Obtención y evaluación de esponjas de una aleación de aluminio 6061 fabricadas mediante infiltración de preformas solubles de sal bajo presión de vacío

Por: Jorge Eduardo Gallego Ropero
Carlos Andrés Valencia Villada

Director: Irvin Jadway Castro Navas, Ing.

Tesis de pregrado para obtener el título de
Ingeniero de Materiales

Escuela de Ingeniería de Materiales
Universidad del Valle
Cali
Agosto 2011

Aprobado por el comité de tesis

_____

Firma del director

_____

Firma del evaluador

DEDICATORIA

A Dios por guiarme siempre en mi camino, por brindarme sabiduría, paciencia para superar los obstáculos y lograr conseguir esta meta.

A mis Padres Gustavo y Alicia los mejores y a mis Hermanas Nidia, María, Liliana, Cecilia y Gustavo “El burro” por su apoyo, consejos, paciencia y alcahuetería, por su lucha incansable, por brindarme la oportunidad de salir adelante, gracias por su esfuerzo y dedicación para ayudarme a culminar esta etapa de mi vida. Los quiero mucho.

Jorge Eduardo Gallego Ropero.

A mis padres

Carlos Andrés Valencia Villada.

RESUMEN

Esta investigación consiste en estudiar el procesamiento y las propiedades obtenidas de materiales celulares a partir de una aleación de aluminio 6061 mediante la infiltración de preformas solubles (IPS) basadas en sal. El trabajo se desarrolló en varias etapas tales como: a) el mejoramiento de la morfología de las partículas de sal (buscando lograr partículas más regulares casi esféricas, b) el desarrollo del equipo para realizar el proceso de infiltración asistida por presión de vacío, c) el tratamiento térmico de envejecimiento de las esponjas producidas, d) la caracterización micro y macroestructural, la evaluación de los valores del ensayo de compresión y microdureza, antes y después del tratamiento térmico.

El uso de la aleación de aluminio 6061 nos brinda la posibilidad de realizar un tratamiento térmico de envejecimiento posterior a la infiltración con lo cual podemos realizar una comparación y estudio de ciertas propiedades como resistencia a la compresión y las variaciones microestructurales antes y después del tratamiento térmico.

Las preformas a ser infiltradas fueron fabricadas de sal común, con un proceso de modificación posterior para lograr una morfología más regular casi esférica, con lo cual se pretende mejorar algunas propiedades, como lograr una menor densidad relativa, mayor resistencia mecánica de las esponjas entre otras. Luego se procedió a la infiltración del metal fundido mediante presión de vacío, se dejo solidificar y se procedió a la remoción de la sal bajo ciertas condiciones con agua corriente, para mostrar la estructura porosa de la esponja metálica, y posteriormente se realizo el tratamiento térmico de envejecimiento a ciertas probetas.

Al lograr conseguir partículas de sal con una morfología más regular, se seleccionaron tres tipos de tamaño en un rango de 700 a 2000 μm. Con lo cual después de optimizado el proceso de infiltración se lograron obtener esponjas con una porosidad uniformemente distribuida y en un porcentaje de aproximadamente el 67%.

Las esponjas fueron caracterizadas microestructuralmente a través de microscopia óptica y microscopia electrónica de barrido, los ensayos mecánicos fueron de compresión uniaxial y de microdureza vickers, a probetas con y sin tratamiento térmico.

El estudio de la influencia tanto del metal de la matriz como el de la estructura celular de la esponja en cada una de las propiedades caracterizadas, así como el efecto que alcanzan a tener los parámetros de procesamiento de las esponjas, son aportes importantes en el campo de los materiales.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN iv
INTRODUCCIÓN 11
OBJETIVOS 13
Objetivo general 13
Objetivos específicos 13
Capítulo 1. ESTADO DEL ARTE 14
1.1. METALES CELULARES 16
1.1.1. Espumas o esponjas 16
1.1.2. Esponjas de Alumínio 17
1.2. PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE METALES CELULARES 18
1.3. Procesos de rellenos removibles 20
1.3.1. Preformas de Sal (NaCl) 21
Disolución de la preforma 22
1.3.2. Metal de la matriz 22
1.4. Aplicaciones generales de materiales celulares 22
Capitulo 2 24
PROCESAMIENTO DE LAS ESPONJAS DE ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061 24
Diseño y puesta en marcha del equipo para la infiltración; 24
Selección y caracterización de materias primas 24
2.1 Introducción 24
2.2 Diseño y funcionamiento del equipo de infiltración 24
2.1.1 Diseño del proceso: sistemas y equipos 24
2.3 Selección y caracterización de materias primas 31
2.3.1 Materias primas 32
2.3.2 Caracterización de las materias primas y resultados 32
2.4 Procesamiento de las esponjas mediante IPS 35
2.4.1. Implementación del proceso IPS asistido por presión de vacío 36
2.5 Selección de variables mediante ensayos preliminares 39
2.5.1 Selección de la temperatura 39
2.5.2 Selección de la presión de infiltración 40
Capítulo 3 41
PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA LA CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LAS ESPONJAS DE ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061 OBTENIDAS POR IPS 41

3.1 Métodos de caracterización morfológica y microestructural 41
3.1.1 Densitometría 41
3.1.2 Análisis morfológico 42
3.1.3 Composición química de las esponjas de aluminio 42
3.1.4 Análisis metalográfico 43
3.1.5 Tratamiento térmico 43
3.2 Métodos de caracterización de propiedades mecánicas 44
3.2.1 Prueba de compresión uniaxial 44
3.2.2 Prueba de microdureza Vickers 45
Capítulo 4. 46
CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE PROPIEDADES DE LAS ESPONJAS DE ALEACIÓN 6061 OBTENIDAS POR IPS 46
4.1 Resultados de las pruebas de morfología y metalografía 46
4.1.1 Densitometría 46
4.1.2 Morfología macroestructural de las esponjas de aluminio. 46
4.1.3 Composición química puntual de las esponjas 47
4.1.2 Análisis metalográfico 49
4.2 Resultados de las pruebas mecánicas 54
4.2.1 Respuesta mecánica bajo carga de compresión uniaxial 54
4.2.2 Microdureza Vickers 56
Capítulo 5. 57
DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS 57
5.1 Análisis de las características morfológicas y microestructurales de las esponjas 57
5.1.1 Densitometría 57
5.1.2 análisis morfológico macroestructural 58
5.1.3 Análisis de la microestructura 59
5.2 Análisis del comportamiento mecánico 60
5.2.1 Ensayo de compresión uniaxial 60
5.2.2 Microdureza Vickers 63
Capítulo 6. 64
CONCLUSIONES 64
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 66

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Crecimiento del número de trabajos presentados en el Metfoam, 2009. 15
Figura 2. Comparación entre el desarrollo de materiales celulares y crecimiento a través de publicaciones de las ciencias generales 16
Figura 3. Clasificación de metales celulares según el tipo de porosidad, a) Espumas "porosidad cerrada". b) Esponja "porosidad abierta, interconectada" 17
Figura 4. Clasificación de los procesos de fabricación de MC según el estado físico de la matriz, Fernández M., P. [3]. 19
Figura 5. Rango de tamaño de poro en función de la densidad relativa para los distintos procesos de manufactura de MC. 20
Figura 6. Esquema del proceso IPS con presión externa de un gas inerte. 21
Figura 7. Campos de aplicación de los metales celulares en función del tipo de porosidad. 23
Figura 8. Sistema de calentamiento y fundición, a) Horno eléctrico para fundición del aluminio, b) Horno fabricado para el calentamiento del molde a infiltrar. 25
Figura 9. Molde y sus componentes 25
Figura 10. Bomba de vacío de paletas rotativas y tubería de silicona. 26
Figura 11. Horno eléctrico fabricado para el calentamiento e infiltración de la preforma. En la parte inferior es hueco lo que permite la entrada del molde. 27
Figura 12. Componentes del molde para el sistema de infiltración asistido por vacio de preformas solubles. 28
Figura 13. Filtros y sus características. 30
Figura 14. Sello de asbesto. 30
Figura 15. Diseño y acople entre los sistemas. 31
Figura 16. Fusión de la sal común. 33
Figura 17. Disposición de la sal fundida para lograr las partículas más regulares 34
Figura 18. Imagen SEM de la de partículas de tamaño 1.25 de NaCl. 35
Figura 19. Secuencia del proceso de IPS asistido por vacío. a) Preforma de sal dentro del molde, b) calentamiento de la preforma y fusión del aluminio, c) vaciado del aluminio y presión de vacío, d) enfriamiento y desmolde 38
Figura 20. Disposición de la probeta durante la realización del ensayo de compresión. 44
Figura 21. Microdurómetro 45

Figura 22. Macroestructura vista al estereomicroscopio para tres esponjas dependiendo del tamaño de poro, escala 2 mm. a) R10-12, b) R14-16, c) R20-30. 47
Figura 23. *EDX para las espumas de aluminio 6061* 48
Figura 24. Microestructuras probetas R10-12 (50x-100x-200x-500x) atacadas químicamente sin tratamiento térmico 51
Figura 25. Microestructuras probetas R 1416 ST a (50x-100x-200x-500x) atacadas químicamente sin tratamiento térmico. 51
Figura 26. Microestructuras probetas R 2030 ST a (50x-100x-200x-500x) atacadas químicamente sin tratamiento térmico 52
Figura 27. Microestructuras probetas R1012 TT a (50x-100x-200x-500x) atacadas químicamente con tratamiento térmico 53
Figura 28. Microestructuras probetas R1416 TT a (50x-100x-200x-500x) atacadas químicamente con tratamiento térmico. 53
Figura 29. Microestructuras probetas R2030 TT a (50x-100x-200x-500x) atacadas químicamente con tratamiento térmico. 53
Figura 30. Curvas esfuerzo - deformación para esponjas de aleación de aluminio..... 55
Figura 31. Fotos en el esteromicroscopio de esponjas con fabricadas con partículas de diversas morfologías, escala 1mm a) amorfas, b) esferas. 59
Figura 32. Diagrama Al Mg_2Si..... **¡Error! Marcador no definido.**
Figura 33. Curva típica de esfuerzo – deformación a compresión en MC. 60
Figura 34. Probetas Tratadas térmicamente y sin tratamiento..... 62

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 Métodos de presión ejercida 29
Tabla 2 Composición en peso de la aleación de aluminio 6061 empleada como matriz en las esponjas. 33
Tabla 3 Serie de tamices utilizados para el análisis granulométrico de la sal 34
Tabla 4 Composición química puntual de muestras de sal obtenida por EDS, con su Correspondiente espectro 35
Tabla 5. Tamaños de partícula seleccionados para el estudio 37
Tabla 6 Densidad promedio y porosidad por cada tamaño de partícula 46
Tabla 7. Identificación metalografía de las fases de las esponjas 51
Tabla 8 Datos obtenidos en el ensayo de compresión uniaxial 54
Tabla 9 Resultados del ensayo de microdureza Vickers. 56

INTRODUCCIÓN

Dentro de los diferentes clases de materiales se encuentran los materiales celulares, resultado de la profunda exploración y estudio de la amplia ciencia de los materiales, el surgimiento de estos materiales celulares se da como resultado a la necesidad de cubrir aplicaciones que requieran propiedades mecánicas, físicas, químicas y sus combinaciones, que han sido posible abarcar gracias a la estructura de este tipo de materiales. Por lo cual en aplicaciones de absorción de energía, en transferencia de calor, estructurales en automoción y aeronáutica, son algunas de las aplicaciones funcionales donde los materiales celulares encuentran gran uso potencial.

A pesar de todo el estudio que se ha venido llevando a cabo sobre los materiales celulares, estos se encuentran aun en etapa de investigación y desarrollo, por lo cual cuenta con gran interés de parte de los investigadores en la profundización de desarrollo en procesos de fabricación, caracterización y ampliación del campo de aplicaciones. Dentro de los materiales celulares son más estudiados las espumas metálicas (poro cerrado) que las esponjas (poro abierto, interconectados), por lo cual para estas es de gran importancia seguir aumentado el estudio de sus características, como el porcentaje de porosidad, la morfología, distribución y tamaño de poros, puntos de gran importancia que deben ser estudiados desde su procesamiento, caracterizaron y evaluación.

Al enfocarnos en el estudio de las esponjas metálicas y como resultado a la necesidad de encontrar materias primas y rutas de procesamiento mas económicas con un amplio rango de porosidades y propiedades repetibles, se decidió optar por el método de infiltración de proforma solubles que en el estudio llamaremos (IPS), asistido por presión de vacío usando como materia prima para las preformas cloruro sodio conocida como sal común, con un tratamiento adicional para conseguir una morfología más regular casi esférica. La fabricación de las esponjas se dividió en dos partes, la primera fue el proceso por el cual se le dio una morfología más regular a sal, a través de la fusión y goteo en unos rangos de alturas preestablecidas sobre unas superficies metálicas antiadherentes; el impacto genera la dispersión y solidificación de partículas con morfologías más regulares y en diferentes tamaños, las cuales después de seleccionadas formaron la preforma, la cual en la etapa dos fue infiltrada con metal

liquido asistido por presión de vacío desde la parte inferior del molde, logrando la conformación de la muestra, a la cual después de su solidificación y enfriamiento se le removió la preforma por disolución revelando la estructura porosa de la matriz de aluminio.

El estudio del proceso de infiltración de preformas de sal data desde los años 60, sin embargo la mayoría de estudios realizados se han venido realizando desde la última década, de la cual se ha podido visualizar la proyección de la fabricación de esponjas de aluminio por este método, sumando a este la importancia y las buenas características del aluminio y sus aleaciones siendo este el material de la matriz utilizado, además de la sal común como materia prima para la preforma la que es económica, no toxica, fácil de adquirir y de remover.

Por lo enunciado anteriormente y con la fuerte idea de aportar información relevante en el estudio de las esponjas metálicas, desde la fabricación de mejores preformas solubles, hasta establecer interacciones entre variables del proceso, la microestructura y propiedades mediante la técnica de infiltración de preformas solubles IPS, se motivo la presente tesis.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Producir y caracterizar esponjas metálicas de aluminio 6061 mediante la técnica de infiltración asistida por vacio, en preformas de sal.

Objetivos específicos

- Desarrollar un tratamiento que permita mejorar la morfología de las partículas de sal a una forma más regular.
- Diseñar, fabricar y ajustar el equipo para la producción de esponjas metálicas por infiltración de preformas solubles IPS asistido por vacio.
- Producir esponjas metálicas de aluminio 6061 con preformas de sal, de tres granulometrías distintas.
- Realizar un tratamiento térmico de envejecimiento T6 a las esponjas para su posterior caracterización y comparación.
- Evaluar a través de ensayos mecánicos de compresión y microdureza las esponjas metálicas de aluminio, con y sin tratamiento térmico T6.
- Caracterizar a través de microscopia óptica y microscopia electrónica de barrido las esponjas obtenidas con y sin tratamiento térmico T6.

Capítulo 1. ESTADO DEL ARTE

Los primeros estudios que mostraron interés en los materiales celulares se realizaron a principios de los años 40, llevando a algunos a realizar patentes, uno de ellas por parte del investigador Benjamín Sosnick, quien registro un proceso mediante el cual creaba una aleación de dos metales que poseían una gran diferencia en sus puntos de fusión y con lo cual lograba un metal en estado gaseoso mientras el otro aun estaba en estado liquido, logrando así la estructura porosa de un material celular. Sin embargo el proceso era bastante costoso y solo producía cantidades pequeñas de una estructura porosa bastante irregular.

A través de los 50 años siguientes se realizaron estudios esporádicos con pocos avances en el área, con un resurgimiento en el interés por el estudio de los materiales celulares en la década de los 90, donde universidades, centros de investigación y la industria han desarrollado un gran número de estudios hasta la presente fecha en un crecimiento casi exponencial, logrando así un gran número de artículos, libros y patentes. Explorando desde métodos de producción, caracterización y aplicación de los materiales celulares. Los estudios con mas avances en el tema de los materiales celulares se han presentado en países como Alemania, Japón, Estados Unidos, Inglaterra, Italia, Francia, Canadá, y puntualizando en Latinoamérica se encuentra un trabajo desarrollado en el Instituto de Investigación en Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México [5], el cual está basado en la fabricación de esponjas de aleación zinc-aluminio-cobre (zinalco) mediante infiltración del metal líquido por gravedad utilizando preformas de sal, y a nivel de nuestro país encontramos una tesis doctoral realizada en la Universidad Pontificia Bolivariana llamada “Obtención y evaluación de esponjas de aleación de aluminio fabricadas mediante infiltración de preformas solubles bajo presión de vacío) Fernández M., P. [3] y la tesis de pregrado “producción y caracterización de esponjas metálicas de aluminio por el proceso de infiltración en preformas de sal” de Gómez, M., [4] realizada en la universidad del Valle.

Todo el desarrollo que como se ha dicho a venido aumentando los últimos 10 años, ha creado a su vez importantes congresos como el Metfoam y el Cellmet, eventos creados en Alemania y con una regularidad de dos años, en los cuales los investigadores y el mundo entero tienen la posibilidad de difundir y obtener información acerca de lo más reciente en el mundo de los materiales celulares, en la figura 1. Vemos el crecimiento como marcamos casi exponencial que ha logrado las investigaciones en función de los trabajos presentados en los congresos del Metfoam, y en la figura 2. Vemos una comparación entre el desarrollo de materiales celulares y su crecimiento a través de publicaciones de las ciencias generales.

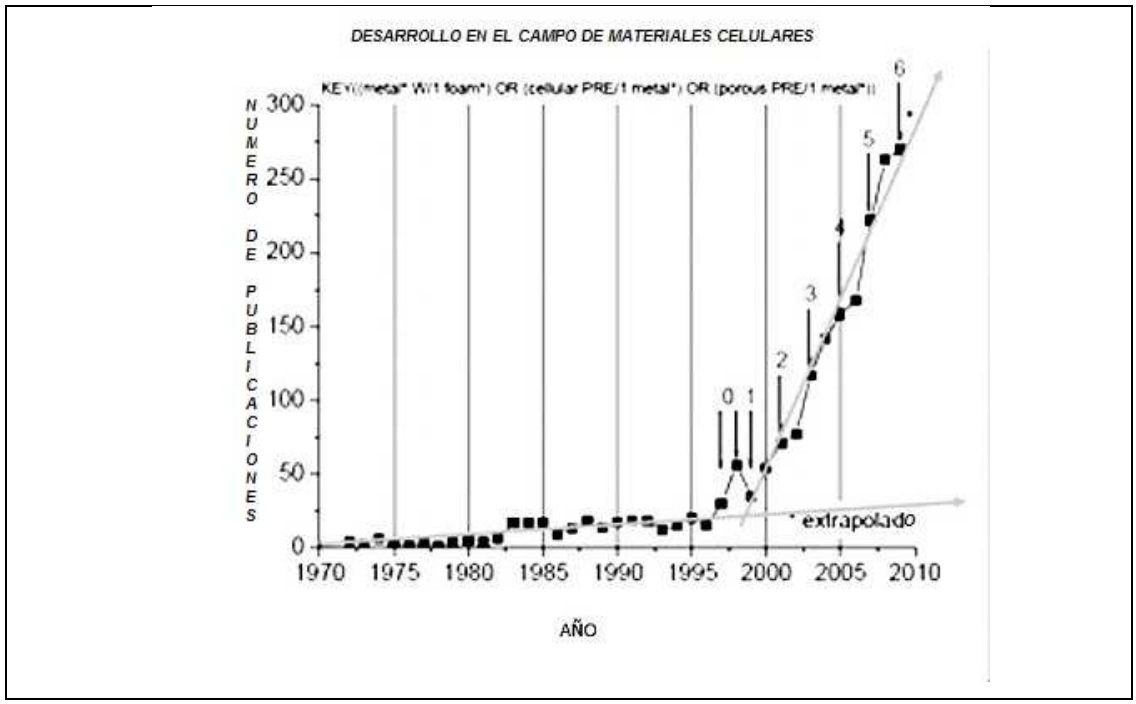


Figura 1. Crecimiento del número de trabajos presentados en el Metfoam, 2009.

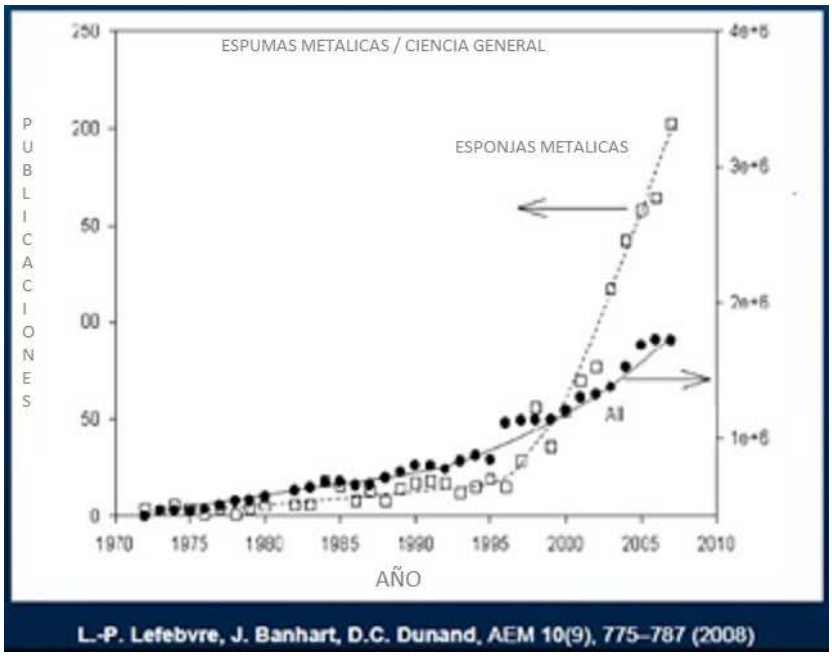


Figura 2. Comparación entre el desarrollo de materiales celulares y crecimiento a través de publicaciones de las ciencias generales

A pesar de que el estudio de materiales celulares no es una novedad para el mundo su crecimiento muestra un gran camino por explorar y en el ámbito nacional los reportes que existen en este tema son muy pocos y en el método IPS mucho menores.

1.1. METALES CELULARES

Los metales celulares MC existen en numerosos tipos en la naturaleza, desde los huesos hasta la madera poseen este tipo de estructura celular y basados en esta constitución nacieron los primeros tipos de materiales celulares desarrollados por el hombre, existen basados en matriz polimérica y cerámica pero con ciertas limitaciones en sus aplicaciones debidos a las propiedades del material base, es por esto que se desarrollaron los metales celulares (MC ó metfoams en ingles), partiendo de un metal puro o una aleación, clasificados según su estructura celular como espumas, las cuales poseen porosidad cerrada y esponjas con porosidad interconectada o abierta, son estas características sumadas a las propiedades del metal base las que le brindan un gran potencial de aplicaciones.

1.1.1. Espumas o esponjas

Como se menciono anteriormente la clasificación del los metales celulares son principalmente dos clases dependiendo del tipo de porosidad que se presente,

diferenciándose estas cuando los poros están cerrados separados por paredes del metal de la matriz y no conectados entre ellos se les llama espumas metálicas (close-cell foams) fig. 3a, y cuando los poros están interconectados son esponjas (open-cell foams) fig. 3b, en los dos tipos de materiales celulares se pueden obtener densidades relativas entre un 60 % a un 98 % del peso del metal, diferentes métodos de producción y unas interesantes combinación de propiedades.

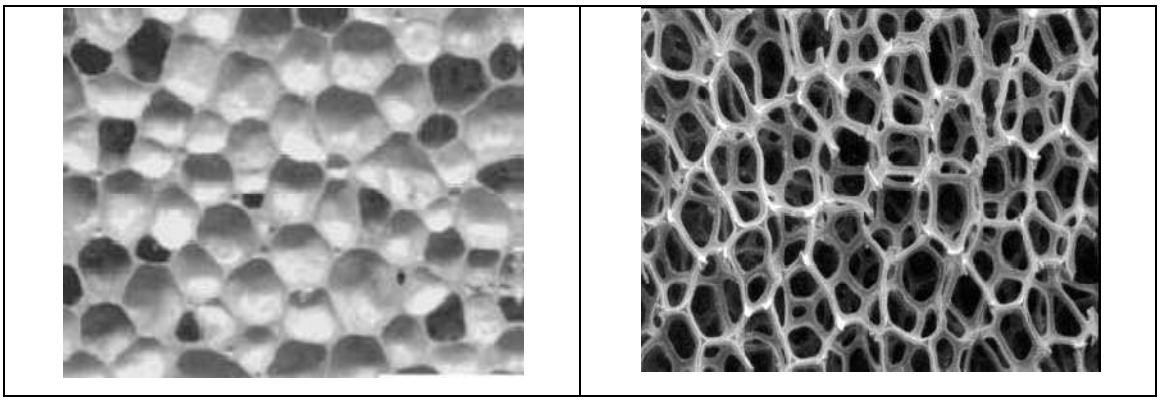


Figura 3. Clasificación de metales celulares según el tipo de porosidad, a) Espumas "porosidad cerrada". b) Esponja "porosidad abierta, interconectada"

1.1.2. Esponjas de Alumínio

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 férreos, siendo uno de los metales más usados en la

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

A través del desarrollo y los recientes avances en el estudio de los materiales celulares, se han logrado una variedad de técnicas de producción, que en general son clasificadas y reconocidas por encajar dentro de tres clases principales dependiendo del estado físico en que se utilice la matriz:

1. Procesos en estado liquido, Ej.: Inyección de gas (procesos CYMAT / HYDRO), espumado instantáneo por descomposición de partículas (proceso ALPORAS).

2. Procesos en estado sólido, Ej.: Metalurgia de polvos.

3. Procesos en estado gaseoso, Ej.: Deposición en fase vapor, electrodeposión.

En la fig. 4 se muestra la clasificación en un esquema descrito por Fernández M., P. [3], con los principales procesos de fabricación y sus variantes.

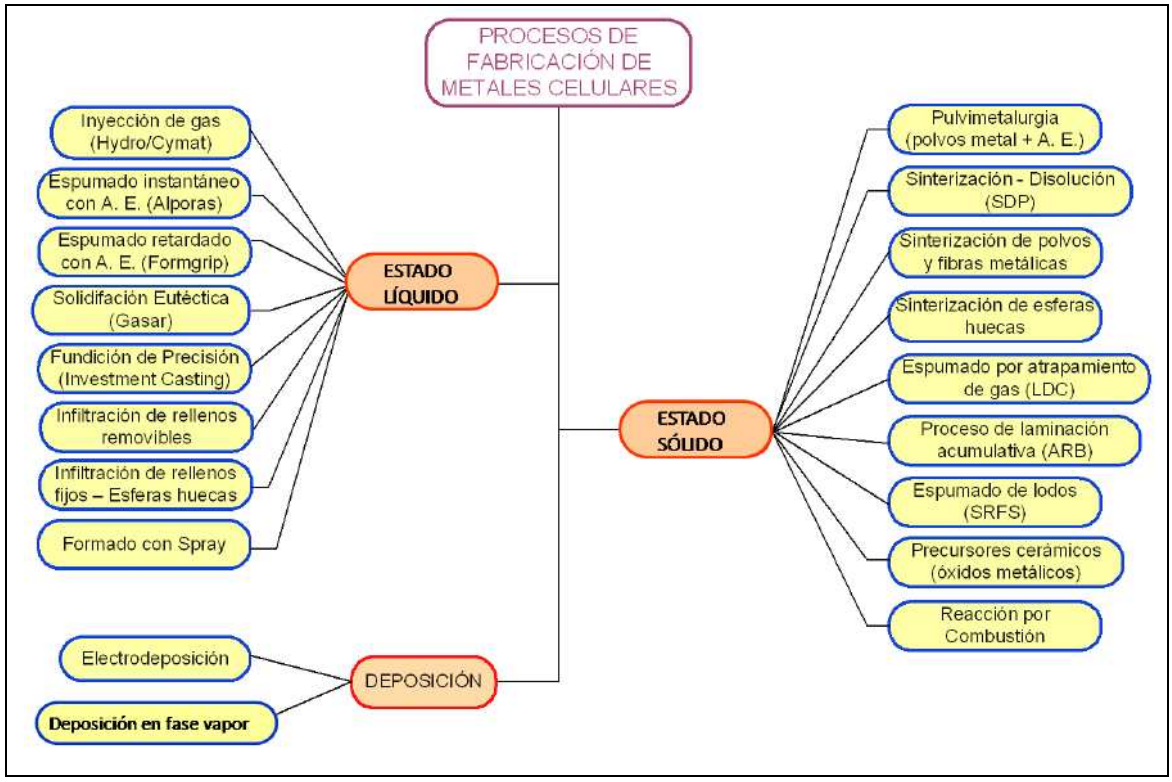


Figura 4. Clasificación de los procesos de fabricación de MC según el estado físico de la matriz, Fernández M., P. [3].

Cada método puede ser usado con un subconjunto de metales para crear materiales celulares con un rango limitado de densidades relativas y tamaños de poro Fig. 5, extraída de Ashby [1], algunos producen esponjas (MC de celda abierta) y otros espumas (MC de celda cerrada), también los productos difieren en gran variedad de calidad y precio. Aunque cabe enunciar que solo algunos han sido desarrollados comercialmente.

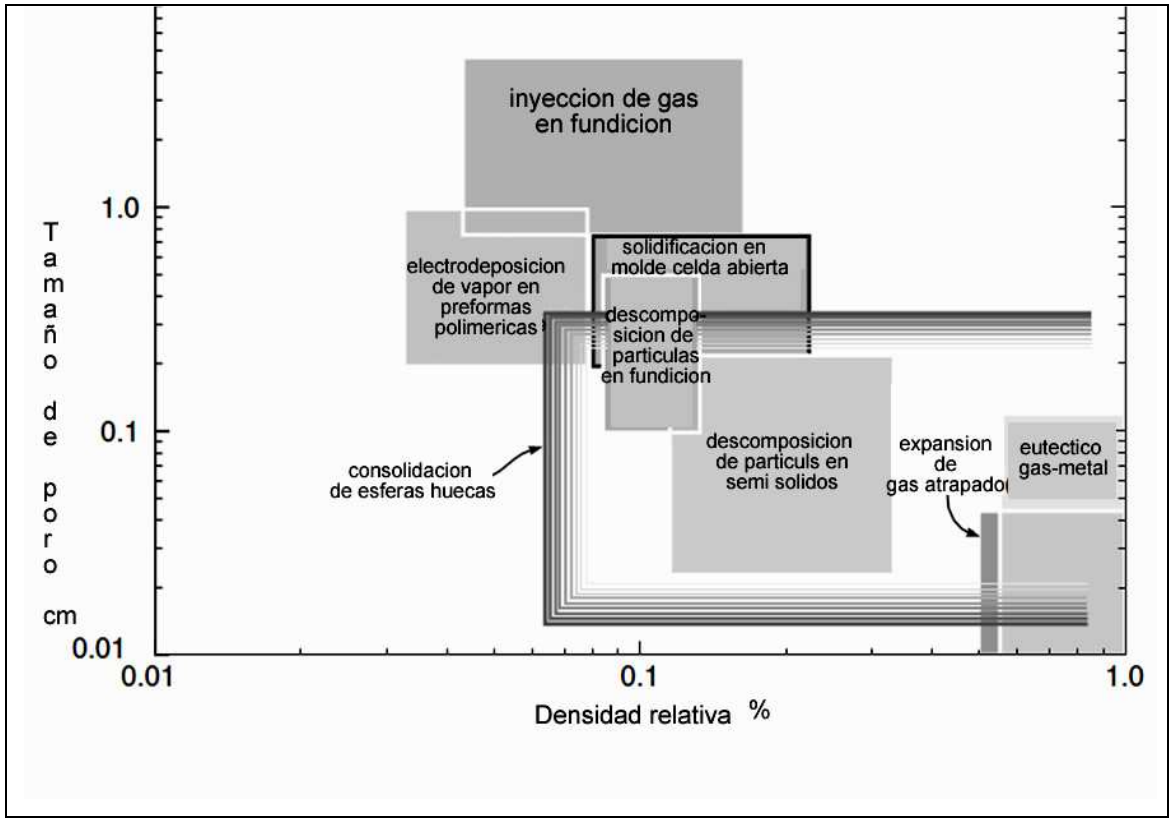


Figura 5. Rango de tamaño de poro en función de la densidad relativa para los distintos procesos de manufactura de MC. Ashby [1]

El proceso de fabricación que se utilizo en este trabajo es el de infiltración de rellenos removibles que como pudimos observar en la fig. 4, pertenece a la clasificación de matriz en estado liquido, lo cual es correcto debido a que el aluminio se fundió para después ser infiltrado en la preforma de sal.

1.3. Procesos de rellenos removibles

El proceso de producción por medio de infiltración de rellenos removibles el cual fue el método utilizado para la fabricación de esponjas en este trabajo, permite obtener metales celulares con porosidad abierta "*Esponjas*" y Consiste básicamente de tres pasos:

1. *Preparar un molde con materiales de relleno ya sean orgánicos o inorgánicos que pueden acomodados y/o sinterizados para dar 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, teniendo en cuenta que no exista reacción entre estos y que resistan las condiciones del proceso como; La temperatura de fusión de la preforma debe estar por encima de la temperatura de fusión del metal para que el

proceso de infiltración se lleve a cabo sin la fusión de la preforma, la posibilidad de remover las partículas de sal sin dañar la integridad del metal de la matriz.

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.

3. *Remoción de la preforma.*

Una vez el conjunto metal/preforma a solidificado y enfriado, se procede a la remoción de la preforma mediante disolución o tratamiento térmico de manera que permita obtener la esponja metálica.

Los metales celulares obtenidos mediante la técnica de infiltración pueden alcanzar porosidades de un 55% al 98% y densidades relativas entre 0.3 y 0.5 En la fig. 6 se observa un esquema del proceso IPS con presión externa de un gas inerte, utilizando preformas de sal.

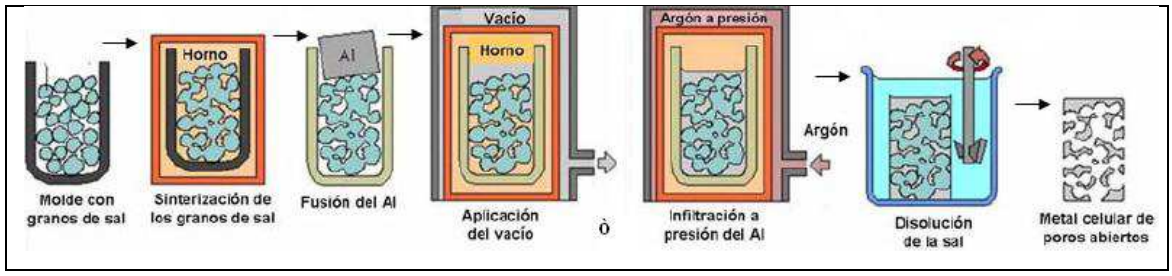


Figura 6. Esquema del proceso IPS con presión externa de un gas inerte.

1.3.1. Preformas de Sal (NaCl)

Primero debemos tener en cuenta que el material de la preforma cumpla con ciertos requisitos como, que resista a las altas temperaturas del proceso, la no reactividad al infiltrar y que sea removible, al saber lo anterior y existir una variedad de materiales orgánicos e inorgánicos que van desde sales de fluoruros, gránulos de vermiculita, esferas cerámicas y mezclas de aditivos poliméricos entre otros, que pueden cumplir con los requerimientos enunciados se opto por el NaCl o sal común, el cual es uno de los materiales removibles más utilizados en el proceso de infiltración, y que además

brinda características como su bajo costo, fácil adquisición, no toxico y fácilmente removible con agua.

Debido a que parámetros como el porcentaje de porosidad del producto final puede ser manipulada a través del tamaño, la forma y la distribución de las partículas utilizadas en la preforma, se decidió hacerle un tratamiento posterior a la sal que permitiera la obtención de partículas con una forma más regular casi esférica, para así poder estudiar propiedades de la esponja con la impresión de esta morfología y poder comparar algunos resultados con otros estudios donde se obtuvieron esponjas a partir de cristales de sal con diferentes morfologías, Fernández M., P. [3] y Gómez, M., [4], estudios donde la morfología de la sal no fue modificada.

Disolución de la preforma

Poca información se encontró en la literatura acerca de métodos y resultados de la disolución de preformas de sal, las preformas son generalmente removidas por disolución en agua, o en solventes de soluciones acidas o básicas [2], pero en general ocurre por inmersión en agua, y algunos autores proponen el uso de ultrasonido, gas presurizado y agua caliente, por lo anterior y basándonos en un estudio nacional Gómez, M., [4], se realizo la remoción a través de inmersión en agua con un tiempo posterior en el ultrasonido, los parámetros de la remoción se marcaron en el capítulo 4.

1.3.2. Metal de la matriz

La fabricación de esponjas metálicas por infiltración abarca distintos metales como Al, Zn, Fe entre otros y sus aleaciones, enfocándonos en las esponjas que usaron Aluminio como metal para su matriz y NaCl como material de la preforma, encontramos unos pocos. Se decidió entonces utilizar la misma aleación usada por Gómez, M., [4], para contrastar mejor los resultados y ver la influencia del cambio de morfología de la sal, menores tamaños de partícula y el cambio de proceso de fabricación a IPS asistido por vacio en las propiedades de las esponjas. La composición exacta de la aleación de aluminio 6061 se encuentra en el capítulo 4.

1.4. Aplicaciones generales de materiales celulares

Los metales celulares han presentado con el crecimiento de su estudio en las últimas décadas un aumento en el número de aplicaciones al que se destina, al poseer estos metales celulares una combinación de propiedades inherentes al metal de la matriz y a

su estructura porosa son materiales más multifuncionales que otros materiales porosos poliméricos o cerámicos. Dentro del abanico de aplicaciones posibles están aplicaciones funcionales y estructurales, donde para su elección marca una diferencia significativa el tipo de porosidad del metal celular (abierta o cerrada).

Por ejemplo las espumas que poseen una estructura porosa cerrada son muy efectivas en aplicaciones estructurales principalmente en el sector del transporte debido a su relación de resistencia mecánica y baja densidad, mientras las esponjas metálicas que poseen una porosidad abierta son utilizadas como materiales funcionales para aplicaciones que incluyen intercambiadores de calor, filtros, prótesis biomédicas entre otras. En la fig. 7. podemos ver diferentes campos de aplicación de los metales celulares en función del tipo de porosidad.

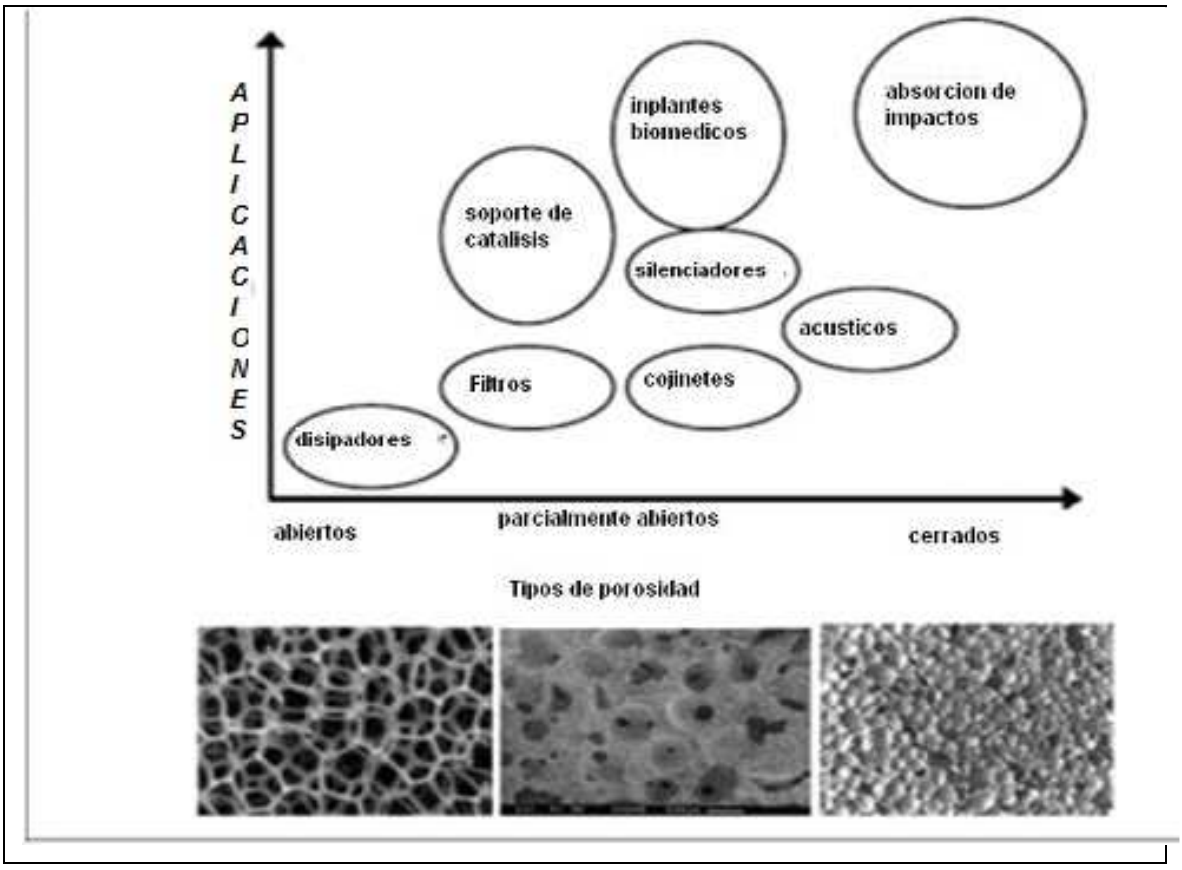


Figura 7. Campos de aplicación de los metales celulares en función del tipo de porosidad.

Capitulo 2

PROCESAMIENTO DE LAS ESPONJAS DE ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061

Diseño y puesta en marcha del equipo para la infiltración;

Selección y caracterización de materias primas

2.1 Introducción

El método de infiltración de preformas solubles del que trata este estudio, es una variante del proceso de infiltración de rellenos removibles que encontramos en la Fig.4, donde por la característica de la preforma de sal de ser soluble en agua, llamamos a este de relleno o preforma soluble. Vamos a describir en este capítulo el método utilizado, con la descripción del diseño del equipo, parámetros de proceso y la selección, transformación y caracterización de las materias primas.

2.2 Diseño y funcionamiento del equipo de infiltración

Para la fabricación de esponjas de aluminio por el método de infiltración, se inicio con un análisis profundo de la bibliografía encontrada acerca de la técnica de infiltración, de la cual fue posible partir para acotar valores de algunos parámetros del proceso de gran importancia, como temperatura y presión, aunque cabe resaltar que se encontró poca información específica acerca de los equipo utilizados.

2.1.1 Diseño del proceso: sistemas y equipos

Como se enuncio anteriormente el proceso de infiltración consta de una preforma y un metal para la matriz que en el etapa de infiltración estará en estado liquido, por lo cual las principales variables a considerar durante el proceso de infiltración son la temperatura y la presión, que en este caso fue presión de vacío, siendo esta una de las maneras de ejercer la fuerza para la infiltración de la preforma, sin variar el principio de la técnica.

Al conocer las principales variables de procesamiento, las materias primas a utilizar y sabiendo que el correcto manejo de cada una de las variables nos permitirán la obtención de esponjas metálicas con estructuras homogéneas, continuamos con la planeación de los equipos y componentes utilizados que permitieron el control de la temperatura y presión requeridos para la infiltración.

Por lo anterior, se concluyo dividir el proceso en tres sistemas con sus respectivos equipos y componentes a utilizar:

Sistema Calentamiento y fundición (compuestos por dos equipos, uno para fundir el metal de la matriz y otro para el calentamiento del molde donde está la preforma) fig. 8.

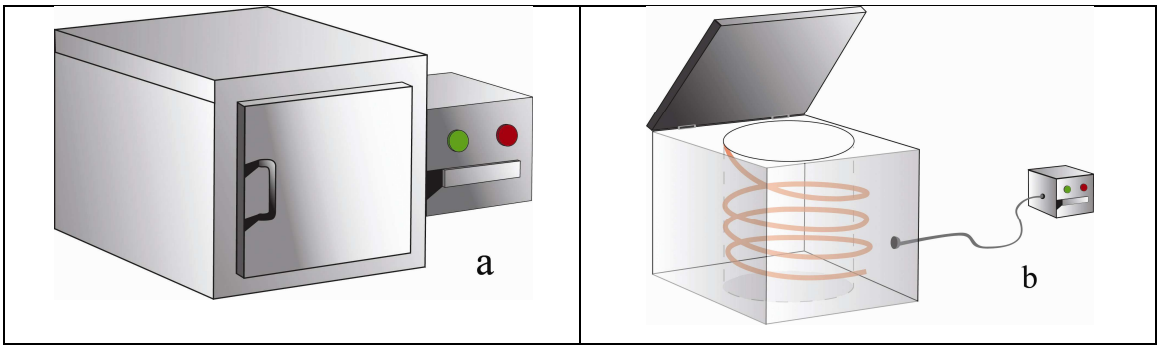
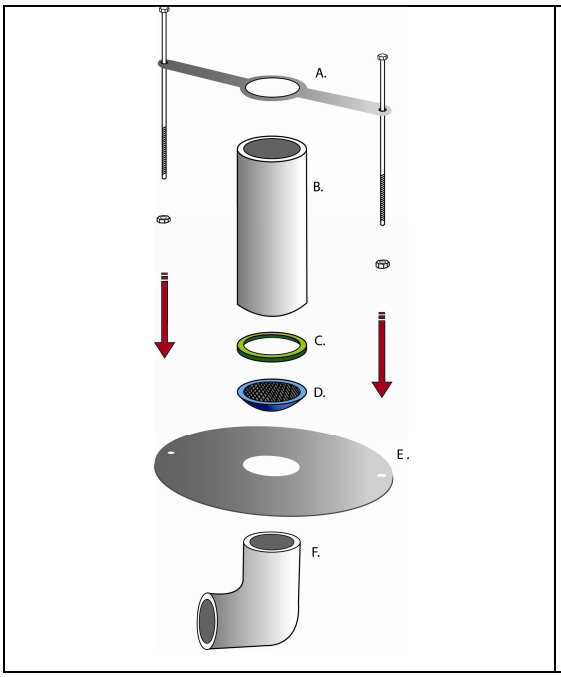


Figura 8. Sistema de calentamiento y fundición, a) Horno eléctrico para fundición del aluminio, b) Horno fabricado para el calentamiento del molde a infiltrar.

Sistema de infiltración (molde y sus componentes) Fig. 9.



a.	Sistema de ajuste
b.	Cilindro de acero 1040
c.	Sello de asbesto
d.	Filtros de malla acero inox.
e.	Disco de acero 1020
f.	Codo conector

Figura 9. Molde y sus componentes

Sistema de presión y enfriamiento (selección de la bomba de vacío y tiempo de utilización, además del equipo para evitar que el aire caliente pase por la bomba de

vacio al ejercer la presión, o que el aluminio fundido en caso de que las mallas no funcionen, dañen la bomba.) fig. 10.

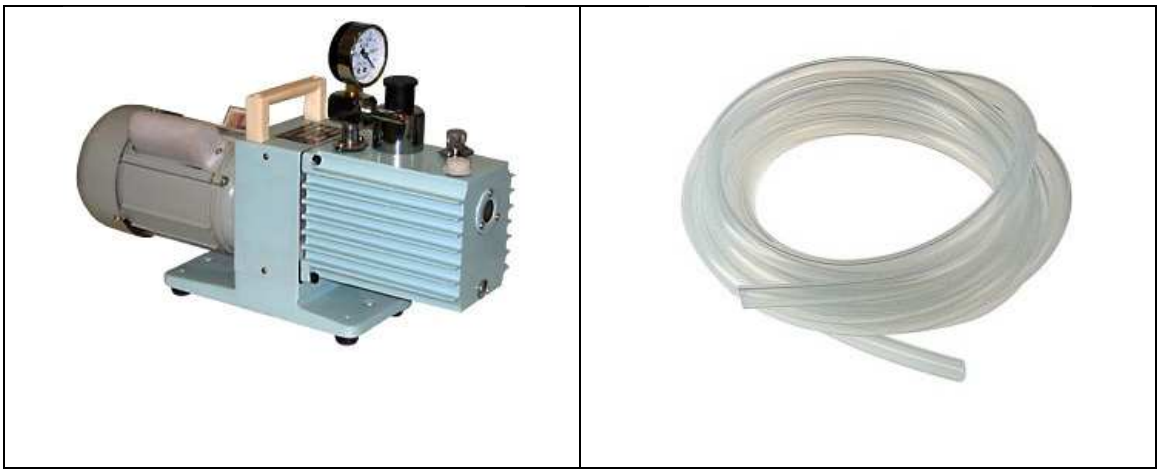


Figura 10. Bomba de vacío de paletas rotativas y tubería de silicona.

Sistemas de calentamiento y fundición

En esta parte se involucraron tres componentes, uno para el calentamiento e infiltración de la preforma que llamaremos molde en adelante, y dos equipos, uno para el calentamiento del metal a fundir que está en un crisol y otro para el calentamiento del molde.

Hornos

- **Horno para el calentamiento del metal:**

Para la selección de este horno se tuvo en cuenta un aspecto fundamental, el valor de temperatura de fusión del metal, en este estudio la aleación de aluminio 6061 tiene temperatura de fusión alrededor de 672 °C [11]. Para realizar esta función se utilizo uno de los hornos eléctricos ya existentes en el laboratorio de materiales metálicos de la universidad del Valle, que cumplió con las características necesarias para este objetivo. Durante la etapa de fusión del metal se formo una capa de oxido debido a que la atmosfera usada fue ambiente y no protectora, el oxido se retiro para evitar una fuente potencial de inclusiones e impurezas que pueden ir con el metal liquido durante la infiltración, por lo tanto se hizo una etapa de desescoriado previa a la infiltración la cual se pudo llevar a cabo en el presente horno debido a que su diseño posee una puerta delantera por donde se pudo extraer el crisol para desescoriar y volverlo a introducir.

- **Horno para el calentamiento del molde:**

El horno utilizado para el calentamiento del crisol presento unas características de diseño que permitieron la adaptación de un sistema de tubería que fue ingresado por la parte inferior del molde para ser conectado con el sistema de enfriamiento y presión, además debía llegar a una temperatura de aproximadamente 700 °C. Por lo tanto se opto por la fabricación de un horno sobre la modificación de los existentes en el laboratorio. El diseño y el horno terminado se ven en la fig. 11.

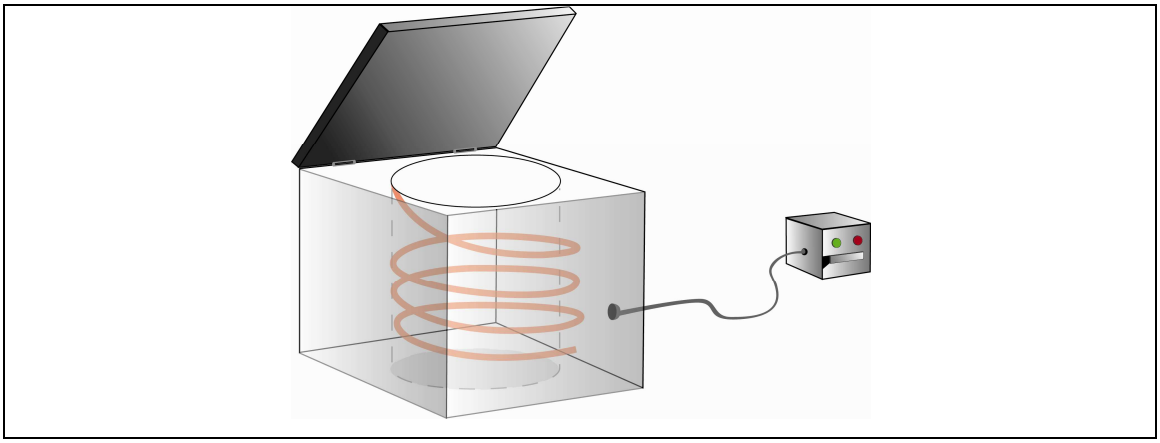


Figura 11. Horno eléctrico fabricado para el calentamiento e infiltración de la preforma. En la parte inferior es hueco lo que permite la entrada del molde.

Sistema de infiltración

Molde (sistema para el calentamiento e infiltración de la preforma)

El molde es un componente fundamental para la exitosa fabricación de las esponjas de aluminio por medio de la técnica de IPS y forma parte del sistema de infiltración.

Las funciones que cumple son:

- contener la preforma durante el proceso de calentamiento de esta.
- Como cámara durante la aplicación de la presión de vacio requerida para el proceso de infiltración
- Como molde para depositar el metal fundido

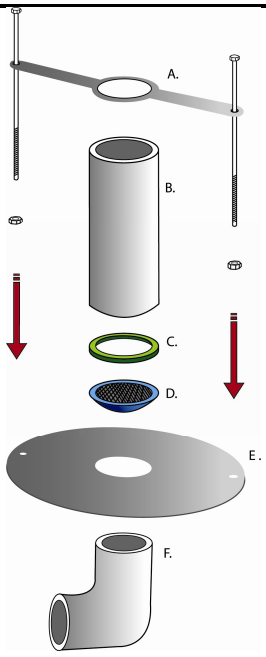
Basados en las funciones que debe cumplir el molde, como soportar las altas temperaturas, el ambiente de trabajo, la presión de vacío y la no reacción con el material de la preforma, se reviso en la literatura los crisoles usados en condiciones similares encontrado crisoles de grafito, alúmina y metálicos.

Revisando los crisoles de grafito y aluminio estos poseen muy buen comportamiento a las altas temperaturas y los choques térmicos, buena resistencia a la corrosión entre

otras, pero su alto costo junto con la difícil manipulación por fragilidad lo hacen no asequible para los alcances de este proyecto.

Por lo anterior el crisol metálico fue el elegido, fuera de ser mas económico que los anteriores, permitió un mas rápido ensamblado y fácil manipulación sin la preocupación de su fragilidad, aunque la resistencia a la corrosión es mucho menor con el material de la preforma, se pudo sobrellevar recubriéndolo con un refractario y lubricante durante la infiltración que a la vez sirvió de desmoldante. También se sumergió en aceite mientras no se utilizo.

Para su elaboración se utilizo un tubo de acero 1040 con un diámetro de 28 mm, espesor de pared de 4 mm y altura de 15 cm. Además se fabricaron unos componentes como un disco de acero de 22 cm de diámetro con un agujero central de 20 mm de diámetro como base para el tubo, al cual se le soldó una unión de acero de 3/4" de diámetro como elemento para la unión del molde al sistema de refrigeración y de vacío, además se fabricaron unos filtros cuya función fue evitar el paso de las partículas y del metal fundido hacia la tubería, para lograr un sello eficiente se utilizaron unos aros de asbesto entre el tubo y el disco metálico, los cuales fueron sujetados por un sistema de presión con tornillos. El sistema y sus componentes se muestran en la fig. 12.



a.	Sistema de ajuste
b.	Cilindro de acero 1040
c.	Sello de asbesto
d.	Filtros de malla acero
e.	Disco de acero
f.	Codo conector

Figura 12. Componentes del molde para el sistema de infiltración asistido por vacio de preformas solubles.

Sistema de presión y enfriamiento

Tubería

Para garantizar el buen estado del equipo que genera la presión de vacío, se presento la necesidad de adaptar un sistema de refrigeración mediante una tubería contra el aire caliente formado en crisol, este sistema no adiciono variables sobre el procesado de las esponjas, pero si ayudo a mantener el buen estado de la bomba de vacío, además de servir como un sistema de seguridad contra el paso de aluminio fundido por si los filtros no hubieran funcionado.

Bomba de vacio

Debido a la poca mojabilidad del aluminio fundido sobre las partículas de sal [17], al proceso de infiltración se le asiste con presión externa, la cual fuerza al liquido a entrar en los intersticios dejados por la preforma.

El tipo de presión que asistió el proceso de infiltración en este estudio fue presión de vacío, dado que se utilizan valores de presión comparativamente más bajos que otros sistemas como se puede ver en la tabla 1.

Método	Presión ejercida
Presión externa con gas argón	0.5 MPa - 15.5 MPa
Presión positiva con aire puro	40.5 kPa
Presión de vacío	30-40 kPa

Tabla 1 Métodos de presión ejercida

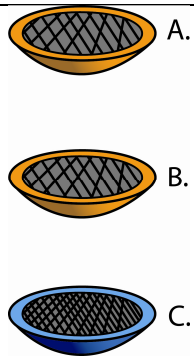
Para la selección del tipo de bomba de vacio se tuvo en cuenta tres parámetros de operación, la temperatura máxima de operación, el volumen a desplazar y la presión de vacio requerida, siendo esta ultima la de mayor importancia.

Para el presente estudio y debido a la disponibilidad de una bomba de vacio *PFEIFFER de paletas rotativas DUO 2.5* del laboratorio de materiales. Además de encontrar en la literatura ensayos de infiltración realizados en probetas de mayor tamaño con partículas de tamaño similar se opto por la utilización de esta bomba. Los cálculos de la presión utilizada en los ensayos de este trabajo se presentaran en el capítulo 4

Filtros:

Como explicamos anteriormente la función de los filtros es la de evitar el paso de partículas de sal de la preforma o de aluminio fundido, a la tubería del sistema de refrigeración y a la bomba de vacío, los filtros se colocaron en la parte inferior del crisol

y sobre el disco metálico que funciono como base para estos, los filtros además debieron cumplir con unas características de resistencia a la temperatura del proceso y a la corrosión, por lo tanto se decidió fabricar los filtros a partir de dos tipos de malla tejida de acero inoxidable, el primer filtro lo conforman dos laminas de malla 40 y el segundo un filtro de malla 100 en la parte inferior, en la fig., 13 se muestra los filtros y sus características.

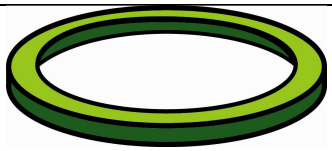


A. Filtro de acero malla 40
B. Filtro de acero malla 40
C. Filtro de acero malla 100

Figura 13. Filtros y sus características.

Sello

Pala evitar pérdidas de presión de vacío y lograr la máxima eficiencia de la inyección, se debe lograr que la unión entre la el tubo de acero (crisol) y el disco de acero (base) sea lo más ajustada posible, por lo tanto existió la necesidad de utilizar un sello que garantizara una unión sin fugas de presión, como el sello hace parte del sistema de infiltración, debe resistir alta presión, altas temperaturas y no debe reaccionar químicamente con la sal, ni con el aluminio. En el mercado existen sellos como grafoil, neopreno y sellos metálicos entre otros, pero se encontraron unos sellos en asbesto en forma de aro con las dimensiones del tubo (diámetro y espesor) que cumplió con las características mencionadas anteriormente haciendo un sello eficiente, con la desventaja de no ser reutilizable, pero con un precio muy económico en el mercado. Debido a la ventaja de forma que brinda rapidez en su instalación y bajo precio se opto por elegir el sello de asbesto que se muestra en la fig. 14.



Sello de asbesto

Figura 14. Sello de asbesto.

Válvula Reguladora: Las válvulas son dispositivos mecánicos para controlar, retener, regular, o dar paso a cualquier fluido entubado. En el presente caso por cuestiones de diseño, economía y practicidad, se optó por un control manual. Es así entonces, que se Integró a la bomba de vacío una válvula proporcional de control manual, concretamente una válvula de aguja la cual brinda el intervalo de variación de presión que se requiere mediante una manipulación sencilla.

Acople final del sistema Fig. 15.

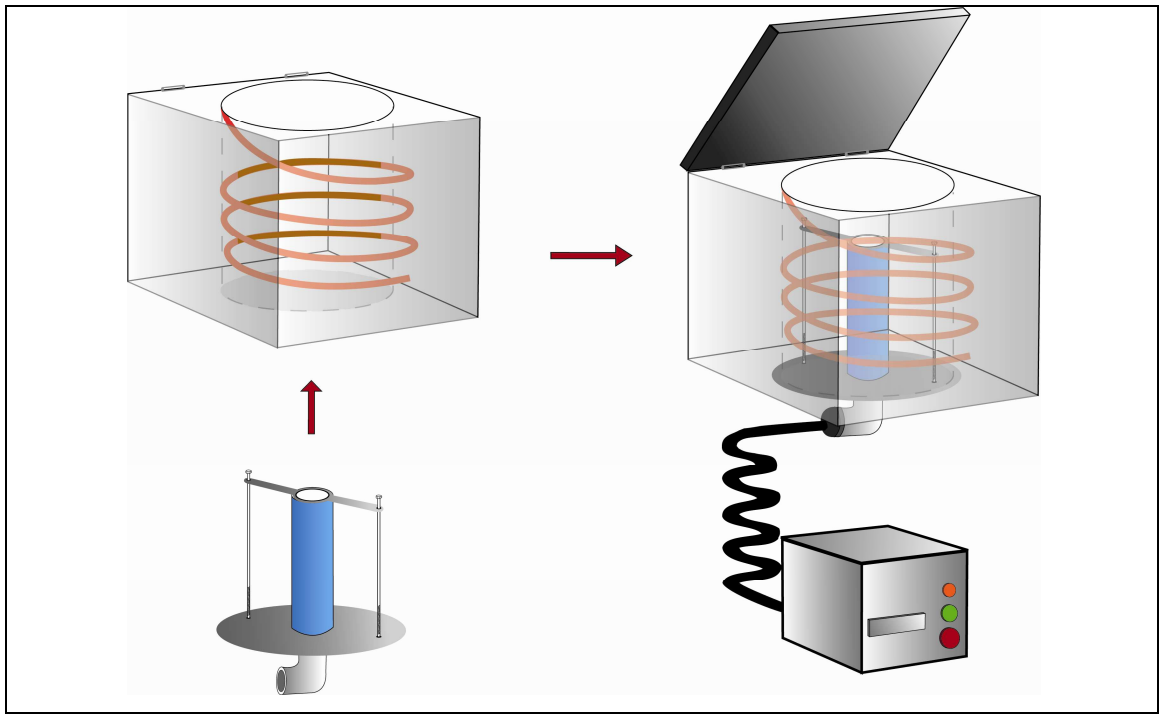


Figura 15. Diseño y acople entre los sistemas.

2.3 Selección y caracterización de materias primas

En la selección de materiales para la preforma se opto por una materia prima de bajo costo y fácil consecución como la sal común, que además de las características anteriores, permita la ejecución de un tratamiento térmico posterior para la modificación de su morfología. Para la materia prima de la matriz se utilizo una aleación de aluminio 6061, aunque el aluminio y sus aleación ya han sido de amplio estudio en diferentes partes, se opto por esta aleación en particular para comparar resultados con un estudio previo realizado en la universidad, Gómez, M., [4] y comparar las mejoras del proceso y resultados.

2.3.1 Materias primas

PREFORMA: Cloruro de sodio NaCl, (sal común)

Como nombramos anteriormente se utilizo cloruro de sodio o sal común para la fabricación de la preforma, la sal común como preforma para infiltración ya esta estudiada y patentada desde principios de 1960, como ya hemos enunciado esta materia prima es muy comercial, de bajo costo, no toxica y de fácil remoción en agua.

La morfología de las partículas de sal en la preforma, controlan la forma de los poros de la esponja, sabiendo esto y con el fin de lograr diferentes tipos de estructura porosa, se decidido explorar un proceso para dar una morfología más regular casi esférica a las partículas de sal, y ver esto cómo afecta las propiedades de la esponja, el proceso fue un tratamiento de calentamiento en el cual se fundió la sal y por goteo e impacto se lograron partículas casi esferoidales, después a través de un tamizado se caracterizo y eligió los tamaños de partícula para realizar el estudio

MATRIZ: aleación de aluminio

El aluminio ha llegado a ser en la actualidad el metal de mayor consumo dentro de los metales no férreos, posee buenas propiedades de conductividad térmica y eléctrica, bajo punto de fusión comparado a otros metales y buenas propiedades mecánicas en un estado aleado, estas propiedades sumadas a propiedades físicas importantes para este estudio como baja densidad (~2.7 gcm^3), una buena resistencia a la corrosión en la mayoría de los entornos naturales, la posibilidad de elegir aleaciones que permitan ser tratadas térmicamente para el aumento de propiedades mecánicas, especialmente cuando el peso es de especial importancia. Hicieron del aluminio un material óptimo para el uso en este estudio.

2.3.2 Caracterización de las materias primas y resultados

Aleación de aluminio: el aluminio seleccionado para este estudio es una aleación aluminio-silicio ALSI 6061, el silicio en un intervalo entre el 5 y el 12% 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.

Tabla 2 Composición en peso de la aleación de aluminio 6061 empleada como matriz en las esponjas.

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

Cloruro de sodio (sal común):

Aunque la sal como material para la preforma ya ha sido utilizada, la mayoría a utilizado cloruro de sodio de alta pureza, para este estudio se utilizo sal común, con el pretratamiento para el cambio de morfología que se explica seguidamente. Se calentó cierta cantidad regulada de sal común en un crisol, con un soplete de oxiacetileno en un rango de temperatura alrededor de 900 ºC hasta lograr la fusión del material lo cual tardaba entre 20-30 seg. Como muestra la fig. 16.

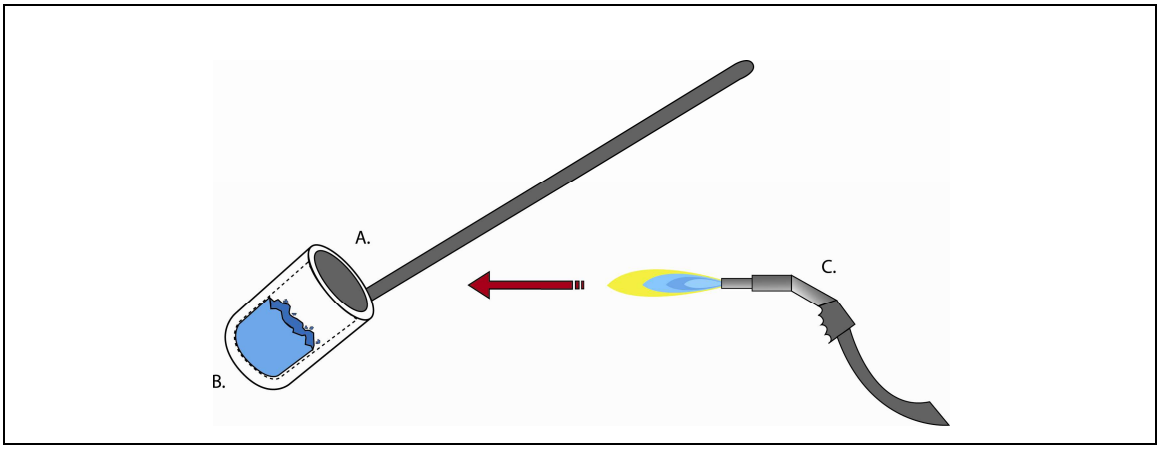


Figura 16. Fusión de la sal común.

Posteriormente se dejaba gotear sobre unas láminas de acero inoxidable desde una altura de entre 20 a 30 cm fig. 15, logrando con el impacto y el enfriamiento al aire, conseguir partículas con una morfología más regular casi esférica que se muestra en la Fig. 17.

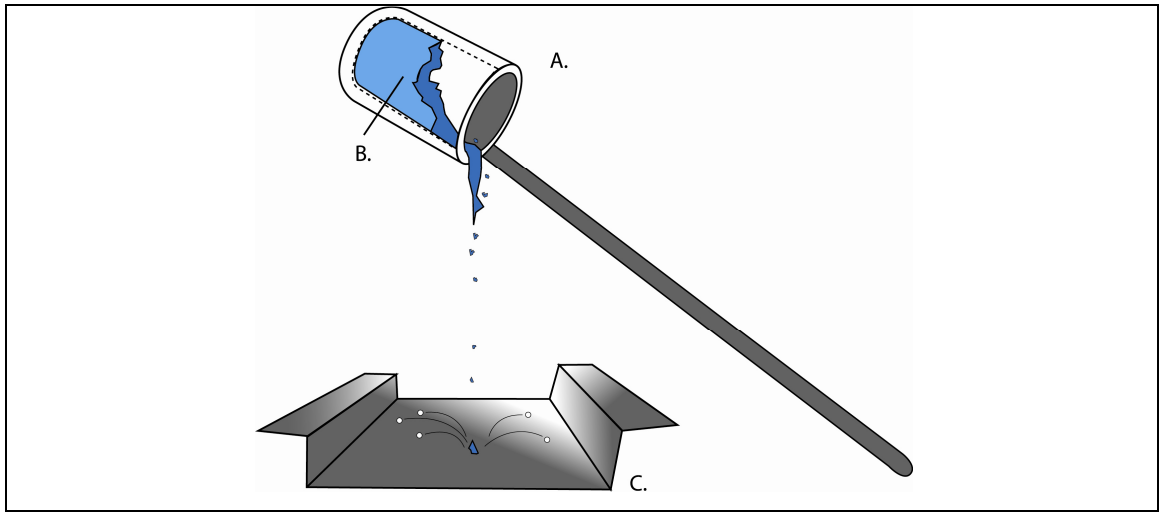


Figura 17. Disposición de la sal fundida para lograr las partículas más regulares

Posteriormente a las partículas de sal se les hizo un análisis granulométrico a fin de determinar los de tamaños de partícula a usar para la fabricación de las esponjas. Se realizó un tamizado en un equipo *Ro-Tap testing shaker*, los tamices son de acero inoxidable con un diámetro de disco de 200 mm. Para cada análisis, se utilizó un peso base de muestra de 500 g, que fue sometido a movimiento periódico, tanto vertical como horizontal durante 15 min. En la tabla 3. Se listan los datos del tipo de malla, el tamaño de abertura correspondiente al tamiz y el intervalo de tamaño de grano retenido.

Tabla 3 Serie de tamices utilizados para el análisis granulométrico de la sal

Nº malla	Tamaño abertura del tamiz	Tamaño de grano Retenido
6	3,35 mm	>3,35
8	2,36 mm	2,36 - 3,35 mm
10	2,00 mm	2 - 2,36 mm
12	1,68 mm	1,68 - 2,00 mm
14	1.40 mm	1.40 mm - 1,68 mm
16	1,18 mm	1,18 - 1.40 mm
20	0,85 mm	0,85 - 1,18 mm
30	0.60 mm	0.60 – 0.85 mm
40	0.43 mm	0.43 – 0.60 mm

Microscopia óptica: Para la observación de las partículas de sal, se utilizó un estereomicroscopio *Micrometrics*, se obtuvo información acerca del tamaño promedio de partícula y morfología para cada uno de los tipos de sal analizados.

Microscopia de barrido electrónico (SEM): Mediante un microscopio marca *JEOL JSM-6490LV*, se realizó el análisis químico, morfológico y de tamaño promedio de las partículas de NaCl. En la fig. 18. Puede observarse las imágenes obtenidas por *SEM*, para las partículas tamaño 14-16 (1.25 mm) en promedio. La tabla 4. Ilustra la composición química obtenida por EDS para cada una de las muestras mencionadas.

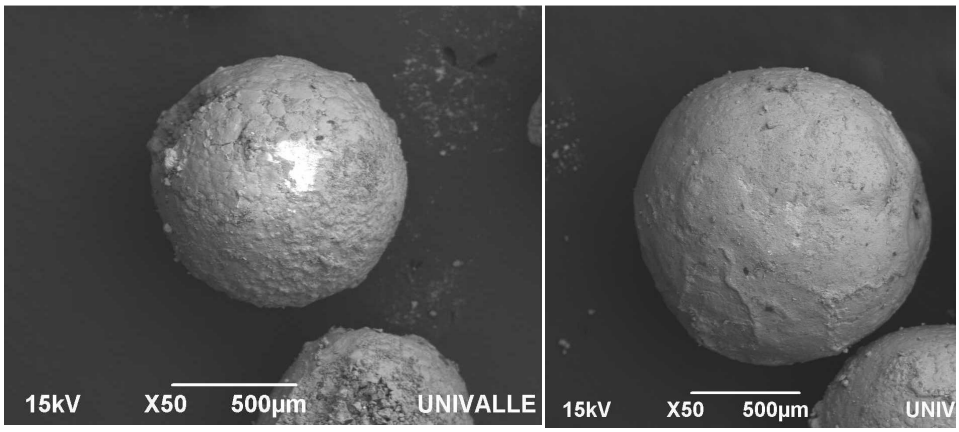
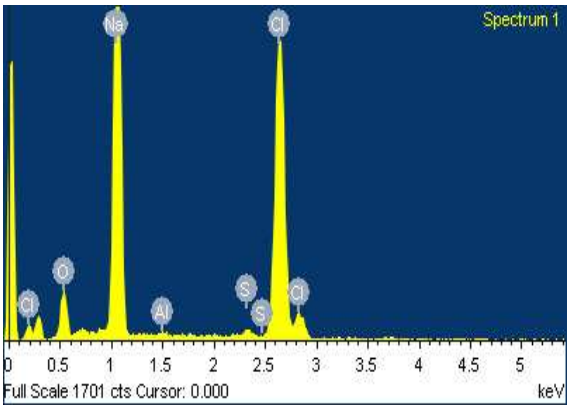


Figura 18. Imagen SEM de la de partículas de tamaño 1.25 de NaCl.

Tabla 4 Composición química puntual de muestras de sal obtenida por EDS, con su Correspondiente espectro



Elemento	Peso %	Atómico %
O	16.23	25.59
Na	38.05	41.75
Al	0.40	0.37
S	0.58	0.46
Cl	44.73	31.82
Total	100.00	

2.4 Procesamiento de las esponjas mediante IPS

Las esponjas metálicas, que son metales celulares de porosidad abierta, pueden ser obtenidas por métodos de sinterización de polvos o mediante infiltración de metal liquido en preformas poliméricas, cerámicas, entre otras. Este último proceso fue el

proceso implementado para este estudio, y al usar una materia prima como NaCl para la preforma la cual es soluble, denominamos al proceso infiltración de preformas removibles o solubles IPS. El cual consiste básicamente en tres pasos (como ya explicamos anteriormente a la sal se le hizo un pretratamiento para mejorar la morfología, pero este paso no cuenta dentro del proceso IPS.) en la fig. 19 se muestra un esquema para el proceso IPS asistido por vacio como se realizo en este estudio.

1. ***Preparación de la preforma:*** la materia prima será el NaCl, las partículas deben estar en contacto.

2. ***Infiltración:*** del metal líquido que conformara la matriz de la esponja metálica.

3. ***Disolución:*** de la preforma después de la infiltración y enfriamiento de la pieza, la disolución debe ser en un solvente y bajo condiciones apropiadas para garantizar una buena remoción.

2.4.1. Implementación del proceso IPS asistido por presión de vacío

El proceso IPS asistido por vacio es una variación del proceso de infiltración bajo la influencia de la gravedad, la cual en ocasiones es preferida ya que no requiere equipos o procedimientos especiales, sin embargo en muchos casos el metal no moja el modelo completamente por lo cual debe aplicarse alguna fuerza adicional para promover la infiltración uniforme, y más aun cuando se van a utilizar partículas de hasta 600 micras de diámetro. Además con el objetivo de continuar la mejora en el estudio de las técnicas de IPS y habiendo un estudio preliminar de infiltración por gravedad se decidió asistirlo por vacio.

Preparación de la preforma

Se siguieron los siguientes pasos parta la preparación de la preforma de NaCl.

1. **Tamizado y pesado de la sal:** Se tamizo la sal como previamente se explico y se eligieron tres tamaños de partícula promedio a utilizar los cuales se nombran de aquí en adelante como muestran en la tabla 5, de cada tamaño se pesaron 200 gr. a utilizar en el proceso.

Tabla 5. Tamaños de partícula seleccionados para el estudio

Nombre a utilizar	Tamaño promedio de partícula.
R 10-12	2.00 mm
R 14-16	1.25 mm
R 20-30	0.75 mm

2. **Preparación del molde:** consiste en recubrir el cilindro metálico con una capa de algún elemento o compuesto que facilitara el posterior desmolde de la esponja una vez infiltrada y enfriada. En la literatura es común el uso de pinturas refractarias o polvos de grafito, para el presente trabajo se utilizaron estas últimas como agente desmoldante.

3. **Tratamiento térmico de la sal:** la sal debido a su alta higroscopia antes de colocarse en el molde, se le hizo un secado previo a 200 ºC durante 30 minutos para remover la humedad, fuera de este secado la sal al depositarse en el molde metálico para formar la preforma se le debe calentar a una temperatura más elevada para controlar el choque térmico con el metal fundido a depositar y para garantizar que el metal no se enfrié tan rápido, pierda fluidez y no permita el llenado total de la preforma. Para saber cuál es el valor de la temperatura y tiempo de calentamiento de la sal en el molde, se probaron varias condiciones de ambas variables a una misma temperatura del metal fundido para la infiltración y bajo una presión de 35.2 Kpa, donde la regla para considerar optimo el tratamiento fue la calidad de la esponja infiltrada, la condición que presento mejores resultados fue la #4. a continuación se describen todas las condiciones a las que se trato térmicamente la preforma antes de la infiltración.

    - Condición 1: preforma 750 ºC sostenido por 15 minutos
    - Condición 2: preforma 725 ºC sostenido por 15 minutos
    - Condición 3: preforma 700 ºC sostenido por 15 minutos
    - Condición 4: preforma 680 ºC sostenido por 15 minutos
    - Condición 5: preforma 650 ºC sostenido por 15 minutos

Infiltración

Para la infiltración del aluminio se utilizaron los sistemas de calentamiento y presión, los cuales se explicaron en detalle anteriormente, cuyas funciones principales fueron las de calentar la preforma en el molde y asistir la infiltración del metal a través de presión de vacío, el proceso utilizado fue el mismo para cada tamaño de partícula en las preformas empleadas para los ensayos, a continuación enumeramos los pasos para lograr la infiltración y en la fig. 19 ilustramos la secuencia total del proceso IPS asistido por vacio.

1. Preforma de sal
2. Calentamiento de la preforma y fusión del metal en horno separados
3. Vaciado del aluminio y presión de vacio
4. Enfriamiento y desmolde

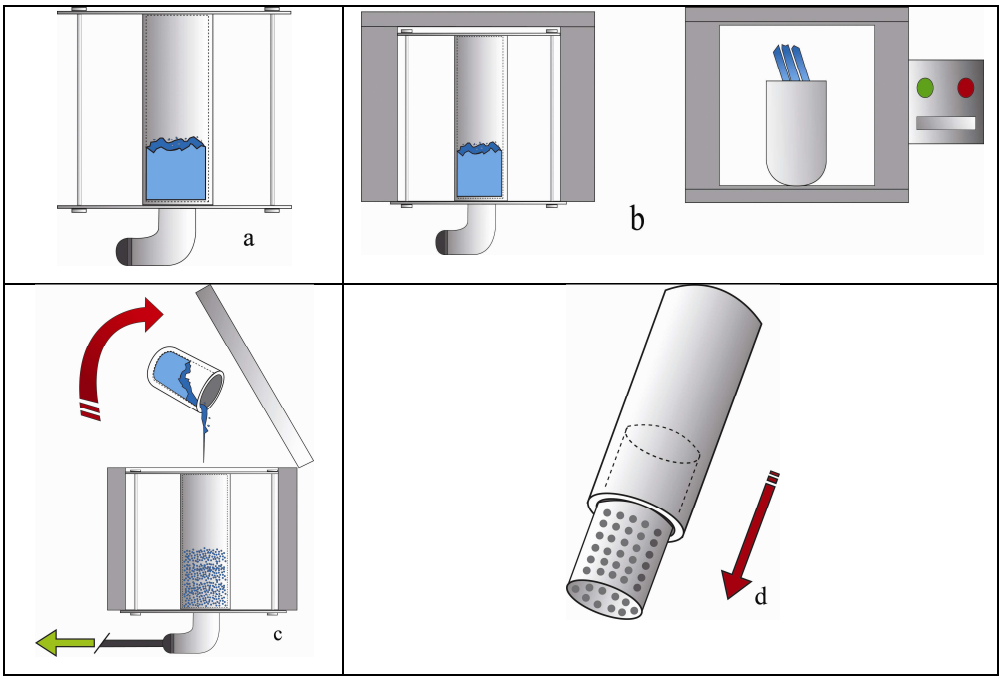


Figura 19. Secuencia del proceso de IPS asistido por vacío. a) Preforma de sal dentro del molde, b) calentamiento de la preforma y fusión del aluminio, c) vaciado del aluminio y presión de vacío, d) enfriamiento y desmolde

Remoción de la preforma

Antes de la remoción de la preforma por solubilización, las piezas fundidas fueron maquinadas mediante técnicas convencionales, tales como fresado, torneado, corte con disco, entre otras llevadas a cabo en el taller de mecánica y el laboratorio de materiales de la universidad del valle. La principal precaución durante estos procesos era que la sal debía permanece durante el maquinado para evitar el daño de la estructura porosa, por

lo tanto todas las operaciones de mecanizado debían realizarse sin ningún tipo de lubricante que pudiera disolver la sal. Se maquinaron probetas designadas para los diferentes ensayos de caracterización, y luego se sometieron a la remoción de la preforma mediante disolución en agua, la cual se realizo en el último paso para revelar la estructura de las esponjas.

Para obtener una óptima extracción de la sal y así obtener resultados más exactos en pruebas como la densidad sin esta fuente de error y evitar otras posibles consecuencias que una inapropiada extracción pueda traer, se utilizo el siguiente procedimiento basado en algunas técnicas de la literatura.

1. Se tomaron 500 ml de agua destilada y se tomo la medida de la conductividad eléctrica de referencia.
2. Se agito la probeta con un sistema de agitación por 1 hora y se midió la conductividad eléctrica.
3. Se cambia el agua y se repite el paso anterior hasta lograr una conductividad igual o bastante cercana a la de referencia (se realizaron alrededor de 4 cambios de agua).
4. Finalmente se coloco la probeta en un baño ultrasónico con agua destilada por 15 minutos, midiendo la conductividad eléctrica, este paso se realizo 2 veces.

2.5 Selección de variables mediante ensayos preliminares

Ya diseñado el equipo y puesto en marcha, se debían determinar las valores de las variables de control que son la temperatura y la presión de trabajo para posteriormente implementarlas al procesamiento de las esponjas, esto se logro a través de la literatura y mediante varios ensayos preliminares, hasta lograr una adecuada selección de las variables.

2.5.1 Selección de la temperatura

La temperatura fue una de las variables a controlar y que además se aplicaba en dos equipos diferentes, uno para la fundición de la aleación de aluminio y en otro para el calentamiento de la preforma, en el primer equipo nos basamos en la literatura [10], y

utilizamos una temperatura de 700 ºC sostenido por 20 min, que asegura que la cantidad de aleación de aluminio va a estar completamente fundido, la otra temperatura como lo explicamos en la sección anterior era para el tratamiento térmico de la sal evitando así el choque térmico y garantizando que el metal se mantuviera fluido el tiempo necesario de la infiltración, para lograr esta condición se hicieron unas pruebas en varias condiciones detalladas anteriormente y la que cumplió mejor el requerimiento fue la temperatura de 680 ºC sostenido por 15 minutos, obteniéndose una probeta sin defectos de llenado.

2.5.2 Selección de la presión de infiltración

Debido a la poca mojabilidad entre el aluminio y la sal descrita en la literatura [12], la selección de la presión para la infiltración es otra condición que debía ser controlada para lograr un buen llenado de la pieza. Basados en la ecuación de Garcia-Cordovilla que indica la presión crítica P_0 que debe ser aplicada al metal líquido para iniciar la infiltración de la preforma basada en el análisis de la infiltración de aluminio en partículas cerámicas como una función de las características de la preforma:

$$P_0 = 16 \frac{f}{(1-f)D} - 0.09\ (\text{Mpa}) \qquad \text{Garcia-Cordovilla}$$

Donde: f es la densidad relativa de la preforma (adimensional) y D corresponde al diámetro de la partícula en um. El resultado de esta ecuación fue de 55.6 Kpa. Donde cabe resaltar que faltan varios valores a tener en cuenta para hallar una presión de infiltración más exacta, basados en lo anterior y con la disposición de la bomba de vacío de paletas rotativas, se utilizo la presión en su mayor valor el cual fue de 35.2 Kpa para los ensayos modificando solo la temperatura a la cual se llevo la preforma como se explico anteriormente.

Capítulo 3

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA LA CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LAS ESPONJAS DE ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061 OBTENIDAS POR IPS

3.1 Métodos de caracterización morfológica y microestructural

En el presente capítulo, se describen las diferentes pruebas y metodologías empleadas para la caracterización morfológica, microestructural, del comportamiento mecánico y de las propiedades físicas de las esponjas de aleación de aluminio obtenidas mediante IPS.

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:

i) Se pesó la muestra de esponja metálica para determinar su masa *m* (g)

ii) Para determinar el volumen *V* (cm^3), fueron medidas las dimensiones externas de las probetas. En este caso, se utilizaron todas las probetas cilíndricas destinadas para los ensayos de compresión.

iii) Se calculo la densidad de la esponja ρ_s (gcm^3) mediante la división de la masa por el volumen según la ecuación 1.

$$\rho_s = V / m \ \ (gcm^3) \qquad (1)$$

iv) 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).

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

v) 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.

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

3.1.2 Análisis morfológico

Mediante el análisis morfológico se determina la conformación estructural a nivel macro del material bajo estudio. En el caso de los metales celulares, este tipo de análisis resulta bastante interesante por cuanto se establece como está constituida la esponja con respecto a la forma, el tamaño y la distribución de los poros. Existen diversas técnicas para el análisis morfológico, para éste caso se consideró clave el uso de varias técnicas de microscopia, como se describe a continuación.

- *Microscopía óptica:* Para determinar algunos aspectos inherentes a la morfología de las celdas, tales como su distribución, tamaño e interconectividad, se utilizo un microscopio óptico marca Olympus, modelo U-CTR-30-2 y un estereomicroscopio *Micrometrics.*

- *Microscopia de barrido electrónico (SEM):* Mediante un microscopio marca *JEOL JSM-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

- *Espectroscopia de difracción de rayos X:* De manera complementaria, y con el fin de determinar la distribución de los elementos de aleación en las esponjas de aluminio

obtenidas y la posible presencia de elementos asociados con la preforma (NaCl), 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: 18 muestras fueron embebidas en una resina liquida de poliéster, la cual evitara el daño de la probeta y ayudara para el proceso de pulido. 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 y 1500
- Pulido intermedio en paño con partículas de alúmina de 1.0 um a baja velocidad
- Pulido final en paño con partículas de alúmina de 0.3 um a alta velocidad

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

3.1.5 Tratamiento térmico

Para la aleación de aluminio 6061 utilizada en este estudio basada en Al-Si, se recomienda un tratamiento térmico de envejecimiento artificial a través del cual se espera el endurecimiento por precipitación de siliciuro de magnesio y también otros cambio microestructurales.
Para realizar el tratamiento térmico por envejecimiento T6 para el presente estudio se eligieron 3 probetas por cada tamaño de partícula estudiado *R10-12, R14-16, R20-30*, las cuales fueron sometidas a las siguientes condiciones:

1. *Tratamiento de solubilización: 540ºC –por 1 hora*
2. *Tratamiento de enfriamiento: Templadas en agua*
3. *Envejecimiento artificial: 175 ºC -por 4 horas y templadas en agua*

Las probetas a las que se realizo este tratamiento se les comparo la microestructura, las propiedades mecánicas a la compresión y la microdureza para verificar la influencia del tratamiento T6.

3.2 Métodos de caracterización de propiedades mecánicas

Debido al corto tiempo de aparición de las espumas metálicas, no existen normas especificas para llevar a cabo los ensayos mecánicos, sin embargo es de aclarar que los equipos utilizados para los ensayos mecánicos son los mismos equipos convencionales utilizados para los materiales sólidos, por lo tanto se tuvieron en cuenta unas recomendaciones del libro del Ashby *"Metal foams: A design guide"* [1], para la elaboración de las probetas y la realización de los ensayos de compresión, entre las cuales están que las dimensiones de las probetas deben ser al menos siete veces mayor al tamaño de los poros de la esponja y la relación la altura y el diámetro mayor o igual a 1.5

3.2.1 Prueba de compresión uniaxial

Las probetas para el ensayo de compresión fueron obtenidas a través de maquinado en torno y corte con disco de las probetas infiltradas. Las dimensiones de las probetas fueron las siguientes:

Dimensiones de las probetas: 18mm de diámetro x 28 mm de longitud
Los ensayos de compresión fueron llevados a cabo en una maquina universal de ensayos *Tinius Olsen* con una velocidad de cabezal constante de 1,5mm/min, en la fig. 20, Se muestra la disposición de la probeta durante la realización del ensayo.



Figura 20. Disposición de la probeta durante la realización del ensayo de compresión.

3.2.2 Prueba de microdureza Vickers

Para esta prueba se seleccionaron 3 probetas de cada tamaño de partícula, con y sin tratamiento térmico para un total de 18 probetas, se realizaron un total de 10 indentaciones por cada muestra utilizando una carga de 100 gr.

El equipo utilizado fue un microdurómetro *Wilson instruments 401 MV* el cual se muestra en la fig. 21.

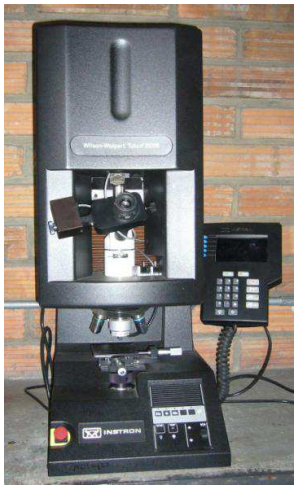


Figura 21. Microdurómetro

Capítulo 4.

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE PROPIEDADES DE LAS ESPONJAS DE ALEACIÓN 6061 OBTENIDAS POR IPS

En éste capítulo se muestran los resultados obtenidos en las diferentes pruebas llevadas a cabo para la caracterización y la evaluación de las esponjas de la aleación de aluminio 6061, pero en el siguiente capítulo de análisis de resultados se discutirán y contrastaran con resultados de otros autores.

4.1 Resultados de las pruebas de morfología y metalografía

4.1.1 Densitometría

La densidad relativa ρ_r encontrada para las esponjas de aluminio se encontró en un intervalo de 0.31 – 0.36, la densidad relativa promedio fue de 0.32 en la tabla 6. Se muestra la densidad promedio y porosidad por cada tamaño de partícula.

Tabla 6- Densidad promedio y porosidad por cada tamaño de partícula

Muestra	Densidad relativa	Porosidad %	Densidad gr/cm^3
R10-12	0,31	68,72	0,84
R14-16	0,34	65,85	0,92
R20-30	0,35	64,99	0,96
promedio	0,32	67,59	0,90

4.1.2 Morfología macroestructural de las esponjas de aluminio.

Mediante la observación directa en el esteromicroscopio, las esponjas de aluminio mostraron regularidad en la forma de los poros, las cuales se distribuyeron

uniformemente en la matriz metálica. En la fig. 22 se muestra la macroestrura para tres esponjas dependiendo del tamaño de poro.

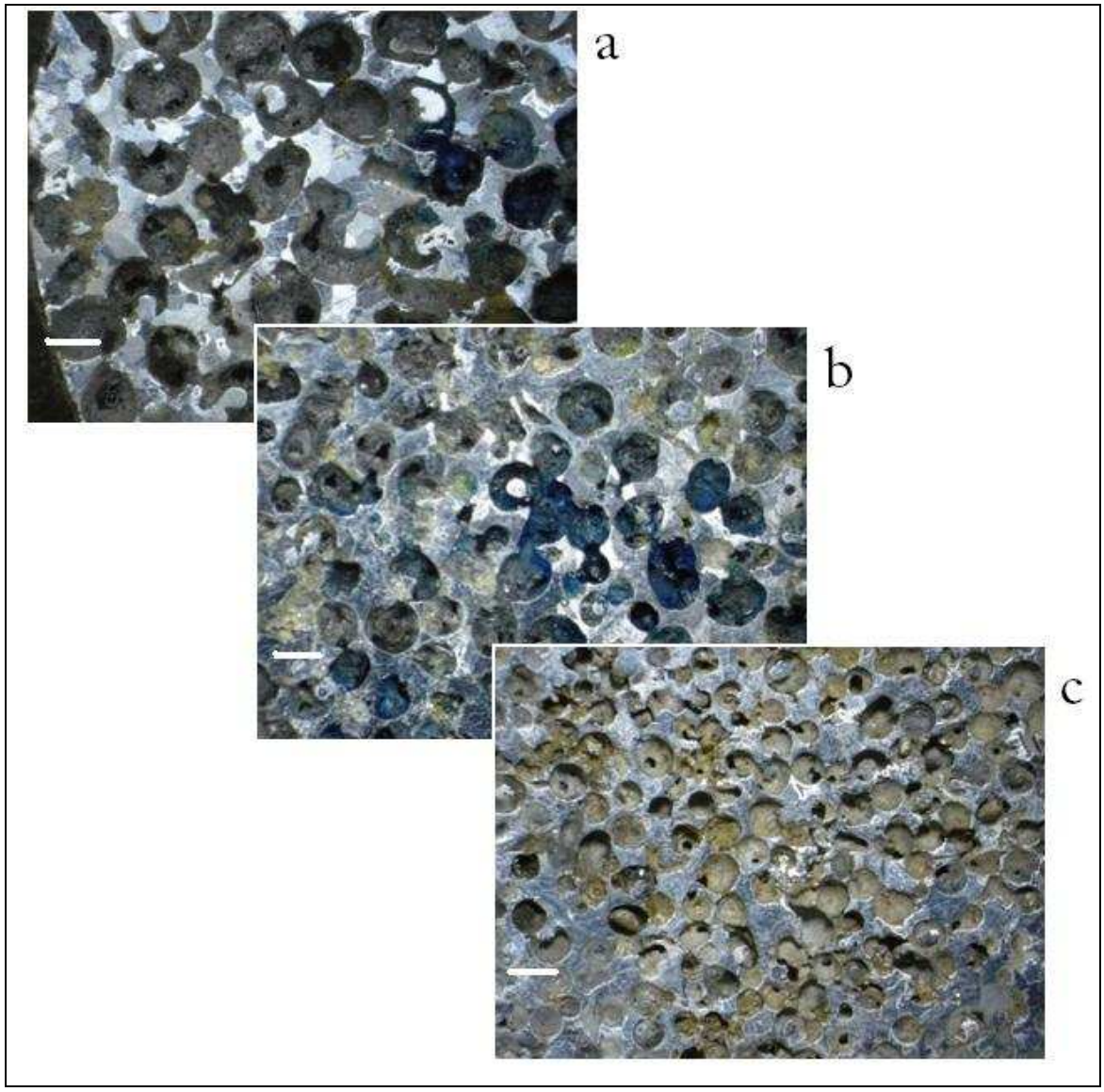
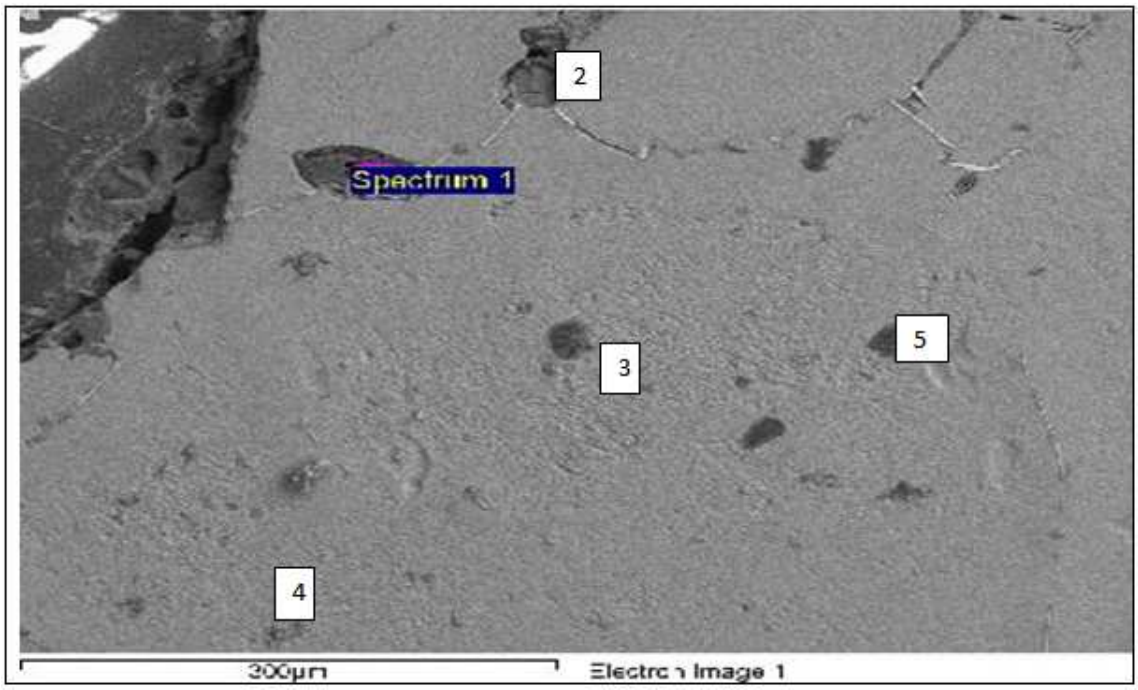


Figura 22. Macroestructura vista al estereomicroscopio para tres esponjas dependiendo del tamaño de poro, escala 2 mm. a) R10-12, b) R14-16, c) R20-30.

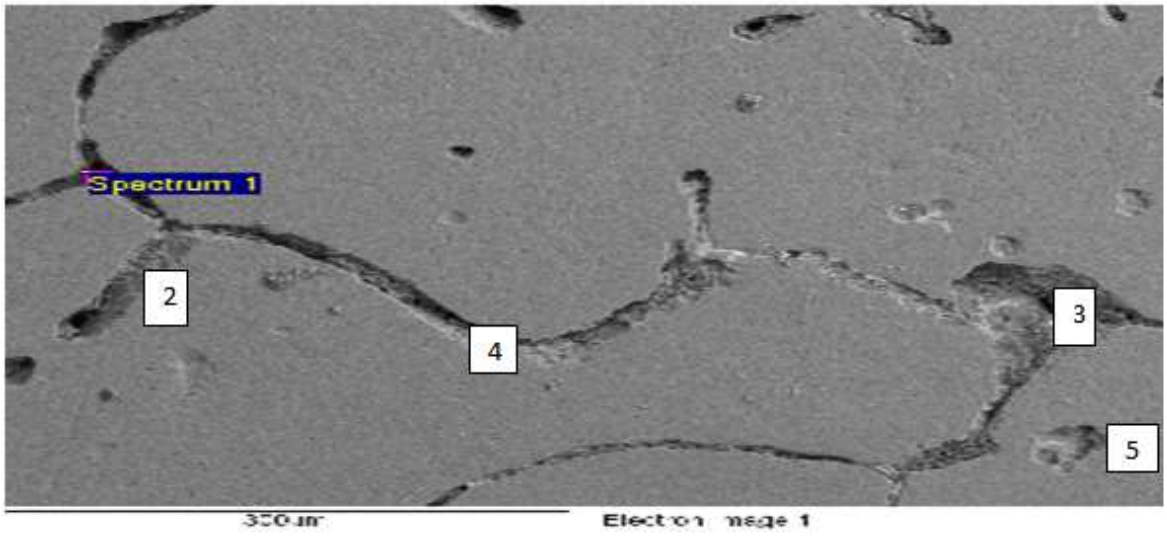
4.1.3 Composición química puntual de las esponjas

Espectroscopia de difracción de rayos X EDS: En la fig. 23 y 24. Se muestran los resultados obtenidos para las esponjas, en estado fundido y tratadas térmicamente.



Puntos	1	2	3	4	5
ELEMENTO	peso	peso	peso	peso	peso
O	53.71	54.71	22.34	16,69	14,88
Na	1.42	0.42	0,39	12,56	38,26
Al	50.94	50.96	75,80	68,58	46,86
Si	5.45	4.45	-	1,16	-
Cl	0.79	1.79	-	-	-
Cr	3.70	3.70	-	-	-
Mg	-	-	1,08	-	-
total	100.	100.	100.	100.	100.

Figura 23. EDX para las espumas de aluminio 6061 en estado fundido.



puntos	1	2	3	4	5
ELEMENTO	peso	peso	peso	peso	peso
O	53,71	55,45	42,90	3.34	3,39
Na	1,42	1,38	6,28		
Al	34,94	35,79	33,91	96.66	96,51
Si	5,45	2,35	4,70		-
Cl	0,79	1,32	9,95	-	-
Cr	3’70	0,73	-	-	-
Mg	-	3,97	-	-	-
Ca			1,50		
	100.	100.	100.	100.	100.

Figura 24. EDX para las espumas de aluminio 6061 tratadas térmicamente.

4.1.2 Análisis metalográfico.

Se realizaron fotomicrografías ha aumentos de 50X, 100X, 200X y 500X para la observación de los microconstituyentes presentes en las esponjas sin tratamiento térmico (ST) y tratadas térmicamente (TT). Se seleccionaron las fotos más representativas que son las mostradas en las figs. 27 a 32. En la Fig. 25 se explica cómo es la formación de los microconstituyentes basados en el diagrama AlSiMg y en la Fig. 26 se explica la formación de cambios según la curva de calentamiento que se realizo para el tratamiento térmico T6 y en la tabla 7 se listan los microconstituyentes que se relacionaran en las microfotografías.

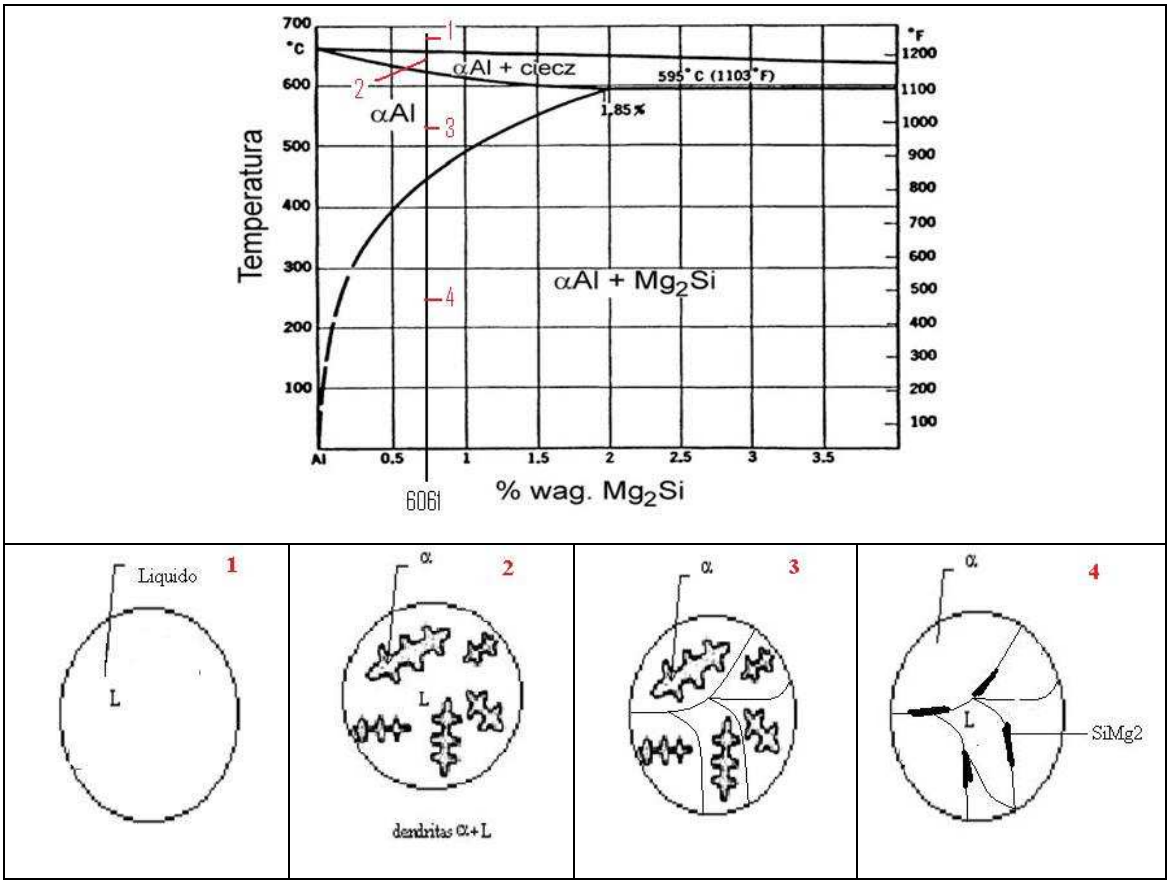


Figura 25. Diagrama AlMgSi

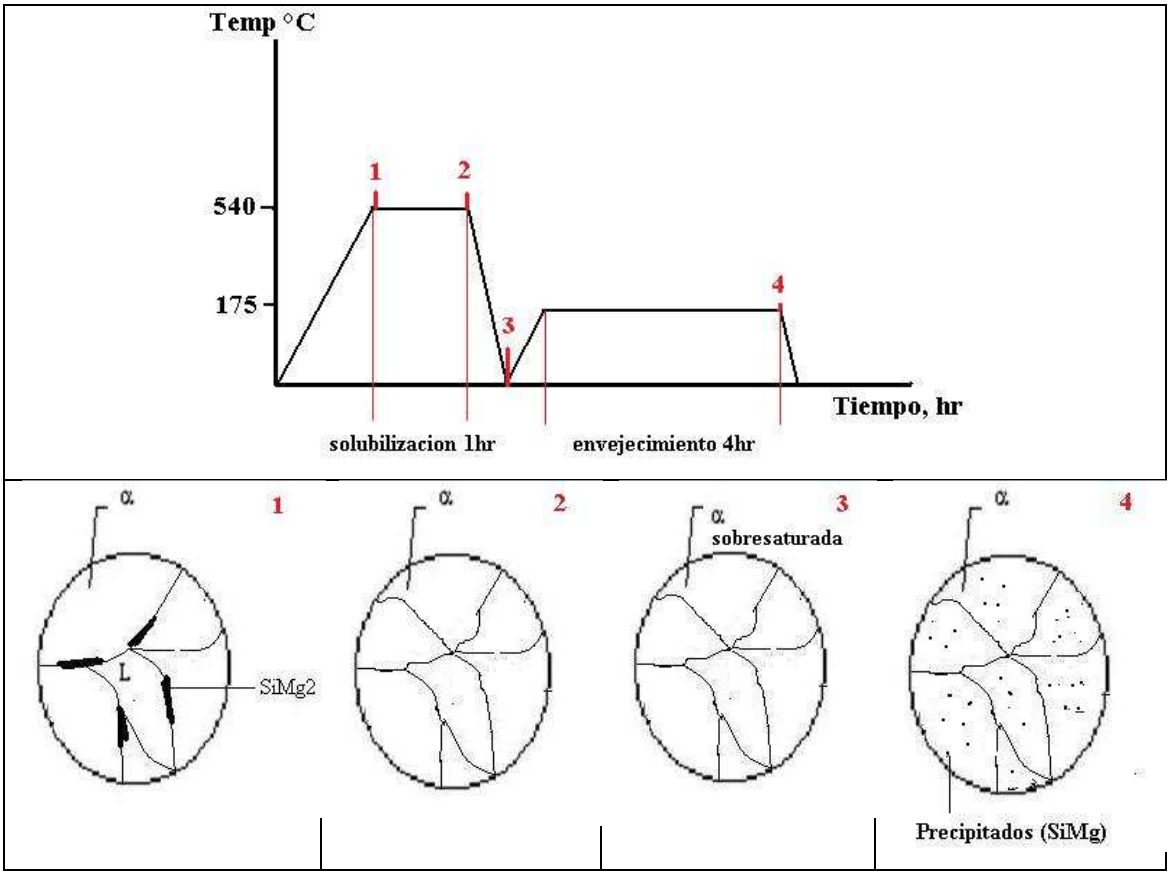


Figura 26. Curva del tratamiento térmico de envejecimiento T6 realizado a las esponjas de aluminio.

Tabla 7. Identificación metalografía de las fases de las esponjas

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

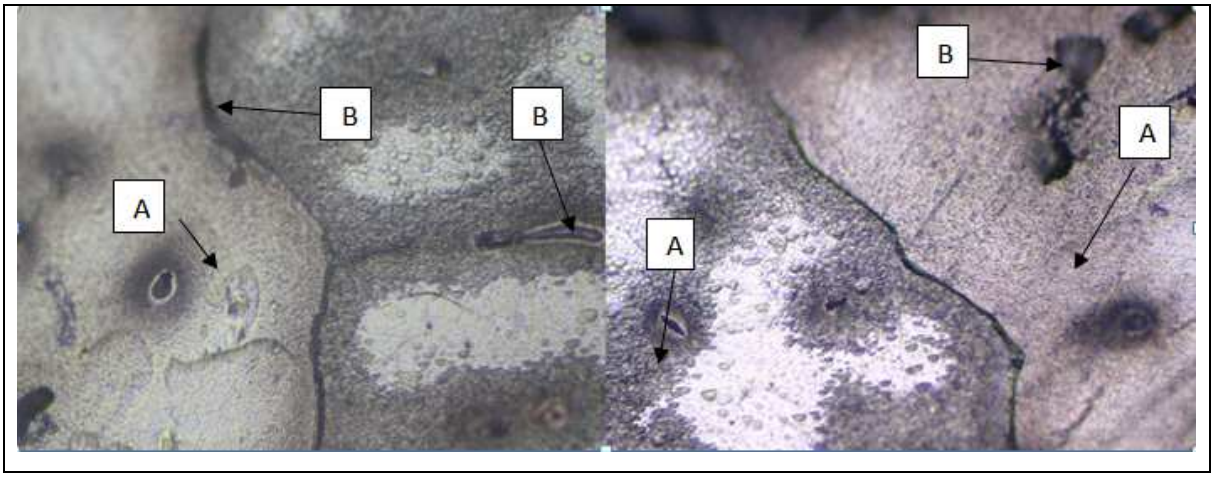


Figura 27. Microestructuras probetas R10-12 (200x-500x) atacadas químicamente sin tratamiento térmico

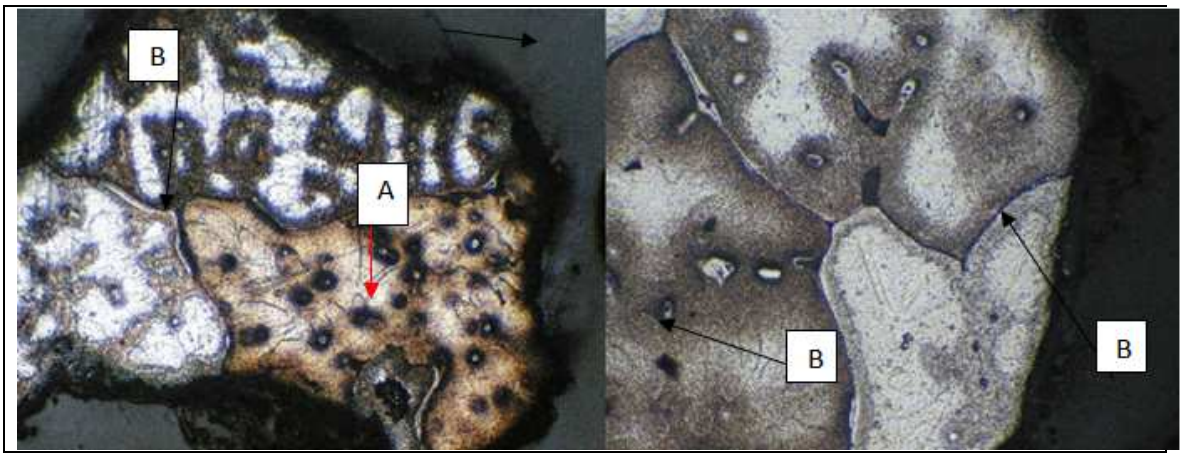


Figura 28. Microestructuras probetas R1416 ST a (200x-500x) atacadas químicamente sin tratamiento térmico.

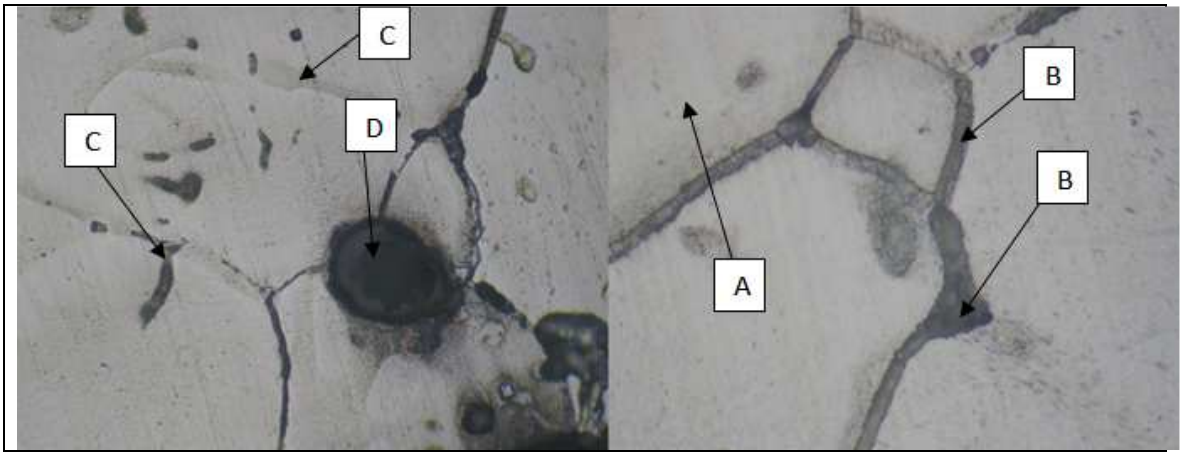


Figura 29. Microestructura probetas R2030 ST a (200x-500x) atacadas químicamente sin tratamiento térmico

Análisis Esponjas Fundidas o (sin TT):

Se observa granos derivados de una estructura dendrítica de solución solida alfa que evidencia segregación (vista como manchas oscuras), También en los bordes de grano se encuentran microconstituyentes de siliciuro de magnesio Mg_2Si de color grisáceo oscuro.

El Silicio libre se encuentra muy poco en las micrografías esto es debido a que la composición química de la aleación posee muy poco de este elemento y por lo general está en forma de Mg_2Si, también se encuentran inclusiones de hierro $Fe_2Si_2Al_9$ en formas de esqueletos oscuros, estas provienen de contacto de los instrumentos con el metal fundido, como cuchara para desescoriar, molde para la infiltración.

Tratamiento térmico.

El tratamiento térmico T6 para las probetas *R1012-R1416-R2030* que se uso en nuestro proyecto mostro cambios en lo microestructural y de resistencia mecánica en comparación con el material primario.

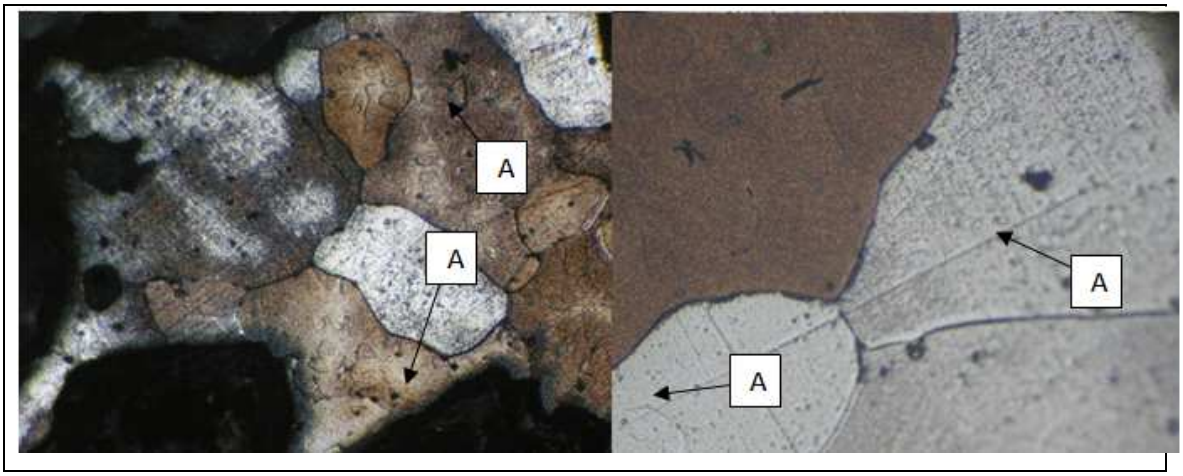


Figura 30. Microestructuras probetas R1012 TT a (200x-500x) atacadas químicamente con tratamiento térmico

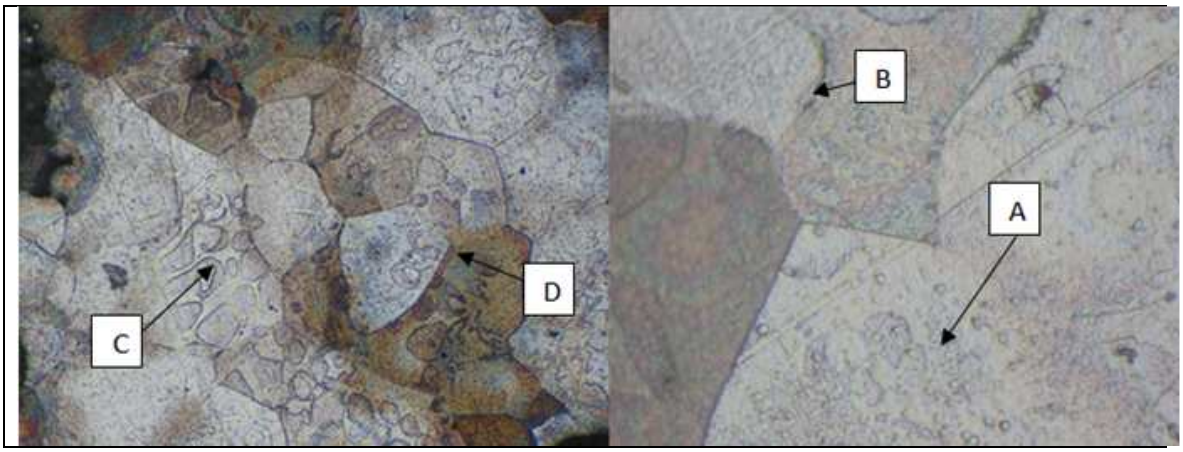


Figura 31. Microestructuras probetas R1416 TT a (200x-500x) atacadas químicamente con tratamiento térmico.

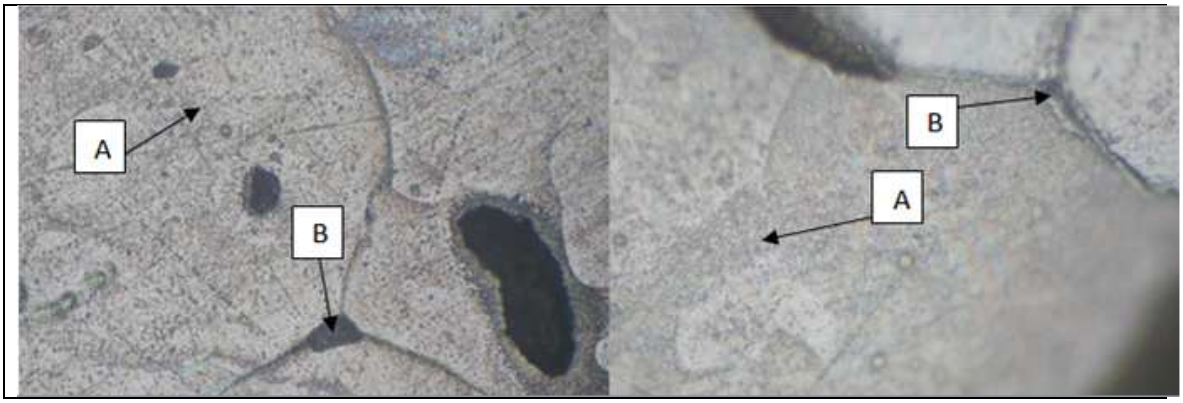


Figura 32. Microestructuras probetas R2030 TT a (200x-500x) atacadas químicamente con tratamiento térmico.

ANALISIS TRATAMIENTO TERMICO

La microestructura muestra una solución solida en cuyo interior se deben encontrar precipitados típicos de la zona de (Guinnier-Preston) los que no son visibles bajo microscopio óptica, ni microscopia electrónica de Barrido. Los granos muestran una variación de tonalidad ocasionada por la orientación cristalográfica. Aun sigue

apareciendo siliciuro de magnesio en menores cantidades en las muestras *R20-30,* esto puede deberse a una baja temperatura de solubilización, poco tiempo de sostenimiento o una velocidad de enfriamiento no muy drástica.

4.2 Resultados de las pruebas mecánicas

4.2.1 Respuesta mecánica bajo carga de compresión uniaxial

La respuesta mecánica a la compresión de las esponjas de aluminio fabricadas mediante IPS fue determinada mediante el análisis cuidadoso de las graficas resultantes, los datos obtenidos se registran en la tabla 8., en la fig. 33 se muestran las curvas obtenidas para cada conjunto de probetas correspondiente a los diferentes tamaños de partícula y la influencia del tratamiento térmico en sus propiedades. En general puede indicarse que durante la compresión de las muestras se observo 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.

Tabla 8 Datos obtenidos en el ensayo de compresión uniaxial

Muestra	Tamaño de poro	Resistencia a la compresión (MPa)	Modulo de Young (MPa)
R10-12 ST	2.0 mm	7,8130	430,259
R10-12 TT	2.0 mm	16,001	559,912
R14-16 ST	1.2 mm	7,8552	427,711
R14-16 TT	1.2 mm	19,8692	707,931
R20-30 ST	0.7 mm	9,8318	511,4039
R20-30 TT	0.7 mm	11,4269	633,9931
Desviación estándar		1.9275	

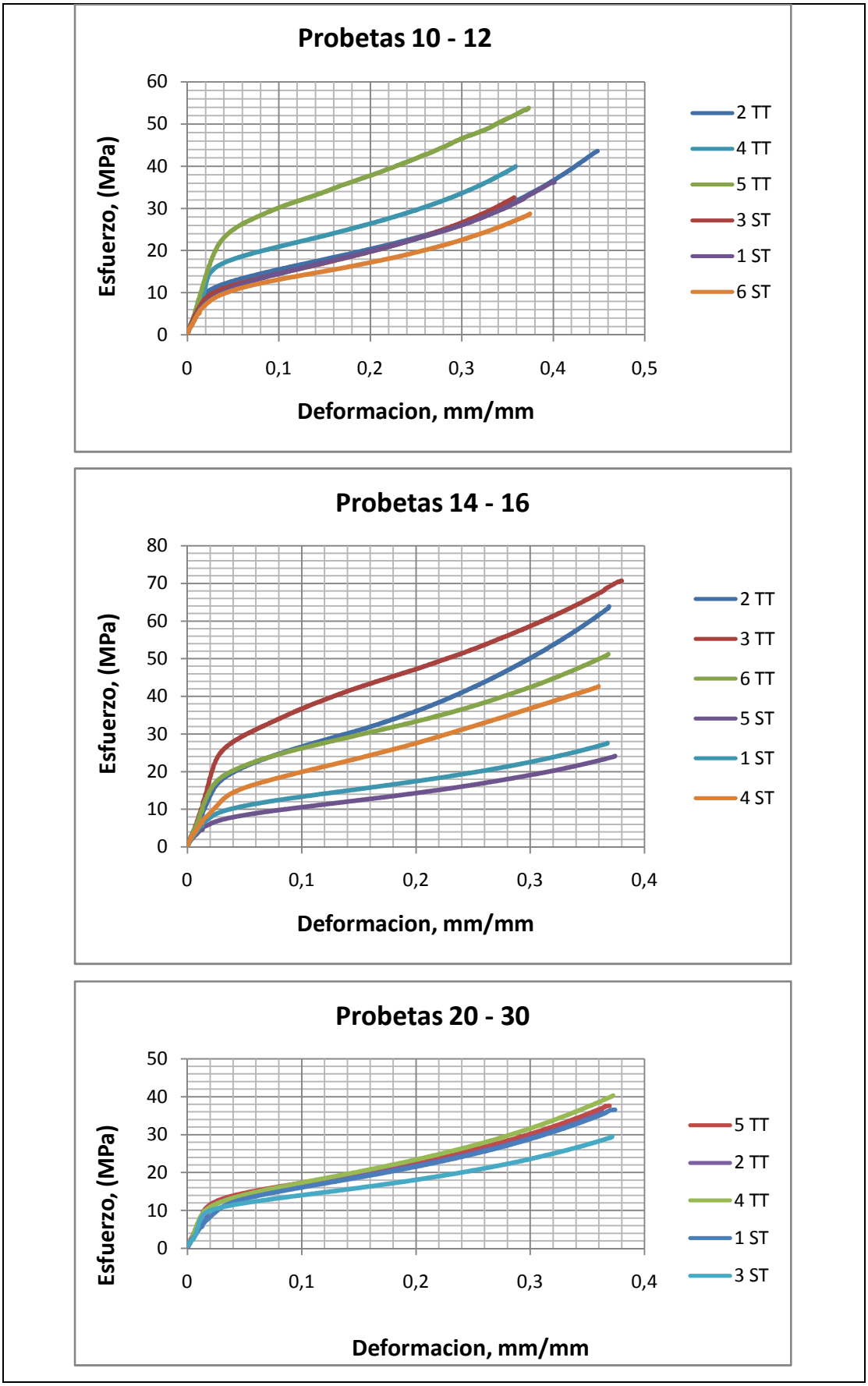


Figura 33. Curvas esfuerzo - deformación para esponjas de aleación de aluminio

Cálculo del módulo elástico

Se calculó el módulo elástico mediante la ecuación propuesta por Gibson y Ashby, cuyo valor obtenido fue de 655 MPa, siendo éste casi un 50% más del hallado experimentalmente, el cual fue de 440 MPa 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 IPS.

4.2.2 Microdureza Vickers

Los resultados del ensayo de microdureza Vickers se muestran en la tabla 9. Dependiendo del tamaño de partícula y con la influencia del tratamiento térmico, cabe destacar la regularidad de los datos para las probetas sin tratamiento térmico en comparación con las tratadas.

Tabla 9 Resultados del ensayo de microdureza Vickers.

Muestras	***R10-12*** **ST**	***R10-12*** **TT**	***R14-16*** **ST**	***R14-16*** **TT**	***R20-30*** **ST**	***R20-30*** ***TT***
Microdureza Vickers	**38,86**	**59,74**	**33,24**	**73,74**	**42,42**	**69,83**

Capítulo 5.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo analizaremos algunos aspectos como la influencia de las partículas de sal, elementos de aleación, el efecto del proceso de infiltración entre otros sobre las características micro-macroestructurales y el comportamiento mecánico de las esponjas de aluminio fabricadas y evaluadas en el presente estudio.

5.1 Análisis de las características morfológicas y microestructurales de las esponjas

5.1.1 Densitometría

Dado que el aluminio presenta una densidad en promedio de 2.7 gr/cm^3 y la densidad de las esponjas de aluminio obtenidas en este estudio fue de 0.90 gr/cm^3 lo cual nos da una densidad relativa promedio de 0.33 con una porosidad del 67% aproximadamente. Considerando lo anterior y basados con otros autores podemos comparar con estudios de Fernández M., P. [3], que utilizo IPS asistido con vacio en una sola etapa, con preformas de sal amorfas y cubicas de tamaño de partícula similar obteniendo una densidad relativa también de 0.33 y con el estudio de Gómez, M., [4], que utilizo IPS con inyección manual, preformas de sal amorfas con un tamaño de partícula casi del doble presente estudio y obteniendo una densidad relativa promedio 0.34, concluyendo con esto una concordancia en los valores de densidad obtenidos en el presente estudio. Cabe anotar que las preformas en este estudio no presentaban ningún tipo de compresión o densificación por temperatura, lo cual se puede utilizar para posteriores estudios como un tratamiento de sinterización a la preforma.

La morfología de las partículas junto con el tamaño y distribución afectan la eficiencia del empaquetamiento lo que influye en la densidad de las esponjas, por lo cual en este estudio se quiso lograr a través de la modificación de la morfología de las partículas de sal de unas amorfas a unas más regulares comparar el cambio en la densidad,

obteniéndose en los ensayos un resultado menor, pero muy similar al obtenido con partículas amorfas del estudio [4], pero con una disminución de aproximadamente el 50% en el tamaño de partícula y un resultado igual con partículas cubicas del estudio [3], que manejaron un rango de tamaño de partículas similar al presente. Cabe destacar que la morfológica de los poros puede influenciar mas significativamente en las propiedades mecánicas, lo que se presentara más adelante.

Con respecto al tamaño de partícula, este tuvo un papel inversamente proporcional a la densidad relativa obtenida, lo que quiere decir que las esponjas fabricadas con tamaños de partícula menor obtuvieron densidades mayores a las fabricadas con mayores tamaño de partícula, atribuyéndose lo anterior a que a menor tamaño de partícula mayor empaquetamiento de la preforma derivando en una mayor densidad de la esponja lo cual es contrario en partículas de mayor tamaño.

5.1.2 análisis morfológico macroestructural

Se espera que a través del proceso de infiltración de preformas, los poros abiertos reproduzcan la morfología de las partículas que la conforman, controlando así, en cierta medida la forma de los poros mediante la selección de las partículas que conformaran la preforma, con respecto a lo anterior se pudo ver mediante el análisis morfológico 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, perdiendo de esa manera la forma original, además de posibles partículas irregulares que no se retiraron en el proceso de selección. A pesar de lo anterior se puede comparar en la fig. 34 la diferencia en forma de una esponja con partículas irregulares y otra con partículas más regulares. Con respecto al análisis macro de los poros en la matriz podemos ver una distribución no periódica y tamaño aleatorio, clasificándose así como una espuma *estocástica*.

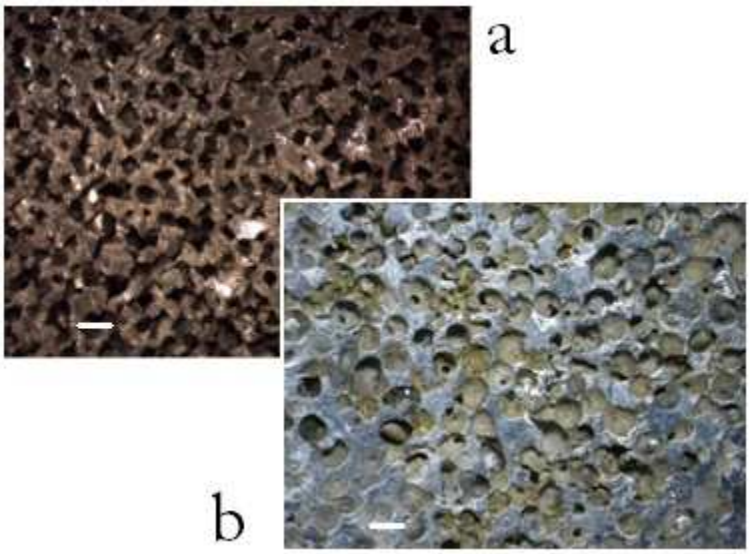


Figura 34. Fotos en el esteromicroscopio de esponjas con fabricadas con partículas de diversas morfologías, escala 1mm a) amorfas, b) esferas.

También se puede observar que a pesar de que hay conexión entre los poros hay zonas donde las paredes celulares incrementan en espesor, debiéndose esto a una posible falta de aglomeración en la conformación de la preforma o una excesiva presión de infiltración, aunque durante los ensayos preliminares para presiones inferiores no se logro un llenado completo de la preforma, por lo cual para estudios posteriores sería prudente estudiar una posible sinterización de la preforma.

5.1.3 Análisis de la microestructura

Basados en las identificaciones de los microconstituyentes realizada en los resultados del capítulo anterior, podemos sumar que los precipitados de siliciuro de magnesio disminuyen la ductilidad, pero trabajan como obstáculos para el movimiento de las dislocaciones mejorando así las propiedades mecánicas de la esponja por lo cual esta 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 dureza, estos compuestos son visibles bajo MET y su efecto se evidencia por el incremento de las propiedades mecánicas que se muestran en la sección siguiente.

5.2 Análisis del comportamiento mecánico

5.2.1 Ensayo de compresión uniaxial

De los ensayos de compresión realizados a las probetas se obtuvieron las curvas esfuerzo-deformación, estas graficas mostraron las tres zonas de deformación típicas para materiales celulares y de características similares a las reportadas por otros autores, las cuales son las siguientes:

1. Zona I, (lineal-elástica), presenta un comportamiento lineal elástico las celdas no sufren deformación plástica permanente.
2. Zona II, de meseta ("plateau región") región de deformación plástica donde el esfuerzo es casi constante y la esponja es capaz de absorber energía sin exceder su límite de rotura.
3. Zona III, (densificación) donde las celdas colapsan, compactándose y haciendo el esfuerzo cada vez mayor.

Las anteriores regiones concuerdan además con las descritas por Gibson y Ashby [1], mostradas en la Fig. 36. la cual muestra similitud a las graficas de compresión obtenidas en este estudio.

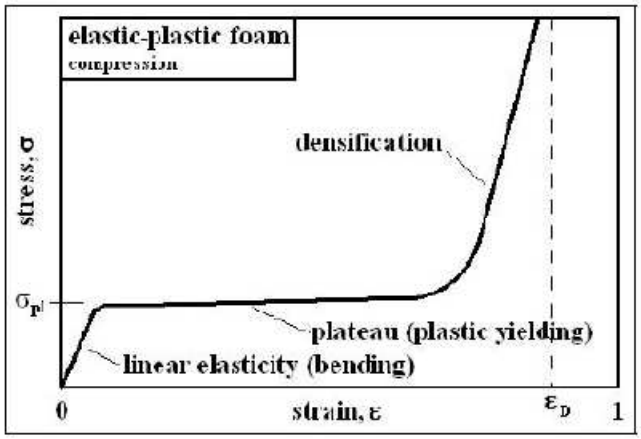


Figura 35. Curva típica de esfuerzo – deformación a compresión en MC.

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.

Influencia de la densidad

Como se reporta en la literatura la densidad relativa obtenida en los materiales celulares afecta en cierta medida la respuesta esfuerzo-deformación. Para el presente estudio la resistencia a la compresión para las probetas sin tratamiento térmico presento valores muy similares entre las probetas del mismo tamaño de poro y aumentando a medida que este disminuía, esto se puede deber a que las densidades relativas de las muestras están en valores bastante cercanos, en un rango entre (0.30 - 0.35), aunque cuando comparamos con los estudios de Gómez, M., [4], que uso tamaño de partícula casi un 100% mayor (2.8 mm y 1.7 mm) se obtuvo una mejora entre 30% a 50% en resistencia a la compresión y comparado con Fernández M., P. [3], una disminución del 20 % aprox. en la resistencia a la compresión, donde estos autores obtuvieron un promedio de densidad relativa muy similar al del presente estudio, por lo cual los cambios en resultados a la compresión entre los diferentes autores se puede deber a otro factor.

Influencia de la morfología del poro

La morfología que se quiso estudiar en este trabajo fue una más regular y comparando con los estudios de Gómez, M., [4], que uso partículas irregulares se puede ver un aumento significativo en la resistencia a la compresión, además de una zona II de meseta mas aplanada y con un mayor rango de deformación, lo que puede deberse a que la morfología usada en este estudio ayuda a absorber mejor la energía y por lo cual hacer el material más tenaz y/o a que el procesos de IPS asistido por vacio es mejor que el de inyección manual. Comparado con Fernández M., P. [3], que uso partículas amorfas y cubicas e IPS asistido por vacio, la resistencia a la compresión fue un poco más baja y la zona II presento un comportamiento muy similar, mejorando el modulo de elasticidad significativamente en el presente estudio, con lo cual no se da una muy buena conclusión con respecto a mejoras en propiedades mecánicas con el cambio de morfología cuando el sistema de infiltración es asistido por vacio.

Influencia del tamaño de poro

De los resultados en las pruebas a compresión puede notarse que el tamaño de los poros influye de la siguiente manera en las probetas sin tratamiento térmico, a menor tamaño de poro mejores propiedades mecánicas como resistencia a la compresión y modulo de elasticidad, lo que va de la mano con el modelo presentado por Onck [10], el cual parte

de un tipo de celda hexagonal mas similar al utilizado en este estudio y con una predicción de que a menor tamaño de poro mayor esfuerzo, corroborando así los resultados experimentales, debido también a que a menor tamaño de poro mayor densidad relativa y mejor comportamiento a esfuerzos de compresión. También podemos ver que las probetas de mayor tamaño de poro presentan una zona II de meseta mas aplanada en comparación con los de menor poro pero con un rango de deformación muy similar.

Influencia del tratamiento térmico

El tratamiento térmico realizado mostro un aumento significativo y proporcional de resistencia a la compresión y modulo de elasticidad para las probetas de poro grande y mediano, siendo muy poco en las de poro más pequeño concluyendo que en estas el tratamiento térmico T6 fue ineficiente; la ductilidad se mantuvo igual para los tres tipos de probetas. Fig. 37.

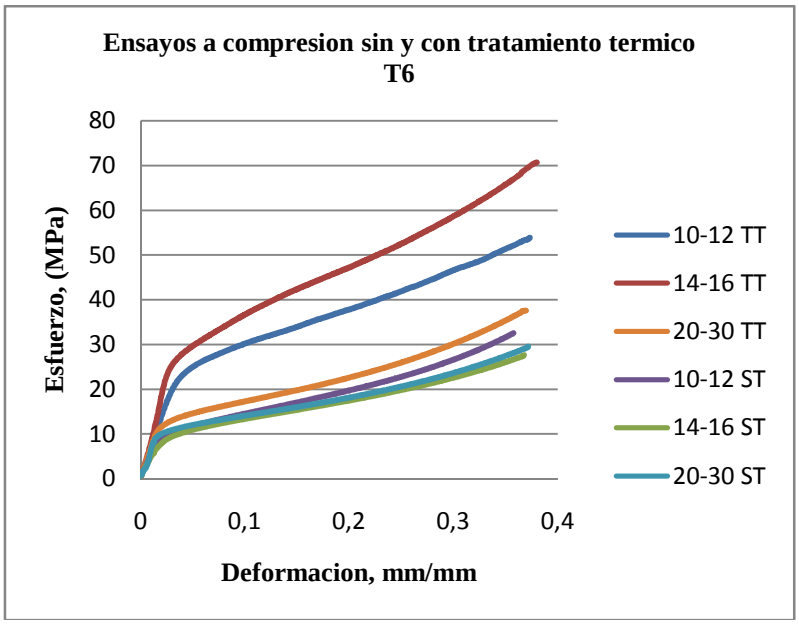


Figura 36. Probetas Tratadas térmicamente y sin tratamiento.

Mecanismo de falla

Las probetas ensayadas a compresión no presentaron desprendimiento de material con ningún tipo de porosidad y se mostro una tendencia a bandas de deformación al cortante, esto puede deberse como dice Fernández M., P. [3], 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, una vez el material celular 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. Muchos autores se han dedicado a determinar los micromecanismos de la deformación de los metales celulares, utilizando la teoría de vigas y mediante la simulación de elementos finitos.

5.2.2 Microdureza Vickers

La microdureza es independiente de la porosidad del material ya que esta solo evalúa la matriz de forma superficial, por lo puede decirse que la información reportada en el uso de este ensayo en metales celulares es realmente escasa y ha sido muy poco lo experimentado, por ende este ensayo nos permitirá fuera de medir la dureza, detectar que tan homogéneo es el material, comparando así con más tranquilidad el resto de propiedades entre probetas, basados en lo anterior se destaca la uniformidad de los valores obtenidos para las muestras sin tratamiento térmico, con un promedio de microdureza vickers de 38,18 HV y una desviación estándar de +/- 4.92 HV.

Capítulo 6.

CONCLUSIONES

1. Las partículas de sal que se obtuvieron del tratamiento realizado para el cambio de morfología presentaron un tamaño de forma cercano a 1, haciéndolas así casi esféricas, con lo cual se alcanzo el propósito de estudiar el efecto de una morfología más regular en las propiedades de la esponja. Sin embargo se recomienda mejorar el proceso para realizar el tratamiento de cambio de morfología buscando un mayor volumen de producción.

2. Se obtuvieron valores de densidad relativa de 0.31 para la porosidad R10-12 y de 0.35 para la porosidad menor de R20-30, esta relación experimental va de la mano con lo que la teoría predice. En promedio la densidad relativa fue de 0.32 que es igual a lo encontrado en otros estudios por métodos de infiltración asistidos con presiones mayores y más costosas.

3. La resistencia a la compresión presento para las R10-12 fue de 7.8 Mpa en promedio y las de R20-30 fue de 9.83Mpa este 26 % de aumento en la resistencia a la compresión va de la mano con el aumento de la densidad relativa resaltando una relación entre la densidad y la resistencia a la compresión.

4. La resistencia a la compresión especifica fue de 8.87 comparado con Gómez, M., [4], que obtuvo 4.94 quien también utilizo una aleación de aluminio 6061 para la matriz, pero con tamaño de partículas casi un 100% mayores (2.8 mm y 1.7 mm), esto puede adjudicarse a que la morfología macroestructural de las esponjas muestra una mejor regularidad en la forma de los poros y/o al sistema de infiltración asistido por vacio utilizado en este estudio. El resultado sigue marcando mejoras en el estudio de las esponjas y su desarrollo en la universidad del valle.

5. El tratamiento térmico T6 aplicado a las esponjas R10-12 revelo una resistencia a la compresión de 16,0 Mpa y para la R14-16 fue de 19,9 Mpa lo que muestra

un aumento significativo en las propiedades mecánicas, siendo este de casi el 150% en promedio. Pero solo se alcanzo una aumento de 30% en las *R20-30*, adjudicándose este poco aumento en las últimas debido a un tratamiento térmico ineficiente como lo evidencio la microestructura a través de la metalografía analizada.

6. El equipo diseñado y puesto en marcha para el sistema IPS asistido por vacio, funciono exitosamente y presenta una alternativa de fabricación de espumas en dos etapas, en comparación con Fernández M., P. [3], que solo usa una, y por lo cual puede ser más viable industrialmente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Ashby, M.F.; Evans, A.; Fleck, N.A.; Gibson, L.J.; Hutchinson, J.W. and Wadley, H.N.G. Metal foams: a design guide: Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 251 pp., Materials and Design, 2000.

[2] Banhart, J. Manufacture, Characterization and Application of Cellular Metals and Metal Foams. *Progress in Materials Science,* 46, 559-632, 2001

[3] Fernández, G. P., Obtención y evaluación de esponjas de aleación de aluminio fabricadas mediante infiltración de preformas solubles bajo presión de vacío. Medellín, Colombia: Universidad pontificia bolivariana, 2009.

[4] Gómez, M., Producción y caracterización de esponjas metálicas de aluminio por el proceso de infiltración en preformas de sal. Cali, Colombia: Universidad del Valle. 2007.

[5] Casolco, S.; Torres V., G.; Gómez, A. y López P., M. Influencia del tamaño de grano del NaCl en el procesamiento de espumas de Zn-Al-Cu. Memorias del XI Congreso Internacional Anual SOMIM, IV Congreso Bolivariano de Ingeniaría Mecánica. 2005, Morelia, México.

[6] Banhart, J., Chapter 7.2: Functional applications, Handbook of Cellular Materials - Production, Processing, Applications, H.P. Degischer Ed., Wiley-VCH, Weinheim, (2002),
313-320.

[7] Sosnick, B. US Patent 2 434 775, 1948.

[8] J. Gutiérrez y J. Oñoro. Espumas de aluminio, fabricación, propiedades y aplicaciones. Revista de metalurgía (septiembre-octubre) 2008; 44 (5): 457- 476.

[9] Gergely, V.; Curran, D.C. and Clyne, T.W. The FOAMCARP process: foaming of aluminium MMCs by the chalk-aluminium reaction in precursors. Composites Science and Technology 63 (2003) 2301–2310.

[10] Vachiants, S., Manukyan, N. Technology of aluminium foam production using methods of powder metallurgy. 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. 131-136.

[11] J. Zhou, Z. Gao, A. Cuitino and W. Soboyejo. Effects of heat treatment on the compressive deformation behavior of open cell aluminum foams. Materials Science and Engineering; 2004:118–128.

[12] C. Marchi, A. Mortensen. Infiltration and the replication process for producing metal. 2002;16: 43-55.

[13] C. Gaillard, J. Despois, A. Mortensen. Processing of NaCl powders of controlled size and shape for the microstructural tailoring of aluminium foams 2004; A374: 250–262.

[14] Bram, M; Buchkremer, H.P.; Laptev, A. and Stöver, D. Scaling-up of powder metallurgical production highly porous metals to industrial quantities. Cellular metals and metal foaming technology. Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. Proc. 2nd Int. Conf. Bremen, 2001. Bremen: MIT–Verlag., 215-220.

[15] 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.

[16] Despois, J. F., Marmottant, A., Salvo, L., Mortensen, A. Influence of the infiltration pressure on the structure and properties of replicated aluminium foams. Materials Science and Engineering A 462 (2007), 68-75.

[17] Eustathopoulos, N., Nicholas, M. G., Brevet, B. Wettability at high temperature, Pergamon Materials Series Vol. 3, (1999), 7-12, 148.