

**EJE DE FORMACIÓN EN INVESTIGACIÓN**

**MONOGRAFÍA:**

**OBTENCIÓN DE ESPUMAS CERÁMICAS Y ESTUDIO DE SU COMPORTAMIENTO  
MECÁNICO.**

**AUTORES:**

SARA URIBE CASTRO

MANUELA ZULUAGA RAMÍREZ

SARA ORTIZ MUÑOZ

**ASESORES:**

ALEJANDRO A. ZULETA GIL

DIANA A. URDINOLA SERNA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE ARQUITECTURA Y DISEÑO

FACULTAD DE DISEÑO INDUSTRIAL

MEDELLÍN-ANTIOQUIA

2018

## Tabla de contenido

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introducción.....                                                                | 5  |
| 1. Planteamiento del problema.....                                               | 6  |
| 1.1 Tema general del proyecto.....                                               | 6  |
| 1.2 Características generales del proyecto de investigación.....                 | 6  |
| 1.3 Problema de investigación identificado.....                                  | 6  |
| 1.4 Pregunta e hipótesis de investigación.....                                   | 7  |
| 1.5 Elementos del problema.....                                                  | 7  |
| 1.6 Limitaciones de la investigación: alcance del proyecto.....                  | 7  |
| 2. Justificación.....                                                            | 8  |
| 2.1 Relevancia dentro de la problemática identificada.....                       | 8  |
| 2.2 Pertinencia dentro del ámbito del diseño industrial.....                     | 8  |
| 3. Marco de referencia.....                                                      | 10 |
| 3.1 Antecedentes.....                                                            | 10 |
| 3.1.1 Espumas cerámicas.....                                                     | 10 |
| 3.1.2 Propiedades mecánicas y relación con las características morfológicas..... | 11 |
| 3.2 Estado del arte.....                                                         | 13 |
| 3.3 Marco teórico: conceptualización de los elementos del problema.....          | 15 |
| 3.3.1 Densidad.....                                                              | 15 |
| 3.3.2 Propiedades mecánicas.....                                                 | 16 |
| 3.3.3 Relación esfuerzo – densidad.....                                          | 17 |
| 3.3.4 Morfología.....                                                            | 18 |
| 4. Objetivos.....                                                                | 19 |

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| 4.1 Objetivo general.....                                    | 19 |
| 4.2 Objetivos específicos.....                               | 19 |
| 5. Metodología.....                                          | 20 |
| 5.1 Exploración para la obtención de espumas cerámicas.....  | 20 |
| 5.2 Parámetros para la realización de pruebas mecánicas..... | 22 |
| 6. Resultados.....                                           | 23 |
| 6.1 Exploración para la obtención de espumas cerámicas.....  | 23 |
| 6.2 Fabricación de las espumas cerámicas.....                | 25 |
| 6.3 Pruebas de compresión y densidad de las probetas.....    | 29 |
| 7. Conclusiones.....                                         | 32 |
| 8. Anexos.....                                               | 33 |
| 9. Referencias.....                                          | 36 |

## **Listado de figuras**

|                                                                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Figura 1.</i> Espumas con porosidad abierta (derecha) y porosidad cerrada (izquierda).....                                                                  | 11 |
| <i>Figura 2.</i> Relacion entre la densidad de los materiales y su resistencia mecánica.....                                                                   | 16 |
| <i>Figura 3.</i> Tipos de esfuerzos mecánicos a los que puede estar sometido un objeto.....                                                                    | 16 |
| <i>Figura 4.</i> Rayado del barro, el plomo y el vidrio.....                                                                                                   | 17 |
| <i>Figura 5.</i> Diferencia entre las propiedades de ductilidad y fragilidad.....                                                                              | 18 |
| <i>Figura 6.</i> Tenacidad.....                                                                                                                                | 18 |
| <i>Figura 7.</i> Posibles formas de distribuir los poros al interior de la probeta.....                                                                        | 22 |
| <i>Figura 8.</i> Proceso anterior a la realización de pruebas de compresión.....                                                                               | 23 |
| <i>Figura 9.</i> Resultado de los ensayos con diferentes materiales de poro y cerámicos.....                                                                   | 25 |
| <i>Figura 10.</i> Dimensiones de las esferas y de las probetas de material poroso, y representación de la cantidad de esferas por probeta según el tamaño..... | 27 |
| <i>Figura 11.</i> Preformas de las probetas con porosidad formadas por la unión de esferas de poliestireno expandido.....                                      | 27 |
| <i>Figura 12.</i> Proceso de llenado de una probeta con las esferas de poliestireno expandido.....                                                             | 28 |
| <i>Figura 13.</i> Proceso de preparación y vaciado del yeso.....                                                                                               | 29 |
| <i>Figura 14.</i> Proceso de disolución de las esferas de poliestireno expandido.....                                                                          | 30 |
| <i>Figura 15.</i> Espumas cerámicas obtenidas.....                                                                                                             | 30 |
| <i>Figura 16.</i> Falla de las probetas.....                                                                                                                   | 31 |

## **Listado de tablas**

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Comparación de datos y resultados de las pruebas de compresión..... | 31 |
|------------------------------------------------------------------------------|----|



## **Introducción**

El presente proyecto de investigación se concentró en la obtención de espumas cerámicas con morfología controlada para aligerar el peso del material cerámico sin variar la relación entre la resistencia mecánica y la densidad. Esto se llevó a cabo fabricando 12 probetas de igual forma y tamaño, 9 de ellas con estructura celular dada por poros de 3 tamaños diferentes, organizados siguiendo el mismo patrón de distribución, y con cantidades distintas (que varían según el tamaño del poro), y 3 con estructura no porosa (material compacto); la intención fue establecer la relación entre las características morfológicas de la porosidad de una espuma y el comportamiento mecánico del material, entendiendo así cuáles podrían ser las posibles oportunidades de aplicación y uso que puede tener dentro del diseño industrial. Los resultados de esta experimentación se sacaron a partir de pruebas de resistencia a la compresión aplicadas a las probetas, que analizaron el comportamiento mecánico tanto de las que poseen estructura celular, como las de material compacto, para establecer la relación existente. Esto sirvió para generar comparaciones y resultados que permitieron entender con mayor profundidad las espumas cerámicas y la relación resistencia mecánica/densidad del material cerámico.

## **1. Planteamiento del problema**

### **1.1 Tema general del proyecto**

Espumas cerámicas y la relación entre su resistencia mecánica y su densidad.

### **1.2 Características generales del proyecto de investigación**

En este proyecto se llevó a cabo una investigación experimental en la cual se establece un procedimiento para fabricar espumas cerámicas con variaciones morfológicas en su porosidad interna, con el objeto de identificar cómo estas variaciones afectan la relación resistencia mecánica/densidad del material. Se inició el proceso con técnicas manuales para fabricar probetas, luego fueron analizadas técnicamente, lo que arrojó resultados con valores cuantitativos que se compararon según la relación anteriormente mencionada.

### **1.3 Problema de investigación identificado**

Los materiales cerámicos, en especial los tradicionales, son ampliamente utilizados en gran variedad de objetos para usos diversos. Algunas de sus propiedades son: dureza, resistencia química, a las altas temperaturas, y a la compresión. Sin embargo, su comportamiento mecánico en relación con su alta densidad ha limitado su uso en aplicaciones que se enmarcan en lo técnico, pues tienden a ser menos competitivos y reemplazados por otros materiales, como los metales o polímeros, e igualmente se ha dejado de lado en aplicaciones dentro del Diseño Industrial.

Por otra parte, los adelantos en investigaciones sobre nuevos materiales muestran alternativas para disminuir la densidad de un material por medio de estructuras porosas o celulares denominadas “espumas”, las cuales poseen la mayoría de las propiedades mecánicas, térmicas,

eléctricas, entre otras, de su material base, aunque con menor densidad, condición que afecta directamente las propiedades mecánicas, limitando el desarrollo de nuevos productos (Sheffler, M. & Colombo, P. 2005). Si bien el material de las espumas define en gran medida su comportamiento, la porosidad de la estructura influye altamente, es por esto que cualquier modificación que se le haga, sobre todo morfológica, puede repercutir directamente en la variación de la resistencia mecánica de la espuma. Lo que busca este proyecto es identificar esa relación entre la morfología del poro, la densidad y sus propiedades mecánicas.

#### **1.4 Pregunta de investigación**

¿Cuál es el efecto del tamaño y distribución de los poros en espumas cerámicas con morfología controlada, sobre la relación entre la resistencia mecánica y la densidad?

#### **1.5 Elementos del problema de investigación**

Los elementos más importantes que conforman el problema planteado son: las espumas cerámicas, las propiedades de los materiales cerámicos y de las espumas cerámicas, específicamente la resistencia a la compresión y su densidad y las características morfológicas de un material cerámico poroso.

#### **1.6 Limitaciones de la investigación: alcance del proyecto**

Se buscó producir espumas cerámicas con variaciones en el tamaño y la cantidad de poros para aligerar el peso del material sin desmejorar la relación resistencia/densidad del mismo, sometiéndolas a pruebas de compresión y densidad para caracterizar su comportamiento y, con los resultados encontrados en estas pruebas, se concluyó cuál es el tamaño y la cantidad de poros que generan un mejor efecto en dicha relación, comparando los resultados con una probeta compacta del mismo material.

## **2. Justificación**

### **2.1 Relevancia dentro de la problemática identificada**

El uso industrial de materiales espumados cerámicos ha venido cobrando fuerza en los últimos años por su alto potencial de aplicación, y esto ha estimulado su investigación (Sheffler, M. & Colombo, P. 2005). Estos tienen como principal ventaja su bajo peso, lo que los hace muy útiles para crear diversos tipos de objetos; dentro de las aplicaciones actuales más relevantes se destaca su uso como filtros o catalizadores en el caso de las espumas con porosidad abierta, y aislantes térmicos e implantes biomecánicos en el caso de las espumas con porosidad cerrada. A pesar de esto, aún no es muy común el uso de materiales cerámicos con estructuras porosas ya que, en comparación con los metales, los polímeros y los compuestos, están en desventaja en cuanto a resistencia mecánica; es por esto que es de sumo interés general encontrar métodos para hacer que se conserve o mejore la relación resistencia mecánica/ densidad, es decir, que el hecho de sustraer material de la estructura no haga que disminuya su resistencia mecánica. Para esto es importante entender cómo varían las propiedades mecánicas de las espumas cerámicas cuando se modifican características morfológicas de los poros, pues el comportamiento de los poros es uno de los principales determinantes de las propiedades en general de las espumas.

### **2.2 Pertinencia dentro del ámbito del diseño industrial**

En el diseño industrial, un aspecto importante es el material de fabricación de los objetos, sin este no podría darse ningún resultado tridimensional. Actualmente los materiales celulares están siendo conocidos e incipientemente utilizados para aplicaciones en el diseño de objetos, en campos como la iluminación y el mobiliario, gracias a propiedades como su bajo peso y sus características estéticas, especialmente la porosidad que, como textura visual, resalta y atrae.

Conociendo cómo influye la modificación de las características de los poros de una espuma en algunas de sus propiedades, y sobre todo en las propiedades mecánicas, el diseñador puede experimentar con las características morfológicas internas y externas de su material espumado para generar cambios en sus diseños sin comprometer el comportamiento del material y del objeto en sí; además, el diseñador puede comprender el comportamiento mecánico del material que elige para producir sus objetos y determinar la mejor forma de aplicarlo.

### 3. Marco de referencia

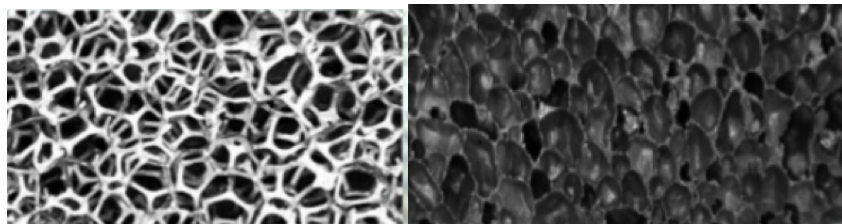
#### 3.1 Antecedentes

##### 3.1.1 Espumas cerámicas.

Las espumas corresponden a una de la dos tipologías de estructuras porosas, son sólidos monolíticos que tienen una estructura celular con una cantidad de poros que se procesan según requerimientos morfológicos y que influyen en el tipo de aplicación: las espumas cerámicas con porosidad cerrada son requeridas, por ejemplo, para aislamiento térmico, mientras que las espumas cerámicas con porosidad abierta son más útiles en aplicaciones que involucren transporte de fluidos, como filtros y catalizadores. (Sheffler, M. & Colombo, P. 2005). Hay un interés actual por los materiales porosos y se debe a que la estructura le aporta propiedades nuevas al material, generando aplicaciones que solucionan problemáticas actuales. Las espumas que tienen un cerámico como material base tienen las siguientes ventajas: alta permeabilidad, baja densidad, bajo calor específico, y alto grado de aislante térmico.

Los procesos de producción de este tipo de estructuras cerámicas se dividen en dos grandes familias: técnicas de replicación y técnicas de espumación. Dentro de las primeras se encuentran los siguientes procesos: (a) revestimiento de espumas poliméricas con lechada y posterior combustión, y (b) pirolisis y recubrimiento por deposición química en fase vapor o CVD (*Chemical Vapor Deposition* por sus siglas en inglés) de espumas poliméricas en donde el material se somete a un proceso de pirolisis, mediante el cual se genera un esqueleto (*scaffold*) carbonado que puede ser cubierto con la lechada cerámica. Por otra parte, dentro de las técnicas de espumación se incluyen los siguientes procesos: (a) incorporación de una fase de gas externa: una vez se forma la lechada con el cerámico deseado y ciertos aditivos estabilizadores, se somete

a una agitación mecánica que puede llevarse a cabo de diferentes formas: usando una máquina tipo batidora, inyectando una corriente de un gas o introduciendo un propulsor de aerosol, (b) evolución de un gas *in situ* en donde se utiliza, por lo general, un agente espumante que se descompone con el calor o por una reacción química, lo que genera la producción de un gas, y (c) solidificación, la cual se da gracias a la polimerización *in situ* de monómeros orgánicos que son solubles en agua (Scheffler, M; Colombo, P. 2005). Las principales diferencias entre ambos tipos de producción radican en que las técnicas de espumación generan estructuras con porosidad principalmente cerrada, y estas estructuras tiene una menor permeabilidad, pero mejor resistencia mecánica, mientras que las técnicas de replicación generan espumas con porosidad por lo general abierta, lo que hace que haya un alto grado de interconexión entre los poros, y la espuma tenga una alta permeabilidad, pero menor resistencia mecánica. (MIT, 2014). En la *Figura 1* se muestran diferencias entre espumas con porosidad abierta y cerrada al ser observadas por un microscopio.



*Figura 1.* Espumas con porosidad abierta (derecha) y porosidad cerrada (izquierda). (Montero, R. (2013). *Espuma de aluminio*. [Figura]. Tomado de: <https://es.slideshare.net/FerminBlanco/espuma-de-aluminio>).

### **3.1.2 Propiedades mecánicas y su relación con las características morfológicas.**

Como se mencionó anteriormente, además de las propiedades del cerámico con el que está hecha la espuma, el principal determinante de las propiedades mecánicas de cualquier material celular es la cantidad de poros y sus características morfológicas; esto quiere decir que las

propiedades mecánicas dependen de la estructura de la espuma y del poro. Teóricos e investigadores de este tipo de materiales, como Lorna Gibson y Michael Ashby, han definido ciertos parámetros morfológicos que describen la estructura de las espumas: el tamaño del poro y su distribución, el grosor del borde del poro y su distribución, la morfología del poro, la apertura del poro, la densidad fraccionaria, el grado de anisotropía del poro, y la relación de la superficie y el volumen; sin embargo, de todas estas se reconoce que las características que más influyen en el comportamiento mecánico son el tamaño de los poros, la cantidad de poros, el grosor de los poros, y también influye la técnica de producción de la espuma, pues de esta depende la configuración morfológica final (Gibson, L.J; Ashby, M.F. 1999).

Un enfoque usado comúnmente para relacionar los parámetros estructurales de la espuma y su comportamiento mecánico, explicado por Paolo Colombo y Michael Scheffler en el libro “Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications (Scheffler, M & Colombo, P. 2005), implica el desarrollo de un modelo micro mecánico, lo que conlleva a asumir una geometría de poro unitaria y un modo de deformación dentro de los bordes, en este modelo la falla de un solo borde constituye generalmente la de todo el poro y en consecuencia de la espuma completa. Se asume entonces que el comportamiento mecánico de un solo poro representa el comportamiento de toda la espuma.

Una de las características morfológicas que se ha estudiado más a profundidad ha sido la geometría del poro. Colombo y Scheffler explican también que hasta principios de la década de los 90 se consideraba que la geometría del poro que mejor aplicaba a las espumas isotrópicas, es decir, que era capaz de llenar el espacio con la mínima superficie de contacto, era el tetracaidecaedro, más conocido como “estructura de Kelvin”, un poliedro que llena el espacio



con 14 caras: 6 cuadrados y 8 hexágonos, con la condición de que las caras sean un poco curvas; pero que en 1993, Weare y Phelan descubren una estructura espumada que contiene 2 tipos diferentes de cavidades de igual volumen y con un área de superficie menor que la de Kelvin: consta de 8 poliedros, 2 dodecaedros y 6 tetracaidecaedros formados por 2 hexágonos y 12 pentágonos, igualmente con caras ligeramente curvadas. (Scheffler, M & Colombo, P. 2005).

Se ha encontrado que los poros de una espuma pueden tener formas variadas, pero solo algunas pueden llenar el espacio sin distorsionarse (curvar sus lados): los prismas triangular y cuadrado, el dodecaedro rómbico y el tetracaidecaedro, son algunos ejemplos. Explican Gibson y Ashby que la mayoría de las espumas no tienen una porosidad con unidades idénticas, sino que contienen poros de diferentes tamaños, formas, caras y aristas; pero hasta las espumas más aleatorias obedecen a reglas topológicas. Además, se sabe que casi todas las espumas fabricadas por el hombre son anisotrópicas, es decir, sus poros tienden a elongarse, aplanarse o tener paredes de grosores variables (Gibson, L.J; Ashby, M.F. 1999).

### **3.2 Estado del arte**

Numerosas investigaciones se han realizado para tratar de comprender y determinar la influencia de las características morfológicas del poro en las propiedades mecánicas de una espuma. No se encontraron trabajos que evidencien estudios de espumas cerámicas particularmente de yeso, que fue el material utilizado en este proyecto, sin embargo, a continuación se nombran ejemplos de tres casos de estudio, los primeros dos tienen como objeto el análisis de espumas cerámicas (de barbotina e hidroxiapatita), el último tiene como base de estudio una espuma de aluminio.

El primero consiste en un estudio sobre la construcción y caracterización de cerámicas porosas a partir de espumas de poliuretano y barbotinas de arcilla roja (M. Ferrer, G. Peña

Rodríguez y H.J. Dulce. 2011). Se fabricaron probetas de cerámica porosa con dimensiones promedio de 4 cm de ancho, 12 cm de largo y 2 cm de alto, a partir de espumas de poliuretano inmersas en barbotina de arcilla roja con una densidad de  $1,5 \text{ g/cm}^3$  y un tamaño de partícula pasante tamiz ASTM 325 (45 micrómetros), y se utilizaron espumas con 4 tipos de densidades; estas probetas se sometieron a pruebas mecánicas de carga a la rotura, módulo de rotura, resistencia a la flexión. Dentro de las principales conclusiones a las que llegaron fue que la densidad de las cerámicas porosas disminuye conforme aumenta la densidad de las espumas base con las que están hechas, y esto se debe a que la espuma menos densa tiene mayor cantidad de poros que van a ser llenados por la barbotina; también que la contracción de la cerámica porosa en el secado es influenciada por la posición de la probeta y no depende de la longitud; y finalmente, que en este estudio las 13 cerámicas porosas no tenían un tamaño de poro homogéneo y no presentaban una distribución isométrica.

En el segundo caso, el grupo de Biomateriales de la Universidad de Antioquia se planteó como propósito el estudio de estructuras celulares de hidroxiapatita, un cerámico bioactivo que se enlaza directamente al tejido óseo y tiene baja resistencia mecánica, manufacturadas mediante el proceso de gel-casting, el cual permite preparar materiales cerámicos con microestructura y propiedades mecánicas controladas (González, J. Escobar, D. M. Ossa, C. P. 2007). Se prepararon espumas de hidroxiapatita con porcentajes de sólidos de 40 y 50%. Los resultados mostraron que las espumas obtenidas tenían poros abiertos e interconectados con un tamaño de alrededor de 10 micrómetros. Para la muestra con 50% de sólidos, la resistencia mecánica fue de 3,2 MPa en promedio y, para la de 40% de sólidos, fue de 0,9 MPa en promedio. La carga necesaria para fracturar las probetas con mayor cantidad de sólidos fue más alta que la necesaria para fracturar las probetas con menor cantidad de sólidos. Se concluyó que para tener una mejor

densidad y propiedades mecánicas en las espumas se requiere un alto porcentaje de sólidos, pero si la concentración de hidroxiapatita en la suspensión es demasiado alta se presenta mayor viscosidad haciendo difícil la mezcla y generación de la espuma; además, el porcentaje de sólidos influye en la porosidad y la resistencia mecánica pues, cuando este es alto, la porosidad disminuye y viceversa (en este caso las espumas con 50% de sólidos tuvieron menor porosidad que las que tenían 40% de sólidos). Finalmente, encontraron que a mayor cantidad de sólidos, menor porosidad, y a mayor cantidad de sólidos, mayor resistencia mecánica.

Por último, un grupo de japoneses realizaron un estudio sobre el efecto de la morfología del poro en las propiedades de compresión de una espuma de aluminio con porosidad abierta (T.G Nieh, T. G. Higashi, K. Wadsworth, J. 1999). Hicieron un estudio de espumas de aluminio de poros abiertos con diferentes densidades (densidad relativa entre 5 y 10%) y diferentes morfologías (4-16 poros por  $\text{cm}^2$ ) que fueron caracterizadas en cuanto a la compresión. Se concluyó que: (a) la densidad es la variable más importante, pues las espumas más densas tienen un módulo y un esfuerzo de cedencia más altos; y que (b) el punto de tensión en el cual ocurre la densificación, disminuye con la densidad de la espuma.

### **3.3 Marco teórico: conceptualización de los elementos del problema**

A continuación, se definen conceptualmente cada uno de los elementos relevantes de la problemática tratada:

#### **3.3.1 Densidad.**

Es la propiedad que expresa la relación entre la masa y el volumen de un cuerpo, cuya unidad de medida en el sistema internacional es el  $\text{Kg/m}^3$ . En la *Figura 2* se observa que los materiales cerámicos tienen una alta densidad, en un rango entre 2500 y 7000  $\text{Kg/m}^3$ .

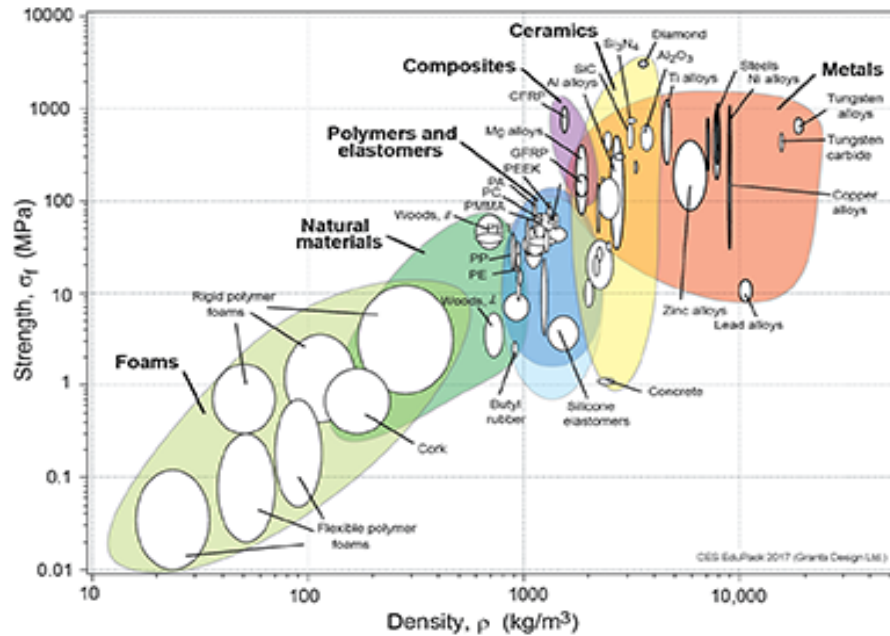


Figura 2. Gráfico que relaciona la densidad de los materiales vs su resistencia mecánica (Propiedad Relativa).

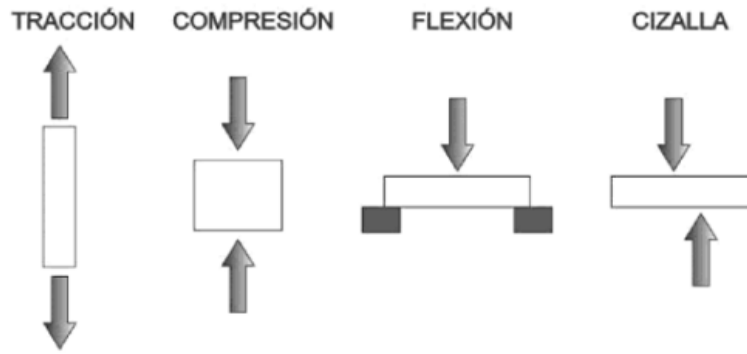
(Granta. (2017). *Material Property Chart*. Recuperado el 04 de 02 de 2018, de Granta:

<http://teachingresources.grantadesign.com/mikecharts/strenght-vs-density>).

### 3.3.2 Propiedades mecánicas.

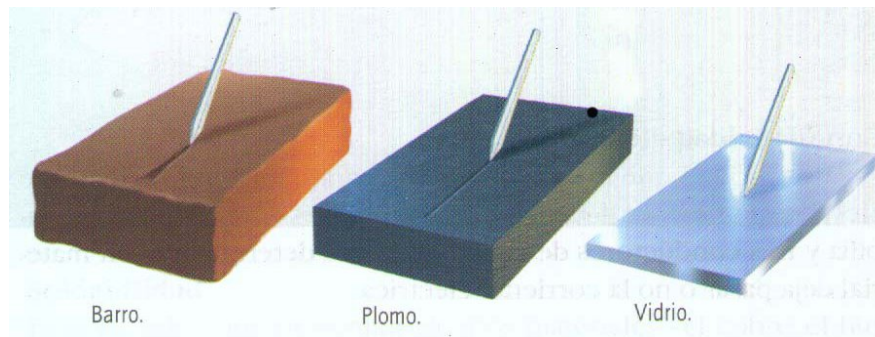
Corresponden a propiedades físicas de los materiales entre las cuales están:

- Resistencia mecánica: resistencia que presenta un material a la deformación cuando se somete a cargas o esfuerzos exteriores. Pueden ser de cuatro tipos: tracción, compresión, flexión o cizalla; en la *Figura 3* se puede evidenciar como actúan las cargas sobre un objeto en cada uno de los esfuerzos.



*Figura 3.* Tipos de esfuerzos mecánicos a los que puede estar sometido un objeto. (Barroso, S., Gil, J. R., & Camacho, A. M. (2010). *Introducción al conocimiento de los materiales y a sus aplicaciones*. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia).

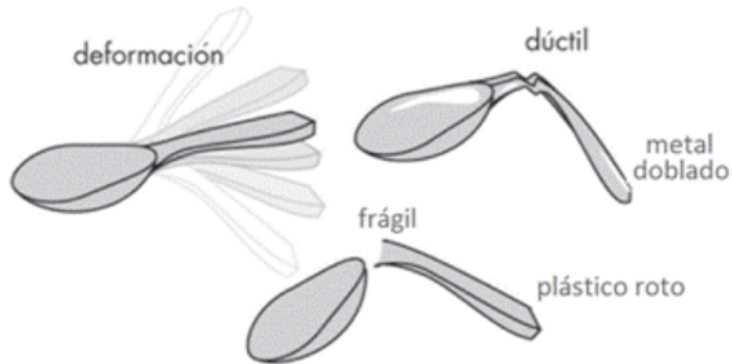
- Dureza: resistencia que opone un material al ser rayado por otro. En la *Figura 4* se observa la dureza de 3 materiales.



*Figura 4.* Rayado del barro, el plomo y el vidrio. Tomado de:

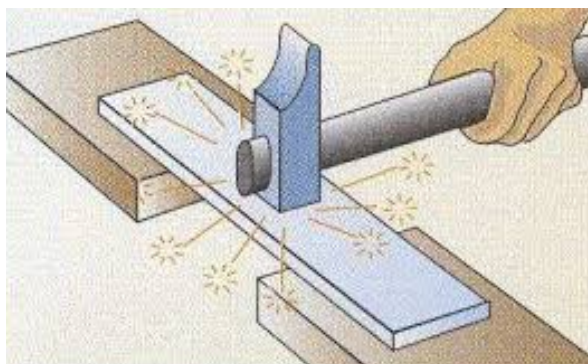
<https://www.mindmeister.com/es/1036266579/propiedades-de-los-materiales>.

- Fragilidad/Ductilidad: la fragilidad es capacidad de un material de romperse, cuando se aplica una carga, sin deformarse significativamente. La falla frágil se da sin deformación plástica. En oposición, la ductilidad es la capacidad de un material para deformarse plásticamente sin fracturarse. En la *Figura 5* se observa la diferencia entre ambas.



*Figura 5.* Diferencia entre las propiedades de ductilidad y fragilidad. (Duran, G. (2013). *Qué es el enlace iónico*. [Figura]. Tomado de: [http://quimicaigustavoduran.blogspot.com.co/2013\\_11\\_01\\_archive.html](http://quimicaigustavoduran.blogspot.com.co/2013_11_01_archive.html)

- Tenacidad: es la capacidad que presenta un material para absorber energía durante su deformación plástica hasta producirse la rotura. En la *Figura 6* puede observarse de forma gráfica una ejemplificación de esta propiedad.



*Figura 6.* Tenacidad. Tomado de:

<http://aulas.uruguayeduca.edu.uy/mod/book/view.php?id=21792&chapterid=8172>

Los materiales cerámicos presentan particularmente una elevada resistencia a la compresión, alta fragilidad y dureza, y una baja tenacidad.

### **3.3.3 Relación esfuerzo - densidad.**

Se relaciona el valor de la resistencia mecánica con respecto al valor de la densidad del material, realizando una división entre ambos. Se considera que el resultado es positivo cuando la estructura de un material es lo más liviana posible, pero conserva una buena resistencia a cargas mecánicas. La *Figura 2*, mostrada anteriormente, evidencia esta relación en todas las familias de materiales, y ubica a los cerámicos como una de las familias que mayor resistencia y densidad tienen.

### **3.3.4 Morfología.**

Etimológicamente la palabra “morfología” significa “estudio de la forma”: [morfo-] “forma” y [-logía] “ciencia, estudio, tratado”. Desde el Diseño Industrial, expresado por Ever Patiño Mazo y Elsie María Arbeláez, profesores ambos de la Universidad Pontificia Bolivariana, en su libro “Generación y transformación de la forma”, el objetivo de la morfología es el estudio de la generación y las propiedades de la forma. (Patiño, E; Arbeláez, E.M. 2009). Los poros de una espuma pueden analizarse desde los siguientes parámetros morfológicos: tamaño del poro y su distribución, calibre del borde del poro y su distribución, morfología del poro, apertura del poro, densidad fraccionaria, grado de anisotropía del poro, y relación de la superficie y el volumen.

## **4. Objetivos**

### **4.1 Objetivo general**

Determinar el efecto de la porosidad de una espuma de yeso sobre la relación entre su resistencia mecánica y su densidad.

### **4.2 Objetivos específicos**

1. Desarrollar una metodología para la obtención de espumas cerámicas.
2. Fabricar espumas cerámicas con diferente cantidad y tamaño de poros.
3. Caracterizar el comportamiento mecánico de las espumas obtenidas y de la probeta de material compacto.
4. Comparar el comportamiento mecánico de las espumas cerámicas obtenidas.



## **5. Metodología**

### **5.1 Exploración para la obtención de espumas cerámicas**

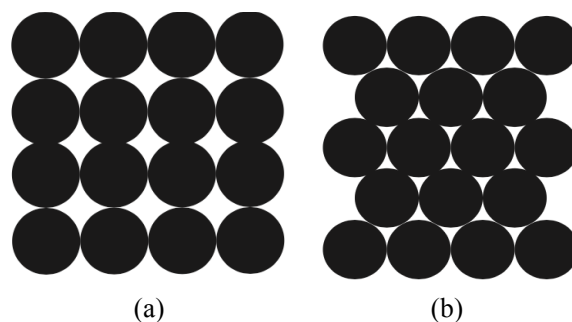
Para comenzar la fase de exploración formal y material, se determinó el tipo de proceso productivo que se utilizaría para la fabricación de las probetas. En el marco teórico se explica que existen dos tipos de procesos productivos para fabricar espumas cerámicas, en este proyecto se eligió trabajar con técnicas de replicación pues con este tipo es posible fabricar espumas con porosidad abierta y controlada. Con base a la elección tomada, se procedió a analizar, experimentar y seleccionar materiales, formas y parámetros de fabricación de las probetas.

El proceso de exploración comenzó con la selección de la morfología del poro, para esto se realizó un análisis de productos de comercialización masiva en el mercado, y con este se identificaron productos de fácil adquisición en grandes volúmenes y que conservaran una misma forma y dimensiones estandarizadas, con el fin de garantizar que los poros de todas las probetas tuvieran los mismos parámetros morfológicos. Se identificó que una forma recurrente en productos de consumo masivo es la esférica, y se realizaron ensayos con cereal, chocolates, gel para floristería y decoración, pelotas de goma, gomas de mascar, y poliestireno expandido en 3 tamaños diferentes: 18 mm (No. 2), 30 mm (No. 3) y 39 mm (No. 4).

Paralelamente se realizó una exploración de los posibles materiales cerámicos con los cuales se construirían las probetas. Los parámetros de evaluación fueron: un material de fácil adquisición en el mercado, de fácil preparación, que presentara buena fluidez para que pudiera esparcirse rápida y eficientemente dentro del molde, con un tiempo de secado corto, y en general un material que se pudiera preparar y utilizar con indumentaria básica. Se realizaron ensayos con barbotina, cemento refractario, yeso estándar y yeso escayola.

Posteriormente, se continuó el proceso estableciendo los parámetros del molde. En primer lugar, se definió que las probetas debían tener una forma cúbica o prismática con dimensiones cercanas a 120x120x120 mm con base en las diferentes normativas técnicas que regulan las muestras de materiales que deben ser sometidas a ensayos mecánicos. Con base en esto se procedió a experimentar la construcción de los moldes con madera aglomerada, MDF y cartón corrugado; con cada uno se realizaron varios ensayos, uniendo cinco láminas (una base y cuatro paredes) con colbón o pegante para madera, y cinta de enmascarar. Estos tres materiales son fáciles de conseguir y económicos, y aunque todos son buenos absorbentes de agua (que para este caso se considera una dificultad), la madera lo hace en menor proporción o de forma más lenta, es decir, tiene una mejor capacidad de resistencia ante los líquidos y es más rígida, lo que garantiza que la probeta conserve su forma en el proceso de vaciado y secado del cerámico.

Finalmente se determinó la distribución de los poros en la probeta, y para esto, teniendo en cuenta la forma esférica del poro, había dos posibilidades: distribuir los poros en filas y columnas organizadas o planos paralelos, u organizarlos en planos intercalados; en la *Figura 7* se visualizan, desde una vista frontal de la probeta, cómo es cada una de estas.

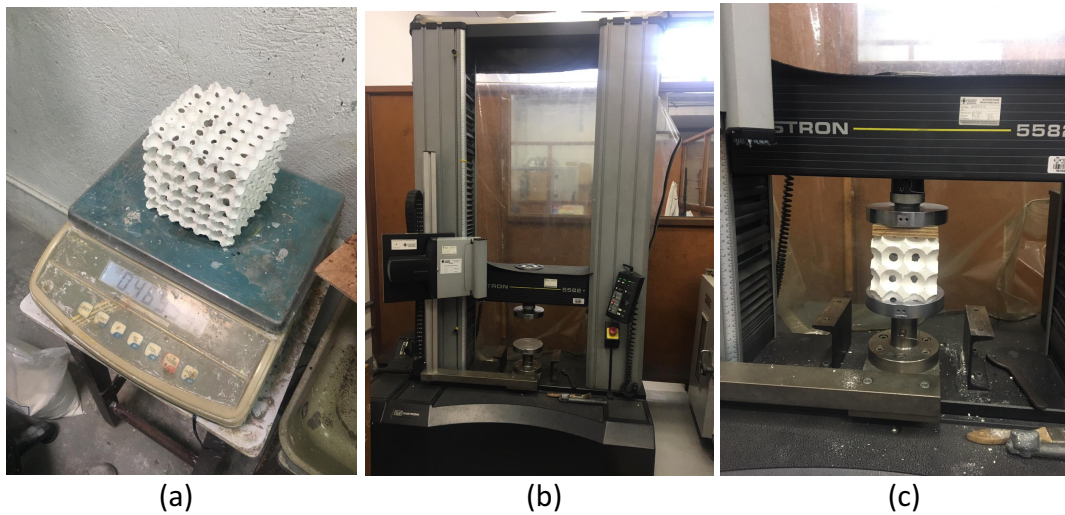


*Figura 7.* Posibles formas de distribuir los poros al interior de la probeta:

(a) Planos paralelos y (b) Planos intercalados.

## 5.2 Parámetros para la realización de pruebas mecánicas

Antes de realizar las pruebas mecánicas, se pesó cada una de las probetas obtenidas en una balanza, se dividieron por grupos según el tamaño del poro y se enumeraron del 1 al 3, para observar qué tan diferentes estaban y promediar ese valor. Se realizaron las pruebas de compresión de dos probetas por cada grupo, y dos probetas del material macizo, en la máquina universal Instron (No. Serial 5169), utilizando bolsas de tela para cubrir las probetas y evitar el daño de la máquina. Esta máquina permite graficar las curvas de la fuerza aplicada, mostrándolas en una pantalla, y comparándolas entre sí. En la *Figura 8*, se puede observar el proceso de medición del peso y la colocación de las probetas en la máquina testeadora.



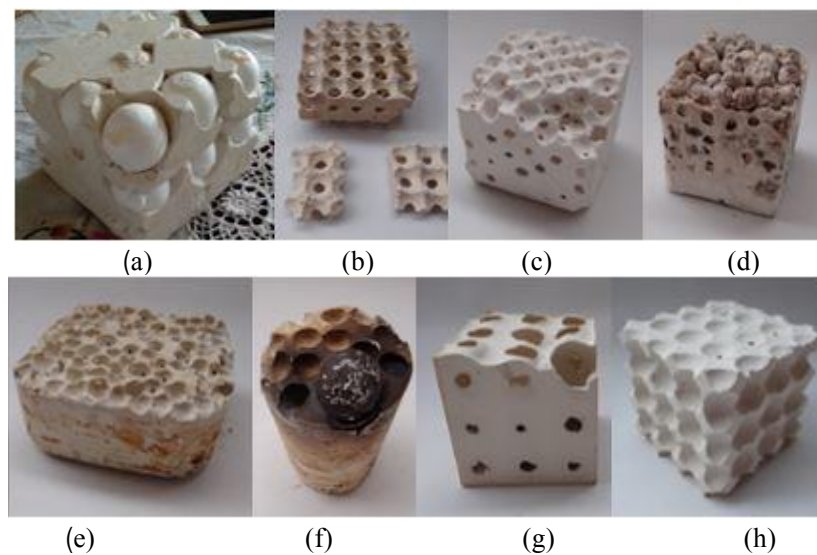
*Figura 8.* Proceso anterior a realizar las pruebas de compresión. a) Pesar probetas en balanza. b) Máquina Universal-instron. c) Probeta a punto de realizar prueba de compresión sobre ella.

## 6. Resultados

### 6.1 Exploración para la obtención de las espumas cerámicas

Al explorar los diferentes materiales para obtener la forma y distribución del poro, se evidenció que los productos orgánicos se descomponen fácilmente durante el proceso de vaciado y secado de la probeta. Las esferas de goma y las gomas de mascar presentaron dificultades a la hora de llevar a cabo el proceso de sustracción que se ensayó por medio de combustión, ya que, al elevar la temperatura al punto requerido, estas esferas se carbonizaron y se quedaron adheridas a la probeta. Por otro lado, las esferas de gel para floristería se comportaron de forma adecuada durante todo el proceso de vaciado y secado al aire libre del cerámico, y al ser expuestas a altas temperaturas para sustraerlas de la probeta, el agua que contienen se evapora y su volumen se reduce considerablemente hasta que solo quedan unas pequeñas esferas de material polimérico compacto; inicialmente se consideró que, al presentar este comportamiento, estas esferas podrían ser un material de fácil sustracción, sin embargo, fue difícil extraer completamente esos pequeños residuos que quedaron al interior de la probeta; adicionalmente, estas esferas de gel se comercializan únicamente en dos tamaños, por lo que son insuficientes para cumplir con el parámetro de los 3 tamaños de poros. En contraste, las esferas de poliestireno expandido se consiguen en varios tamaños y, por lo general, conservan unas dimensiones estandarizadas; este material no presentó ningún tipo de modificación durante el proceso de vaciado y secado, y el proceso de sustracción de la probeta es relativamente sencillo y no requiere de combustión: la probeta se sumerge en thinner y este disuelve el poliestireno, además, el material tiene un bajo costo y se consigue fácilmente, por lo que este fue el material elegido para continuar con la realización de las espumas.

En cuanto al material cerámico, después de realizar ensayos con el cemento refractario y la barbotina, se evidenció que éstos requieren de mucha más temperatura y tiempo de secado que el yeso, mientras que éste puede secarse en corto tiempo y a temperatura ambiente, sin necesidad de llevarlo al horno. El yeso escayola, en comparación con el estándar, tiene un proceso de secado más rápido y es especialmente utilizado para la fabricación de moldes, por tales motivos fue el seleccionado. En la *Figura 9*, se pueden visualizar algunos de los resultados de los ensayos de materiales, tanto de los poros como de la mezcla y el molde.



*Figura 9.* Resultado de los ensayos con diferentes materiales de poro y cerámicos. a) esferas de poliestireno expandido; b) esferas de chocolate jet; c) esferas de gel; d) esferas de cereal; e) esferas de goma de mascar; f) esferas de goma; g) esferas de poliestireno expandido con yeso escayola.

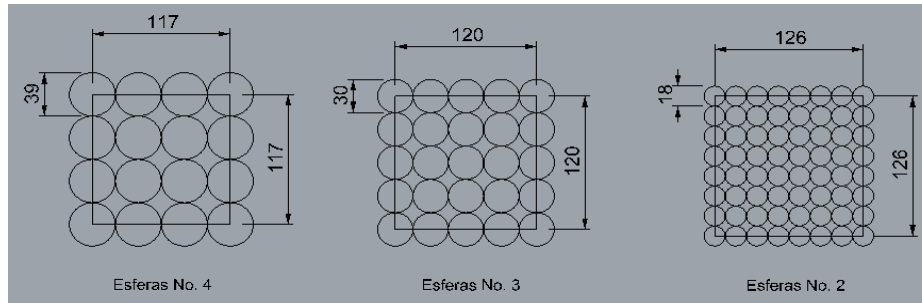
En las primeras probetas ensayadas se distribuyeron los poros de ambas maneras: por planos paralelos y planos intercalados, pero definitivamente las fabricadas con distribuciones de planos paralelos son más resistentes que las fabricadas con planos intercalados puesto que contienen mayor masa de material cerámico, ya que las intersecciones entre los poros tienen mayor volumen.

## 6.2 Fabricación de espumas cerámicas

El proceso seleccionado para la fabricación de las probetas, como ya se mencionó, se basa en una técnica de replicación que consiste en revestir con la solución cerámica una preforma de otro material y posteriormente sustraer esta preforma. Se eligió esta técnica porque permite ser trabajada de forma casera y no requiere de herramientas complejas para su implementación.

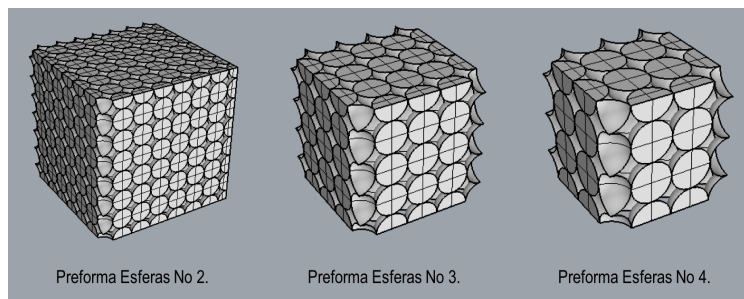
La preforma que origina la porosidad de las probetas son esferas de poliestireno expandido de 3 tamaños diferentes, que para el proyecto se denominaron así: PG (poro grande) esfera número 4 de 40mm de diámetro, PM (poro mediano) esfera número 3 de 30 mm de diámetro, y PP (poro pequeño) esfera número 2 de 20 mm de diámetro. Se realizaron 3 probetas para cada uno de los 3 tamaños y 3 probetas del material cerámico compacto (sin poros).

Si bien se determinó que las probetas debían tener unas dimensiones de aproximadamente 120x120x120 mm, para establecer las medidas reales se consideró el diámetro de cada uno de los tres tipos de esfera, pues un número exacto de estas debían caber de forma ajustada en la probeta. El ideal era estandarizar el molde, y por esto se calculó que el número de esferas multiplicadas por cada diámetro diera como resultado una dimensión cercana a 120 mm, con un margen de  $\pm 10\%$ ; de esta forma las probetas PP con esferas No. 2 se hicieron con dimensiones de 126x126x126 mm, las probetas PM con esferas No. 3 se hicieron con dimensiones de 120x120x120 mm, y las probetas PG con esferas No. 4 se hicieron con dimensiones de 117x117x117 mm. En la *Figura 10* se observan estas dimensiones desde una vista frontal.



*Figura 10.* Dimensiones de las esferas y de las probetas de material poroso, y representación de la cantidad de esferas por probeta según el tamaño.

Las esferas que tocan las paredes del molde no se colocaron completas sino divididas a la mitad, en cuartos u octavos para aumentar la superficie de contacto entre la esfera y la pared, puesto que, de esta forma se puede ver la porosidad de la probeta una vez se sustrae la preforma. La *Figura 11* muestra la distribución de las esferas de cada tamaño formando cada una de las preformas.

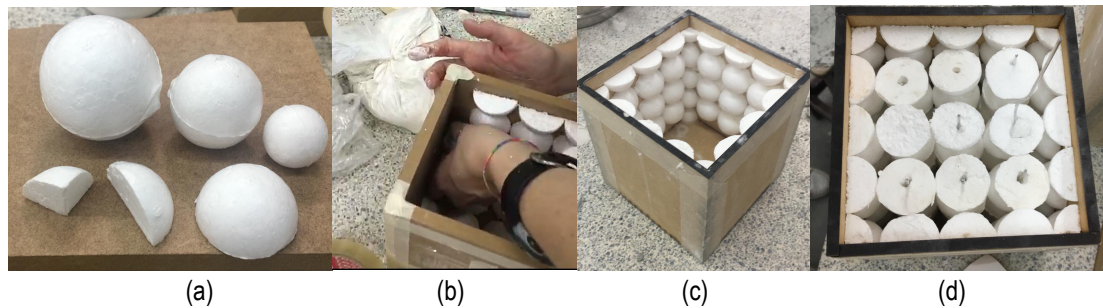


*Figura 11.* Preformas de las probetas con porosidad formadas por la unión de esferas de poliestireno expandido.

Se emplearon 343 esferas No. 2 por probeta (1029 en total), 64 esferas No. 3 por probeta (192 en total) y 27 esferas No. 4 por probeta (81 en total). Adicionalmente se cortaron a láser las bases y paredes en MDF de 5.5 mm de calibre para fabricar los 12 moldes.

La fabricación de cada molde consistió en unir con pegamento para madera los pares de paredes contiguas, y unir cada par a la base; se hizo así para poder desmoldar con facilidad. Posteriormente se procedió a ubicar en el interior de cada molde las esferas de poliestireno

expandido, comenzando por las de las paredes (se unieron con pegamento) y luego llenando el interior en planos paralelos. En la *Figura 12* puede observarse la secuencia de llenado de una probeta. A las columnas de esferas completas, se les debió insertar un alambre de aluminio con el fin de mantenerlas unidas y alineadas.



*Figura 12.* Proceso de llenado de una probeta con esferas de poliestireno expandido. (a) 3 tamaños de esferas y los cortes realizados; b) Forma de pegarlos a las paredes con pegamento; c) Paredes del molde con todas las esferas o recortes de esferas pegadas; c) Molde completamente lleno de esferas unidas por medio de un alambre de acero.

Para preparar la mezcla, se utilizó una proporción de (1/1,7), es decir, 1 porción de yeso escayola dividido 1,7, que fue la cantidad de agua utilizada por molde y, antes de iniciar el vaciado, se analizaron los volúmenes de los moldes. El volumen del molde sin poros para las probetas compactas, dio un total de 2.196 cm<sup>3</sup> y este valor se dividió en 1,7 lo que dio 1.291,76 cm<sup>3</sup> de agua que se debía utilizar para estas probetas. El volumen de los moldes con poros, resultó de la división del volumen del molde compacto entre 2, asumiendo que las esferas ocupaban aproximadamente la mitad del espacio, y dio un valor de 1.098 cm<sup>3</sup> y este dividido entre 1,7 arroja un valor de 645,88 cm<sup>3</sup> que corresponde a la porción de agua necesaria para las probetas con esferas en su interior; así no se generaron desperdicios en las probetas.

Posteriormente, se procedió a medir las cantidades establecidas, luego se agregó al balde el yeso y el agua, dándole golpes al recipiente para dispensar y mezclar adecuadamente el material.



Una vez el yeso y el agua estuvieron juntos, se evidenció una “isla” de yeso que se iba hidratando hasta el momento de mezclar con la mano, allí se contó 1 minuto y se comenzó a revolver sin parar y en círculos, tratando de eliminar todos los cúmulos de yeso creando una mezcla homogénea; luego de 1,5 minutos revolviendo, se echó la mezcla desde una de las esquinas del molde hasta llegar al tope. En la *Figura 13* se puede visualizar el proceso de preparación de yeso y vaciado en el molde.



*Figura 13.* Proceso de preparación y vaciado del yeso. (a) Verter el agua en el balde; b) Agregar el yeso en el agua; c) Revolver la mezcla con la mano sin dejar grumos; d) Verter la mezcla en el molde; e) Probeta secándose.

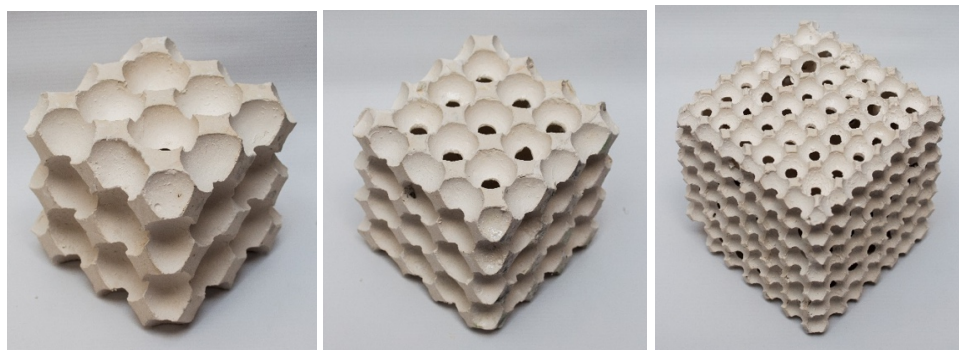
Cuatro días después del vaciado se procedió a sacar las probetas del molde de MDF, con ayuda de un formol y un martillo, pero aún no estaban secas del todo, por lo que se dejaron secando al aire libre una semana más.

Para realizar el proceso de sustracción de la preforma se adquirieron tres galones de thinner y un balde de polipropileno (este material no se disuelve en este químico) y se procedió de la siguiente forma: se retiraron las esferas de poliestireno expandido que se encontraban en la parte exterior, luego se comenzó sumergiendo de a 2 probetas dentro del thinner durante 30 minutos y al retirarlas, se evidenció que quedaban restos de poliestireno expandido en estado viscoso adherido a las paredes de la probeta, por lo que se utilizaron pinzas para retirar la mayor cantidad de restos posible. Posteriormente se dejaron en el exterior para secarse con el calor del sol por un

día. En la *Figura 14* se evidencia el proceso de disolución de las esferas, y en la *Figura 15* los resultados obtenidos al día siguiente de la disolución, cuando las probetas ya estaban secas.



*Figura 14.* Proceso de disolución de las esferas de poliestireno expandido.

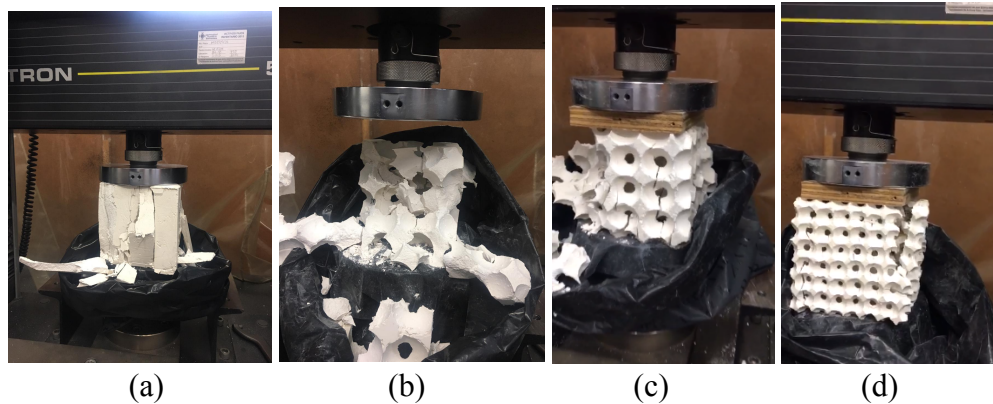


*Figura 15.* Espumas cerámicas obtenidas. (Ver Anexo 1 para más imágenes).

### **6.3 Pruebas de compresión y densidad de las probetas**

Antes de realizar las pruebas de compresión, se pesó cada probeta para obtener su densidad. Después se procedió a hacer las pruebas con dos probetas por tamaño de poro y se evidenció que en las probetas PP, la grieta se propagó longitudinalmente, por lo que se desprendían paredes completas, es decir, la fractura generó superficies por el tamaño pequeño del poro, y esto hizo que fallará rápidamente con menor fuerza aplicada. En las probetas PM y PG, las grietas viajaron a través de los poros en la dirección de la fuerza aplicada (verticalmente), por lo que se dio una falla del material en forma de reloj de arena, las columnas comienzan a fallar porque la grieta

empieza a viajar transversalmente, con un poco más de fuerza aplicada que en las probetas de poro pequeño. En cuanto a las probetas de yeso macizas, resiste a una mayor fuerza aplicada (3 veces la fuerza aplicada al PG) y el material falla en forma de reloj de arena, como suelen fallar los materiales cerámicos, En la *Figura 16* se puede observar cómo fallan las probetas al ser sometidas a una carga de compresión.



*Figura 16.* Falla de las probetas. a) Probeta de material macizo. b) Probeta de poro grande. c) Probeta de poro mediano. d) Probeta de poro pequeño.

El sistema de la Máquina Universal arrojó los gráficos con las curvas de la fuerza aplicada en cada probeta (ver Anexo 2), comparando las del mismo tamaño de poro entre ellas, lo que permitió obtener una media de los datos necesarios para relacionarlas según el esfuerzo con la densidad y comparar la propiedad relativa de las diferentes probetas con respecto a la probeta de material macizo. Luego de realizar las pruebas de compresión se realizó una tabla (*Tabla 1*) donde se evidencian y comparan los datos de: el tamaño de poro en centímetros, la longitud de la arista de cada probeta para obtener su área y su volumen, el peso en gramos de cada probeta, la densidad de cada una ( $\text{gr/cm}^3$ ), la fuerza en Newtons (N) de la carga aplicada, que es la arrojada por la gráfica del sistema del Extensómetro Óptico, la resistencia a la compresión en mega pascuales (MPa) y la relación entre la resistencia mecánica y la densidad (el cociente entre ambas).

| Tamaño poro     | Arista (cm) | Peso (g) | Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) | Fuerza aplicada (N) | Resistencia (MPa) | Resistencia/Densidad |
|-----------------|-------------|----------|-------------------------------|---------------------|-------------------|----------------------|
| Sin Poros       | 12          | 1968     | 1,138888889                   | 74535,17            | 5,176053472       | 4,544827439          |
| Sin Poros       | 12          | 1941     | 1,123263889                   | 77853,46            | 5,406490278       | 4,813196909          |
| 4 – 3,9 cm (PG) | 11,7        | 630      | 0,393353451                   | 19398,32            | 1,417073563       | 3,602545143          |
| 4 – 3,9 cm (PG) | 11,7        | 638,7    | 0,398785474                   | 19086,8             | 1,394316605       | 3,496407703          |
| 3 – 3 cm (PM)   | 12          | 659,5    | 0,381655093                   | 15702,54            | 1,090454167       | 2,857171797          |
| 3 – 3 cm (PM)   | 12          | 604,3    | 0,349710648                   | 15702,54            | 1,090454167       | 3,118161178          |
| 2 – 1,8 cm (PP) | 12,6        | 486,1    | 0,243004315                   | 6410,31             | 0,403773621       | 1,661590331          |
| 2 – 1,8 cm (PP) | 12,6        | 469,6    | 0,234755866                   | 5506,58             | 0,346849332       | 1,477489523          |

*Tabla 1.* Datos obtenidos de las pruebas de compresión para cada probeta.

De acuerdo con los datos obtenidos, las probetas PG evidencian una disminución en su densidad de 1,37 veces, y en su resistencia mecánica de 3,7 veces en comparación con las probetas de material macizo; las muestras de PM disminuyeron su densidad 1,48 veces y su resistencia mecánica 4,84 veces; y las probetas de PP redujeron su densidad 2,25 veces y su resistencia 14,27 veces. Adicionalmente se observa que la probeta PG redujo la relación resistencia/densidad 1,31 veces en comparación la relación en la probeta maciza, la PM redujo esta relación 1,56 veces, y la PM la redujo 3 veces. Estos resultados muestran que la variación de la disminución de la densidad entre los distintos tipos de probeta no es tan alta, como sí lo es la variación de la resistencia mecánica, lo cual permite identificar que, entre las dos propiedades relacionadas, la modificación morfológica del poro tiene mayor impacto en la resistencia a la compresión del material.

Teniendo en cuenta que el tamaño del poro es inversamente proporcional a la cantidad de poros de una probeta, los resultados son evidencia de que entre más grande sea el poro, y menos poros configuren la estructura de la espuma, es mayor la densidad y la resistencia mecánica a la compresión, y es mayor el cociente entre ambas variables; por lo que, para conservar la relación entre la resistencia mecánica y la densidad de un cerámico cuando se fabrica bajo una estructura celular, lo ideal es que la estructura tenga la menor cantidad de poros de un tamaño mayor.

## 7. Conclusiones

1. Para las condiciones seleccionadas de fabricación de las espumas cerámicas, el material indicado es el yeso escayola debido a que tiene una buena fluidez, disposición en el mercado a un bajo costo, no requiere de proceso de cocción, y su proceso de secado al aire libre es rápido.

2. El material indicado para realizar los poros de las espumas cerámicas es el poliestireno expandido debido a su forma regular, su asequibilidad en el mercado, su bajo peso y su fácil disolución, lo que permite la generación de poros interconectados al interior, asegurando que no quedan desperdicios ni restos de material en la probeta.

3. La distribución de los poros de las espumas cerámicas se debe hacer en planos paralelos, ya que esto permite que las esferas estén interconectadas y generen entre sí espacios por los cuales se distribuirá adecuadamente el yeso. Además, al disponerlas de esta manera se genera una estructura firme en el molde que no se desordena cuando se adiciona el material líquido, y al momento de disolver las esferas de poliestireno expandido la disolución es óptima por el tipo de interconexión entre los poros.

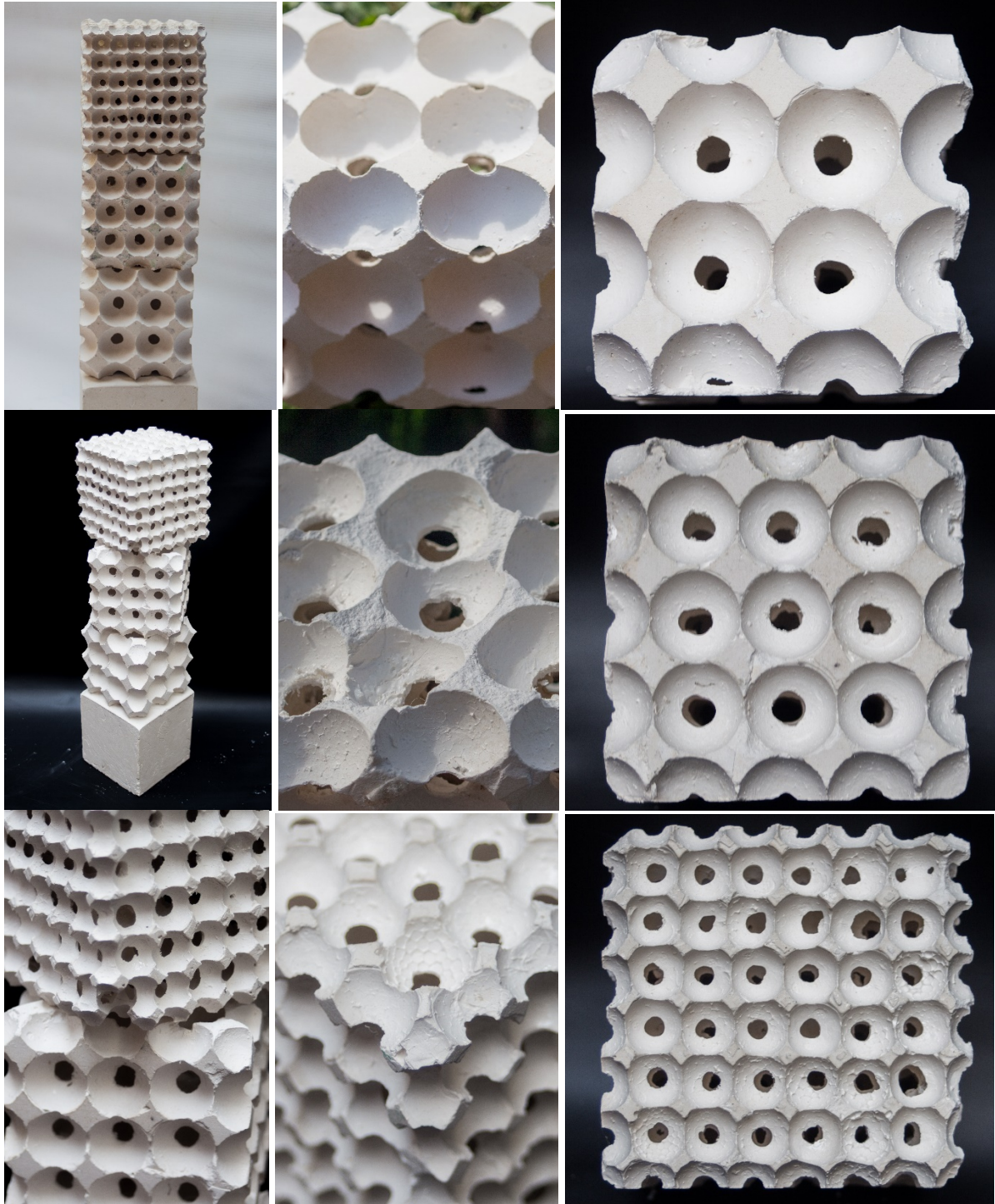
4. El tamaño y la distribución de los poros en espumas cerámicas, influye altamente en sus propiedades de densidad, resistencia a la compresión (principalmente en ésta) y la relación entre ambas, ya que se evidencia que el aumento de la cantidad de poros en la estructura del material significa una disminución de la densidad y proporcionalmente de la resistencia a la compresión. Por lo tanto, se debe conocer cuál será la aplicación que se le dará al material cerámico a utilizar, para entender si es necesario que el material sea muy resistente sin importar el peso del mismo, o si por el contrario se requiere que sea menos pesado sin ser necesaria una alta resistencia a la compresión, y es en esta última en la que es apropiado y recomendado utilizar espumas cerámicas.



## 8. Anexos

### Anexo 1

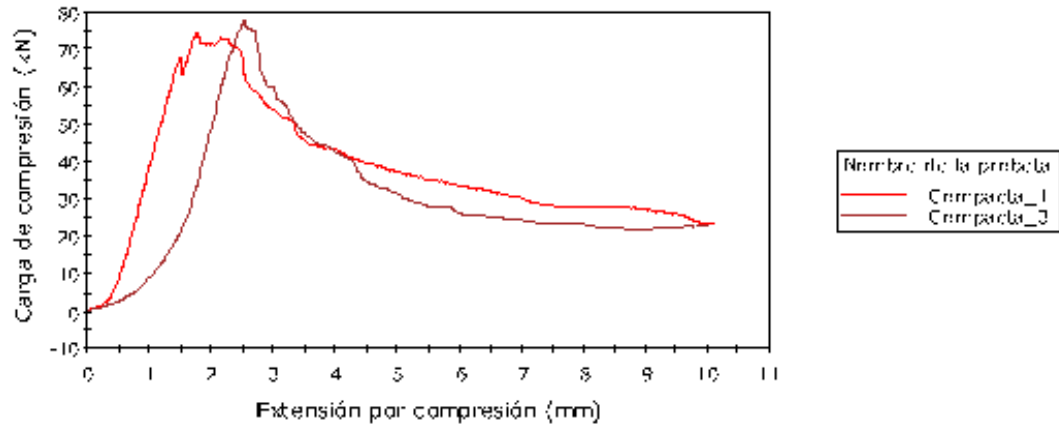
Imágenes de las probetas PG, PM y PP terminadas.



## Anexo 2

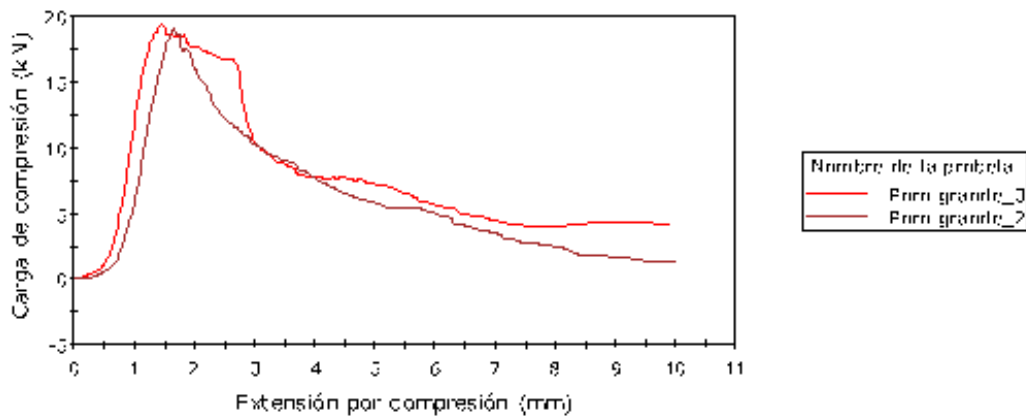
Gráficas con las curvas de resistencia a la compresión de cada una de las probetas:

### PROBETA DE MATERIAL COMPACTO



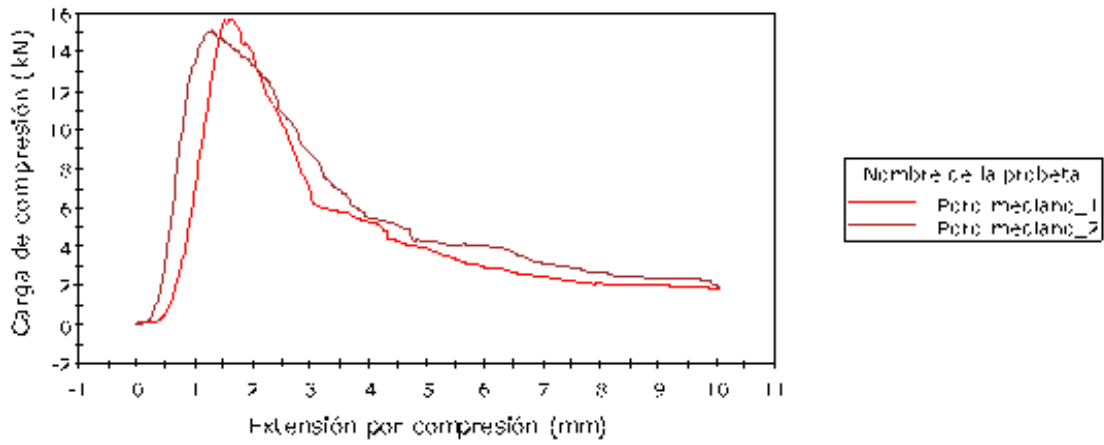
|       | Etiqueta de la probeta | Maximum Load (N) |
|-------|------------------------|------------------|
| 1     | Compacta_1             | < -74535.17      |
| 2     | Compacta_3             | < -77853.46      |
| Media |                        | -76194.32        |

### PROBETA DE POROS GRANDES



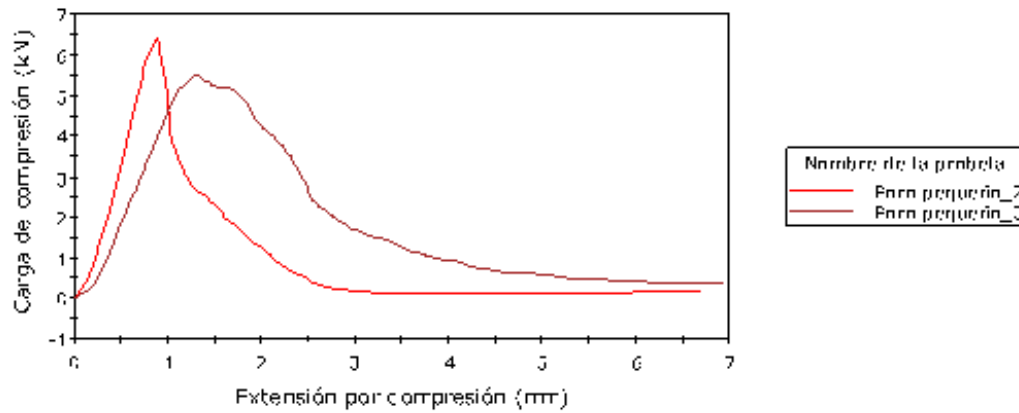
| PG    | Etiqueta de la probeta | Maximum Load (N) |
|-------|------------------------|------------------|
| 1     | Poro grande_3          | < -19398.32      |
| 2     | Poro grande_2          | < -19086.80      |
| Media |                        | -19242.56        |

## PROBETA DE POROS MEDIANOS



| PM    | Etiqueta de la probeta | Maximum Load (N) |
|-------|------------------------|------------------|
| 1     | Poros mediano_1        | < -15702.54      |
| 2     | Poros mediano_2        | < -15113.23      |
| Media |                        | -15407.89        |

## PROBETA DE POROS PEQUEÑOS



| PP    | Etiqueta de la probeta | Maximum Load (N) |
|-------|------------------------|------------------|
| 1     | Poros pequeño_2        | < -6410.31       |
| 2     | Poros pequeño_3        | < -5506.58       |
| Media |                        | -5958.44         |



## 9. Referencias

1. Barroso, S., Gil, J. R., & Camacho, A. M. (2010). *Introducción al conocimiento de los materiales y a sus aplicaciones*. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia.
2. Duran, G. (2013). *Qué es el enlace iónico*. [Figura]. Tomado de:  
[http://quimicaigustavoduran.blogspot.com.co/2013\\_11\\_01\\_archive.html](http://quimicaigustavoduran.blogspot.com.co/2013_11_01_archive.html)
3. Ferrer, M; Peña, G; Dulce, H. J. (2011). *Construcción y caracterización de cerámicas porosas a partir de espumas de poliuretano y barbotinas de arcilla roja*. Cúcuta, Colombia: Revista Colombiana de Física.
4. Frederick, S. (2014). Applications of alumina ceramic foam filter. [Figura]. Tomada de:  
<http://jsetceramics.blogspot.com.co/2014/09/applications-of-alumina-ceramic-foam.html>
5. Garcia, A. (1994). Cerámica tradicional y no tradicional. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 33(6), 309-315.
6. Gibson, L.J; Ashby, M.F. (1999). *Cellular Solids – Structure and Properties*. Cambridge Solid State Science Series.
7. González, J; Escobar, D. M; Ossa, C. P. (2007). *Producción y caracterización de cuerpos porosos de hidroxiapatita sintética*. Medellín, Colombia: Revista Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia.
8. Groover Mikell, P. (1997). Fundamentos de manufactura moderna, materiales, procesos y sistemas.
9. Hewitt, P. G. (2004). Densidad. En P. G. Hewitt, *Física Conceptual* (págs. 229-230). México: Pearson Educación.

10. MIT [MIT Open Course Ware]. (2016/10/14). Youtube Open Course. Session 1: Introduction and Overview. Tomado de: <https://www.youtube.com/watch?v=hOZ6-gearUo&list=PLU14u3cNGP611bupB7ohUYEScjWb60mWW>
11. MIT [MIT OpenCourseWare]. (2016/10/14). Youtube Open Course. Session 2: Processing of Cellular Solids. Tomado de: <https://www.youtube.com/watch?v=bDnia4HJRqk&list=PLU14u3cNGP611bupB7ohUYEScjWb60mWW&index=2>
12. MIT [MIT Open Course Ware]. (2016/10/14). Youtube Open Course. Session 3: Structure of Cellular Solids. Tomado de: <https://www.youtube.com/watch?v=q-9YIXesHtI&list=PLU14u3cNGP611bupB7ohUYEScjWb60mWW&index=3>
13. Montero, R. (2013). *Espuma de aluminio*. [Figura]. Tomado de: <https://es.slideshare.net/FerminBlanco/espuma-de-aluminio>
14. Patiño, E; Arbeláez, E.M. (2009). Generación y transformación de la forma. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana.
15. Scheffler, M & Colombo, P. (Edits.). (2005). *Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications*. Weinheim, Alemania: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
16. T.G Nieh, T. G; Higashi, K; Wadsworth, J. (1999). *Effect of cell morphology on the compressive properties of open-cell aluminum foams*. Japón.