

# OBTENCIÓN DE ESPONJAS DE METÁLICAS CON MORFOLOGÍA CONTROLADA

Trabajo realizado por  
LAURAMARIA ECHEVERRI RAMÍREZ

Monografía para optar al título de Diseño Industrial

Asesor  
ALEJANDRO ZULETA  
Ingeniero de Materiales

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE ARQUIDISEÑO  
FACULTAD DE DISEÑO INDUSTRIAL  
MEDELLÍN

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. RESUMEN</b> .....	<b>5</b>
<b>2. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>7</b>
<b>3. PLANTEAMIENTO</b> .....	<b>9</b>
3.1. Tema general del proyecto.....	9
3.2. Características generales del proyecto de investigación.....	10
3.3. Problema de investigación identificado - Pregunta de investigación.....	10
3.4. Elementos del problema de investigación .....	11
<b>4. JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>13</b>
4.1. Validez del proyecto en el contexto de la de investigación en diseño industrial.....	13
4.2. Validez del proyecto en el contexto del desarrollo de nuevos productos.....	14
<b>5. OBJETIVOS</b> .....	<b>15</b>
5.1. Objetivo general.....	15
5.2. Objetivos específicos .....	15
<b>6. MARCO DE REFERENCIA</b> .....	<b>16</b>
6.1. Antecedentes.....	16
6.1.1. Aluminio .....	16
6.1.2. Proceso de Fundición .....	17
6.1.3. Simulación de procesos de fundición .....	20
6.1.4. Esponjas Metálicas .....	24
6.1.5. Estado del arte.....	29
<b>7. METODOLOGÍA</b> .....	<b>32</b>
7.1. Caracterización de técnicas para la obtención de esponjas de aluminio .....	32
7.1.1. Pulvimetalurgia.....	32
7.1.2. Fundición de precisión .....	35
<b>8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>41</b>
8.1. Resultados.....	41

<b>9. CONCLUSIONES</b> .....	<b>49</b>
<b>9.1. Hallazgos más importantes de la investigación</b> .....	<b>49</b>
<b>10. BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE DATOS</b> .....	<b>50</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. comparación de tres CFD software de simulación.

Figura 2 . Procesos de fabricación de metales celulares

Figura 3. Proceso fundición de precisión

Figura 4. Proceso Infiltración por fundición de moldes removibles

Figura 5. Sinterización de polvos metálicos y rellenos removibles

Figura 6. Cellular Chair by Mathias Bengtsson

Figura 7. Illuminated Bar & Countertop

Figura 8. Table-top

Figura 9. Vertical Panel

Figura 10. Iluminated Wall panel

Figura 11. Esponjas de aluminio en el interior de un sólido

## 1. RESUMEN

En este trabajo se plantea un procedimiento para la obtención de esponjas de aluminio con geometría interna controlada como alternativa de procesamiento para la fabricación de materiales celulares mediante la combinación de herramientas como la fabricación digital aditiva, la simulación y la fundición. Durante el proceso de exploración se realizaron diferentes experimentaciones haciendo uso de métodos de fabricación de esponjas empleando técnicas como la metalurgia de polvos y fundición de precisión. Para esto se empleó el método de fundición por cera perdida, el cual involucró la fabricación de preformas en cera y ABS, las cuales fueron obtenidas como resultado de la modelación digitales de estructuras celulares con patrones definidos. Adicionalmente, se empleó el programa FLOW 3D para establecer los valores de temperatura, los cuales se garantizan el llenado del molde, encontrando que el metal debe vaciarse a una temperatura de 720 °C en un molde que debe estar a 500 °C. Esto, permitió la optimización del proceso de fundición de precisión lográndose obtener resultados bastante aproximados en cuanto a la reproducción de la forma de la esponja que se diseña inicialmente.

### **Abstract**

In this paper a method for obtaining aluminum sponges alternatively controlled internal geometry processing for manufacturing cellular materials by combining tools such as digital additive manufacturing simulation and casting arises. During the scanning process different experiments were conducted using manufacturing methods sponges using techniques such as powder metallurgy and precision casting.

For this method lost wax casting, which involved the manufacture of preforms wax

and ABS, which were obtained by means of the digital modeling of cellular structures with defined patterns was used. Additionally, the FLOW 3D program was used to establish the temperature values for which the mold filling is guaranteed, finding that the metal must be drained at a temperature of 720 ° C in a mold must be at 500 ° C. This allowed optimization precision casting process achieving fairly approximate results obtained regarding the reproduction of the shape of the sponge initially designed.

**Palabras Clave:** *Esponjas de aluminio, morfología controlada, aluminio, fundición de precisión.*

## 2. INTRODUCCIÓN

Conceptos como prefabricación, ensamblaje rápido, estructuras de peso ligero, simulación, fabricación digital, entre otros, están incrementando en campos relacionados con el Diseño Industrial. Entre estos conceptos, uno de los más relevantes es el diseño de estructuras de peso ligero, las cuales requieren de menos material y, por lo tanto de menos tiempo y energía para ser transportadas. Desde este punto de vista, se presentan diversos modelos de exploración formal de los objetos, con el fin de rediseñar o generar nuevos diseños a partir de un análisis estructural, donde la simulación y la fabricación digital son herramientas para la optimización del proceso.

Es por esto que por medio de una experimentación objetiva con el aluminio, el cual es un elemento de peso ligero, se pretende entender la relación que existe entre las propiedades mecánicas, estéticas y funcionales, y su método de fabricación, con el fin de obtener elementos conceptuales y metodológicos que favorezcan el proceso creativo del diseño de nuevos productos, tomando como base componentes artísticos y técnicos derivados de campos como la geometría y la ciencia de los materiales. Es por ello que el proyecto que se plantea en este documento busca la realización de un trabajo de diseño iterativo en donde a partir del uso de herramientas de modelación digital aditiva, experimentación y conceptualización se establece una metodología que permite la obtención de productos diseñados a partir de la relación entre sus componentes estéticos y funcionales; y cómo interviene la obtención de una estructura liviana con alta

resistencia a la compresión en la facilidad de transporte y ahorro de material a partir de la optimización de su proceso de fabricación y reutilización del mismo.

Con este trabajo se busca desarrollar una metodología para la obtención de esponjas de aluminio con estructura interna controlada mediante la combinación de herramientas como la fabricación digital aditiva, simulación y fundición. Esto brindará la posibilidad de realizar un trabajo de investigación que permita abordar conceptos de optimización y experimentación morfológica en el desarrollo de proyectos de diseño de objetos industriales con el uso de técnicas que están a la vanguardia mundial como lo son las técnicas de procesamiento para la obtención de esponjas de aluminio. Adicionalmente, la experimentación y validación de los procesos permitirán crear un soporte de los alcances de los recursos con los que cuenta la universidad incentivando el uso de éstos en el desarrollo de posteriores proyectos de investigación, y para la generación de nuevos productos.

### 3. PLANTEAMIENTO

#### 3.1. Tema general del proyecto

Las esponjas metálicas se han convertido en tema de interés en los últimos años, gracias a sus adecuadas propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas y acústicas. El proceso de fabricación de éstas ha sido estudiado desde el siglo XX con el fin de profundizar y analizar sus propiedades más significativas, para así tener potenciales aplicaciones a nivel industrial. Uno de los materiales más cotizados para la elaboración de estas esponjas ha sido el aluminio, ya que se caracteriza por ser un material de bajo peso que puede ser transformado en elementos útiles de una manera relativamente sencilla. Las esponjas de aluminio son aún más livianas y tienen una mayor resistencia mecánica, lo cual las hace atractivas para múltiples aplicaciones.

Con este trabajo de investigación se busca desarrollar una metodología para la obtención de esponjas de aluminio con estructura interna controlada involucrando aspectos tales como la experimentación morfológica y optimización mediante el uso de herramientas de modelación digital, simulación, prototipado rápido. Lo anterior, con miras a potenciar el uso de este tipo de materiales en el diseño de productos industriales que puedan ser aplicados en sectores tales como el mobiliario, decoración, iluminación, aislantes acústicos, absorbentes de impacto, entre otros.

### **3.2. Características generales del proyecto de investigación**

En este proyecto se realizará una investigación experimental en la cual se establece un procedimiento para la obtención de esponjas de aluminio mediante la combinación de fabricación digital aditiva y fundición, con el fin de aprovechar al máximo este material multifuncional conformado por una relevante combinación de propiedades físicas y mecánicas.

Para definir este procedimiento, se inicia con una revisión de literatura y vigilancia tecnológica con el fin de analizar los procesos existentes de fabricación de las esponjas. Al analizar, estudiar e interpretar estos procesos, finalmente se seleccionan los métodos a utilizar junto con las herramientas digitales, por medio de las cuales se modelan las estructuras, se simula el proceso de fundición para determinar variables relacionadas con temperatura y tiempo de vaciado, y finalmente se imprimen en 3D para proseguir con el proceso de fundición de precisión. Estos pasos son recopilados junto con los resultados obtenidos para conformar un protocolo para la obtención de esponjas controladas a partir de los parámetros y limitaciones identificados durante el proceso de fabricación.

### **3.3. Problema de investigación identificado – Pregunta de investigación**

Las esponjas metálicas son materiales celulares que están siendo utilizados actualmente por diversos sectores industriales, ya que ofrecen atractivas propiedades mecánicas relacionadas con su bajo peso, control de las propiedades fisicoquímicas y alta resistencia a la compresión y al impacto. Sin embargo, a pesar de que se han

considerado como un material atractivo para aplicaciones industriales, en algunos sectores su uso ha sido netamente funcional, como por ejemplo en sectores relacionados con la construcción, medicina y transporte, donde ciertos elementos, estructuras o componentes del diseño son fabricados internamente con este tipo de material. En estos casos los componentes se encuentran ocultos, por lo tanto la exploración formal de las esponjas metálicas es nula, su uso es 100% funcional, no generan un aporte estético al objeto. Lo anterior ha limitado el uso de este tipo de materiales en diversos campos industriales, específicamente en la fabricación de productos de consumo que involucren una mayor intervención desde su composición morfológica.

Lo anterior plantea una oportunidad para el desarrollo de metodologías que permitan generar nuevas alternativas de exploración morfológicas en donde, a través de la disciplina del Diseño Industrial, sea posible proponer por medio de experimentaciones e investigaciones relacionadas con la composición formal de ciertos elementos ideas para la manufactura de productos con alto potencial de aplicación en diversos sectores industriales; y a su vez se logre una permanente contribución en la disminución de la contaminación ambiental, gracias a que los materiales celulares fabricados en aluminio son livianos y 100% reciclables, por lo tanto su producción y transporte genera un ahorro relevante en el consumo de energía y sustratos.

### **3.4. Elementos del problema de investigación**

- Aleaciones ligeras

- Aluminio
- Esponjas metálicas
- Morfología controlada
- Simulación
- Fundición de precisión

## 4. JUSTIFICACIÓN

### 4.1. Validez del proyecto en el contexto de la de investigación en diseño industrial.

Este proyecto se basa en identificar una serie de parámetros y limitaciones con el fin de conformar un protocolo para la obtención de esponjas de aluminio, el cual le aporta información a los diseñadores industriales para aplicar y llevar a cabo este proceso a la hora de diseñar objetos industriales.

Al identificar el aluminio como un material de bajo peso, el cual puede ser empleado en la creación de elementos útiles de una manera relativamente sencilla, se define como un material atractivo para elaborar diversidad de productos livianos. Adicionalmente, con este material se pueden fabricar las esponjas metálicas, las cuales se definen como sólidos celulares que ofrecen beneficios para múltiples aplicaciones estructurales y funcionales. Al ser fabricadas de aluminio, se disminuye aún más su densidad y gracias a que poseen adecuadas propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas y acústicas, han sido tema de interés e investigación científica durante los últimos veinte años.

Las aplicaciones potenciales de las esponjas metálicas, identificadas como materiales multifuncionales, son realmente atractivas en el campo del Diseño Industrial, ya que no solo tienen una combinación relevante entre sus propiedades mecánicas sino que también tienen un alto impacto desde su conformación estética, lo cual interviene directamente en la experiencia sensorial de cierto usuario en un contexto determinado.

El uso de geometrías controladas en las esponjas metálicas permiten al diseñador jugar

con los sentidos y la funcionalidad de un producto en específico.

#### **4.2. Validez del proyecto en el contexto del desarrollo de nuevos productos.**

Actualmente las esponjas no han sido totalmente caracterizadas y algunos de sus procesos de fabricación no se han podido controlar de forma precisa, es por esto que es necesario plantear otros métodos de obtención que permitan mejorar el control sobre la estructura y morfología de las esponjas para ser aplicadas a nivel industrial. Para esto es relevante tener en cuenta la relación que existe entre sus características funcionales y estéticas; es importante realizar técnicas experimentales, modelaciones y simulaciones que permitan conocer aún más los posibles comportamientos y condiciones de fabricación de las esponjas en determinados productos. Una de las ventajas de producir y desarrollar nuevos productos en este material y con estructura porosa es la disminución del uso de energía, lo cual está ligado a los métodos de producción y a los medios de transporte, lo que interviene directamente en el impacto ambiental que genera el proceso de fabricación y transporte.

El desarrollo de este proyecto, además de contribuir con el desarrollo de nuevos productos con alto potencial de innovación y además con la disminución del consumo energético contribuirá con el impulso de la industria local. Se impulsan sectores relacionados con la industria automotriz, decoración, mobiliario, iluminación, paneles aislantes de sonido, entre otros.

## 5. OBJETIVOS

### 5.1. Objetivo general

Obtener esponjas de aluminio con geometría interna controlada mediante la combinación de herramientas como la fabricación digital aditiva, simulación y fundición.

### 5.2. Objetivos específicos

- Obtener patrones geométricos a través del uso de tecnologías digitales para generar modelos de esponjas rígidas con morfología interna controlada
- Simulación del proceso de fundición con las morfologías establecidas a partir de la obtención de los patrones geométricos
- Definir un protocolo para la obtención de esponjas controladas

## 6. MARCO DE REFERENCIA

### 6.1. Antecedentes

#### 6.1.1. Aluminio

El aluminio representa aproximadamente el 8% de nuestra corteza terrestre, convirtiéndolo en el tercer elemento más común después del silicio y el oxígeno, aunque siempre combinado con otros elementos, formando diversos minerales, entre los que destacan: el corindón, la bauxita, la criolita, los feldespatos, las micas, el caolín y las arcillas. (Nordberg et al., 2001)

El aluminio es como un almacén de energía (15 kWh/Kg), por ello tiene un gran valor que no puede desperdiciarse y su reciclado se traduce en recuperación de energía. Además, es un material muy valioso como residuo, lo que supone un gran incentivo económico. Las propiedades que hacen del aluminio un metal tan provechoso son: su ligereza (sobre un tercio del peso del cobre y el acero), resistencia a la corrosión (característica muy útil para aquellos productos que requieren de protección y conservación), resistencia, es un buen conductor de electricidad y calor, no es magnético ni tóxico, buen reflector de luz, impermeable e inodoro, y muy dúctil. Además, el gran atractivo es que se trata de un metal 100% reciclable, es decir, se puede reciclar indefinidamente sin que por ello pierda sus cualidades.

En 1782, el químico francés, Lavoisier, indica que hay una alta probabilidad de que la sustancia alúmina, presente en la corteza terrestre, sea un óxido del mismo metal. En 1854, Sainte Claire Deville, quien le da el presente nombre al aluminio, produce un

pequeño trozo del metal al fundir amalgama de sodio con cloruro de aluminio. Tanto la Academia Francesa como el mismo emperador Napoleón contribuyen y apoyan a Deville para que siga con el desarrollo del metal y para que éste pueda ser utilizado para confeccionar armaduras y armas para sus tropas. Napoleón mantuvo al aluminio en gran estima y consultó la posibilidad de fabricar cuchillería de aluminio para reemplazar la de oro y plata con la que se servía a sus invitados especiales. El 23 de febrero de 1886, Charles Martin Hall, un estudiante del colegio de Oberling en Ohio y Paul L.T. Heroult, de París, producen aluminio simultáneamente por medio del proceso de reducción electrolítica.

### **6.1.2. Proceso de Fundición**

El proceso de fundición de metales se consideraba como un arte, hasta el siglo pasado. Durante este período el proceso de fundición se ha convertido en una ciencia donde el control se ejerce sobre la totalidad de la producción. El uso del computador como una herramienta para simular metales fundición comenzó en el 1940 con el Comité de Transferencia de calor Foundrymenls Society (AFS). (Hock, 1987)

Con el paso del tiempo y el incremento de herramientas computacionales, se ha facilitado progresivamente la posibilidad de simular los procesos de fundición de metales. Esta brecha científica, tuvo su origen en los años cuarenta con la modelación de la transferencia de calor en modelos de fundición. La aplicación principal, durante esta época, fue la obtención de isotermas en el momento del vaciado del metal, accediendo así la predicción de puntos calientes en los moldes de fundición. Sarjant y Slack (A.F,

2007), calcularon posteriormente la distribución interna de temperatura en lingotes de acero, usando métodos numéricos para modelar el flujo de calor por conducción. Ya en los 60's, la primera aplicación utilizando computadoras digitales firme realizada por Fursund en Dinamarca, encontrando que la difusión de calor, en el proceso de fundición en arena, afectaba el acabado superficial del acero fundido.

Las primeras investigaciones patrocinadas por la sociedad eran realizadas por Parchies de la Universidad de Columbia. Parchies fue el primero en utilizar un ordenador analógico grande para estudiar los patrones de solidificación, las pérdidas de calor a partir de las paredes, diseño de vertederos, el flujo de calor en los materiales de moldeo y predicción de problemas en el patrón de enfriamiento en el proceso de fundición, los resultados obtenidos fueron útiles para la industria de la fundición. (Hock, 1987)

La fundición del aluminio utiliza diferentes técnicas de procesamiento, estas técnicas se describen brevemente a continuación:

- Fundición de precisión (Investment casting)

Técnica industrial de fabricación de piezas de alta calidad, consiste en revestir un modelo de cera, con varias capas construidas por una mezcla de elementos refractarios y un barro aglomerante. El barro reacciona químicamente durante el secado para formar una red de gel que sostiene el material cerámico. Posteriormente el material de modelo es removido y la cerámica calcinada para formar una estructura rígida en donde se vierte el metal fundido conformando así una réplica exacta del modelo original. (E.V, 2003)

- Fundición a presión (Die cast)

Proceso de fabricación usado en la producción de piezas de metal forzando la colada a alta presión en las cavidades de la matriz, estas cavidades del molde se crean mecanizándolas creando la forma neta o cerca de la forma final del molde. (CORPORATION, 2011)

- Fundición centrífuga (Centrifugal Casting)

Se refiere a varios métodos de fundición caracterizados por utilizar un molde que gira a alta velocidad para que la fuerza centrífuga distribuya el metal fundido en las regiones exteriores de la cavidad del dado. (Tecnología)

- Fundición en molde de arena por gravedad (Sand Casting)

El proceso general de la fundición en arena comienza con la fabricación del modelo de la pieza a fundir, luego este modelo se coloca entre la arena para generar una cavidad negativa y se ubican los sistemas de alimentación que guiaran el metal fundido hacia las cavidades del molde. Una vez el metal se solidifica al interior de la cavidad, se destruye el molde y se extrae la pieza terminada; si se requiere se puede realizar el proceso de tratamiento térmico a la pieza fundida o realizar los procesos adicionales de acabados y controles necesarios.

### 6.1.3. Simulación de procesos de fundición

Con los avances en la tecnología informática la computadora digital complementó el proceso realizado con el equipo analógico, donde por primera vez se utilizó el método de diferencias finitas para resolver problemas en la simulación de la fundición. En 1962 Forsound fue el primero en utilizar este método para resolver el problema de la transferencia de calor en la fundición de un ordenador digital. Un año más tarde, el trabajo de investigación en simulación por ordenador de función de metales elaborado por el AFS eran: patrones de solidificación en dos dimensiones y simulación tridimensional de una combinación compleja de moldeo en materiales compuestos. (Hock, 1987)

Distintas universidades en Estados Unidos han hecho la realización de distintas investigaciones en modelos digitales de la fundición, la Universidad de Michigan ha llevado a cabo investigaciones utilizando aproximaciones en diferencias finitas tanto explícitas como método implícitos. (Hock, 1987)

La dinámica de fluido computacional (CFD) es una de las ramas de la mecánica de fluido que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas que involucran flujos de fluidos. Un método numérico tiene como objetivo discretizar el dominio espacial en pequeñas celdas y así formar una malla de volumen o de cuadrícula, para luego aplicar un algoritmo adecuado y resolver. Estos procedimientos digitales y de simulación permiten que la producción de materiales como las esponjas metálicas sean posibles de producir y de experimentar.

Las investigaciones y los procesos de producción de esponjas metálicas han avanzado notablemente durante los últimos años en áreas de innovación y optimización. Se han desarrollado diferentes métodos para la fabricación de éstas, entre los cuales se encuentran los procesos pulvimetalúrgicos, fundición de precisión, infiltración por fundición de moldes con rellenos removibles, los cuales tienen en común la generación de poros interconectados, densidad y tamaño de poro variable y bajos costos de procesamiento; por medio de estos métodos se logra una gran libertad de diseño, lo cual permite obtener esponjas con variaciones en sus propiedades mecánicas y morfológicas al realizar diferentes experimentaciones.

Para simular estos procesos de fundición de metales, se dispone de herramientas o métodos de discretización que se utilizan para determinar y controlar variables del fluido a fundir, en este caso el Aluminio. Estos métodos son los siguientes:

- Método de Volúmenes Finitos (FVM): Ampliamente usado en software comercial, garantiza la conservación de los flujos a través de un volumen de control.
- Método de Elementos Finitos (FEM): Ampliamente usado para el análisis estructural de los sólidos, pero también es aplicable a fluidos.
- Método de Diferencias Finitas (FDM): Método sencillo de programar, sólo se usa actualmente en pocos códigos especializados. Modernos códigos e

diferencias finitas hacen uso de un límite integrado para el manejo de geometrías complejas que hacen estos códigos altamente eficientes y exactos.

El método de volumen de fluido (VOF) es el más popular y altamente utilizado en la simulación de llenado del molde. La razón es su relativa facilidad de aplicación y su base en fracciones de volumen que se adapta bien a otras físicas. La técnica de VOF es empleado por algunos paquetes de software comerciales para la simulación de fundición y análisis, como FLOW 3D, que utiliza aproximaciones de diferencia finita o volumen finito para resolver numéricamente el fluido y ecuaciones de solidificación. (Grande, 2009)

En los últimos años, los procesos de fundición han sido objeto de una gran evolución y en la actualidad están sometidos a elevados niveles de exigencia en materia de calidad y precio. Además, en un mercado como el actual, las empresas deben ser flexibles y capaces de responder con rapidez ante sus clientes, por ello es imprescindible optimizar la etapa del diseño de molde. En el mercado hay numerosos programas y herramientas con diferentes características de simular la fundición del metal en el molde y que ofrecen la posibilidad de modificar las características tanto de los materiales como del proceso en sí, tales como: Clic2Cast, ProCast, Flow3D, AnyCasting, AutoCast, MAGMA, SolidCast entre otros.

COMPARACIÓN DE CFD SOFTWARE DE SIMULACION			
PROGRAMA	FLOW-3D	MAGMASoft	proCAST
Idoneidad para simulación de llenado	EXCELENTE	MODERADO	EXCELENTE
Método de Discretización	Método de diferencias finitas (control de volumen multi-block)	Método de diferencias finitas (voxel)	Método de elementos finitos
Forma del elemento	Mallado regular  Elementos rectangulares  	Mallado regular  Elementos rectangulares  	Mallado Irregular  Elementos Tetrahedrales  
Flujo de superficie libre	VOF	VOF	VOF
Porcentaje de desviación en el tiempo de llenado comparado experimentalmente	15.63%	41.40%	15.34%
Desventajas	Gran espacio en tarjeta de memoria	Gran espacio en tarjeta de memoria	
Ventajas			Menor espacio en tarjeta de memoria

**Tabla 1, comparación de tres CFD software de simulación. (Grande, 2009)**

#### 6.1.4. Esponjas Metálicas

Las estructuras celulares se definen como sólidos celulares, los cuales están formado por una red de celdas poliédricas o poligonales unidas entre sí formando mallas bidimensionales o tridimensionales. Estos materiales son sumamente porosos, lo que se ve reflejado en la densidad relativa, definida como  $\rho^*/\rho_s$ , donde  $\rho^*$  es la densidad del material celular y  $\rho_s$  la del material que forma el sólido macizo. (Castro & Alejandro, 2012)

Las esponjas metálicas, hacen parte de los metales celulares (MC), los cuales se definen como materiales obtenidos a partir de un metal puro o de una aleación, que pueden formar una estructura de poros abiertos, esponjas metálicas, o una de poros cerrados, espumas metálicas. Estas estructuras porosas se caracterizan por sus propiedades mecánicas, físicas y químicas, las cuales han sido de gran interés para el mundo industrial en los últimos años. Por lo tanto, los metales celulares han sido reconocidos como materiales “Multifuncionales”, ya que pueden ser implementados en variedad de aplicaciones, las cuales varían según el proceso de fabricación empleado. (Fernández, Cruz, & Coletto, 2008)

Esta multifuncionalidad les permite a las esponjas metálicas participar en diversos campos de aplicación, son utilizadas como materiales funcionales, es decir para cubrir propiedades relacionadas con la absorción de sonido y vibraciones y el intercambio de calor, como también en aplicaciones relacionadas con sus propiedades mecánicas, es decir, de tipo estructural, como por ejemplo la absorción de impacto y la disminución de

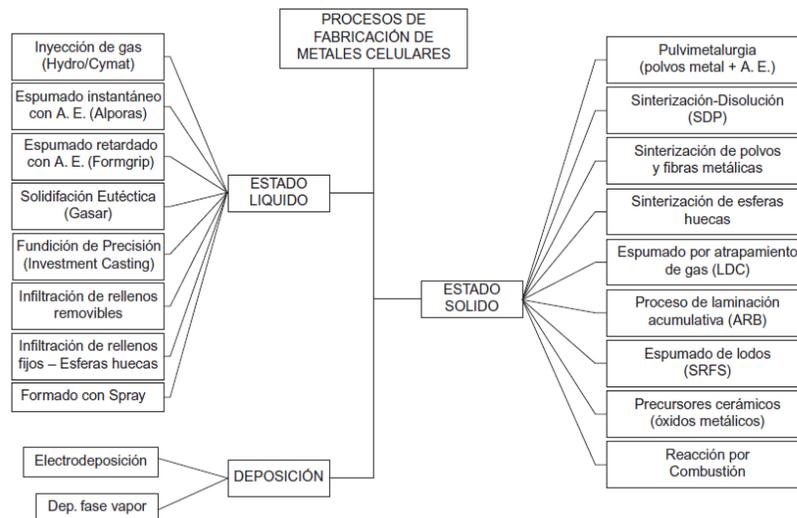
peso. (Fernández et al., 2008)

A pesar de que la producción de esponjas metálicas se empezó desde los años 40's, por falta de información y debido a su alto costo de fabricación, apenas hasta el siglo XX se empieza realmente el estudio de las esponjas metálicas (Castro & Alejandro, 2012). La primera patente con referencia se realizó en 1940, cuando Sosnick obtiene a partir de un proceso realizado con aleación de metales donde uno de ellos se vaporizaba gracias a su punto de fusión para dar lugar entonces a la estructura porosa del metal de mayor punto de fusión. Aún así, los MC son materiales que no han alcanzado un total nivel de desarrollo y, mucho menos, de implementación debido a problemas en los procesos de producción, y éstos cómo están relacionados con los costos de producción, control del proceso y calidad de las espumas. Es por esto que actualmente todavía hay falta de conocimiento en el control de los métodos de fabricación, lo cual influye en que las propiedades de las esponjas no sean tan óptimas como se quisiera y en comparación con los modelos teóricos tengan dificultades o diferencias relevantes.

Además de esto, las esponjas obtenidas por rutas de deposición gaseosa de metales han evolucionado igualmente y se han convertido en la ruta preferida para las grandes industrias, varias de ellas distribuidas en Europa, Japón y Norteamérica, para conseguir esponjas metálicas totalmente funcionales, ya que para realizar producción en serie, la implementación de este tipo de procedimiento es mucho más económico y práctico. A pesar de la existencia de gran variedad de métodos de producción, actualmente se describen otras rutas menos exploradas pero que afirman el gran interés a nivel mundial acerca de la producción y obtención de esponjas metálicas. (Fernández, Cruz, & Coletto,

2009)

Los procesos de obtención de esponjas de aluminio, se muestran en la siguiente Figura 2, los cuales difieren según el estado inicial del aluminio, estado sólido o líquido.



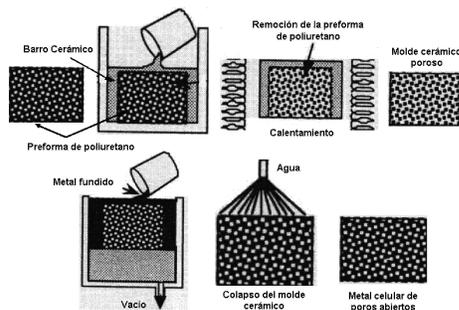
**Figura 2 . Procesos de fabricación de metales celulares**

A continuación se realiza una breve explicación de 3 de los procesos de fabricación de metales celulares, los cuales intervinieron en las experimentaciones y estudios realizados posteriormente.

- Fundición de precisión:

En este método de producción de esponjas metálicas (Figura3), se parte de un modelo de esponja de poliuretano con las características que son requeridas en el componente final (poros por mm, tamaño de poro, % de porosidad). A la esponja de poliuretano se le

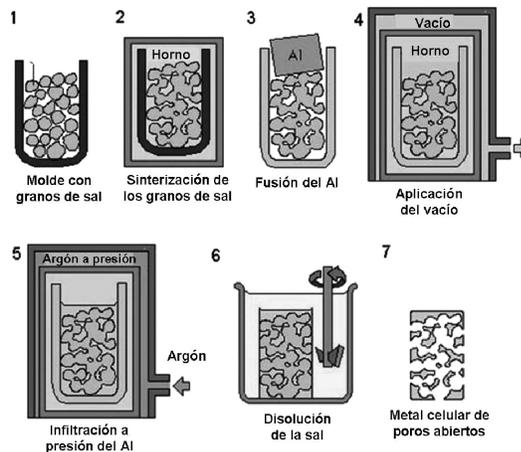
ensambla el sistema de alimentación y otras partes que requiera el componente final mediante técnicas tradicionales como el moldeo por inyección a la cera perdida, dando lugar al modelo propiamente dicho. Posteriormente, este modelo es llenado con una arcilla refractaria altamente resistente a la temperatura para, luego, proceder mediante un tratamiento térmico a la eliminación del modelo de cera y de la preforma de poliuretano, rigidizando, finalmente, la estructura de refractario. El metal fundido es colado en el molde precalentado. Finalmente, se remueve el molde cerámico cuidando de no causar daños a la delicada estructura metálica. (Fernández et al., 2008)



**Figura 3. Proceso fundición de precisión**

- Infiltración por fundición de moldes con rellenos removibles

Este proceso (Figura 4) consiste en preparar un molde con materiales de relleno ya sean orgánicos o inorgánicos; luego, se sinteriza y enfría, dando lugar a un molde con poros interconectados; la preforma obtenida es infiltrada con el metal fundido y luego enfriada y solidificada. Por último, el material obtenido es sometido a un proceso de disolución o a un tratamiento térmico que permita la remoción de la preforma y obtener la esponja metálica. (Fernández et al., 2008)



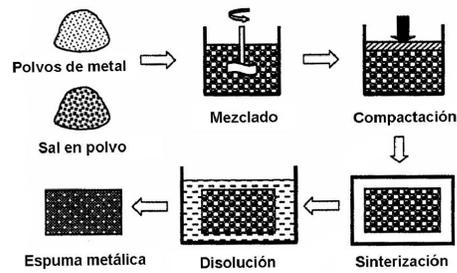
**Figura 4. Proceso Infiltración por fundición de moldes removibles**

Las ventajas de este proceso es que se logra una producción de buena calidad de las esponjas, es un proceso de bajo costo, el cual permite obtener esponjas con regiones de diferentes características y distribución de tamaño de poros de forma controlada. A pesar de ser un proceso de bajo costo, es difícil llevarlo a escala de producción, ya que intervienen un gran número de pasos que requieren mucho tiempo. Al emplear rellenos de sal, se requieren de materiales que no reaccionen con la misma ya que habrían problemas de corrosión. (Fernández et al., 2008)

- Pulvimetalurgia:

Este método consiste en mezclar polvos en una relación determinada, según la porosidad deseada, de un metal y de un material que permita su remoción al final del proceso. Una vez mezclados los polvos del metal con los de el material removible, se compactan, obteniéndose una preforma que posteriormente pasa a ser sinterizada a una temperatura por debajo de la temperatura de fusión del material removible y cercana o igual a la temperatura de fusión del metal. Luego, se procede a la disolución de este material en

agua para obtener una esponja de aluminio. (Fernández et al., 2009)



**Figura 5. Sinterización de polvos metálicos y rellenos removibles**

### 6.1.5. Estado del arte

Las aplicaciones industriales de las esponjas pueden tener características a nivel estético y/o funcional, esto se ve reflejado en las propiedades que adquiere el producto al ser fabricado en este tipo de material. Los siguientes ejemplos son fabricados en esponja de aluminio y tiene un alto componente estético. En la Figura 6, se muestra el diseño de Mathias Bengtsson, llamado Cellular Chair, la cual se define por una forma orgánica y su estructura interna es definida por un referente natural, en este caso la porosidad de los huesos humanos. Para obtener esta estructura porosa interna, un programa o simulador reconoce la forma externa de la silla y en base a ella empieza a construir una configuración celular similar al tejido original de los huesos humanos, garantizando su estabilidad y resistencia por medio de su estructura. (Design, 2007)



**Figura 6. Cellular Chair by Mathias Bengtsson**

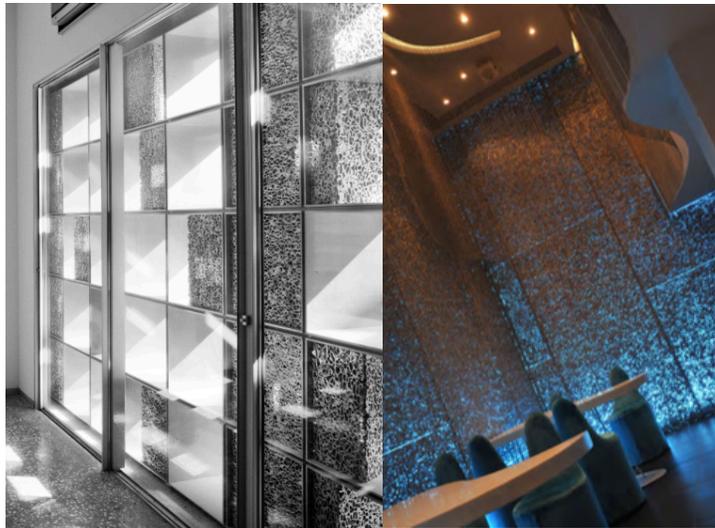
Actualmente, la empresa ALUSION (Cymat Technologies Limited, 2014) ubicada en Canadá, diseña aplicaciones arquitectónicas y de diseño usando esponjas de aluminio. Además de impactar los espacios por medio del uso de este material, intervienen como materiales que aíslan el sonido y refractan las luces en el espacio. En las siguientes Figuras se observan algunas de las aplicaciones industriales de esta empresa.



**Figura 7. Illuminated Bar & Countertop**



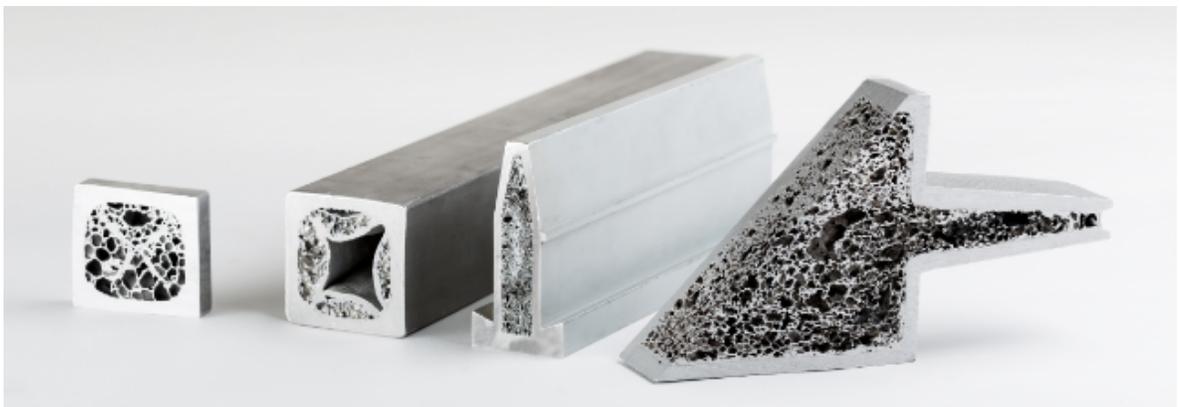
**Figura 8. Table-top**



**Figura 9. Vertical Panel**

**Figura 10. Iluminated Wall panel**

A nivel de funcionalidad y propiedades mecánicas, actualmente se están utilizando este tipo de materiales en sectores de industria automotriz, con el fin de disminuir el peso de las piezas.



**Figura 11. Esponjas de aluminio en el interior de un sólido**

## 7. METODOLOGÍA

El desarrollo de la investigación experimental se inicia a partir de la caracterización de técnicas para la obtención de esponjas de aluminio y cómo a partir de estos se logra establecer un procedimiento mediante la combinación de fabricación digital aditiva y fundición, con el fin de optimizar el proceso de producción.

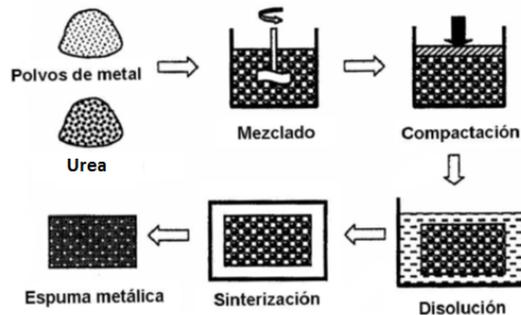
### 7.1. Caracterización de técnicas para la obtención de esponjas de aluminio

Por medio de la revisión de la literatura y vigilancia tecnológica se llevó a cabo una interpretación de los procesos de fabricación de las esponjas de aluminio con el fin de realizar experimentaciones iniciales haciendo uso de algunos métodos, como lo son pulvimetalurgia y fundición de precisión.

#### 7.1.1. Pulvimetalurgia

La primera experimentación que se realiza, se desarrolla en la UdeA, donde se realiza el proceso de **Pulvimetalurgia**. El objetivo de este método es obtener esponjas de aluminio utilizando úrea como material removible. Para el desarrollo, se tiene en cuenta la guía de laboratorio : Elaboración de espumas metálicas de aluminio por medio del método de material removible (space holder). (Universidad de Antioquía, n.d.)

La práctica de laboratorio se realiza a partir del método conocido como pulvimetalurgia, el cual se muestra en la siguiente Figura 11:



**Figura 11 . Sinterización de polvos metálicos y rellenos removibles.**

Este proceso es conocido como proceso por sinterización y disolución (SDP). La técnica emplea a un soporte espacial en la mezcla de polvos para crear la estructura de poro deseada en la mezcla comprimida, luego se sinteriza, y posteriormente, el espaciador se elimina en una etapa de disolución. La forma y el tamaño del espaciador controlan el tamaño de poro y la morfología de la estructura porosa, que por consiguiente afectan las propiedades físicas y mecánicas de la espuma. Los parámetros de control del método fueron estudiados.

La producción de la esponja por la técnica SDP es limitada porque las partículas de NaCl son generalmente irregulares y también el tiempo de la etapa de sinterización y disolución en agua caliente son prologadas; por lo tanto este método de usar urea como espaciador ha tenido éxito. La ventaja de este método, comparado con el SDP, es que se necesita menos tiempo durante la etapa de disolución, es más fácil la eliminación del

espaciador de la espuma, se genera menos contaminación y no hay corrosión del metal base, como en el método SDP con el espaciador de NaCl.

Los materiales utilizados para realizar esta experimentación fueron polvos de aluminio, urea y etanol; y los equipos que hicieron parte en el desarrollo de la misma fueron: estufa de secado, prensa, plancha de calentamiento, molde para la prensa y horno. Los lineamientos definidos en la guía práctica son los siguientes:

1. Se realizan pastillas de 15 g, con adiciones de urea variando el porcentaje en peso entre el 40 y el 70%, la mezcla se realizará con 2 mL de etanol. El propósito es facilitar la adherencia y lograr una distribución uniforme de las partículas de aluminio sobre la urea.
2. La mezcla se homogeniza y se prensa a 1000 Psi por un minuto en un molde para hacer pastillas de 25 mm de diámetro.
3. Se diluye la urea en un recipiente con etanol bajo calentamiento
4. Se pesa el comprimido cada 10 minutos hasta observar que se estabiliza el peso.
5. El contenido de urea en los comprimidos se disuelve sumergiendo las muestras en etanol a 60°C por una hora con agitación constante.
6. El peso de las muestras se evalúa cada 15 minutos para determinar la tendencia de la urea a disolverse, este procedimiento se realiza hasta que el peso de las muestras se estabilice.
7. Lavar con etanol y se secar en el horno a 60°C por 6 horas para asegurar totalmente la pérdida de humedad

8. Desarrollo de la etapa de sinterización que se realiza en el horno a un rango de 540 a 630 °C durante 4 horas, a presión atmosférica, se deben realizar al menos 4 temperaturas y de acuerdo al análisis de las propiedades determinar la temperatura más adecuada para realizar el sinterizado de la esponja.

### 7.1.2. Fundición de precisión

Para realizar el proceso de fundición de precisión se tuvieron en cuenta varios factores relacionados directamente con el proceso de fundir el aluminio y llenar el molde, como también con el proceso previo de obtener el molde cerámico a partir de una preforma, en este caso estructuras con geometrías controladas.

Este proceso se realiza como se muestra en la figura 12, inicialmente se modeló y fabricó la preforma de la esponja que se quería obtener por medio de herramientas digitales como Rhino y su plugging llamado Intralattice.

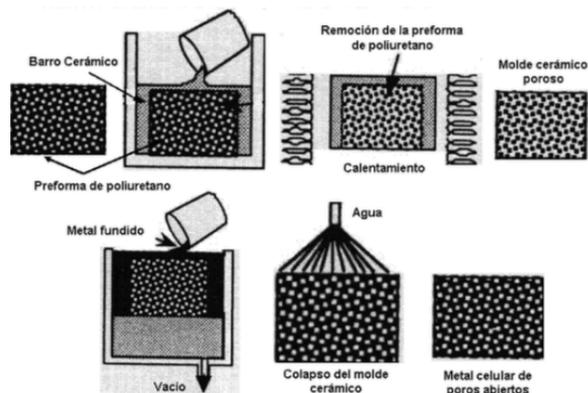


Figura 12 . Fundición de precisión

Posteriormente, después de definir la geometría y la estructura para obtener el modelo en 3D, se realizó una impresión 3D de la preforma en ABS con el fin de ser utilizada para la fabricación del molde cerámico.

El revestimiento utilizado fue Satin Cast 20 marca Kerr cast, compuesto de cristobalita y cuarzo, el cual genera un extra-fino acabado en la pieza final y permite conseguir moldes fuertes y permeables, contiene una mezcla de sílice cristalina. Además de esto permite fundiciones de llenado de metal completos, en este caso del aluminio, el cual funde a 660,3 °C. Es apropiado para el uso de métodos de fundición manuales y para realizarlo se siguieron las siguientes instrucciones de uso (Figura 13) con el fin de ser precisos tanto en la mezcla de agua/polvo, como con la temperatura del agua y el tiempo de fraguado.



Figura 13 . Instrucciones de uso, revestimiento Kerr

**(De, Productos, La, & La, 2008)**

La cantidad de revestimiento y agua se definen a partir de las medidas de los moldes utilizados, los cuales eran cilindros metálicos. Para definir esta cantidad de acuerdo a las medidas se acudió a la tabla que se muestra en la figura 14.

Tablas de proporciones	Altura del frasco							
	50 mm	75mm	100 mm	125 mm	150 mm	175 mm	200 mm	
Diámetro del frasco								
50 mm	150	220	290	--	--	--	--	Polvo (gr)
	57	84	110	--	--	--	--	Agua (cc)
75mm	340	510	680	850	910	1250	--	Polvo (gr)
	129	194	258	323	346	475	--	Agua (cc)
100mm	510	770	1020	1300	1590	1820	2050	Polvo (gr)
	194	293	388	494	604	692	779	Agua (cc)
125mm	--	--	1700	2160	2500	2950	3400	Polvo (gr)
			646	621	959	1121	1292	Agua (cc)

**Figura 14 . tabla de proporción de acuerdo a las dimensiones del frasco (molde)**

De acuerdo a la tabla de proporciones anterior, se resalta la cantidad de polvo y agua que se utilizó para obtener la mezcla y verter el contenido en el frasco o molde metálico de acuerdo a las dimensiones del mismo ( 125 mm de diámetro por 125mm (1 frasco) y 150mm (2 frasco) de altura). La cantidad de polvo y agua para un frasco fue 2160 gr y 621 cc, respectivamente, y para el segundo 2500 gr y 959 cc.

Después de verter la mezcla en cada uno de los recipientes, se dejó reposar mínimo 2 horas para después realizar el proceso de quemado, en el cual la preforma de ABS se remueve y el molde cerámico queda listo para seguir con el proceso de fundición.

Para el ciclo de quemado se tiene en cuenta la siguiente gráfica, donde se muestra el tiempo en horas y la temperatura en grados centígrados.

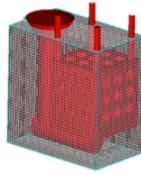


**Figura 15 . Gráfica ciclo de quemado. Tiempo vs Temperatura**

Para optimizar el proceso de fundición se llevó a cabo una simulación empleando el programa Flow 3D, en donde se empleó el modelo o la preforma (\*.STL) generado en Rhino inicialmente. El objetivo de este software es analizar la dinámica de fluidos computacional y establecer las condiciones para realizar los primeros ensayos experimentales para la fundición del aluminio.

**FLOW-3D**

Software para el análisis de dinámica  
de fluidos computacional (CFD)



**Figura 16 . Flow 3D, software para el análisis de dinámica  
de fluidos computacional**

Al obtener las variables de temperatura y tiempo en Flow 3D y después de este proceso de quemado, el molde cerámico queda listo para realizar la fundición del aluminio. Generalmente, la cavidad del molde suele llenarse de metal fundido a través de un sistema de conductos denominado sistema de distribución. Un buen diseño de este sistema permitirá obtener piezas de calidad, sin embargo, un diseño incorrecto podrá producir la aparición de fenómenos que favorezcan el atrapamiento de gases y contaminantes como óxidos, inclusiones o impurezas, o pérdidas de calor que puedan provocar solidificaciones importantes durante el proceso de llenado. La etapa de llenado es sin duda la más importante en los procesos de fundición. De forma general, se podría decir que un correcto llenado del molde sería aquel que permitiese conseguir, fundamentalmente, los objetivos que se enumeran a continuación: (Rodríguez, 2011)

- Llenar rápidamente la cavidad del molde.
- Minimizar los fenómenos que favorecen la oxidación del metal y el atrapamiento de gases.
- Eliminar impurezas como los óxidos, las inclusiones o las escorias.

- Originar gradientes de temperatura favorables para evitar la distorsión de la pieza durante la solidificación y el enfriamiento del metal.

El llenado rápido del molde es especialmente importante cuando las secciones son delgadas, ya que la pérdida de calor del metal fundido puede provocar solidificaciones prematuras que dificulten el flujo de metal y, por tanto, puedan producir defectos importantes debidos al incompleto llenado del molde. Las solidificaciones prematuras del metal en estas secciones se pueden evitar aumentando la temperatura del metal fundido, sin embargo, un sobrecalentamiento excesivo puede favorecer el incremento del atrapamiento de gas, la oxidación del metal o una distribución inapropiada de temperaturas debida al aumento de los gradientes térmicos entre el metal fundido y el molde. Por otro lado, si la velocidad del flujo es alta y la proyección del metal fundido sobre la superficie del molde no es apropiada, se pueden producir defectos importantes en la pieza fabricada debido a la erosión de la superficie del molde o a la inclusión de partículas en la pieza procedentes de dicha erosión. También debe tenerse en cuenta que si el tiempo de llenado no es lo suficientemente grande, el aire inicial que ocupa la cavidad del molde no será adecuadamente evacuado y podrá quedar atrapado en la pieza en forma de poros. (Rodríguez, 2011)

## 8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 8.1. Resultados

Después de realizar una revisión de la literatura y vigilancia tecnológica para conocer los métodos de fabricación de las esponjas, se escogieron dos métodos para llevar a cabo las experimentaciones, pulvimetalurgia y fundición de precisión. Para la realización de éstos se realizó un análisis de los procesos de fabricación, las ventajas y desventajas de los mismos y el resultado final se analizó desde sus componentes estéticos y estructurales.

El primer método consiste en en mezclar polvos en una relación determinada, según la porosidad deseada, de un metal y de un material que permita su remoción al final del proceso. Una vez mezclados los polvos del metal con los de el material removible, se compactan, obteniéndose una preforma que posteriormente pasa a ser sinterizada a una temperatura por debajo de la temperatura de fusión del material removible y cercana o igual a la temperatura de fusión del metal. Luego, se procede a la disolución de este material en agua para obtener una esponja de aluminio. (Fernández et al., 2009). El resultado final de esta experimentación se muestra en la Figura 3.



**Figura 3. Resultado sinterización de polvos metálicos  
y rellenos removibles.**

A partir de esta experimentación se observó que la ventaja de realizar este método con úrea es que se necesitó menos tiempo durante la etapa de disolución, es más fácil la eliminación del espaciador de la espuma, se genera menos contaminación y no hay corrosión del metal base. En esta experimentación se encontró que la obtención final de la esponja se logra de altas porosidades, sus propiedades son reproducibles y a pesar de que el proceso tiene una buena relación costo/beneficio, toma mucho tiempo la disolución del molde y las esponjas finales tienen bajas propiedades mecánicas. La forma y el tamaño del espaciador controlan el tamaño de poro y la morfología de la estructura porosa, que por consiguiente afectan las propiedades físicas y mecánicas de la esponja, e igualmente no se logran poros abiertos y visibles en la capa exterior sino solamente en la parte interna. Sin embargo a pesar de ser un método atractivo para la obtención de esponjas se identificaron limitaciones morfológicas, ya que no era posible obtener variaciones en la geometría de los poros, su disposición era irregular e imposible de asemejar a formas complejas, organizadas y geométricas.

Posterior a esta experimentación se realizó el método de fundición por precisión, el

cual parte de una preforma de ABS y cera con las características que son requeridas en el componente final (poros por mm, tamaño de poro, % de porosidad). La preforma de la esponja deseada se modeló en Rhinoceros (Figura 4) para lograr la impresión en 3D en ABS y se simuló en Flow 3D el proceso de fundición, donde se consideraron variables relacionadas con la temperatura del molde y el metal, como también el tiempo de vaciado.



**Figura 4. Modelación en Rhino y preforma en cera.**

Se encontró que el proceso de impresión es costoso y requiere de un tiempo prolongado, pero aún así se logra la forma deseada en los poros en muy buena calidad. Para simular el proceso de llenado en Flow 3D se tuvieron en cuenta variaciones en la temperatura del molde y de vaciado (ver Figura 5). Teniendo en cuenta esto, y como parte del proceso de validación de la simulación, se decidió proceder con el vaciado de un molde para el cual las condiciones de simulación mostraron un llenado parcial del mismo. Esto se consideró debido a que la complejidad morfológica proporcionada por un llenado parcial del molde era mayor y permitían observar si los detalles de la forma durante el

proceso de llenado obtenidos experimentalmente si se aproximaban a los simulados, aspecto que no podría ser validado si el modelo era llenado totalmente. Las temperaturas de procesamiento del molde y el metal para la condición descrita anteriormente fueron 440 °C y 720 °C, respectivamente.

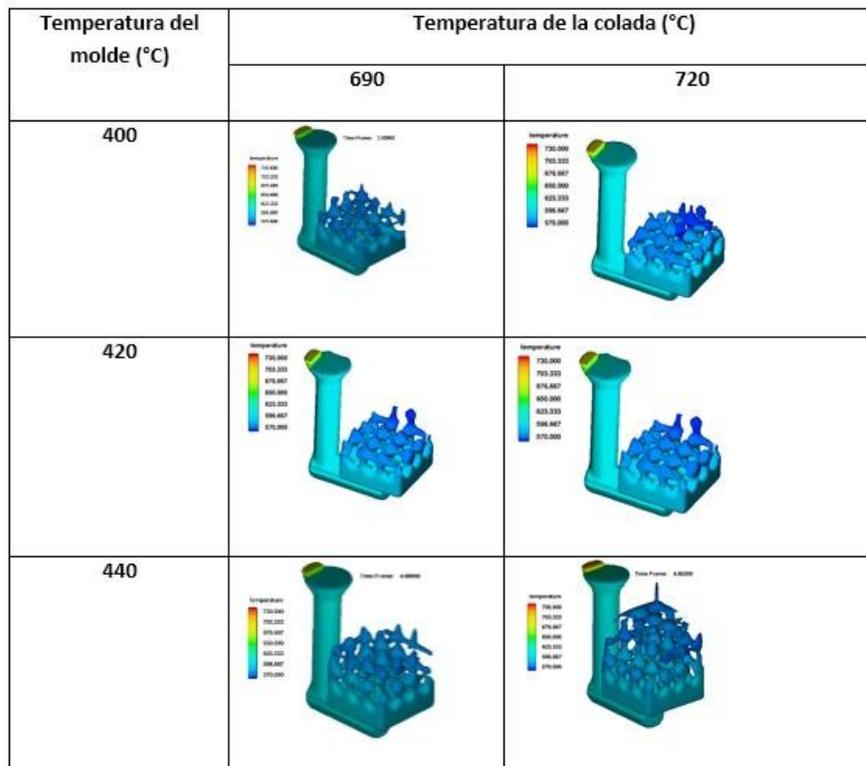


Figura 5. Resultados de la simulación empleando el software Flow 3D.

Posterior a la simulación, se siguió con el proceso experimental. A la preforma se le ensambló el sistema de alimentación y otras partes que requería el componente final mediante técnicas tradicionales como el moldeo por inyección a la cera perdida, dando lugar al modelo propiamente dicho. Posteriormente, este modelo se llenó con una arcilla refractaria, llamada Satin Cast 20 marca Kerr Cast, la cual es altamente resistente a la temperatura para, luego, proceder mediante un tratamiento térmico a la eliminación del modelo de cera y de la preforma de ABS, se encontró que el material se removía satisfactoriamente, sin dejar residuos que no permitieran el llenado del molde rigidizando y finalmente, la estructura de refractario. El metal fundido fue colado en el molde precalentado. Finalmente, se removió el molde cerámico cuidando de no causar daños a la delicada estructura metálica, ya que al humedecer el molde podría perjudicar las propiedades mecánicas de ésta. Para la elaboración del molde y con el fin de ser precisos tanto en la mezcla de agua/polvo se tuvo en cuenta la siguiente tabla (Tabla 1):

Tablas de proporciones	Altura del frasco							
	50 mm	75mm	100 mm	125 mm	150 mm	175 mm	200 mm	
50 mm	150 57	220 84	290 110	-- --	-- --	-- --	-- --	Polvo (gr) Agua (cc)
75mm	340 129	510 194	680 258	850 323	910 346	1250 475	-- --	Polvo (gr) Agua (cc)
100mm	510 194	770 293	1020 388	1300 494	1590 604	1820 692	2050 779	Polvo (gr) Agua (cc)
<b>125mm</b>	--	--	1700 646	<b>2160</b> <b>621</b>	<b>2500</b> <b>959</b>	2950 1121	3400 1292	Polvo (gr) Agua (cc)

**Tabla 1. Proporciones, mezcla polvo agua para molde cerámico**

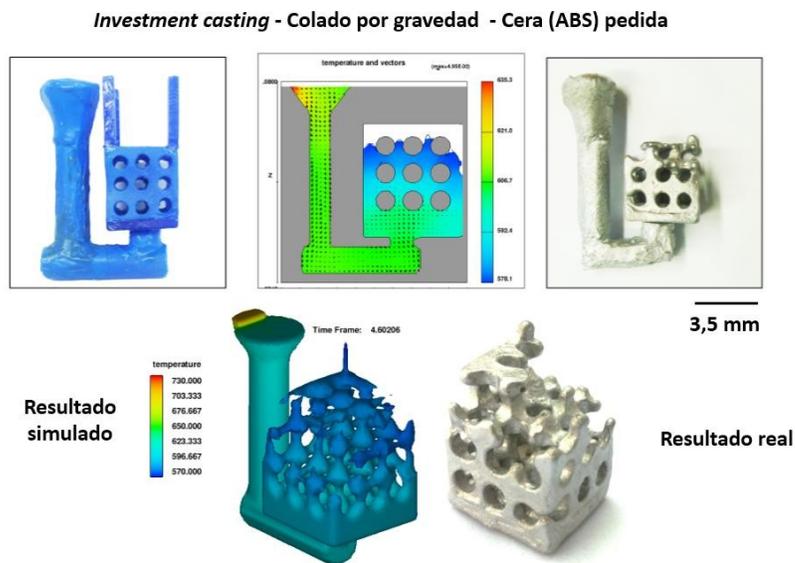
Los valores resaltados fueron los tenidos en cuenta para la fabricación del molde, el proceso se muestra en la Figura 7.



**Figura 7. Elaboración molde cerámico**

Los resultados obtenidos luego de esta experimentación fueron muy aproximados a la simulación realizada en Flow 3D como se muestra en la Figura 8.

Luego de demostrar que la experimentación arrojó resultados bastante aproximados a los indicados por la simulación, se continuó con este proceso, mediante el cual se logró establecer que las condiciones óptimas de temperatura de la colada y del molde son: 720 °C y 500 °C, respectivamente y el tiempo de llenado total fue de 4 segundos.



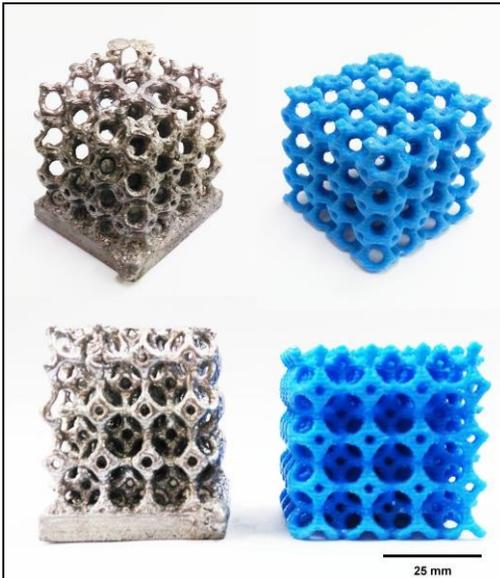
**Figura 8. Resultado final por el método de fundición de precisión.**

Además de este proceso con la preforma mencionada, se realizaron varias preformas para llevar a cabo el proceso de fundición de precisión, con el fin de proponer diferentes patrones o estructuras geométricas controladas, es decir, generar poros abiertos en las esponjas para crear diseños con un alto componente estético. En la Figura 9 se muestran otro modelo propuesto e impreso en ABS. En esta propuesta se observa más complejidad formal en la disposición de los poros.



**Figura 9. Preforma ABS**

Luego de esto se procedió con la obtención de una esponja de morfología interna controlada. En la Figura 10 se observa el resultado final del proceso de optimización y variaciones morfológicas, en esta propuesta se observa cómo la preforma se asimila en tamaño, textura y estructura a la esponja metálica obtenida finalmente.



**Figura 10. Esponjas metálicas obtenidas.**

Este método brindó una gran libertad en el diseño, fue posible generar una alta porosidad, es totalmente reproducible, se creó una estructura homogénea y totalmente controlable, la densidad y el tamaño del poro es variable según la preforma utilizada. A pesar de estas ventajas mencionadas, el proceso tiene un costo elevado por componente o bloque y además es necesario un gran número de etapas que requieren de un tiempo prolongado, así como la etapa de la remoción de la preforma y el ciclo de quemado del molde cerámico.

## 9. CONCLUSIONES

### 9.1. Hallazgos más importantes de la investigación

Los modelos fabricados en cera y ABS empleados para la construcción de los moldes demostraron ser adecuados para la fabricación de moldes cerámicos que permiten el vaciado del aluminio.

La optimización del proceso de fundición de precisión por medio de la identificación de valores de temperatura permite que se logren resultados bastante aproximados en cuanto a la reproducción de la forma de la esponja que se diseña inicialmente. Programas como Flow 3D, Rhino son herramientas de modelación y simulación que facilitan y permiten optimizar el proceso de obtención de esponjas con morfología controlada.

El diseño personalizado de las esponjas de aluminio, le permiten al diseñador un sin fin de aplicaciones industriales, lo cual hace que el proceso sea innovador y tenga un alto nivel de creatividad. Gracias a esto los objetos industriales logran un componente estético atractivo junto a unas altas propiedades mecánicas y físicas.

## 10. BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE DATOS

Castro, I., & Alejandro, I. (2012). Caracterización mecánica de espumas metálicas y su aplicación en sistemas de absorción de energía.

Cymat Technologies Limited. (2014). ALUSION. Stabilized Aluminium Foam.

Retrieved from [http://www.alusion.com/files/ALUSION\\_28\\_Page\\_Low-Res\\_Brochure.pdf](http://www.alusion.com/files/ALUSION_28_Page_Low-Res_Brochure.pdf)

De, I. M., Productos, H. Y., La, P., & La, I. D. E. (2008). Satin Cast Diamante® - Instrucciones, (7).

Fernández, P., Cruz, L. J., & Coletto, J. (2008). Manufacturing processes of cellular metals. Part I: Liquid route processes. *Revista de Metalurgia*, 44(6), 540–555.

<http://doi.org/10.3989/revmetalm.0767>

Fernández, P., Cruz, L. J., & Coletto, J. (2009). Procesos de fabricación de metales celulares. Parte II: Vía sólida, deposición de metales, otros procesos. *Revista de Metalurgia*, 45(2), 124–142. <http://doi.org/10.3989/revmetalm.0806>

Nordberg, G., Langard, S., Sunderman, F. W., Mager Stellman, J., Osinsky, D., Markkanen, P., ... Atsdr. (2001). Metales: propiedades químicas y toxicidad. *Enciclopedia de Salud Y Seguridad En El Trabajo*, 1–76.

Universidad de Antioquía. (n.d.). PRÁCTICA 5. ELABORACIÓN DE ESPUMAS METÁLICAS DE ALUMINIO POR EL MÉTODO DE MATERIAL REMOVIBLE (SPACE HOLDER).