciones del tipo Al-Si-Mg, que produciría un aumento en las propiedades mecánicas debido a la precipitación de siliciuro de magnesio, precipitado que aumentaría la dureza en la matriz del MC y generaría cambios microestructurales en el Si.

Metodología para aplicar el tratamiento térmico T6:

- Tratamiento de solubilización: Se solubilizan los microconstituyentes presentes en la aleación, esto sucede, exponiendo el material a una temperatura de 540°C durante 4 horas.
- Temple: Pretende mantener la estructura solubilizada conseguida en el tratamiento de solubilización, esto templando la muestra en salmuera con NaCl al 10% en peso, a temperatura controlada (aproximadamente 65°C).
- Envejecimiento artificial: Esta es la etapa más importante del tratamiento térmico T6, ya que es donde se consiguen los precipitados que darán aumento a las propiedades mecánicas del material, para esto, se somete el material a una temperatura de 175°C durante un tiempo de 4 horas.

Verificación de las propiedades mecánicas por la influencia del tratamiento térmico, microestructura, microdureza y compresión.

3.2 Métodos de caracterización de las propiedades mecánicas.

Debido al corto tiempo de aparición y moderado empleo de las esponjas, no existen normas específicas para los ensayos mecánicos de dicho material. Razón por la cual; las universidades e institutos de investigación que han realizado estudios sobre este tipo de material han elaborado protocolos propios de ensayo basándose en las normas existentes para metales [5]. No obstante, cabe aclarar que los equipos empleados para los ensayos mecánicos son los mismos equipos convencionales utilizados para pruebas de materiales sólidos. Ashby en su libro “Metalfoams” [7] entrega una serie de recomendaciones a tener en cuenta para la elaboración de las probetas y la realización de los ensayos de compresión y tracción. En todos los casos, las probetas deben tener dimensiones de al menos siete veces mayores al tamaño de los poros de la esponja.

Para lograr la minimización de los daños de la estructura porosa, el proceso de corte y maquinado de toda las probetas fue realizado sobre el compuesto Al/NaCl y en seco, sin el uso de ningún tipo de lubricante que pudiera disolver la sal. Es importante resaltar este aspecto, ya que durante el mecanizado debe tenerse las precauciones del caso para evitar la corrosión de la maquinaria.

3.2.1 Prueba de compresión uniáxial

Para la realización de este ensayo Figura 3.1., se llevó a cabo el corte de 10 probetas, corte que se realizó en el compuesto NaCl/Al, para de esta forma evitar el colapso de los poro de las probetas y obtener la altura deseada, cabe resaltar que a te tipo de probetas no se le realizo maquinado por medio del torno como e realizo en trabajos anteriores [3], [5], ya que la pérdida o reducción del

diámetro, llevaría a la pérdida de la capa externa del gradiente, pues este se realizó de forma axial, las características de las probetas para este ensayo se describe a continuación.

- Dimensiones de las probetas: 20mm de altura x 25,4mm de diámetro.
- Tamaño promedio del gradiente de porosidad: porosidad externa 0,75 mm, porosidad intermedia 1,25 mm, porosidad central 2,00 mm.
- Densidad relativa: 0.416.

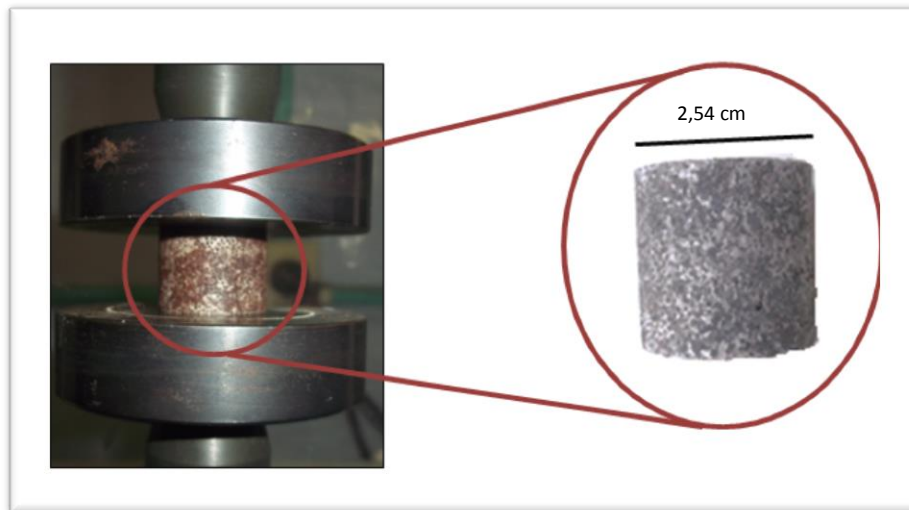


Fig. 3.1. Ensayo de compresión.

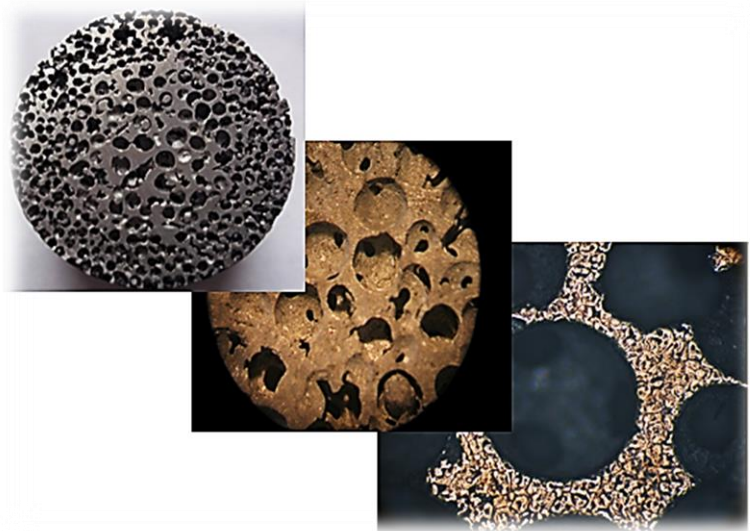
3.2.2 Prueba de microdureza Vickers.

Para la realización de este ensayo, se seleccionaron 6 muestras, donde 3 de las muestras pertenecían a las esponjas en estado de fundición, mientras las tres restantes pertenecían a las muestras tratadas térmicamente por medio del tratamiento térmico T6, todas las muestras estaban preparadas metalográficamente, el ensayo se realizó en un microdurómetro *Wilson instruments 401 MV*, los parámetros del ensayo fueron los siguientes:

- Carga: se utilizó una carga de 100 gr.
- Tiempo de indentación: para este ensayo se estableció un tiempo de indentación de 15 segundos, tiempo que se respetó en cada una de las indentaciones.
- Número de indentaciones: se realizaron 10 indentaciones por probeta.
- Distancia entre cada indentación: se mantuvo en promedio una distancia de al menos 3 veces el tamaño de la huella para cada indentación.

Capítulo 4.

Caracterización y evaluación de las propiedades de las esponjas de aleación aluminio 6061 con gradiente de porosidad obtenidas por el método IPS.



Este capítulo pretende mostrar los resultados obtenidos en los diferentes ensayos de caracterización tanto morfológicamente como metalográficamente y a nivel de propiedades mecánicas de las esponjas de aleación de aluminio 6061 con gradiente de porosidad, resultados que se discutirán en el capítulo posterior.

4.1 Resultados morfológicos y metalográficos.

4.1.1. Densitometría.

Haciendo uso de método de la balanza hidrostática, la densidad relativa de las esponjas con gradiente de porosidad pr, se encontró comprendida entre 0.41 a 0.42, lo cual constituye casi una constante. En promedio la densidad relativa de las esponjas es de 0.416, la tabla 5 muestra la densidad relativa pr, densidad aparente pa de las esponjas y el porcentaje de porosidad.

Tabla 5. Datos de densidad aparente, densidad relativa y porcentaje de porosidad.

Esponjas con gradiente de porosidad (tamaños de partículas entre 0,60-2,00 mm)	Densidad aparente pa (gcm-3)	Densidad relativa pr	Porosidad Vp
1	1,81	0,42	0,57
2	1,83	0,41	0,59
3	1,79	0,42	0,57
4	1,85	0,41	0,59
5	1,8	0,42	0,59
Promedio	1,81	0,41	0,58

Cabe resaltar que todas las esponjas sometidas al ensayo de densitometría fueron probetas conformadas en su totalidad y con valores de presión entre 33,8 a 28,0 kpa.

4.1.2 Macroestructura: morfología de las esponjas de aluminio con gradiente de porosidad.

Mediante la apreciación por medio del estéreo-microscopio, fue posible evidenciar la distribución de los poros y su uniformidad a lo largo de toda la matriz del MC, además de la morfología de los mismos (casi esférica), otro aspecto importante es que se puede corroborar el cambio de diámetro de los poros hacia el centro de MC, como su interconectividad, característica principal de las esponjas metálicas. Para establecer ópticamente la conformación de las esponjas de aluminio con gradiente de porosidad se decidió realizar la inspección por medio del estéreo-microscopio, tanto a la preforma como al fenómeno de infiltración del metal que se dio durante la constitución de la esponja, la figura 4.1 muestra tanto las partículas de sal casi esféricas de la preforma ya conformada, como la infiltración del material el interior de las mismas. La figura 4.2. Muestra tanto la gradación de los poros, como la interconectividad entre los mismos.

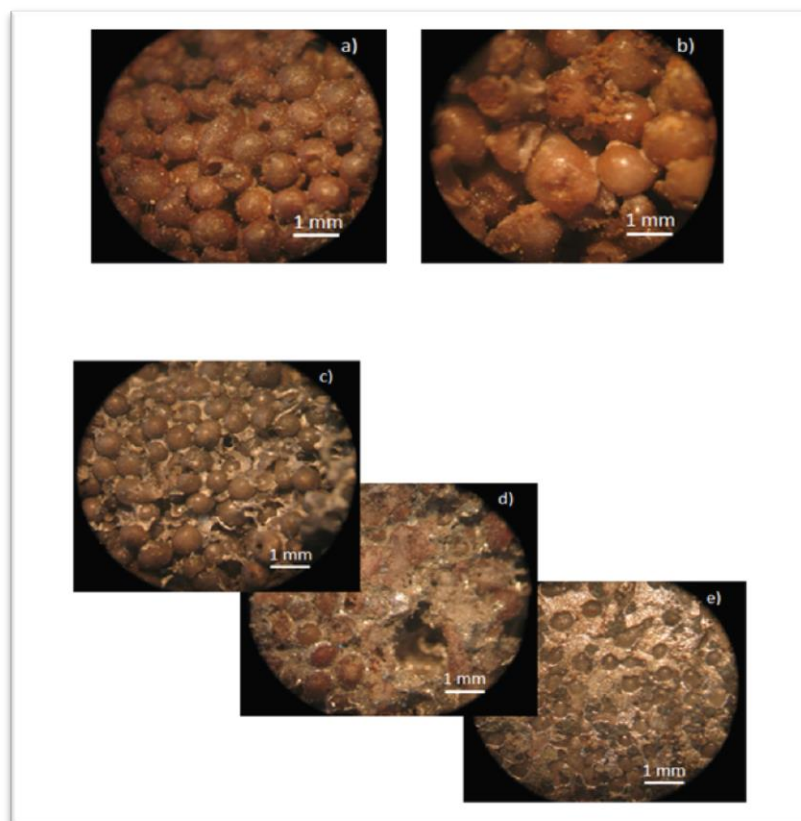


Fig.4.1. a) y b) estéreo-microscopia de la preforma de sal constituida por partículas casi esféricas, c), d) y e) muestran el compuesto NaCl/Al después del proceso de infiltración.

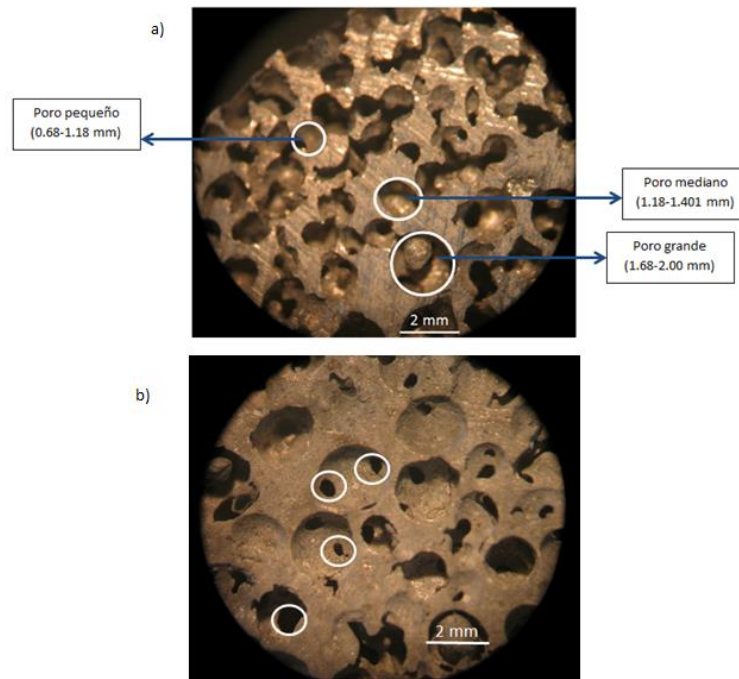


Fig.4.2. La figura a), muestra la gradación de los poros, haciéndose estos de mayor tamaño hacia el centro de la probeta, la figura b), muestra la interconectividad propia de las esponjas metálicas.

Además de la inspección por medio de estéreo-microscopia, se hicieron tomas de las MC con gradiente de porosidad a macro escala, determinando de esta forma la distribución del gradiente de porosidad a lo largo de la matriz, como lo muestra la figura 4.3.

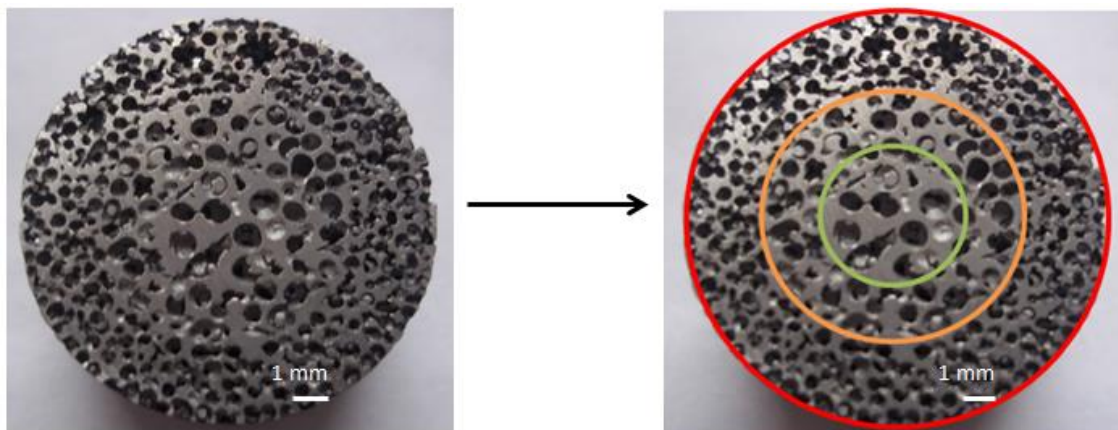


Fig.4.3. gradiente de porosidad axial de las esponjas de aluminio, el tamaño de partícula aumenta del exterior hacia el centro, teniendo en el exterior partículas de 0.68-1.18 mm, intermedia de 1.18-1.40 mm y en el centro de 1.68-2.00 mm.

4.1.3. Análisis puntual de la composición química de las esponjas de aluminio.

La determinación de la composición química de las esponjas de aluminio con gradiente de porosidad se realizó a través de EDS, esto con el fin de determinar la distribución de los elementos de aleación y la posible presencia de elementos contaminantes provenientes de la preforma o del proceso de producción, los resultados arrojados por esta técnica se muestran en la figura 4.4, la composición química en se muestra en la tabla 6.

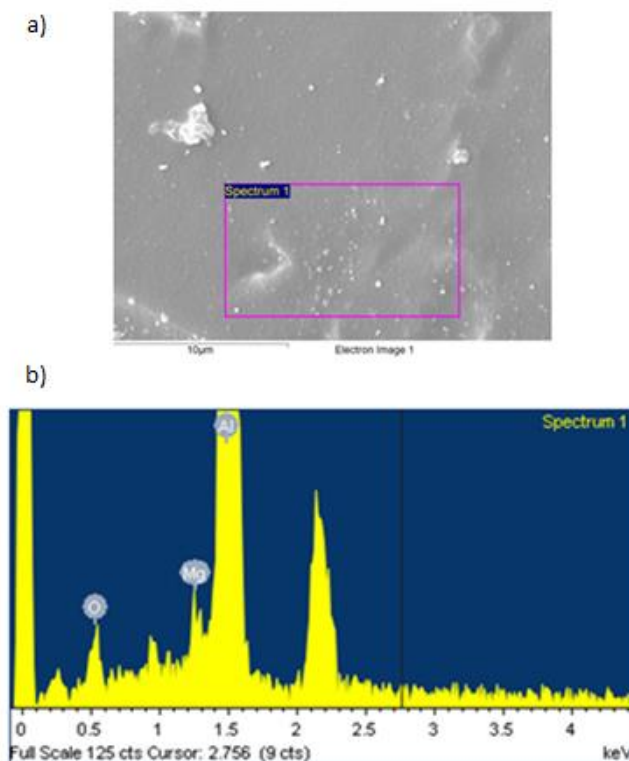


Fig. 4.4. La figura a) muestra el área observada a la que se le hizo el barrido, la gráfica b) muestra el espectro de la composición de las esponjas de aluminio para la probeta.

Tabla 6. Composición química de la esponja de aluminio por el método de EDS.

	Peso%	Atómico%
O	4,76	7,77
Mg	0,77	0,83
Al	94,47	91,4

4.1.4. Metalografía: análisis microestructural de las esponjas de aluminio.

Para el análisis microestructural, se procedió, después de la previa preparación ya descrita de las probetas sin y con tratamiento térmico figura 4.5, a la toma de micrografías a aumentos de 100X, 200X y 500X, estableciendo que para efectos de este trabajo, los resultados mostrados, en las figuras (4.9 a 4.16), son los más representativos.

La figura 4.6, se muestra para la aleación de aluminio 6061, aleación usada en este trabajo, cuáles son los microconstituyentes presentes en el diagrama de fases AlSiMg, en la figura 4.8, se ve cada fase microestructural de acuerdo al tratamiento térmico usado (tratamiento térmico T6), para la aleación 6061, en la tabla 7 se muestra la forma de identificar cada constituyente.



Fig.4.5. Probetas preparadas para análisis metalográfico con y sin tratamiento térmico.

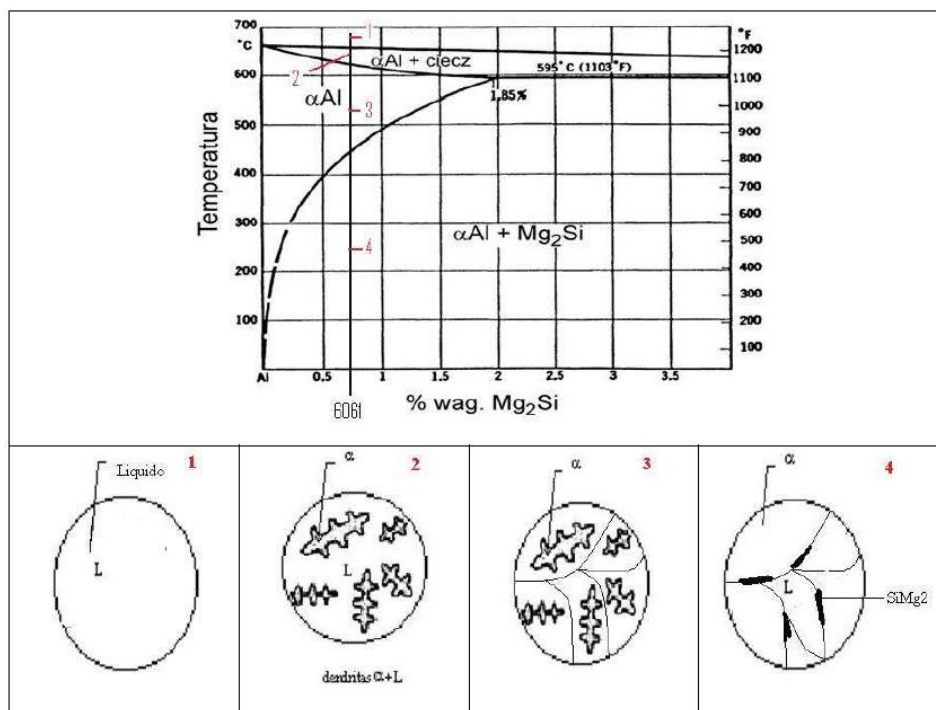


Fig. 4.6. Diagrama AlSiMg.

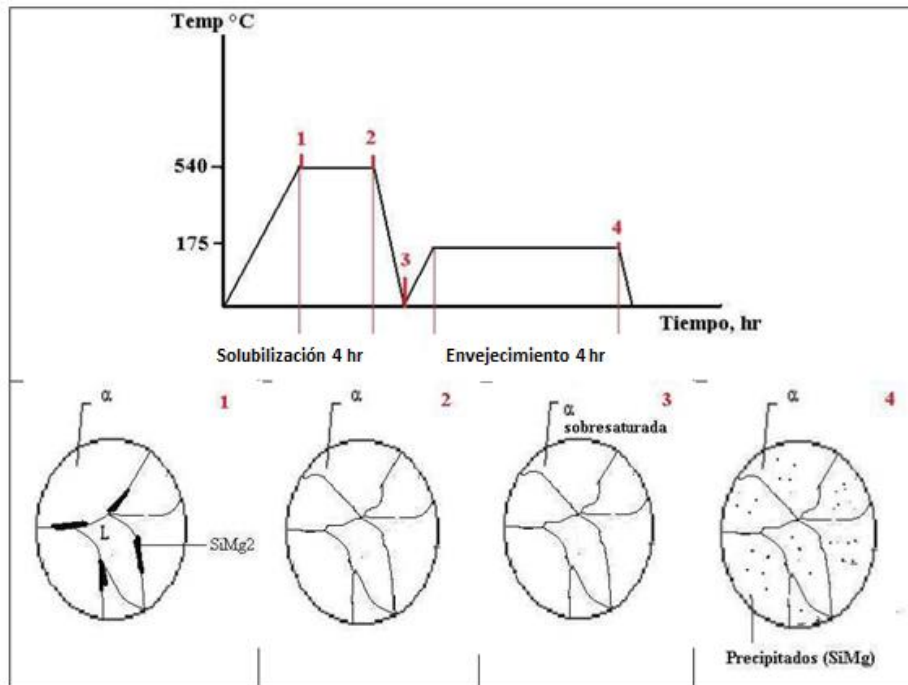


Fig.4.7. Curva de calentamiento tratamiento térmico T6 realizado a las esponjas de aluminio con gradiente de porosidad.

Tabla.7. Identificación metalografía de las fase presentes en la aleación 6061.

LUGAR	A	A(1)	B	C	D
FASES PRSENTES	α (solución solida)	α^1 (solución solida sobresaturada)	Mg_2Si	si	$Fe_2Si_2Al_9$
MORFOLOGIA APRECIADA	Granos derivados de formaciones dendríticas	Formación granular en las probetas TT	Plaquetas y puntos	Puntos negros precipitados en la solución solida alfa	Presencias de forma redondeada y de color gris claro

Para el análisis metalográfico se tuvieron en cuenta las micrografías más representativas de 100x, 200x y 500x ilustradas en las figuras 4.7 a 4.10.

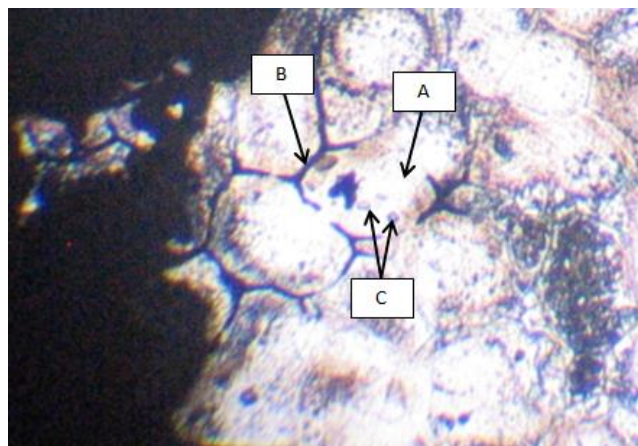


Fig. 4.7. Microestructura probeta 1 sin TT. 200x.

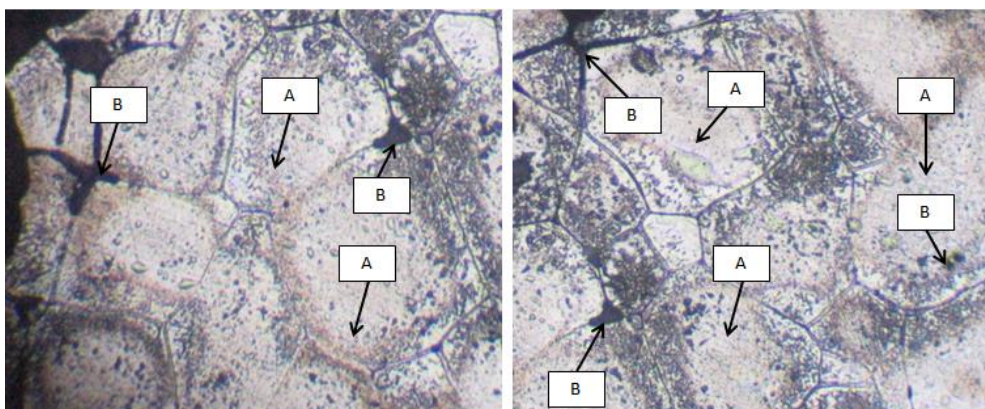


Fig. 4.8. Microestructura probetas 2 y 3 sin TT, 200x.

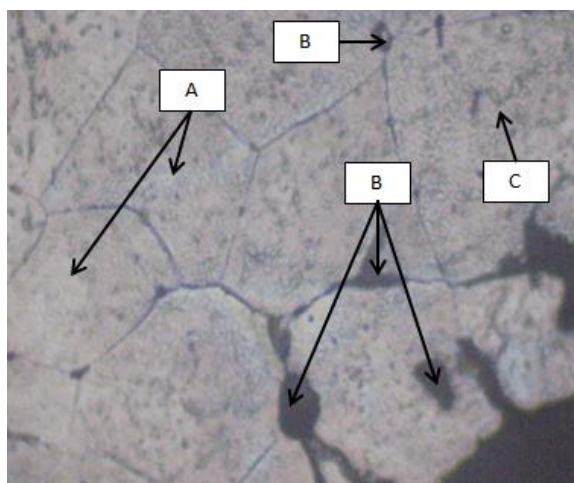


Fig. 4.9. Microestructura probeta 4 sin TT, 200x.

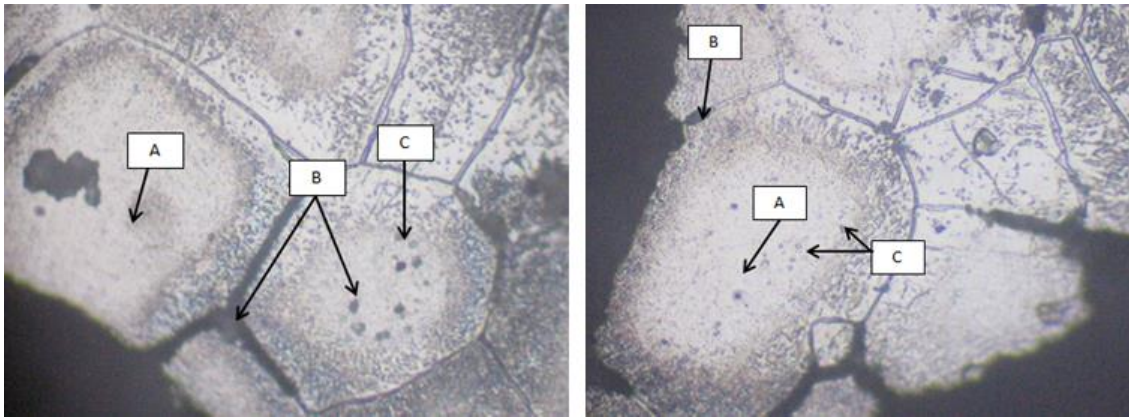


Fig. 4.10. Microestructura probetas 3 y 4 sin TT, 500x.

Análisis metalográfico de las esponjas en estado fundido (sin tratamiento térmico).

Las metalografías tomadas a las probetas en estado fundido, muestran la formación de granos derivados de una estructura dendrítica alfa, en la cual es evidente la segregación (manchas oscuras cerca de los límites de grano), a su vez es evidente la aparición de Mg_2Si en los bordes de grano de color grisáceo oscuro.

Es posible apreciar en muy baja proporción Si libre (C), ya que la composición química de la aleación tiene un contenido muy bajo del mismo, lo que lleva a que este elemento se encuentre predominantemente en estado Mg_2Si , por otro lado no se aprecia el constituyente $Fe_2Si_2Al_9$, esto debido a que el material se fundió en un crisol cerámico, lo que garantiza la disminución o anulación de contaminantes (contaminantes como el Fe proveniente del acero) que pudieran difundir desde el material del horno al material a infiltrar debido a la temperatura de trabajo.

Tratamiento térmico.

El tratamiento térmico usado en este trabajo fue el tratamiento térmico T6, tratamiento usado para las aleaciones de aluminio de la serie 6000 [35], que pretende generar la solubilización de los elementos de aleación brindando un incremento en las propiedades mecánicas y generando cambios microestructurales en el material, las figuras 4.11 a 4.14 muestran la microestructura de las probetas tratadas térmicamente.

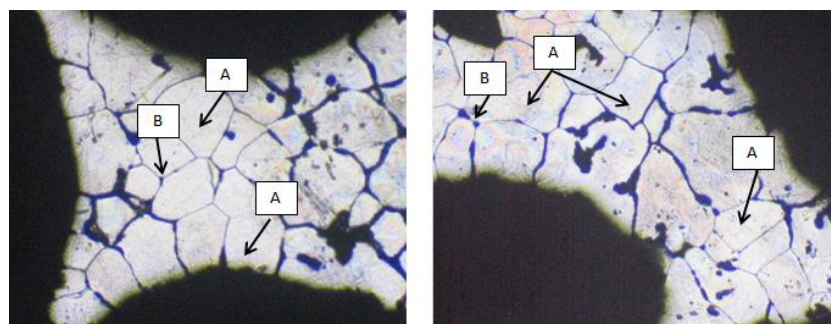


Fig.4.11. Microestructura probetas 1" y 2" con TT, 100x.

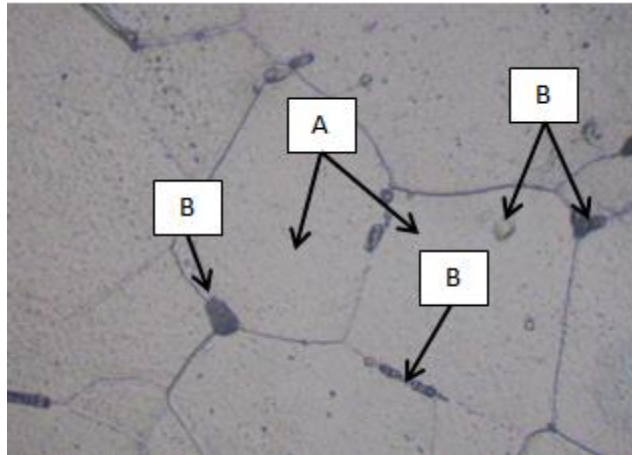


Fig.4.12. Microestructura probeta 1'' con TT, 200x.

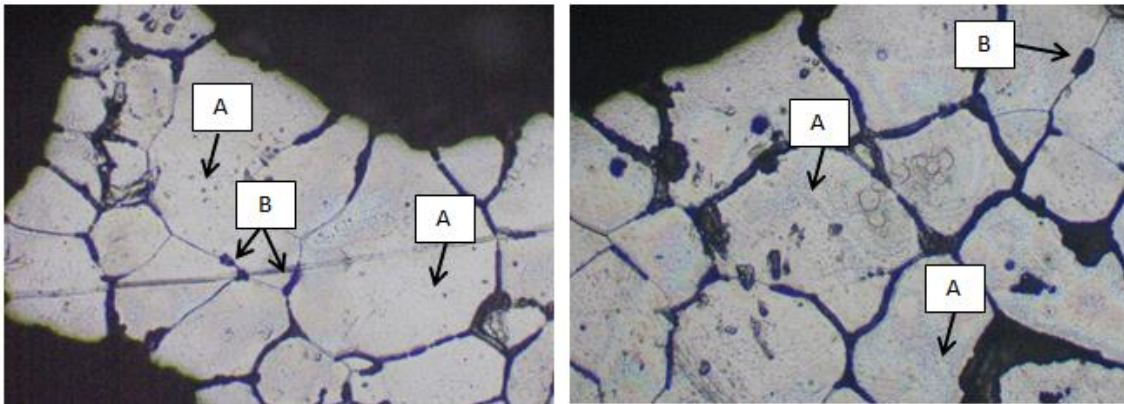


Fig. 4.13. Microestructura probetas 3'' y 4'' con TT, 200x.

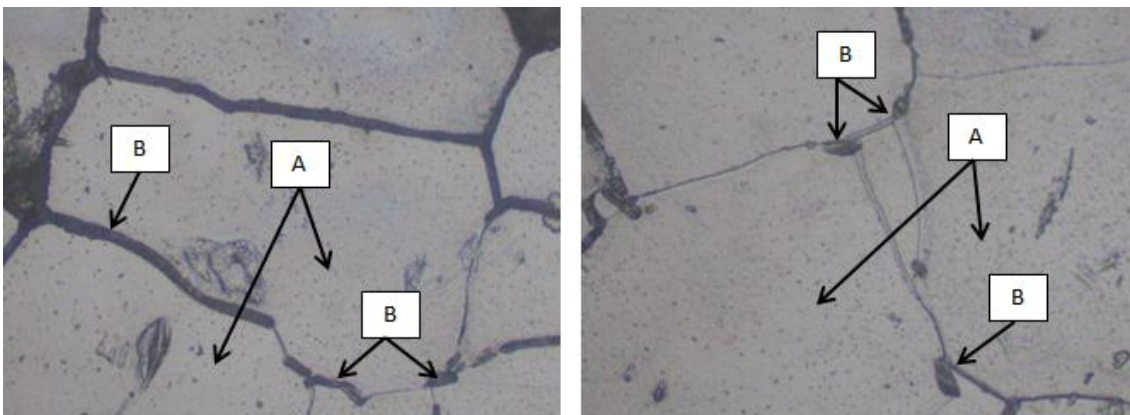


Fig. 4.14. Microestructura probetas 3'' y 4'' con TT, 500x.

4.2. Ensayos mecánicos, resultados.

4.2.1. Microdureza Vickers.

Los resultados de este ensayo se registraron en las tablas 8 y 9, donde se muestran los datos obtenidos tanto para las probetas sin tratamiento térmico como para las probetas tratadas térmicamente, respectivamente, resultados que en ambos casos presentaron valores homogéneos de 52.75 HV y 102.55 HV respectivamente. En la figura 4.17 se muestra la huella de indentación dejada por el microdurómetro al momento de realizar el ensayo.



Fig. 4.16. Huella de indentación dejada por el microdurómetro después de realizado el ensayo.

Tabla.8. Resultados obtenidos del ensayo de Micro Dureza Vickers (Probetas sin TT).

Microdureza sin T.T (1)			Microdureza sin T.T (2)	
Ensayo	HV		Ensayo	HV
1	50,40		1	52,10
2	52,00		2	54,90
3	51,80		3	50,50
4	50,00		4	51,00
5	49,70		5	50,50
6	54,90		6	55,50
7	53,10		7	55,60
8	52,00		8	60,50
9	51,70		9	52,80
10	54,90		10	50,40
Promedio 1	52,05		Promedio 2	53,38
Desviacion Estandar	1,82		Desviacion Estandar	3,25
Coeficiente de Variacion	0,03		Coeficiente de Variacion	0,06
		Promedio total sin T.T = 52,75 HV		

Tabla.9. Resultados obtenidos del ensayo de Micro Dureza Vickers (Probetas con TT).

Microdureza con T.T (1)			Microdureza con T.T (2)	
Ensayo	HV		Ensayo	HV
1	93,10		1	117,00
2	100,20		2	102,30
3	100,80		3	100,50
4	98,70		4	99,70
5	113,30		5	100,80
6	105,20		6	104,30
7	100,20		7	100,70
8	96,40		8	98,90
9	105,20		9	103,40
10	100,20		10	105,20
Promedio 1	101,33		Promedio 2	103,78
Desviacion Estandar	5,54		Desviacion Estandar	5,23
Coeficiente de Variacion	0,05		Coeficiente de Variacion	0,05
		Promedio total con T.T = 102,555 HV		

4.2.2. Comportamiento mecánico bajo carga de compresión uniáxial.

La respuesta mecánica bajo esfuerzo de compresión cuasi estático de las esponjas de aluminio con gradiente de porosidad fabricadas mediante el proceso de IPS fue determinada mediante el análisis cuidadoso de las gráficas obtenidas, Los valores de resistencia a la compresión y módulo de Young se registran en la tabla 10., en la figura 4.18 a) a la 4.18 b), se muestran las curvas obtenidas para las probetas con y sin tratamiento térmico. En general puede indicarse que durante la compresión de las muestras se observó un incremento en el esfuerzo con el aumento de la deformación. La pendiente esfuerzo-deformación disminuye hasta un punto de inflexión, luego del cual, esta comienza a incrementar nuevamente. Debe indicarse que estas esponjas exhibieron una deformación inicial elástica muy corta al comienzo de la carga, las tablas 11 a 12 muestran la absorción de energía de forma porcentual que arrojo el ensayo de compresión en la zona de meseta.

Tabla. 10. Datos obtenidos del ensayo de compresión.

Muestra	opl (MPa) TT	Módulo de Young (Mpa) T.T	opl (MPa) ST	Módulo de Young (Mpa) S.T
1	20,87	243,88	6,59	88,59
2	20,12	257,98	8,19	135,96
3	21,47	294,67	5,23	104,42
4	25,26	303,33	4,12	72,05
5	24,62	249,4		
Promedio	22,46	269,85	6,03	100,25
Desviacion estandar	2,31	27,25	1,75	27,22
Coeficiente de variacion	0,1	0,1	0,29	0,27

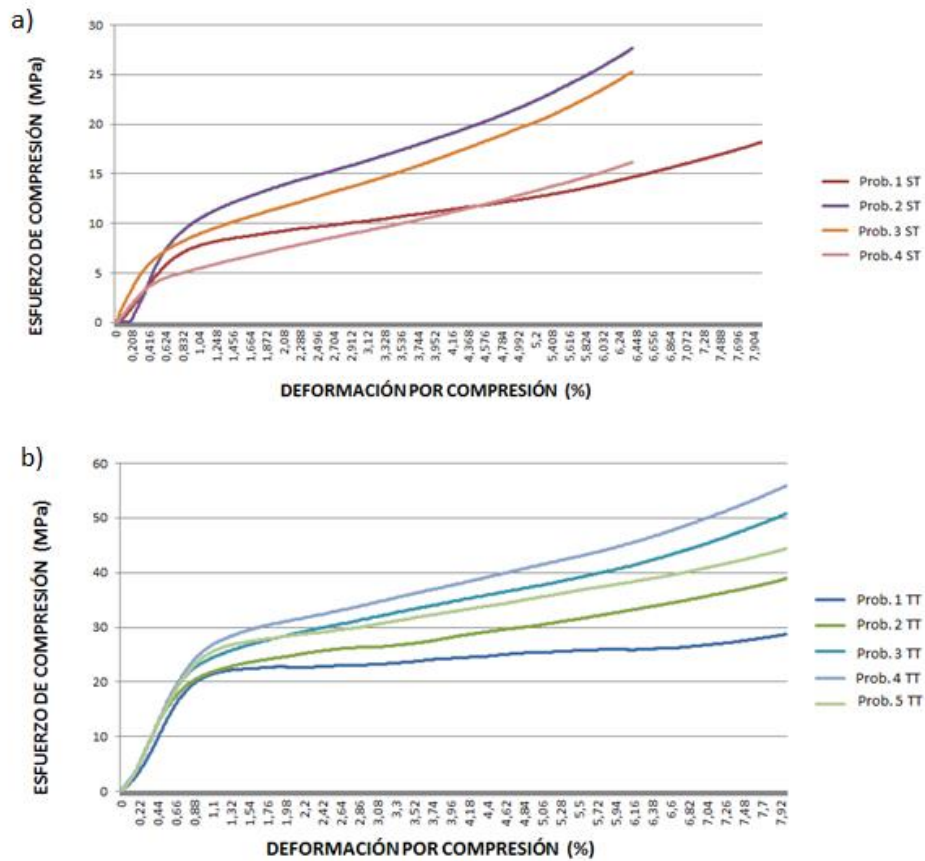


Fig.4.17. Curvas esfuerzo - deformación para esponjas con gradiente de porosidad de aleación de aluminio 6061, la gráfica a) muestra la curva para las probetas sin tratamiento térmico (ST), la gráfica b) muestra las curvas obtenidas para las probetas con tratamiento térmico (TT).

Tabla. 11. Porcentaje absorción de energía de las probetas sin tratamiento térmico.

Probetas ST	Abosorcion de energia (%)
4	67
3	60,37
2	59,25
1	60
Promedio	61,66

Tabla. 12. Porcentaje absorción de energía de las probetas tratadas térmicamente.

Probetas TT	Abosorcion de energia (%)
5	72,5
4	59,37
3	60,37
2	54,75
1	68,75
Promedio	63,15

Calculo del módulo elástico.

Se calculó el módulo elástico mediante la ecuación propuesta por Gibson y Ashby [9], cuyo valor obtenido fue de 655 MPa, siendo éste mayor al hallado experimentalmente, el cual fue de 100 MPa y 270 MPa para las probetas sin y con tratamiento térmico respectivamente en promedio. Una de las principales razones para tal desfase, es que las relaciones propuestas por dichos autores asumen un modelo de celda unitaria, el cual difiere bastante del modelo campo aleatorio Gaussiano representativo de las esponjas obtenidas por el proceso de IPS.

Influencia del tratamiento térmico.

En la figura 4.19, muestra las diferencias existentes entre las curvas esfuerzo-deformación de las probetas tratadas térmicamente con respecto a las probetas sin tratamiento térmico.

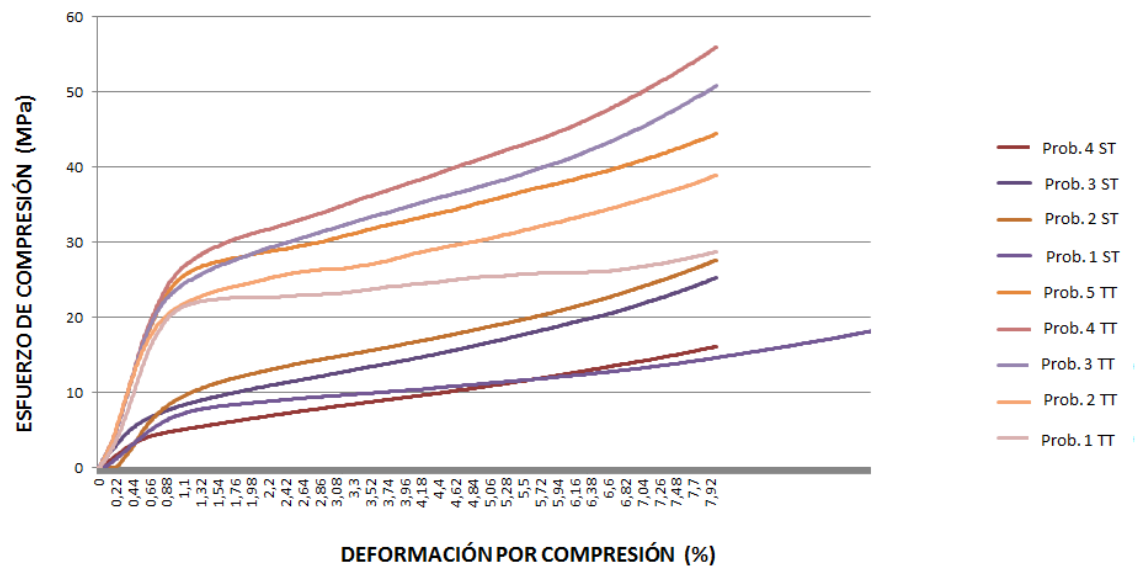
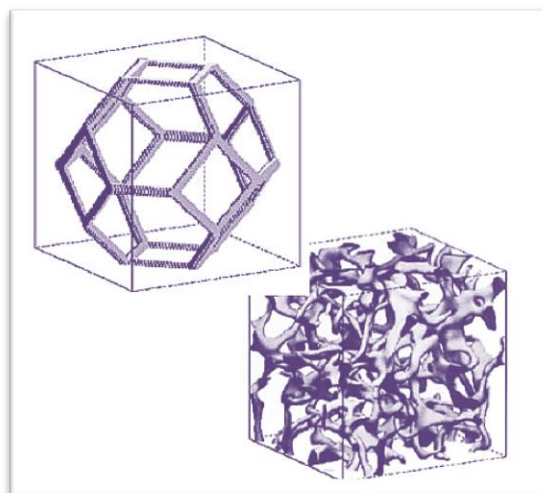


Fig. 4.18. Graficas esfuerzo-deformación probetas con y sin tratamiento térmico.

Capítulo 5.

Discusión y análisis de resultados.



En este capítulo se pretende establecer y analizar tanto la influencia del procesamiento, la variación del tamaño de partícula y la importancia del tratamiento térmico (variación de los elementos de aleación a nivel microestructural), en las propiedades tanto mecánicas como morfológicas de las esponjas de aluminio con gradiente de porosidad obtenidas en este trabajo.

5.1. Análisis morfológico y microestructural de las esponjas con gradiente de porosidad.

Con el estudio de los materiales celulares, ha sido posible establecer una dependencia de las propiedades mecánicas del material, con respecto a su estructura porosa, resistencia del metal de la matriz y su densidad relativa [5], lo que hace importante el análisis que se va a realizar a continuación en cuanto a la morfología, micro y macroestructura de los metales celulares con gradiente de porosidad obtenidos por IPS en este estudio.

5.1.1. Densitometría.

Para el cálculo de la densidad de las esponjas con gradiente de porosidad, se tomó la densidad del aluminio como $2,7 \text{ g/cm}^3$, lo que arrojó un resultado promedio de la densidad aparente de las esponjas con gradiente de porosidad de 1.81 g.cm^{-3} y una densidad relativa en promedio de 0.416, lo que permitió establecer un valor de 0.5827 para la fracción volumétrica de los poros.

En lo que se refiere a materiales celulares con porosidad interconectada, las densidades de los mismos están inversamente relacionadas con la densidad de la preforma usada, en este caso una preforma de NaCl con morfología esférica, pues, teniendo una densificación mayor de la preforma

se encontraran materiales celulares con mayor porcentaje de porosidad, lo que se traduce en la obtención de MC con densidades bajas.

En el caso de esta investigación, al tener un material celular con gradiente de porosidad axial, tamaño de partícula creciente hacia el centro del mismo, es posible establecer que los valores más elevados de densidad con respecto a los valores obtenidos por otros autores [3], [4], [5] son mayores precisamente por el gradiente, ya que es probable que la interconectividad de las partículas de diferentes tamaños, al no tener una superficie de contacto tan amplia como el que se obtiene con partículas de tamaños homogéneos, genere mayor capacidad de infiltración del material, lo que producirá un aumento en la densidad del material terminado.

En lo que se refiere a la dependencia de la densidad con respecto de los parámetros de procesamiento, se puede hacer un paralelo entre la fluidez del material y el aumento de densidad, más aun, debería hablarse de la dependencia de la densidad obtenida con respecto a la temperatura de trabajo, ya que esta es la que se encarga de dar la fluidez al material, temperatura que en este estudio fue de 710°C, y por lo tanto es de esperarse un aumento de la fluidez apreciable en comparación con otros autores [5], así, es posible que esta sea una de las causas de que los valores de densidad obtenidos en este estudio estén situados por encima de los valores reportados en la literatura.

Con respecto a la presión de trabajo, se puede decir que al aumentar la presión necesaria para la infiltración, se genera un aumento importante en los valores de las densidades obtenidas, esto, debido a que el aumento de la presión negativa (presión de vacío), produce una mayor capacidad de infiltración del metal fundido en los intersticios de la preforma. Debido a que en este estudio se usó una bomba de vacío muy potente (Bomba de vacío PHEIFFER), se disminuyeron las pérdidas en la tubería de vacío del equipo y los valores de presión a nivel de proceso fueron altos “en sentido negativo” para de esta manera poder infiltrar las partículas de menor tamaño (33,8 a 28,0 kPa), es posible afirmar que en lo concerniente a las partículas de mayor tamaño, al ser infiltradas por el material a una presión mayor a la requerida para este tamaño de partículas (si se considerara una preforma de tamaño de partícula homogénea), habrá un aumento de densidad, ya que al tener el producto terminado habrá mayor cantidad de aleación metálica.

Otra variable importante del proceso y que es posible relacionar directamente con la densidad del MC obtenido tras su completa conformación, es la morfología de las partículas, ya que al tener partículas casi esféricas, se presentara un contacto de tipo puntual entre las mismas, contrario al contacto establecido por partículas con geometrías irregulares [4], [5] que no se tocan solo en un punto, si no posiblemente en varios o en una superficie irregular, al contrario del contacto entre esferas, que al tocarse en un solo punto, darán paso a que el material infiltrado pueda fluir en un espacio mayor y por lo tanto producir valores elevados de densidad en el MC obtenido, la figura 5.1 esclarece este hecho.

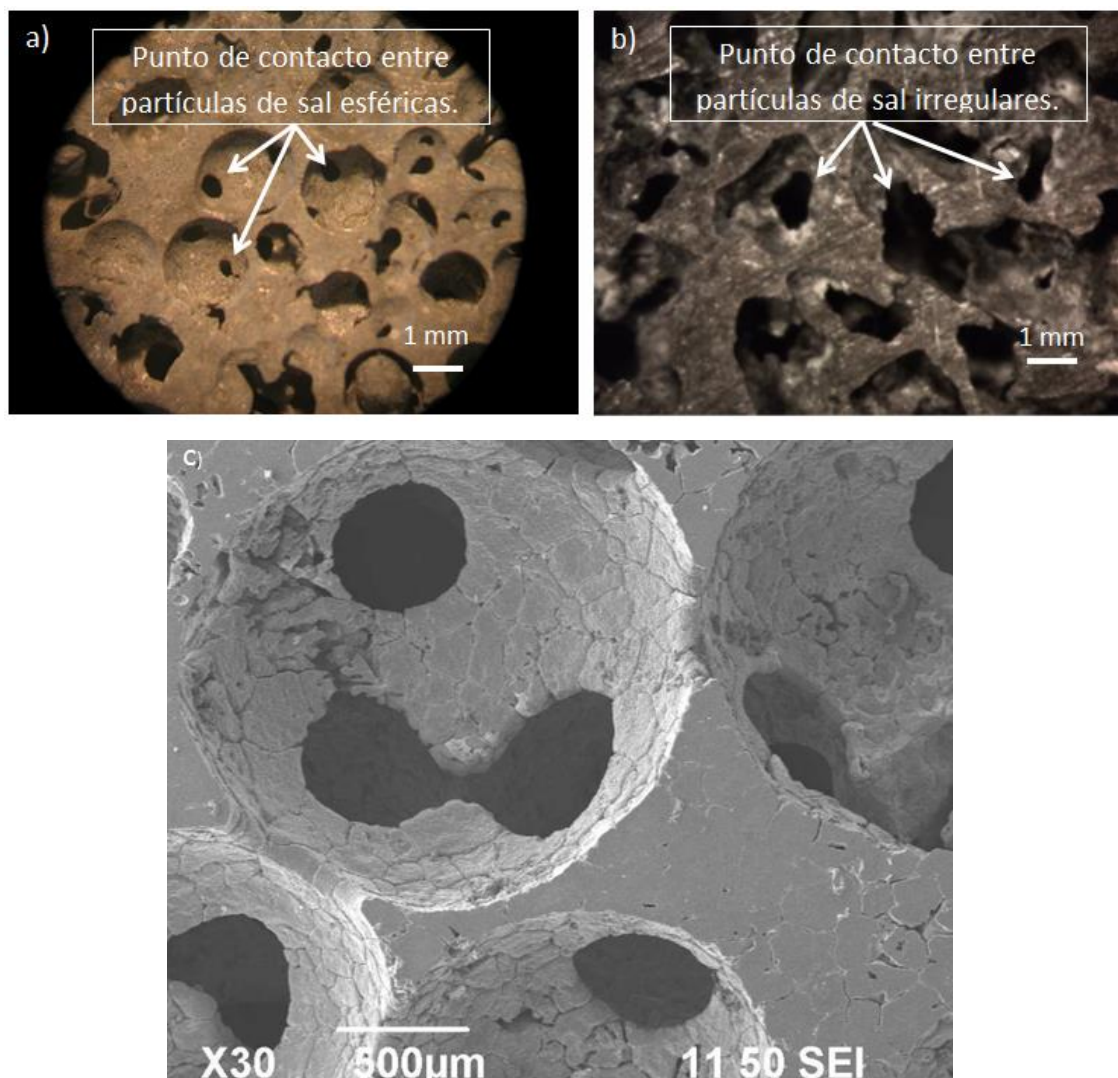


Fig.5.1. La estereomicroscopía a), muestra los puntos de contacto entre las partículas de sal esféricas, mientras que la b), muestra que el contacto entre partículas de sal con morfologías irregulares no se da en un solo punto [5], c) muestra una imagen SEM que corrobora que la interconectividad de las esponjas es de forma puntual.

5.1.2. Análisis morfológico, macroestructura.

Es de esperarse que en las esponjas de aluminio obtenidas a través del proceso de infiltración de preformas solubles, los poros abiertos reproduzcan la morfología de las partículas que la conforman, esto, permitiendo de cierta manera controlar tanto la forma de los poros como su tamaño mediante la selección de las partículas que conformaran la preforma, lo que se pudo comprobar por medio de diversas técnicas ópticas (Microscopía óptica y Microscopía electrónica de barrido “SEM”, figura 5.1.) ya que mediante el análisis morfológico se observó que los poros en su mayoría son una copia uniforme de las partículas de sal utilizadas en la preforma; con ciertas irregularidades que podemos atribuir a posibles fracturas de partículas de sal durante la conformación de la preforma y/o durante la infiltración [5], perdiendo de esa manera la forma original, además de

partículas irregulares que no se retiraron en el proceso de selección y a posible sinterización de las partículas de sal debidas o, al choque térmico al momento de infiltración del material, o a humedad que no se haya retirado de forma adecuada de la preforma lo que ocasionaría aglomeración de las partículas o sinterización de las mismas por expulsión de hidrogeno. Las características de los poros y su morfología con respecto de la preforma se puede evidenciar en la figura 5.2, donde también se aprecia la diferencia existente entre una esponja con partículas irregulares y otra con partículas regulares. Con respecto al análisis macro de los poros en la matriz podemos ver una distribución periódica, con un tamaño de partícula controlado, clasificándose así como una esponja periódica a la vez que estocástica (figura 5.3), esto debido a que fue posible por medio del proceso empleado, controlar tanto el tamaño de partícula como su distribución a lo largo del material (gradiente de porosidad controlado).

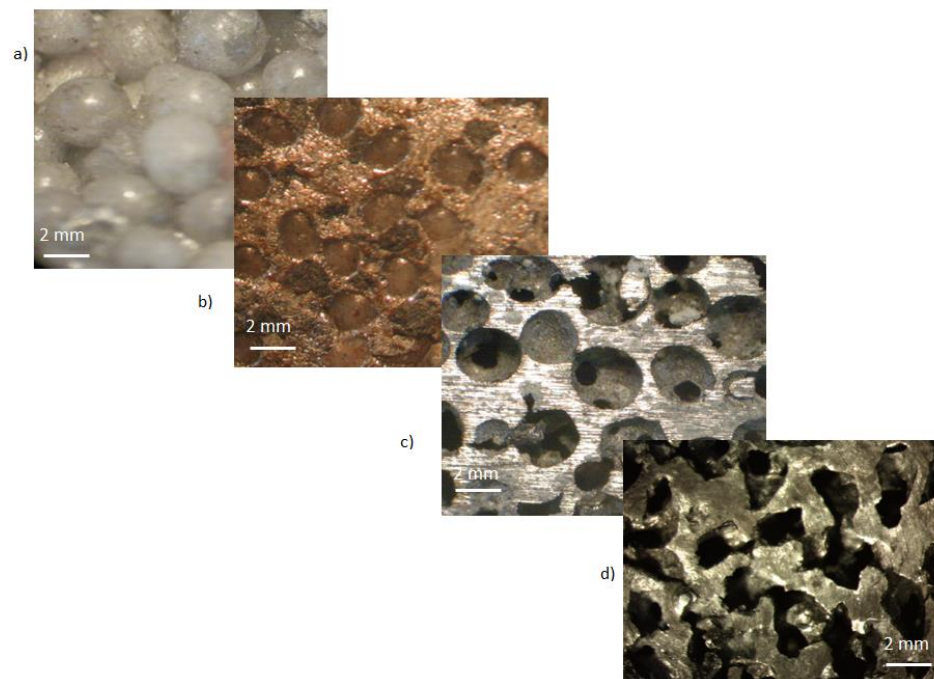


Fig. 5.2. La grafica a) muestra la partículas de sal casi esféricas con las que se constituyó la preforma, b) se ve el compuesto Al/NaCl una vez infiltrado el material, c) se observa la morfología de los poros donde se puede ver la fiel copia de las partículas de sal, d) esponja elaborada a partir de una preforma con partículas d morfología irregular [5].

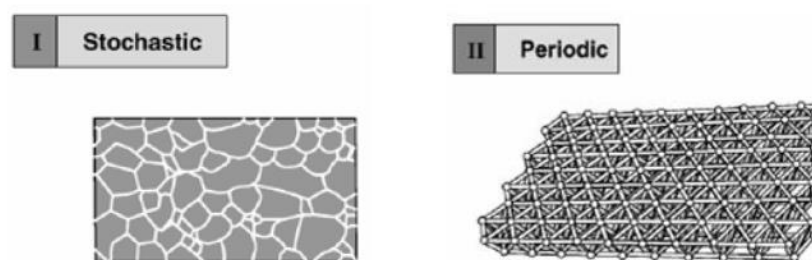


Fig. 5.3. Modelos de arreglos de las celdas en los Metales Celulares [5].

5.1.3 Análisis morfológico, microestructura.

El tratamiento térmico T6 demostró ser un tratamiento óptimo, pues por medio del temple se logró obtener solución sólida sobresaturada, la cual con el posterior envejecimiento produjo precipitados típicos de la zona de (Guinier-Preston) los que no son visibles bajo microscopía óptica ni microscopía electrónica de barrido (SEM). Los granos muestran una variación de tonalidad propia de la orientación cristalográfica, se sigue encontrando solución sólida (A) y en los bordes de grano en algunas zonas (centro de la probeta) es posible evidenciar la presencia del Mg_2Si , en forma más redondeada y en menor cantidad, esto debido, posiblemente a una baja velocidad de enfriamiento ocasionada por la geometría de la probeta (cilíndrica) o a que posiblemente la temperatura del tratamiento térmico T6 realizado no fue la óptima para la total solubilización de los elementos de aleación.

La identificación de los microconstituyentes descrita en el apartado anterior, permite establecer que los precipitados de siliciuro de magnesio disminuyen la ductilidad, pues trabajan como obstáculos para el movimiento de las dislocaciones mejorando así las propiedades mecánicas de la esponja, lo que permite anotar que la aleación de aluminio 6061 brinda muy buenas posibilidades en el uso como matriz de materiales celulares.

Para sumar al análisis del efecto que causa el envejecimiento en los microconstituyentes vistos anteriormente, se puede decir que los precipitados generados aumentan la resistencia mecánica y la dureza, estos compuestos son visibles bajo MET (MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE TRANSMISIÓN) y su efecto se evidencia al ver el incremento en las propiedades mecánicas del metal celular tratado térmicamente en comparación al metal celular sin tratamiento térmico, como se pudo comprobar en los ensayos mecánicos realizados.

5.2. Comportamiento mecánico, análisis.

5.2.1. Microdureza Vickers.

La microdureza es una forma de estimar algunas propiedades mecánicas de un material metálico. Aún por sí solo, el valor de la dureza del material bajo ensayo permite estimar el comportamiento aproximado que el material tendrá, basándose en el grado de dispersión que se presente en los datos medidos, pues una gran dispersión será resultado de una segregación microestructural en el material. En pocas palabras, el ensayo de dureza permite detectar que tan homogéneo es el material. Por otra parte, mediante indentaciones selectivas es posible establecer la dureza de microconstituyentes del metal matriz por separado (siempre y cuando el tamaño de partícula sea el adecuado) [5].

Con base en lo anterior, se destaca la uniformidad de los datos de microdureza Vickers para las esponjas metálicas con gradiente de porosidad obtenidas por el método de IPS, reflejando de alguna manera la homogeneidad del metal de la matriz. Los valores obtenidos mostraron un promedio general de microdureza Vickers para las probetas sin T.T fue de 52.75 HV con una desviación estándar de ± 1.82 y un coeficiente de variación de ± 0.035 , para las esponjas metálicas con T.T los valores encontrados fueron 102.55 HV con una desviación estándar de ± 5.23 y un coeficiente de variación de ± 0.0504 , lo que muestra la homogeneidad de los datos obtenidos tanto en las esponjas tratadas térmicamente como en las no tratadas, siendo el valor obtenido para las

esponjas tratadas térmicamente aproximadamente el 51% más que el obtenido para las esponjas no tratadas térmicamente.

5.2.2. Ensayo de compresión uniáxial.

Las curvas de esfuerzo-deformación obtenidas por el ensayo de compresión para las esponjas con gradiente de porosidad, exhibieron tres regiones de deformación típicas en los materiales celulares y con características similares a esponjas de aluminio y aleación de aluminio reportadas por otros autores. Dichas regiones se describen a continuación:

- Una respuesta inicial de tipo lineal-elástica (1).
- Una amplia región de meseta ("*plateauregion*") con un flujo de esfuerzos casi constante (2).
- Una densificación final debido a la compactación de las celdas colapsadas (3).

La evolución del mecanismo de deformación se caracterizó por el siguiente comportamiento: 1) un régimen elástico lineal controlado por la flexión del borde de celda, donde el módulo de Young guarda una relación entre el esfuerzo y la deformación, seguido por 2) una zona plana tipo meseta denominada "*plateauregion*" resultante de la formación de puntos donde se concentra toda la deformación plástica de los bordes de celda, en muchos casos, esta región es casi plana y se extiende desde aproximadamente un 10% a 50% de deformación, y finalmente 3) una región final, donde la esponja muestra el colapso de las celdas hasta que el espacio entre los poros es cerrado (en este caso el colapso de los poros fue gradual ya que se tiene una distribución de partículas en forma axial, donde las partículas de menor tamaño se encuentran en la parte externa de la probeta y se espera que estas sean las primeras que colapsen y las partículas de mayor tamaño se encuentran en el centro de la misma, las cuales sean las ultimas en colapsar), procediendo un proceso de densificación que es manifestado por un incremento excesivo en el esfuerzo. En esta última etapa, el material poroso se comporta casi como una pieza sólida de metal. La deformación de densificación es la deformación en el punto donde la curva esfuerzo-deformación es aproximada a una vertical. Estas regiones concuerdan con las descritas por Gibson y Ashby [36] figura 5.4., la cual guarda similitud con las curvas obtenidas en los ensayos de compresión realizados en las esponjas IPS figura (4.17).

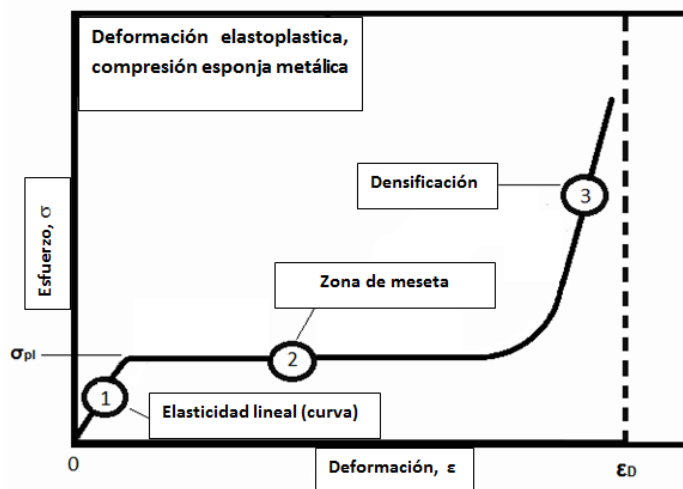


Fig.5.4. Curva típica de esfuerzo deformación para MC.

Cabe mencionar que los valores de resistencia obtenidos son afectados por diversos factores como el proceso de producción, defectos en las celdas, la no homogeneidad en la distribución de la porosidad en la esponja y la densidad obtenida. En adelante discutiremos algunos de estos factores.

Mecanismo de deformación a micro-escala.

Muchos estudios han revelado que la deformación compresiva irreversible de los metales celulares es poco homogénea, tal como se observó en las esponjas ensayadas. Esto puede deberse, primordialmente, a que la concentración de la deformación sobre las celdas más débiles causa el colapso del resto del material. Luego, la deformación localizada originada, se extiende a las celdas vecinas, conduciendo al colapso de todas las celdas y ubicándose en una banda que corre a través de la sección transversal de la muestra, según lo ilustrado en la figura 5.5. Una vez el MC ha colapsado, dicha región de la banda es más resistente a más deformación, debido a los nuevos contactos creados. De esta manera, la deformación se concentra en otra zona que haya permanecido elástica hasta éste punto; por lo que se crea una nueva banda de celdas colapsadas. Este proceso se repite, hasta que todas las celdas de la muestra han colapsado [5].

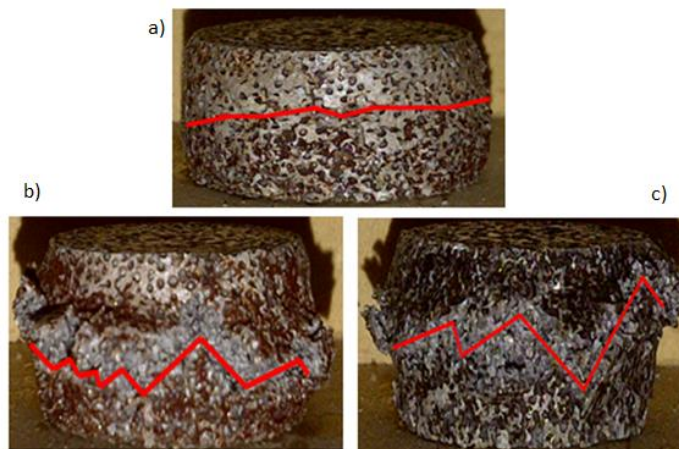


Fig. 5.5. Bandas de deformación y aspecto de falla en esponjas bajo cargas de compresión: a) muestra las bandas de deformación de una probeta sin TT, b) y c) muestran las bandas de deformación de las probetas con TT.

La observación y estudio de estas bandas de deformación mostro que no existe una diferencia significativa entre el mecanismo de falla de las esponjas obtenidas por otros autores, con un solo tamaño de partícula [4], [5] y las esponjas con gradiente de porosidad obtenidas en este trabajo.

Influencia del gradiente de porosidad.

De las curvas esfuerzo-deformación, puede evidenciarse que el tamaño de los poros incide en cada una de las regiones identificadas en las esponjas, siendo más acentuado su efecto en la región de meseta [5], esto para esponjas metálicas fabricadas con un solo tamaño de partícula. Dado que en esta investigación se estudió el comportamiento del material constituido con variación en los tamaños de partícula (gradiente de porosidad), es posible apreciar de las curvas de esfuerzo-deformación arrojadas por el ensayo de compresión un comportamiento que no dista mucho del

obtenido por otros autores [3], ya que se evidencian las zonas I, II y III en las curvas, sin embargo es posible apreciar un cambio notorio en cuanto a la longitud de la meseta, zona II, estableciendo que para las esponjas obtenidas en este estudio, esta zona es más extensa, lo que permite señalar que las esponjas con gradiente de porosidad tienen una capacidad de absorción de energía mayor que las producidas por un solo tamaño de partícula, pues entre mayor sea la longitud de esta zona, mayor será la energía que es capaz de absorber el material [9], otra diferencia es la disminución del módulo elástico en comparación al obtenido por otros autores, esto puede ser debido al gradiente de porosidad manejado, pues es posible afirmar que al momento de someter el material a esfuerzos de compresión, los poros de menor tamaño colapsen más rápido que los de mayor tamaño, dando como resultado una disminución en el módulo elástico, debido a que las celdas más pequeñas llegaran más rápidamente a la zona de deformación plástica y posterior densificación, mientras que las celdas de mayor tamaño estén sufriendo el mecanismo de deformación elástica en ese momento, este fenómeno se repetirá hasta que los poros de mayor tamaño hallan colapsado por completo.

De los gráficos arrojados por el ensayo de compresión es evidenciable un aumento en cuanto a la absorción de energía, pues se encontró que tanto las probetas tratadas térmicamente como las probetas sin tratamiento térmico muestran una zona de meseta en promedio de 63,15% y 61,66% respectivamente; superior a la reportada por Gibson y Ashby [36], donde se establece que para este tipo de materiales esta zona corresponde a valores entre el 10% y el 50%, esto posiblemente debido a la distribución de las partículas; pues al tener una distribución granulométrica controlada se tendrán inherentemente tres mecanismos de deformación plástica distintos, correspondientes cada uno de los tamaños de los poros; debido a que los valores obtenidos para cada tipo de probetas no tiene una diferencia significativa, se puede afirmar que la absorción de energía no tiene una dependencia directa con el tratamiento térmico y el aumento de propiedades mecánicas obtenido por el mismo, si no que depende de la estructura porosa del material.

Influencia de la densidad.

Tal como ha sido reportado en la literatura, la respuesta de esfuerzo-deformación y, por tanto, las propiedades mecánicas de las esponjas metálicas altamente porosas, demostró ser en cierto grado influenciada por la densidad relativa ρ_r , pues la literatura establece que; independientemente del tamaño y morfología del poro, la resistencia a compresión presenta valores muy similares [5]. Con la densidad relativa de las esponjas utilizadas para compresión, establecida en un intervalo algo estrecho (0.41-0.42), las diferencias obtenidas no son muy notables.

Influencia de la morfología de las partículas.

Con respecto a la morfología de las partículas y su relación con las propiedades mecánicas, se puede decir que se obtuvieron resultados similares a los obtenidos por otros autores [3], quienes usaron el mismo tipo de tratamiento térmico en la sal para mejorar la morfología de las partículas, difiriendo solo en una disminución del módulo elástico, que puede ser atribuido al gradiente de porosidad de las esponjas obtenidas en este trabajo, como lo explicamos en el ítem influencia del gradiente de porosidad.

El aumento de la zona de meseta y por lo tanto de la absorción de energía observadas en los gráficos del ensayo a compresión, puede deberse a la morfología de las partículas, ya que, una morfo-

logías casi esféricas no promueven la concentración de esfuerzos, debido a superficies angulares, como es el caso de las esponjas metálicas obtenidas con preformas constituidas con morfologías irregulares.

Influencia del tratamiento térmico.

El tratamiento térmico realizado a las esponjas con gradiente de porosidad, mostro el aumento de las propiedades mecánicas en cuanto al módulo de elasticidad y al esfuerzo **σ_{pl}** (esfuerzo máximo antes de alcanzar la zona de meseta), arrojando un aumento de aproximadamente un 270% para el modulo elástico y un 300% para **σ_{pl}** ; esto debido a la mejora que brinda la morfología redondeada del Si en la microestructura (lo que compensa la perdida de ductilidad en comparación al material en estado de fundición), después del tratamiento térmico, como se mostró e la figura 4.18. y las tablas 11 y 12.

Capítulo 6.

Conclusiones y trabajos futuros.



6.1. Conclusiones.

La técnica de infiltración de preformas solubles IPS, es un método versátil, económico y atractivo para la producción de esponjas metálicas. Entre las ventajas de este proceso es posible encontrar un considerable control del tamaño y distribución de los poros, de la densidad relativa y de la estructura arquitectónica del material, además de una alta interconectividad tridimensional entre los poros.

El equipo diseñado y puesto en marcha demostró ser un equipo apto para la obtención de esponjas metálicas con matriz de aluminio y gradiente de porosidad, pues fue posible tener un control adecuado de la temperatura, presión y tiempo de infiltración durante el proceso, lo que permitió la buena obtención de los MC con gradiente de porosidad con uniformidad en su estructura.

El tratamiento para la mejora de la morfología de las partículas de sal demostró ser un procedimiento apropiado, ya que se obtuvieron partículas en su mayoría esféricas y con una amplia distribución granulométrica, lo que permitió la posibilidad de escogencia al momento de establecer los mejores tamaños para la fabricación del gradiente al interior del material.

La decisión de usar acetatos concéntricos con el molde demostró ser una alternativa versátil, económica y acertada para la fabricación de materiales celulares con gradiente de porosidad, pues este método permitió obtener el material en cuestión con una buena conformación estructural, con una distribución de partícula controlada y con propiedades similares a las descritas por la literatura, cabe resaltar que los acetatos no fueron una fuente de contaminantes una vez las esponjas metálicas fueron constituidas en su totalidad (como se observó en el análisis químico realizado

a las esponjas una vez conformadas), lo que demostró que el uso de estos no significa un problema para la fabricación de este tipo de materiales.

El tratamiento térmico de las partículas de sal para la eliminación de la posible humedad absorbida debida a su alto carácter higroscópico, fue una variable necesaria para la buena conformación del MC con gradiente de porosidad, pues el tratamiento térmico permitió la producción de porosidades uniformes.

Los valores de densidad relativa obtenidos 0.416 en promedio, aunque es un valor más elevado que el reportado por otros autores, esta entre el intervalo de valores de densidad relativa establecidos por la literatura para este tipo de materiales y como era de esperarse, se vio un cambio en esta propiedad debido al gradiente.

El tratamiento térmico T6, demostró ser un tratamiento eficaz para la mejora de las propiedades mecánicas, dando como resultado diferencias apreciables tanto en los valores de microdureza obtenidos, aproximadamente un 51% de aumento para las probetas con TT, como en los arrojados por el ensayo de compresión uniáxial, donde los datos de microdureza para las probetas tratadas térmicamente y para las no tratadas térmicamente fueron 102.55 HV y 52.75 HV respectivamente; mientras que el esfuerzo σ_{pl} fue 22,46 MPa y 6,03 MPa respectivamente, lo que muestra un aumento del 300% aproximadamente, siendo estos superiores a los obtenidos por otros autores que trabajaron con la misma aleación [3], [4]; en cuanto al módulo elasticidad, los valores obtenidos tanto para las probetas tratadas térmicamente como para las no tratadas térmicamente fueron 269.852 MPa y 100.255 MPa respectivamente, lo que se traduce en un aumento de aproximadamente el 270%, siendo menores a los reportados por [3], [4].

6.2. Trabajos futuros.

Producción de esponjas metálicas con gradiente de porosidad, efecto piel en la superficie y anodizadas para caracterización de las mismas.

Obtención de materiales celulares con gradiente de porosidad para aplicaciones biomédicas.

6.3. Referencias.

[1] Sosnick, B. US Patent 2 434775, 1948.

[2] Casolco, S.; Torres, V., G.; Gómez, A. y López, P.; M. Influencia en el tamaño de grano del NaCl en el procesamiento de espumas de Zn-Al-Cu. Memorias del XI congreso internacional anual SO-MIN, IV congreso Bolivariano de Ingeniería Mecánica. 2005, Morelia, México.

- [3] Gallego, J., E; Valencia, C, A. Obtención y evaluación de esponjas de una aleación de aluminio 6061 fabricadas mediante infiltración de preformas solubles de sal bajo presión de vacío. 2011, Cali, Colombia.
- [4] Gómez. M. Producción y caracterización de esponjas metálicas de aluminio por el proceso de infiltración en preformas de sal. 2007, Cali, Colombia.
- [5] Fernández, P. Obtención y evaluación de esponjas de aleación de aluminio fabricadas mediante infiltración de preformas solubles bajo presión de vacío. Universidad Pontificia Bolivariana. 2009. Medellín, Colombia.
- [6] Meatfoam 2007- Sumary.www.metalfoam.net.
- [7] Fernández, P. Daza, M. Oviedo, E. Cruz, J. Diseño de un de un equipo para la fabricación de esponjas metálicas.
- [8] J. Gutiérrez y J. Oñoro. Espumas de aluminio, fabricación, propiedades y aplicaciones. Revista de metalurgia (septiembre-octubre) 2008; 44 (5): 457- 476.
- [9] M. Ashby, A. Evans, N. Fleck, L. Gibson, J. Hutchinson, H. Wadley. Metal foams: a desing guide. Wildwood: Butterworth-Heinemann; 2000. p. 1-52.
- [10] A. Pollien, Y. Conde, L. Pambaguan, A. Mortensen. Graded open-cell aluminium foam core sandwich beams. Materials Science and Engineering 2005; 404: 9-18.
- [11] Zhou, J. Porous metallic materials. En: W. Soboyejo. Advanced Structural Materials. Florida: Taylor & Francis Group, LLC; 2006. p. 103-124.
- [12] X. Ma, A. Peyton, Y. Zhao. Measurement of the electrical conductivity of open celled aluminium foam using non-contact eddy current techniques. NDT&E International; 2005; 38: 359–367
- [13] P.P. Ochoa. Evaluación mecánica y metalúrgica de compuestos de matriz de aluminio (Al/SiCp-MMC) producidos por stircasting. [Tesis de pregrado]. Santiago de Cali: Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería; 2009.
- [14] J. Gutiérrez y J. Oñoro. Espumas de aluminio, fabricación, propiedades y aplicaciones. Revista de metalurgia (septiembre-octubre) 2008; 44 (5): 457-476.
- [15] N. Babscsán, J. Banhart, D. Leitmeyer. Metal foams-manufacture and physics of foaming. En: Memorias de International Conference “ADVANCED METALLIC”; 2003 Nov. 5-7, Smolenice. 2003.pp.5-15.

- [16] J. Banhart. Manufacture. Characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science* 2001; 46: 559–632.
- [17] J. Zhou. Porous metallic materials. En: W. Soboyejo. *Advanced Structural Materials*. Florida: Taylor & Francis Group, LLC; 2006. p. 103-124.
- [18] Evans, A.G.; Hutchinson, J.W., Ashby, M.F. Cellular metals. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 1998, 3, 288-303.
- [19] Jiang, B.; Zhao, N.; Shi, C.; Du, X.; Li, J. and Man, H. A novel method for making open cell aluminum foams by powder sintering process. *Materials Letters*, 2005, 59, 3333-3336.
- [20] Banhart, J. Aluminium Foam Technology towards Industrial implementation *Indian Foundry Journal*, 2005, 51, 36-41.
- [21] Bellmann, D.; Clemens, H., Banhart, J. USANS investigation of early stages of metal foam formation. *Applied Physics A* 74 [Suppl.], S1136–S1138 (2002).
- [22] Banhart, J. Manufacturing Routes for Metallic Foams. *JOM* 52 (12) (2000). pp. 22-27.
- [23] Frei, J.; Gegerly, V.; Mortensen, A., Clyne, B. The effect of prior deformation on the foaming behavior of —Formgrip precursor material. *Advanced Engineering Materials* 2002, 4, N°10. p. 749-752.
- [24] Miyoshi, T., Itoh, M., Akiyama, S., Kitahara, A., Alporas Aluminum Foam: Production Process, Properties and Applications. *Advanced Engineering Materials*, (2000), 2 (4), 179-183.
- [25] Miyoshi, T., Kasai, T., Mukai, T., Higashi, H., Production of closed cell aluminum alloy foam with enhancement of the compressive strength. Cellular metals and metal foaming technology. Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. *Proc. 2nd Int. Conf. Bremen*, (2001), Bremen: MIT–Verlag, 167-170.
- [26] Shapovalov, V., Boyko, L. Gasar – a new class of porous materials: syntheses, structure, properties and prospective application. *Cellular Metals: Manufacture, properties, applications*. In: Banhart J, Fleck NA, Mortensen, A. editors. *MetFoam 2003*, Berlin, Germany, 23–25 June. Berlin: MIT Press–Verlag, 2003. p. 203-208.
- [27] Hyun, S. K., Ikeda, T., Nakajima, H. Fabrication of lotus-type porous iron and its mechanical properties. *Science and Technology of Advanced Materials* 5 (2004) 201–205.
- [28] Hintz, C.; Wagner, I.; Sahm, P. R., Stoyanov, P. Investment cast near-net shape components based on cellular metal materials. *Metal foams and porous metal structures*. In: Ban-

hart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. Int. Conf., Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, (1999), 153-158.

[29] Duocel Aluminium Foam: A basic design material for the imagination. <http://www.ergaerospace.com/> (26 marzo 2006).

[30] Verduyn, H.; Leinjerhorts, J., Triescheijn-Nooteboom, A. Engineering with RECEMAT metal foam. Cellular Metals for structural and functional applications. CELLMET 2005. Ed. Günter Stephani and Bernd Kieback. Fraunhofer IRB Verlag, 2005. p. 91-94.

[31] Choe, H., Dunand, D. C. Synthesis, structure, and mechanical properties of Ni–Al and Ni–Cr–Al superalloy foams. *Acta Materialia* 52 (2004) 1283–1295.

[32] Gaillard, C., Despois, J.F., Mortensen, A. Processing of NaCl powders of controlled size and shape for the microstructural tailoring of aluminium foams. *Materials Science and Engineering A* 374 (2004) 250–262.

[33] Berchem, K.; Mohr, U., Bleck, W. Controlling the degree of pore opening of metal sponges, prepared by the infiltration preparation method. *Materials Science and Engineering A*, (2002), 323, 52-57.

[34] John, B. Manufacture, Characterisation and application of cellular metals and metal foams received 16 August 1999; received in revised form 18 December 1999; accepted 1 January 2000.

[35] Manual del Aluminio y sus Aleaciones, 2009.

[36] Gibson, L.J. and Ashby, M.F. Cellular solids: structure and properties, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1997.