



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ZARAGOZA

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN  
DE UN MATERIAL CERÁMICO CELULAR  
ELABORADO CON ARCILLA Y LODOS DE  
PLANTAS POTABILIZADORAS

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A

GILBERTO MERAZ RAMIREZ

DIRECTOR:

DRA. ROSA MARÍA RAMÍREZ ZAMORA

ASESOR:

DR. FABRICIO ESPEJEL AYALA



México CMDX

2017



INSTITUTO  
DE INGENIERÍA  
UNAM



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## **JURADO ASIGNADO:**

**Presidente:**

**Secretario:**

**Vocal:**

**1er. Suplente:**

**2° Suplente:**

Sitio donde se desarrolló el tema:

**INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.**



---

**DIRECTOR DE TESIS:**  
**Dra. Rosa María Ramírez Zamora**



---

**ASESOR DE TESIS:**  
**Dr. Fabricio Espejel Ayala**



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES "ZARAGOZA"

DIRECCIÓN

**JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN  
ESCOLAR  
PRESENTE.**

Comunico a usted que al alumno(a) Meraz Ramirez Gilberto.  
con número de cuenta 40506116-7 de la carrera Ingeniería Química, se le ha fijado el día 06 del mes de Octubre de 2017 a las 15:00 horas para presentar su examen profesional, que tendrá lugar en la sala de exámenes profesionales del Campus II de esta Facultad, con el siguiente jurado:

PRESIDENTE	I.Q. JOSÉ ANTONIO ZAMORA PLATA
VOCAL	DRA. ROSA MARÍA RAMÍREZ ZAMORA
SECRETARIO	I.Q. DOMINGA ORTIZ BAUTISTA
SUPLENTE	M. EN I. CRESENCIANO ECHAVARRIETA ALBITER
SUPLENTE	I.Q. MARÍA ALEJANDRA VALENTAN GONZÁLEZ

\_\_\_\_\_  
  
\_\_\_\_\_  
  
\_\_\_\_\_  
  
\_\_\_\_\_  
  
\_\_\_\_\_

El título de la tesis que se presenta es: "Optimización del proceso de producción de un material cerámico celular elaborado con lodo y arcilla de plantas potabilizadoras".

Opción de Titulación: Convencional

ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
México, D. F. a 05 de Septiembre de 2017.

DR. VÍCTOR MANUEL MENDOZA NUÑEZ  
DIRECTOR

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ZARAGOZA  
DIRECCIÓN

Vo.Bo.

I.Q. DOMINGA ORTIZ BAUTISTA  
JEFA DE LA CARRERA DE I.Q.

RECIBÍ:  
OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES  
Y DE GRADO

## AGRADECIMIENTOS

*Es difícil agradecer a todas aquellas personas e instituciones que me han apoyado en el desarrollo, mejora y corrección de este trabajo, no solamente es mío, es quizá más de aquellos que confiaron en mí para hacerlo, instructores, profesores, amigos, conocidos ..., que me permitieron parte de su tiempo, paciencia y recursos.*

*Agradezco a nuestra Máxima casa de estudios Universidad Nacional Autónoma de México, a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, quien me forjó y mostró el camino a seguir para mi desarrollo profesional y personal. Al Instituto de Ingeniería que me permitió desarrollar este trabajo en sus instalaciones, así como del apoyo económico que me brindó.*

*Dra. Rosa María Ramírez Zamora; Gracias por permitirme formar parte de su equipo de trabajo y confiar en mí para desarrollarlo.*

*Dr. Fabricio Espejel Ayala; Gracias por la paciencia, el tiempo y el esfuerzo para ayudarme, enseñarme y conducirme adecuadamente.*

*Mtra. Beca; gracias por las risas que me regresaban a mi estado basal, cuando mi cabeza estaba por hacer fisión, y así para poder continuar.*

*Niña Brenda, constantemente provocabas un deseo de kraquin hacia tu persona, pero gracias a ello pude ver desde otra perspectiva.*

*A los compañeros del Instituto que me apoyaron.*

*Y lo mejor siempre viene al final. Gracias a mi Familia, Abuelita Rosa, a mi madre, padre, hermanos y Amigos., Roberto, Fabricio, Miryam Oswaldo...*

*A mi novia, por no dejar de impulsarme.*

*Gracias, Muchas Gracias*

## DEDICATORIAS

*La vida es corta, trágica, alegre..., e infinitamente compleja, dentro de esta entropía existen momentos de equilibrio en los que los amigos, enemigos y familiares están para ayudarte, confundirte, salvarte..., y depende de ti hacer todo lo necesario para continuar y jamás rendirte.*

*Dedicado a mí y a todas las personas que me ayudaron a levantarme.*

*A mi familia, amigos, maestros...*

*A quienes aún me acompañan y a los que se han adelantado, pero no por ello dejamos de recordarlos.*

*Kike, cuando te vea de nuevo te contaré todo lo que ha pasado.*

## Contenido

ÍNDICE DE TABLAS .....	V
ÍNDICE DE GRÁFICOS E ILUSTRACIONES.....	VI
NOMENCLATURA .....	IX
RESUMEN.....	1
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN .....	5
Hipótesis .....	9
Objetivo General.....	10
Objetivos Específicos.....	10
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	11
II.1 Generalidades De Materiales Cerámicos Celulares .....	13
II.1.1 Definición y clasificación del material cerámico celular.....	14
II.1.2 Propiedades de los Cerámicos Celulares. ....	17
II.1.2.1 Propiedades Mecánicas.....	17
II.1.2.2 Permeabilidad.....	17
II.1.2.3 Propiedades Térmicas.....	18
II.2 Espumas Cerámicas .....	19
II.2.1 Proceso de producción de cerámicos celulares y factores de influencia en la formación de la estructura porosa. ....	20
II.2.1.1 Tipos y características de las materias primas para la elaboración de materiales cerámicos celulares.....	21
II.2.1.2 Procesos de Elaboración de las Espumas Cerámicas .....	21
II.2.1.2.1 Replicado .....	22
II.2.1.2.2 Espumado directo.....	24
II.2.1.2.3 Generación de gases in situ.....	26
II.2.1.2.4 Material de Sacrificio .....	27
II.2.1.2.5 Sol-Gel.....	27
II.2.1.2.6 Gel-casting.....	28
II.2.1.2.7 Vaciado de Suspensiones.....	28
II.2.2 Aplicaciones del material cerámico celular en la industria.....	29

II.2.2.1 Filtro para metales fundidos .....	29
II.2.2.2 Filtros de Gas.....	32
II.2.2.3 Filtros Catalíticos .....	33
II.2.2.4 Muebles de Horno.....	35
II.2.2.5 Quemadores porosos .....	36
II.2.2.6 Intercambiadores de calor .....	39
II.2.2.7 Filtros dúplex.....	41
II.2.2.8 Estructuras de bajo peso .....	42
II.3 Generalidades de lodos .....	43
II.3.1 Definición. ....	43
II.3.2 Generación de lodos .....	43
II.3.3 Características fisicoquímicas de los lodos de plantas potabilizadoras .....	44
II.3.4 Aplicación de lodos en la elaboración de materiales cerámicos.....	45
CAPÍTULO III. DESARROLLO EXPERIMENTAL .....	51
III.1 Materiales y reactivos .....	53
III.1.1 Lodos y moldes de los cerámicos celulares.....	53
III.1.2 Reactivos .....	54
III.2 Diseño experimental 3 <sup>k</sup> .....	54
III.3 Descripción de la elaboración del material cerámico celular utilizando lodo y arcilla .....	55
III.3.1 Secado de la arcilla roja y del lodo.....	56
III.3.2 Molienda y Tamizado de la arcilla roja y del lodo.....	56
III.3. 3 Elaboración de probetas .....	57
III.3.4 Secado y cocción de las probetas .....	58
III.4 Caracterización del material cerámico celular .....	58
III.4.1 Densidad.....	59
III.4.2 Porcentaje de absorción de agua .....	60
III.4.3 Porosidad.....	60
III.4.4 Resistencia Mecánica.....	61
III.4.5 Identificación de los minerales formados.....	61
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	53



IV.1 Resultados de la caracterización de los materiales cerámicos celulares. ....	65
IV.2 Análisis estadístico de los resultados experimentales: Determinación de los factores experimentales de influencia significativa .....	70
IV.3 Análisis estadístico.....	73
IV.4 Proceso de generación de la porosidad en la estructura celular.....	79
CONCLUSIONES.....	83
RECOMENDACIONES.....	87
GLOSARIO.....	74
REFERENCIAS .....	99
ANEXOS .....	105
Anexo A. Investigaciones realizadas sobre la utilización de lodos. ....	107
Anexo B. Análisis estadísticos de los resultados. ....	111
Anexo C. Anexo Fotográfico.....	117



## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla II- 1: Propiedades de los materiales cerámicos celulares. (Elaborada por el autor).</i>	17
<i>Tabla II- 2: Características de la espuma cerámica correspondientes al proceso de elaboración (Elaborará por el autor).....</i>	22
<i>Tabla II- 3: Características de los materiales más utilizados como soporte de los quemadores porosos. (Scheffer &amp; Colombo, 2005).....</i>	39
<i>Tabla II- 4: Uso de lodos generados en plantas potabilizadoras en la elaboración de materiales cerámicos. (Espejel, 2007) (Espejel Ayala, 2013).....</i>	49
<i>Tabla III - 1: Valores centrales y externos en el diseño experimental propuesto para las pruebas de producción de cerámico celular. ....</i>	54
<i>Tabla III - 2: Comparativos de tiempos de molienda empleados en un molino de bolas. ..</i>	57
<i>Tabla III - 3: Cantidad de Mezcla seca utilizada para preparar una probeta. ....</i>	57
<i>Tabla IV - 1: Valores centrales y externos en el diseño experimental propuesto para las pruebas de producción de cerámico celular. ....</i>	65
<i>Tabla IV - 2: Características de las probetas elaboradas con arcilla y lodo generado en una planta potabilizadora. %Ab.: % de Absorción de agua; D. Ap.: Densidad aparente; D.R.: Densidad real; D. Rel.: Densidad relativa; Res: resistencia a la compresión.....</i>	66
<i>Tabla IV - 3: ANOVA correspondiente a la densidad aparente. ....</i>	73
<i>Tabla IV - 4: Valores de los factores experimentales para obtener un valor de densidad aparente óptimo (mínimo).....</i>	74
<i>Tabla IV - 5: Resumen del análisis estadístico para la densidad aparente, densidad real, densidad relativa y resistencia a la compresión de las probetas elaboradas.....</i>	75
<i>Tabla IV - 6: Optimización de las condiciones de elaboración de probetas elaboradas considerando las cuatro variables de respuesta.....</i>	76
<i>Tabla IV - 7: Composición elemental de la fase vítrea formada en el material cerámico celular. Se puede apreciar un vidrio compuesto principalmente por Si, Al, Na, Ca y Fe. ..</i>	79
<i>Tabla A- 1: Uso de los lodos generados en plantas potabilizadoras en la elaboración de ladrillos. (Espejel, 2007) (Espejel Ayala, 2013).....</i>	107
<i>Tabla A- 2: Uso de lodos generados en plantas potabilizadoras en la elaboración de materiales cerámicos. (Espejel, 2007) (Espejel Ayala, 2013).....</i>	108
<i>Tabla A- 3: Uso de los lodos generados en las plantas potabilizadoras en la elaboración de cementos y morteros. (Espejel, 2007) (Espejel Ayala, 2013).....</i>	108
<i>Tabla A- 4: Uso de lodos generados en plantas potabilizadoras en suelos. (Espejel, 2007) (Espejel Ayala, 2013).....</i>	109
<i>Tabla A- 5: Uso de lodos generados en plantas potabilizadoras como material adsorbente. (Espejel, 2007) (Espejel Ayala, 2013).....</i>	110
<i>Tabla A- 6: Uso de lodos generados en plantas potabilizadoras en otras aplicaciones. (Espejel, 2007) (Espejel Ayala, 2013).....</i>	110

## ÍNDICE DE GRÁFICOS E ILUSTRACIONES

<i>Figura II - 1: Material cerámico de a) celda cerrada, b) celda abierta. (André R. Studart, 2006).....</i>	<i>13</i>
<i>Figura II - 2: Materiales celulares naturales a) micrografía de corcho, b) estructura de fémur. Tomado de Internet.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura II - 3: Estructura del modelo de GA a) celda abierta, b) celda cerrada. (ASHBY &amp; Medalist, 1983) .....</i>	<i>15</i>
<i>Figura II - 4: Propiedades de los materiales cerámicos celulares. a) Densidad, b) Conductividad eléctrica. (Mata, 2008).....</i>	<i>16</i>
<i>Figura II - 5: Propiedades de los materiales cerámicos celulares c) Módulo de elasticidad y d) Resistencia Mecánica. (Mata, 2008) .....</i>	<i>16</i>
<i>Figura II - 6: a) Se observa una probeta cocida sin molde, y b) una probeta cocida con molde y su apreciable deformación semejante a una espuma. (Pacheco Flores, 2012) .....</i>	<i>19</i>
<i>Figura II - 7: Diagrama de flujo de elaboración de una espuma cerámica por la técnica de réplica (Scheffer &amp; Colombo, 2005) .....</i>	<i>23</i>
<i>Figura II - 8: Micrografías a) plantilla de espuma de poliuretano, b) espuma de cerámica reticulada (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), c) puntal hueco de una espuma cerámica (SiC). (Colombo P. , 2006). ..</i>	<i>24</i>
<i>Figura II - 9: Micrografía del lado izquierdo, espuma cerámica de alúmina sometida a electrospray, a la derecha detalle de puntales sin huecos. (Scheffer &amp; Colombo, 2005) ..</i>	<i>24</i>
<i>Figura II - 10: Micrografía de a) espuma cerámica de Hidroxiapatita obtenida por espumificación directa. b) Detalle de los puntales densos. (Colombo P. , 2006) .....</i>	<i>25</i>
<i>Figura II - 11: Micrografía de a) la espuma cerámica obtenida por la generación de gases in situ b) detalle de los puntales. (Colombo D. J., 2003).....</i>	<i>26</i>
<i>Figura II - 12: Espuma de SiC sintetizada utilizando micro perlas poliméricas. (Colombo P. , 2006) .....</i>	<i>27</i>
<i>Figura II - 13: Técnica de Vaciado de suspensiones. (M.M. Enríquez-Gonzalez, 2012)....</i>	<i>29</i>
<i>Figura II - 14: Filtro Dúplex de 50 x 60 cm para metales a) vista general, b) vista superior del filtro, c) vista lateral. (Scheffer &amp; Colombo, 2005) .....</i>	<i>31</i>
<i>Figura II - 15: Trampas de partículas para filtración de gases calientes. Izquierda monolito de panal y flujo de pared (filtración superficial). Derecha Trampa de espuma cerámica (filtración profunda). (Scheffer &amp; Colombo, 2005).....</i>	<i>32</i>
<i>Figura II - 16: Vista esquemática de un filtro multifuncional para la reducción simultánea de cenizas, óxidos de Nitrógeno y Dioxinas. (Scheffer &amp; Colombo, 2005) .....</i>	<i>34</i>
<i>Figura II - 17: Vista de una espuma que contiene el catalizador Cs<sub>4</sub>V<sub>2</sub>O<sub>7</sub> después del envejecimiento hidrotérmico. Lado izquierdo después de la regeneración por combustión de carbón en el horno a 450 °C. Lado derecho antes de la regeneración. (Scheffer &amp; Colombo, 2005) .....</i>	<i>35</i>
<i>Figura II - 18: Quemadores porosos operados con gas: a) Superficie radiante, b) Radiador catalítico, c) Volumétrico poroso. (Scheffer &amp; Colombo, 2005) .....</i>	<i>37</i>
<i>Figura II - 19: Quemador poroso con estabilización de llama de un temple térmico. (Scheffer &amp; Colombo, 2005).....</i>	<i>39</i>

*Figura II - 20: a) Sección transversal de un intercambiador de calor de tubos de espuma de SiC. b) Disipador de calor, diseño de aleta de espuma de carbono, utilizada para enfriar un chip de computadora. (Scheffer & Colombo, 2005)..... 40*

*Figura II - 21: a) Radiador modular de espuma de grafito de alta conductividad térmica. b) detalle del módulo. (Scheffer & Colombo, 2005)..... 41*

*Figura II - 22: a) Sección transversal de un filtro duplex de gas caliente (espuma SiC recubiertas con una membrana cerámica). b) Filtros duplex-gas caliente (1 m de longitud, con base en espuma de SiC), cubiertas con partículas capturadas, utilizados en pruebas a temperatura y presión elevadas. (Scheffer & Colombo, 2005) ..... 42*

*Figura II - 23: a) espejo con núcleo de espuma cerámica. b) Estructura de Panel de Sándwich de cerámica. (Scheffer & Colombo, 2005)..... 42*

*Figura II - 24: Estudios de uso de lodos generados en plantas potabilizadoras. (Espejel, 2007)..... 49*

*Figura III - 1: Dimensiones del Molde de acero inoxidable utilizado. .... 53*

*Figura III - 2: Descripción de las etapas del proceso de elaboración de la probeta. .... 55*

*Figura III - 3: Metodología seguida para la caracterización de las probetas elaboradas con mezcla de lodo-arcilla siguiendo el diseño experimental 3<sup>k</sup>. .... 59*

*Figura IV - 1: Cerámicos celulares obtenidos; elaborados con mezclas de lodo arcilla cocidos con molde, a) Tamaño de tamiz: 50, composición de lodo 30%, temperatura de cocción: 1200°C, densidad relativa: 0.338. b) Tamaño de tamiz 50; composición de lodo: 30%, Temperatura de cocción: 1250°C; y densidad relativa de 0.18. .... 76*

*Figura IV - 2: Imágenes de Microscopía electrónica de barrido donde se aprecia la porosidad formada. .... 77*

*Grafico IV - 1: Principales efectos de los factores experimentales: a) densidad aparente, b) densidad real, c) densidad relativa y d) resistencia a la compresión..... 70*

*Grafico IV - 2: Difractogramas correspondientes a probetas elaboradas con mezclas lodo:arcilla quemadas a 1200° C. M: mullita, 2Si<sub>2</sub>Al<sub>6</sub>O<sub>13</sub>; C: cuarzo, SiO<sub>2</sub>; Cr: cristobalita; SiO<sub>2</sub>; A: albita, (Na, Ca) (Si, Al)<sub>4</sub> O<sub>8</sub>; An: anhidrita, CaSO<sub>4</sub>. .... 78*

*Grafico IV - 3: Gases identificados mediante la técnica de termo gravimetría acoplada con espectrometría de masas..... 80*

*Figura B - 1: Diagrama de Pareto para la variable de respuesta densidad aparente. .... 111*

*Figura B - 2: Efectos individuales sobre la variable de respuesta densidad aparente..... 111*

*Figura B - 3: Superficie de respuesta para la variable de respuesta densidad aparente. 112*

*Figura B - 4: Diagrama de Pareto para la variable de respuesta densidad real. .... 112*

*Figura B - 5: Efectos individuales sobre la variable de respuesta densidad real..... 113*

*Figura B - 6: Superficie de respuesta para la variable de respuesta densidad real. .... 113*

*Figura B - 7: Diagrama de Pareto para la variable de respuesta densidad relativa. .... 114*

*Figura B - 8: Efectos individuales sobre la variable de respuesta densidad relativa..... 114*

*Figura B - 9: Superficie de respuesta para la variable de respuesta densidad relativa. ... 115*

*Figura B - 10: Diagrama de Pareto para la variable de respuesta resistencia a la compresión.* ..... 115

*Figura B - 11: Efectos individuales sobre la variable de respuesta resistencia a la compresión.*..... 116

*Figura B - 12: Superficie de respuesta para la variable de respuesta resistencia a la compresión.*..... 116

*Figura C - 1: Esquema propuesto del equipo para cuantificar la presión mecánica, usada al elaborar las probetas.* ..... 117

## NOMENCLATURA

<b>ANOVA</b>	Análisis de Varianza
<b>°C</b>	Grados Celsius
<b>PPLB</b>	Planta Potabilizadora los Berros
<b>MPa</b>	Mega Pascales
<b>SEMARNAT</b>	Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales
<b>TPA</b>	Tratamiento Primario Avanzado
<b>m<sup>3</sup></b>	Metros cúbicos
<b>SiC</b>	Carburo de Silicio
<b>ZrO<sub>2</sub></b>	Zirconia
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Alúmina
<b>m<sup>3</sup>/s</b>	Metros cúbicos por segundo
<b>Tc</b>	Temperatura de Cocción
<b>tc</b>	Tiempo de Cocción
<b>tg</b>	Tamaño de Partícula lodo/arcilla
<b>NOM</b>	Norma Oficial Mexicana
<b>NOx</b>	Óxidos de Nitrógeno
<b>CONAGUA</b>	Comisión Nacional del Agua
<b>Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub></b>	Nitruro de Silicio
<b>DRX</b>	Difracción de Rayos x
<b>DVC</b>	Deposición química de vapor
<b>ρ*</b>	Densidad Aparente
<b>ρ<sub>s</sub></b>	Densidad Real
<b>ρ<sub>rm</sub></b>	Densidad Relativa
<b>TiN</b>	Nitruro de Titanio
<b>SiOC</b>	Oxicarburo de Silicio
<b>CFFs</b>	Filtros de Espuma cerámica
<b>Cs<sub>4</sub>V<sub>2</sub>O<sub>7</sub></b>	Oxido de Cesio Vanadio
<b>MOR</b>	Módulo de Ruptura
<b>CVD</b>	Deposición Química de Vapor
<b>PPI</b>	Poros por pulgada
<b>MOR</b>	Módulo de Ruptura





# RESUMEN



En este trabajo se realizó la valoración de un material cerámico enfocado a ser utilizado en la industria de la construcción utilizando como materias primas arcilla y lodo generado en una planta potabilizadora. De manera adicional, la formación de un [cerámico celular](#) fue obtenida por lo que se optimizaron las etapas de este proceso y se propuso un posible mecanismo de formación de la porosidad en el material. El proceso de producción de este material se puede dividir en dos etapas generales. Etapa 1 Recepción Acondicionamiento de materias primas, Etapa 2 producción del material. Con base en el estudio realizado por ([Pacheco Flores, 2012](#)), la experimentación considero tres factores experimentales de optimización: temperatura de cocción, tamaño de partícula y composición lodo:arcilla de la pasta preparada para cocción dentro de la preforma (molde). Para realizar las pruebas se aplicó un diseño factorial  $3^k$  en el que  $k$  es el número de factores experimentales y el número  $3$  representa que esos factores tienen tres valores (uno mínimo, uno máximo y un promedio de esos dos valores). Los valores de esos factores se seleccionaron con base en el estudio de ([Pacheco Flores, 2012](#)). El [análisis de varianza](#) de los resultados permitió determinar que la composición (porcentaje de lodo arcilla y tamaño de partícula) y la temperatura de cocción (con molde) fueron los factores experimentales con influencia significativa (95% nivel de confianza) sobre la variable de respuesta que fue la resistencia a la compresión. Esta última fue seleccionada con base en un valor óptimo, para determinar la factibilidad de su utilización en la industria de la construcción. Mediante este proceso optimizado se logró obtener un material cerámico celular con 85% de porosidad y una resistencia a la compresión de 5.44 MPa. De acuerdo a la norma ([NMX-C-441-ONNCCE, 2005](#)), que estipula los valores que deben cumplir los ladrillos para su uso en la construcción, el valor obtenido de absorción de agua para este cerámico celular se encuentran fuera del rango establecido, por lo cual este material no podría ser útil para esta industria.

El porcentaje de porosidad afecta la resistencia a la compresión, es decir al tener un mayor porcentaje de porosidad el material se vuelve menos denso lo cual demerita su resistencia, por el contrario, al disminuir la porosidad este es más denso lo que le permite tener una mayor resistencia; sin embargo, la porosidad es lo que le confiere propiedades particulares como el aumento en la superficie de contacto, baja conductividad térmica, por mencionar algunas. Otros de los factores que influyen en las propiedades del material cerámico son: el tamaño de partícula y el uso del molde. Por estas razones es necesario controlar estos factores en la elaboración del material cerámico.

Se realizaron diferentes ensayos para optimizar el procedimiento de elaboración del material cerámico celular, algunos de los parámetros optimizados fueron la

temperatura y tiempo de cocción, el uso del molde para soportar la porosidad generada, la composición de la mezcla lodo-arcilla y el tamaño de partícula.

Mediante la técnica de termogravimetría acoplada con espectrometría de masas (TG-EM) se determinó que los gases formadores de la estructura celular fueron CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y vapor de agua, los cuales generaron a su paso la porosidad del material. El CO<sub>2</sub> comenzó a emitirse a partir de los 350° C y prácticamente se observó en todo el intervalo de temperatura medido, desde temperatura ambiente hasta 1250° C. A partir de 1000° C la emisión de CO<sub>2</sub> se lleva a cabo por la formación del denominado corazón negro el cual implica la oxidación del carbón presente en el material debido a la [pirólisis](#) ocasionada por la cocción de la pieza en una atmósfera carente de oxígeno (ambiente confinado por el molde). La presencia de vapor de agua a temperaturas mayores a 1150° C se debió a la descomposición de lepidocrocita, un oxi-hidróxido de hierro mismo. Cabe señalar que este mecanismo de formación del material cerámico celular podría emplearse para materiales con menor punto de fusión, de tal manera que los posibles costos de producción del cerámico celular podrían disminuir.

De acuerdo a los resultados de la caracterización del material cerámico celular, estos podrían emplearse en la industria para elaborar paneles ligeros, soportes para catalizadores, intercambiadores de calor, filtros entre otros. Un caso concreto es el uso como soporte de catalizadores de algunos procesos en los cuales está presente la reacción de Reducción Catalítica Selectiva de NO<sub>x</sub>.

# **CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN**



La necesidad de materiales más ligeros y resistentes útiles en aplicaciones tecnológicas e industriales ha llevado al desarrollo de cerámicos celulares cuyas características inherentes, [matriz cerámica](#) y la microestructura porosa que poseen son los principales motivos de interés. La resistencia, densidad y tipo de porosidad del material cerámico, son resultado del proceso y material de elaboración. Un material celular puede definirse como un ensamblaje de celdas prismáticas o poliédricas (con bordes sólidos y caras) agrupadas de tal modo que forman mallas bidimensionales o tridimensionales y rellenan un plano o el espacio (W D Callister., 1996). Los materiales celulares se pueden clasificar en función de su origen en naturales (madera, esponjas, algunos huesos) y artificiales (aquellos manufacturados por el hombre).

Existen diferentes tipos de estructura en los materiales celulares y estos se pueden agrupar en bidimensionales, tridimensionales y espumas, estas estructuras pueden estar o no interconectadas, por lo cual sus celdas pueden ser cerradas, abiertas o mixtas. El material será de celda abierta cuando la masa de este se encuentre concentrada en las aristas y de celda cerrada cuando la masa del mismo se encuentre concentrada en las aristas y caras, aislando a cada celda de la contigua. La forma, tamaño y conectividad entre las diferentes celdas es muy variable, algunos materiales como las espumas o maderas presentan celdas cerradas y regulares, mientras otros materiales como las esponjas y huesos están formados por una red abierta interconectada que varía a lo largo del material.

El proceso de elaboración y el material con que se elabora el cerámico celular tienen gran influencia: se puede considerar que el proceso de elaboración tiene atribución sobre la topología (conectividad) y forma de celdas mientras que el material de elaboración tiene influencia sobre las propiedades del material formado (resistencia, dureza), pero ambos tienen repercusión en la densidad relativa del material ( $\rho_m$ ), que es la parte más importante dentro de los materiales celulares, ya que ésta determina si el material es clasificado como sólido poroso cuya densidad relativa siempre es superior a 0.3 o material celular cuya densidad relativa siempre es menor a 0.03, teniendo un rango de 0.02 a 0.2.

Los materiales cerámicos celulares se fabrican para necesidades específicas, pueden ser usados en su elaboración metales, polímeros, cerámicos, o combinaciones de estos. Recientemente se han realizado investigaciones para el aprovechamiento de materiales de desecho que sirvan para conformar el material cerámico celular como lo son: lodos de plantas potabilizadoras, escorias, cinescopios de televisores, además de que estos puedan incorporar en su matriz materiales de diferentes industrias que debido a sus características y composición

ponen en peligro a la salud y medio ambiente. Algunas investigaciones han hecho hincapié en el aprovechamiento de los lodos de plantas potabilizadoras por su composición; las investigaciones han mostrado que algunas de estas aplicaciones o usos comprenden las siguientes: elaboración de cemento, ladrillos, materiales cerámicos, materiales adsorbentes, catalizadores, coagulantes. También se han utilizado como mejoradores de suelos, amortiguadores de fuego y controladores de malezas, (una vez estabilizados) entre otros.

A nivel nacional, en tan sólo 56 años la disponibilidad de agua pasó de 18,035 a sólo 4,416 m<sup>3</sup> por año por habitante (CONAGUA, 2011). En 2012 se potabilizaron 96.4 m<sup>3</sup>/s en 699 plantas en operación del país (SEMARNAT, 2013). El proceso más utilizado en potabilización de agua superficial es la coagulación-floculación-sedimentación o también conocido como tratamiento primario avanzado (TPA). Este proceso tiene como principal desventaja la generación de una cantidad significativa de lodos los cuales son almacenados demandando grandes extensiones de terreno. El almacenamiento de lodo representa un riesgo a la salud para los habitantes de las zonas cercanas ya que este es considerado como fuente de contaminación (NOM-004-SEMARNAT-2004).

Para disminuir los efectos ambientales negativos ocasionados por la acumulación de estos residuos, se han utilizado como materia prima para elaborar diversos productos. Es decir, la alternativa es la valorización o utilización de los lodos generados y almacenados. (Espejel, 2007) realizó un estudio para elaborar ladrillos y materiales cerámicos con la mezcla lodo arcilla mediante técnicas y materias primas tradicionales. Los resultados obtenidos mostraron que a diferentes composiciones de lodo y arcilla las características físicas y mecánicas del producto terminado fueron, en algunos casos, inferiores a las de un ladrillo convencional. En general, los materiales cerámicos confeccionados en el trabajo citado presentaron la aparición o formación de imperfecciones en la cerámica.

En la caracterización de los materiales mencionados se determinó que estos poseían una estructura totalmente diferente a la de los ladrillos convencionales. Si bien la materia prima es la comúnmente utilizada en la elaboración de materiales tradicionales, la estructura de estos nuevos materiales bien le podría dar la particularidad para ser clasificados como materiales cerámicos celulares.

Los materiales cerámicos celulares son un tipo de materiales de alta porosidad que comprenden espumas, estructuras de panal, fibras o esponjas. Estos materiales son utilizados por sus propiedades, tales como baja conductividad térmica, alta permeabilidad, estabilidad a altas temperaturas, inertes químicamente, excelente resistencia al choque térmico, baja constante dieléctrica, entre otras. (Colombo D.



J., 2003) La principal limitante para el empleo de materiales cerámicos celulares, pese a las interesantes características que este material ofrece, es el costo de materia prima que también dependerá de la composición química del cerámico. Los altos costos debido a la adquisición de la materia prima se pueden evitar empleando residuos en su manufactura. Anteriormente, el trabajo de (Pacheco Flores, 2012), tuvo como objetivo explorar las condiciones óptimas de formación de este tipo de materiales cerámicos utilizando lodos de plantas potabilizadoras y una arcilla. En ese estudio, se planteó utilizar el lodo generado en una planta potabilizadora con la meta de disminuir estos costos y los riesgos al medio ambiente y a la salud ocasionados por el almacenamiento y mala disposición de estos residuos. Sin embargo, ese estudio no logró determinar las condiciones óptimas de los factores de influencia (composición de la pasta, la cantidad de lodo y de arcilla, tamaño de partícula de estas materias primas y la temperatura de cocción) del proceso de elaboración para obtener un producto de alta relación resistencia/densidad. En ese estudio no se logró obtener la estructura celular en todos los materiales elaborados por lo que resulta necesario mejorar y acotar las variables de influencia en el proceso de elaboración del material cerámico celular. Por lo tanto, en este estudio, se planteó la necesidad de optimizar y mejorar las etapas del proceso de producción de ese material. A continuación se presenta la hipótesis, el objetivo general y específicos.

## Hipótesis

La composición en peso de la mezcla lodo:arcilla, el tamaño de partícula de esas materias primas y la temperatura de cocción afectarán las características del material cerámico celular propuesto de tal manera que la resistencia a la compresión aumentará con una mayor temperatura de cocción, menor cantidad de lodo en la mezcla y menor tamaño de partícula y, el porcentaje de porosidad aumentará con una mayor cantidad de lodo en la mezcla, una menor temperatura de cocción y un tamaño de partícula mayor.

El proceso de producción de un material cerámico celular, empleando mezclas de lodo arcilla, será optimizado de tal manera que se maximizará la resistencia a la compresión y se obtendrá una baja densidad aparente.

## Objetivo General

Realizar la optimización del proceso de elaboración de un material cerámico celular, con alta resistencia y baja densidad aparente empleando mezclas de lodo-arcilla.

## Objetivos Específicos

Determinar la influencia de la cantidad de lodo utilizado (ML), temperatura de cocción ( $T_c$ ), tiempo de cocción ( $t_c$ ) y tamaño de la partícula de lodo ( $t_g$ ) sobre las propiedades mecánicas y físicas de los materiales cerámicos celulares elaborados.

Establecer los valores óptimos de los factores de influencia para la producción de materiales cerámicos celulares con valores máximos de porosidad y resistencia a la compresión.

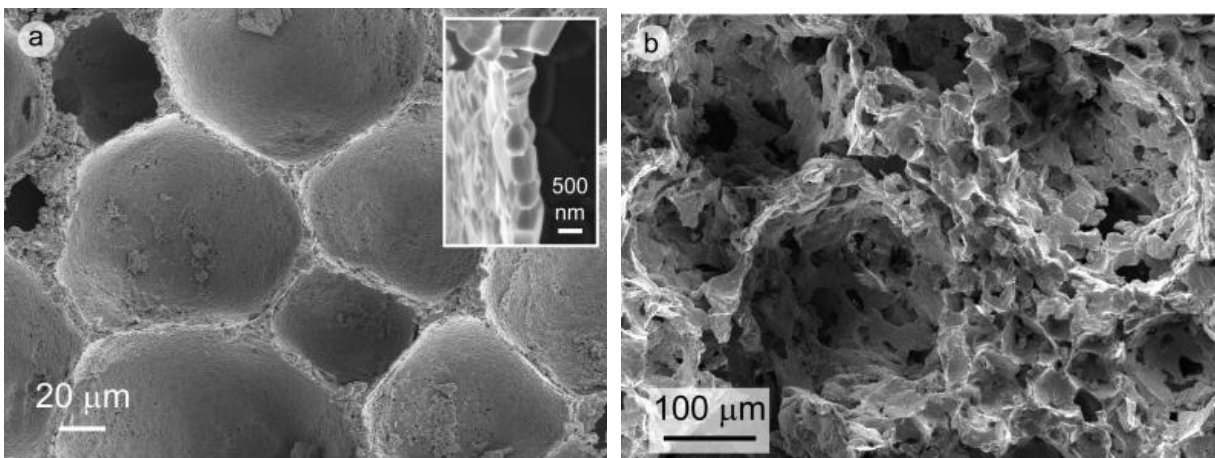
Proponer un posible mecanismo de formación de la porosidad en el material cerámico elaborado.

# **CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO**

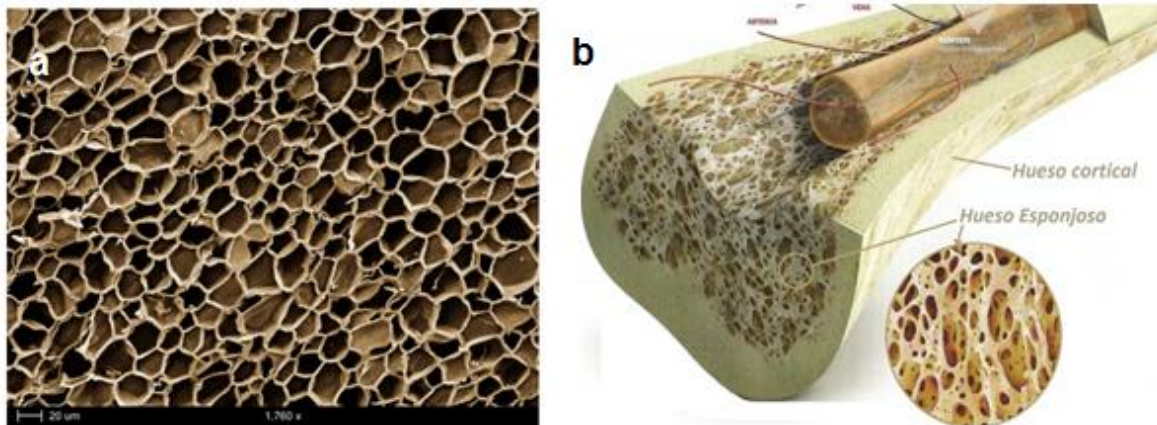


## II.1 Generalidades De Materiales Cerámicos Celulares

Existen diferentes aplicaciones para los materiales cerámicos celulares a nivel industrial. El potencial de uso de este tipo de materiales en aplicaciones tales como: filtrado de metales fundidos, filtro de gases calientes, soporte de catalizadores, paneles estructurales de bajo peso, birreactores, electrodos, refuerzo para metales, aislantes térmicos, materiales ligeros para la construcción, soporte de catalizadores, entre otras aplicaciones, ha desencadenado una mayor investigación. Las materias primas convencionales para preparar estos materiales suelen ser de alta pureza. (Yang *et al.*, 2012; Hu *et al.*, 2012) Los cerámicos celulares son una amplia gama de materiales que abarcan estructuras altamente porosas, superior al 60% en volumen (Colombo P. , 2006) Se caracterizan por la presencia de una “célula o celda” que es un espacio cerrado vacío que posee caras y aristas sólidas. Las caras pueden ser completamente sólidas o presentar huecos (ventanas) lo que da origen a un material de célula abierta o cerrada *Figura II-1*. La estructura de un material cerámico celular está conformada por una estructura poliédrica dispuesta en tres dimensiones que dependiendo de la morfología general puede ser similar a la estructura típica de un panal de abejas (que poseen células prismáticas paralelas) o de una espuma (en la cual las paredes están orientadas al azar en el espacio *Figura II-2*. Además, la distribución de las células puede presentar variaciones aleatorias en la forma, tamaño y distribución



*Figura II - 1: Material cerámico de a) celda cerrada, b) celda abierta. (André R. Studart, 2006)*



*Figura II - 2: Materiales celulares naturales a) micrografía de corcho, b) estructura de fémur. Tomado de Internet*

Muchos trabajos se han enfocado hacia la utilización de residuos para preparar cerámicos celulares. Tal ha sido el caso de la preparación con partes de monitores de computadoras (Méar *et al.*, 2006); sedimentos de cuerpos de agua mezclados con  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (Liao y Huang, 2012), entre otros. En el trabajo de (Ramirez Zamora *et al.*, 2008) se describieron los principales resultados de investigación sobre una tecnología de valorización de lodo generado en plantas potabilizadoras. Si bien estos resultados no fueron del todo alentadores, permitieron evidenciar el efecto de la presencia del lodo en la pasta cerámica sometida a temperaturas mayores a  $1200^\circ\text{C}$ . En esta etapa están involucradas las siguientes transiciones de fase: [caolinita](#) → [metacaolinita](#) → [mullita](#) → [cuarzo](#) y [cristobalita](#). Se pudo constatar la formación de una espuma cerámica la cual dió origen a un material de forma irregular. Considerando la idea de que un fluido puede adoptar la forma del recipiente que lo contenga, en esta etapa de la investigación se plantea demostrar la formación de una cerámica celular con una forma definida. Por lo tanto, el presente trabajo tiene como objetivo principal evaluar la efectividad de un proceso de producción de cerámicas celulares con mezclas lodo-arcilla empleando un molde que la contenga. La evaluación o efectividad del proceso se realizará determinando las características físicas de las cerámicas celulares (resistencia a la compresión, densidad y porosidad).

### II.1.1 Definición y clasificación del material cerámico celular

De acuerdo a (Gibson L.J. Asbby M. , 1999), un material cerámico celular presenta una estructura interconectada por “tornapuntas” o “láminas” las cuales forman los bordes y caras de las celdas [Figura II-3](#). Una de las características más importantes que debe presentar un material cerámico celular es el un valor bajo en su [densidad](#)

relativa  $\rho_{rm}$ , ( $\rho^*/\rho_s$ ). Esto es, el cociente entre la densidad del material celular o densidad aparente,  $\rho^*$ , entre la densidad del material, o densidad real, del cual están constituidas las paredes,  $\rho_s$ .

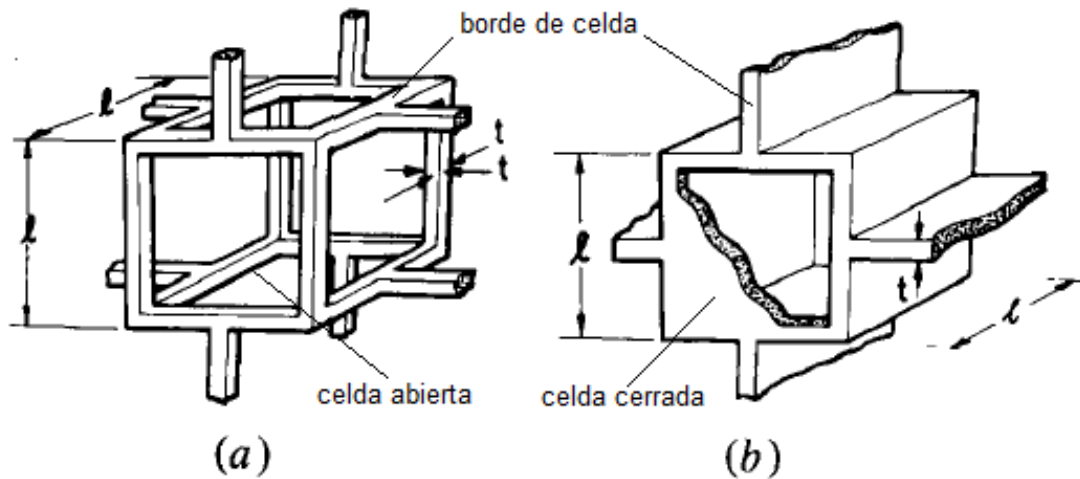


Figura II - 3: Estructura del modelo de GA a) celda abierta, b) celda cerrada. (ASHBY & Medalist, 1983)

Se puede definir de manera general a los cerámicos celulares como: materiales altamente porosos, cuyas propiedades físicas y características (tamaño y distribución de poros) están en función del proceso de conformado y los materiales empleados para la confección de este. Los materiales cerámicos celulares incluyen: espumas, paneles, varillas interconectadas, fibras interconectadas y esferas huecas interconectadas (Colombo P. , 2006). Debido a su estructura los materiales cerámicos celulares presentan propiedades únicas y singulares como las que se presentan en la Figura II-4 y II-5 (Mata, 2008).

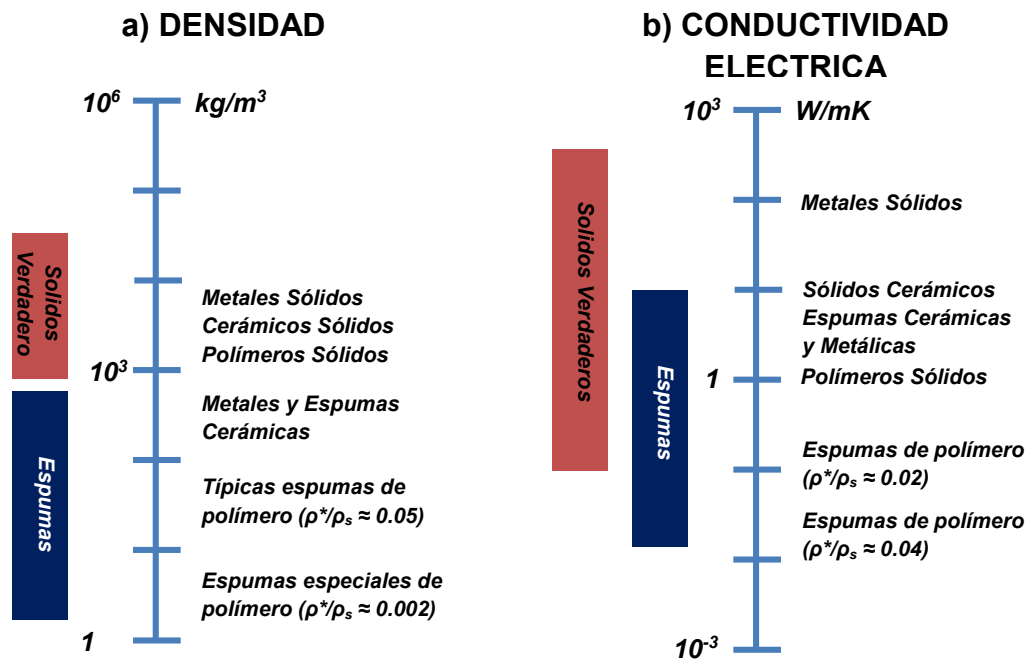


Figura II - 4: Propiedades de los materiales cerámicos celulares. a) Densidad, b) Conductividad eléctrica. (Mata, 2008)

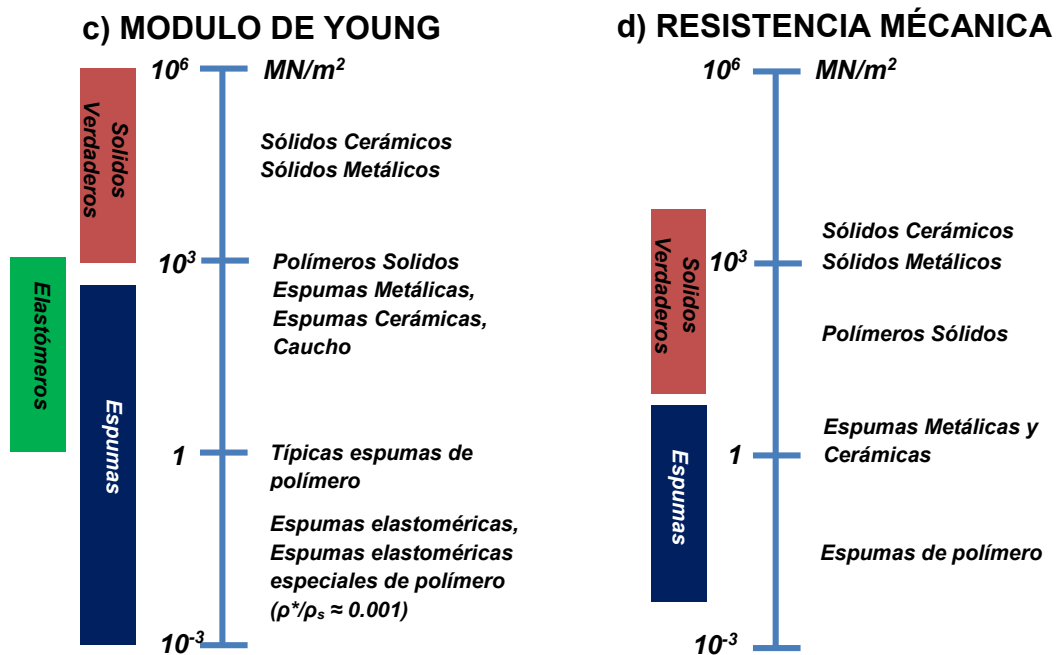


Figura II - 5: Propiedades de los materiales cerámicos celulares c) Módulo de elasticidad y d) Resistencia Mecánica. (Mata, 2008)



## II.1.2 Propiedades de los Cerámicos Celulares.

Como se mencionó anterior mente los materiales cerámicos celulares están conformados por diferentes procesos y materiales, las espumas cerámicas deben sus propiedades a su micro estructura celular [Tabla II-1](#). La propiedad más importante en estos materiales es su densidad relativa.

*Tabla II- 1: Propiedades de los materiales cerámicos celulares. (Elaborada por el autor).*

Valor	Característica
<b>Baja</b>	Densidad aparente, < 0.3
	Conductividad Térmica, 0.179-0.315 W/m °K
	Constante dieléctrica relativa , de 9 – 22 $\epsilon_r$
<b>Alta</b>	Área específica, hasta 30 m <sup>2</sup> /g
	Resistencia al desgaste (depende del material de fabricación)
	Resistencia al desgaste (depende del material de fabricación)

A continuación, se de describen brevemente la importancia de las diferentes propiedades que los cerámicos celulares poseen.

### II.1.2.1 Propiedades Mecánicas

Las propiedades mecánicas de los cerámicos celulares son las que delimitan sus aplicaciones, teniendo un uso limitado en las aplicaciones que busquen como función principal la estructural, pero sus propiedades son muy importantes en aplicaciones como filtros, soporte para catalizadores, aislamiento o combustión controlada. Además de las propiedades básicas de la matriz (material del que está confeccionado el cerámico celular) el porcentaje y tipo de porosidad influye en las propiedades mecánicas, algunas de estas propiedades pueden disminuir con el aumento y tipo de porosidad. ([Mata, 2008](#))

### II.1.2.2 Permeabilidad

La permeabilidad se puede definir como una medida macroscópica que indica la facilidad con la que, el fluido, conducido por una diferencia de presiones, fluye a través de los huecos de un medio poroso. De esta manera la permeabilidad no es una propiedad específica del fluido ni del medio a través del cual pasa, sino una combinación entre ambos. La permeabilidad de un medio poroso se suele expresar

a partir de parámetros que se derivan de dos ecuaciones principales: la ley de Darcy y la ecuación de Forchheimer. La ley de Darcy, que se deriva de experimentos realizados a velocidades muy bajas, considera solo los efectos viscosos en la pérdida de presión del fluido y establece una dependencia lineal entre el gradiente de presiones y la velocidad del fluido a través del medio poroso. Por su parte la ecuación de Forchheimer depende en gran medida de la determinación correcta del régimen del fluido dentro del medio poroso. Para una espuma reticulada la permeabilidad de Darcy se encuentra entre los rangos de  $10^{-11}$  y  $10^{-12}$  m<sup>2</sup> (Mata, 2008). Los parámetros básicos que influyen en esta propiedad son la porosidad total y la distribución del tamaño de celda.

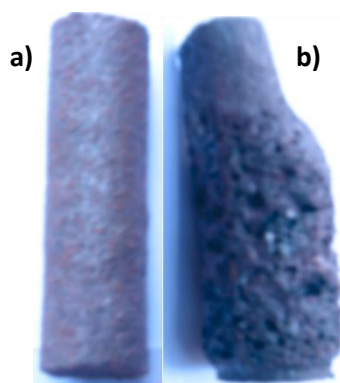
### II.1.2.3 Propiedades Térmicas

Los quemadores porosos, materiales aislantes, e intercambiadores de calor dependen de la conductividad térmica para ser correctamente usados, los cerámicos celulares no son la excepción. La ley de Fourier describe el intercambio de calor en un medio, esto implica que el intercambio de calor es proporcional a la conductividad térmica y al gradiente de temperaturas. Para cuantificar de una manera aproximada los diferentes tipos de transferencia de calor en los materiales cerámicos celulares, debe considerarse que los materiales cerámicos tienen una conductividad térmica alta, comparada con la del aire que se encuentra en las celdas que componen al material cerámico celular, por lo que la conductividad del aire puede despreciarse en la mayoría de los casos siempre que la porosidad del material no sea demasiado elevada. Para los materiales cerámicos celulares, se presentan dos posibilidades de [conductividad térmica](#). Primera posibilidad, cuando los cerámicos celulares presentan porosidad cerrada (celda cerrada), el material cerámico celular puede ser considerado como un material homogéneo con una conductividad térmica efectiva la cual se puede determinar sus propiedades por distintos métodos. Debe considerarse que en los materiales densos el valor de la conductividad térmica se incrementa al subir la temperatura debido a la radiación térmica a través de las celdas. Segunda posibilidad cuando los materiales cerámicos presentan porosidad abierta (celda abierta) permitiendo que el fluido fluya a través de la celda, lo cual hace que los mecanismos de transferencia de calor sean más complejos por lo que la conductividad térmica se hace mayor debido a la convección forzada y la mezcla entre el fluido y el material. Para ambos casos, la conductividad térmica para materiales cerámicos celulares varía entre 0.1 y 1 W/mK (Mata, 2008). La transferencia de calor puede disminuirse reduciendo el tamaño de la celda al mantener valores de densidad reducidos. Por su parte la resistencia al

[choque térmico](#) en las espumas cerámicas es bastante buena, gracias a su bajo coeficiente de expansión térmica el cual para este tipo de materiales oscila entre  $1$  y  $9 \times 10^{-6}$ . (Mata, 2008)

## II.2 Espumas Cerámicas

Como se mencionó anteriormente, los materiales cerámicos celulares debido a su estructura se clasifican en bidimensionales, tridimensionales y espumas, para cada tipo de clasificación existen diferentes métodos de fabricación; los cuales están ligados al uso que se le dará al material cerámico celular, en el trabajo de (Ramírez Zamora et al, 2008), se describe un mecanismo de formación de un material cerámico, que se produjo debido a una reacción tipo peritética en la que los aluminatos y silicatos reaccionaron para formar minerales liberando en el proceso gas volátil. (Espejel, 2007) Al elaborar materiales cerámicos empleando una mezcla de arcilla y lodo observó que después de la cocción de estos materiales, presentaban deformaciones en regiones al azar que consistían en abultamientos del material, que eran producidas por un alto contenido de lodo/arcilla. En el estudio realizado por (Pacheco Flores, 2012), las deformaciones que presentan los materiales confeccionados después de su cocción eran similares, pero estas se presentan en la base de los materiales y solo en algunos materiales elaborados con molde tenían características irregulares, las cuales consistían en un abultamiento del material y una superficie irregular similar a una espuma endurecida [Figura II-6](#). Dentro de los materiales cerámicos, existe un material que debe su forma irregular a los gases que forma su porosidad, estos gases se producen antes o durante la cocción del material, y este tipo es conocido como **Espuma cerámica**.



*Figura II - 6: a) Se observa una probeta cocida sin molde, y b) una probeta cocida con molde y su apreciable deformación semejante a una espuma. (Pacheco Flores, 2012)*

El nombre de espuma cerámica se definió a finales de 1970. Estas fueron utilizadas por primera vez como filtros para atrapar impurezas del aluminio fundido, cobre y hierro. Lo que hace interesantes a estos materiales como la clasificación a la que pertenecen son sus propiedades de permeabilidad, resistencia química; superficie de contacto, resistencia al choque térmico etc. Las espumas cerámicas están definidas por su tamaño de poro y la distribución en el volumen de su porosidad (M.M. Enríquez-Gonzalez, 2012).

### II.2.1 Proceso de producción de cerámicos celulares y factores de influencia en la formación de la estructura porosa.

Se debe tener presente que el tipo de proceso y la materia prima utilizada para elaborar los materiales cerámicos celulares tiene una fuerte influencia en las características de cada material producido. Dependiendo del proceso se puede obtener diferente microestructura; 1) microporos ( $< 20 \text{ \AA}$ ), 2) macroporos ( $> 500 \text{ \AA}$ ), y 3) mesoporos (20 a  $500 \text{ \AA}$ ) (M.M. Enríquez-Gonzalez, 2012).

A nivel macro estructural los materiales de celdas cerradas, con porosidad graduada o anisotrópica, son el resultado de un método de fabricación específico. Cada método de fabricación da lugar a una variedad del tamaño de celda, distribución del tamaño de las células, cantidad total de porosidad, nivel de interconexión entre células y la presencia, cantidad, orientación y grosor de las paredes. De manera similar se ve influenciado los soportes (o puntales) y este parámetro junto con la densidad relativa del material, afecta directamente a la resistencia de la estructura, el tamaño máximo de la pieza y la forma, depende también del proceso de confección elegido.

En los efectos a nivel micro estructural, se encuentran la presencia de puntales huecos en la espuma cerámica producida por la técnica de repica.

Es de importancia en todos los métodos en los cuales se emplean suspensiones, que estas posean una elevada estabilidad en las partículas, para ello se han de tomar en consideración los parámetros; % P/P de dispersante, aglutinante, surfactante y de sólidos además del pH. (M.M. Enríquez-Gonzalez, 2012)

### II.2.1.1 Tipos y características de las materias primas para la elaboración de materiales cerámicos celulares

En los últimos años ha surgido un interés cada vez mayor en los cerámicos avanzados. Estos materiales se han desarrollado por sus particulares propiedades mecánicas, eléctricas, ópticas y magnéticas. Al contrario que los cerámicos tradicionales, los avanzados están constituidos por compuestos puros o casi puros tales como Óxido de Aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Carburo de Silicio ( $\text{SiC}$ ), y Nitruro de Silicio ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). El uso de carburo de silicio en la turbina de un motor de gas en áreas que se someten a elevadas temperaturas es un ejemplo de aplicación de las cerámicas avanzadas en la ingeniería de tecnología de punta y el Óxido de Aluminio en la base del soporte para los circuitos integrados de los chips en un módulo de conducción térmica. Una de las aplicaciones que ha tenido un auge significativo es la medicina, donde se han elaborado biomateriales para ser usados en implantes de cuerpos óseos.

Como se mencionó en la sección anterior, son diversos los materiales que se pueden utilizar en los procesos para elaborar un material cerámico celular. Respecto al material que conforma al cerámico celular suelen ser materiales cerámicos avanzados, así como tradicionales. Es decir, pueden estar conformados por  $\text{SiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Mullita,  $\text{ZrO}$ , Cordierita (Silicato de Magnesio y Aluminio), además de silicato, vidrio y carbono así como ormigon. (Colombo P. , 2006) Además, pueden conformarse de materiales arcillosos.

### II.2.1.2 Procesos de Elaboración de las Espumas Cerámicas

Las diferentes propiedades requeridas en las espumas cerámicas necesitan una serie de rutas de procesamiento para su fabricación, ninguna ruta es lo suficientemente flexible para conformar todas las estructuras necesarias. Esto ha generado una amplia variedad de rutas, sin embargo, se pueden clasificar en tres categorías principales 1) *Replicado*, 2) *Espumado Directo* y, 3) *Generación de Gases in situ*. (Scheffer & Colombo, 2005) Existen variaciones de las rutas principales tales como: *Material de Sacrificio*, *Sol-gel*, *Gel-Casting* y *Vaciado de Suspensiones* (M.M. Enríquez-Gonzalez, 2012) Los diferentes rutas de conformación de las espumas cerámicas crean un material con características únicas, estas características dependen en gran medida de la porosidad del material confirmado. [Tabla II-2.](#)

Tabla II- 2: Características de la espuma cerámica correspondientes al proceso de elaboración (Elaborará por el autor)

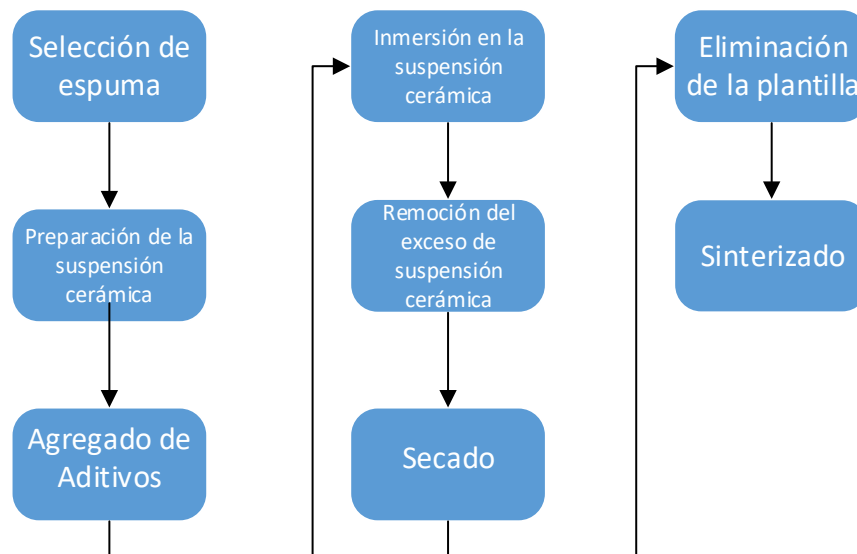
Procedimiento / Técnica de Conformado	Tipo de Porosidad	% de Distribución del Poro	Tamaño de Poro Generado	Aplicaciones
<b>Replicado</b>	Macroporos	25 - 95	3 – 300 $\mu\text{m}$	Filtros
<b>Espumado Directo</b>	Macroporos	40 - 97	1.2 --35 mm	Filtros Quemadores Intercambiadores de calor
<b>Generación de gases in situ</b>	Macroporos	17 - 31	90 – 400 $\mu\text{m}$	Filtros
<b>Material De Sacrificio</b>	Macroporos	20 - 90	1 – 700 $\mu\text{m}$	Muebles de Horno, Filtros
<b>Sol-Gel</b>	Microporos / Macroporos	90	20 a 500 Å	Estructuras de bajo peso. Muebles de Horno
<b>Gel-Casting</b>	Macroporos	----	< 100 $\mu\text{m}$	Filtros, Quemadores
<b>Vaciado de Suspensiones</b>	Microporos	60	10 $\mu\text{m}$	Estructuras de bajo peso. Muebles de Horno

A continuación, se describen cada una de las técnicas mencionadas.

### II.2.1.2.1 Replicado

La mayoría de las espumas cerámicas, actualmente se fabrican industrialmente mediante la técnica de replicado, que produce espumas cerámicas reticuladas. La técnica consiste en la impregnación de una esponja polimérica flexible con una suspensión cerámica, la eliminación del exceso de suspensión se realiza al comprimir o centrifugar la esponja, seguido del secado, la [pirolización](#) de la plantilla polimérica y finalmente la [sinterización](#) del material a alta temperatura. (Colombo P. , 2006). La espuma polimérica se hace generalmente de poliuretano, si se utilizara una espuma orgánica como plantilla esta debe de tener la cualidad de recuperar su forma después de ser comprimida para retirar el exceso de suspensión cerámica, además de que pueda ser eliminada completamente durante la pirolización. Se pueden utilizar materiales sintéticos y naturales para la plantilla, polímeros tales como cloruro de polivinilo, poliestireno, celulosa y el látex, entre los materiales orgánicos se encuentran la madera, coral, y esqueletos marinos etc. La suspensión

cerámica puede estar constituida a base de óxidos y no óxidos, a menudo contiene varios aditivos para actuar como [aglutinantes](#); agentes reológicos o compuestos que facilitan el recubrimiento y adherencia de la suspensión. Al emplearse plantillas sintéticas como poliuretano se han reportado una distribución de porosidad del 40 al 95% y un tamaño de poro de 3 a 200  $\mu\text{m}$ , así mismo una distribución del 25 a 95 % en materiales naturales como la madera y derivados obteniendo un tamaño de poros de 300  $\mu\text{m}$ . (M.M. Enríquez-Gonzalez, 2012). *Figura II- 7* Esta técnica replica aproximadamente el polímero y resulta una estructura distinta en la que los puntales son huecos después de la transformación completa. El agujero representa la forma original y la posición de la plantilla que se elimina por pirolisis después de la cocción. En la *Figura II-8 a, b y c* se aprecia una plantilla de poliuretano antes de realizar la impregnación de la suspensión cerámica, un material cerámico de espuma reticulada acabado y el puntal hueco cerámico.

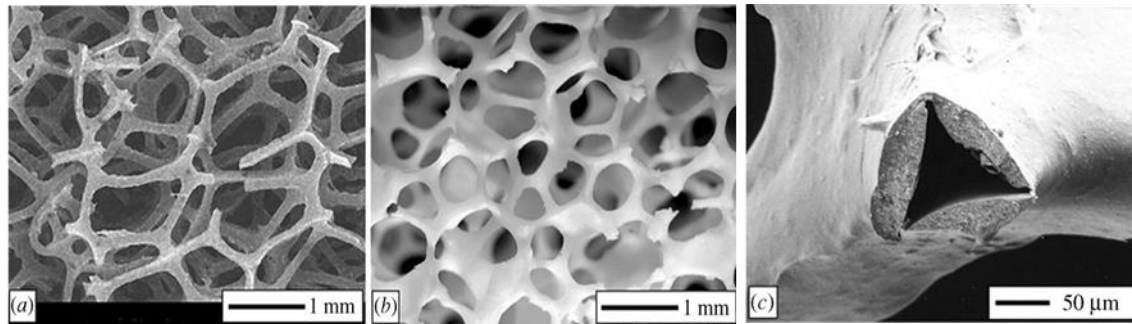


*Figura II - 7: Diagrama de flujo de elaboración de una espuma cerámica por la técnica de réplica (Scheffer & Colombo, 2005)*

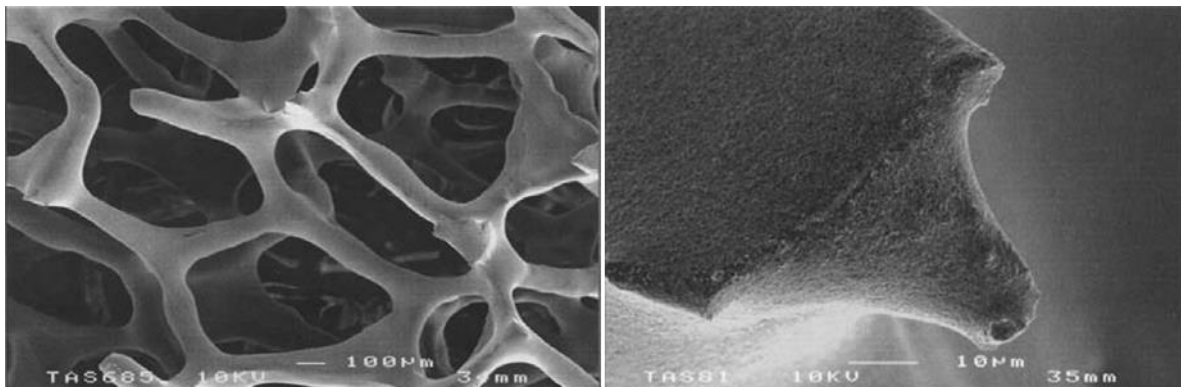
Esta técnica produce una estructura reticulada muy abierta con alta permeabilidad, la principal desventaja está asociada con los puntales huecos y el gran número de defectos que se generan al quemar la espuma de polímero, como consecuencia se tienen bajas propiedades mecánicas; además de los gases tóxicos como Cianuro de Hidrogeno o Ácido Cianhídrico  $\text{H-C}\equiv\text{N}$  en el caso de poliuretano, generados al quemar la espuma polimérica. Estas desventajas se pueden reducir al utilizar adicionalmente la técnica de *electrospray* sobre la espuma de poliuretano antes de pirolizar la espuma, la cual consiste en hacer pasar la suspensión cerámica a través de una boquilla metálica con un voltaje alto y un electrodo a tierra, lo cual atomiza la suspensión creando gotitas muy finas que se utilizan para revestir la espuma de



polímero. Las características del material conformado al utilizar esta técnica son secciones transversales macizas, y puntales sin huecos. [Figura II-9](#)



*Figura II - 8: Micrografías a) plantilla de espuma de poliuretano, b) espuma de cerámica reticulada ( $Al_2O_3$ ), c) puntal hueco de una espuma cerámica (SiC). (Colombo P. , 2006)*



*Figura II - 9: Micrografía del lado izquierdo, espuma cerámica de alúmina sometida a electrospray, a la derecha detalle de puntales sin huecos. (Scheffer & Colombo, 2005)*

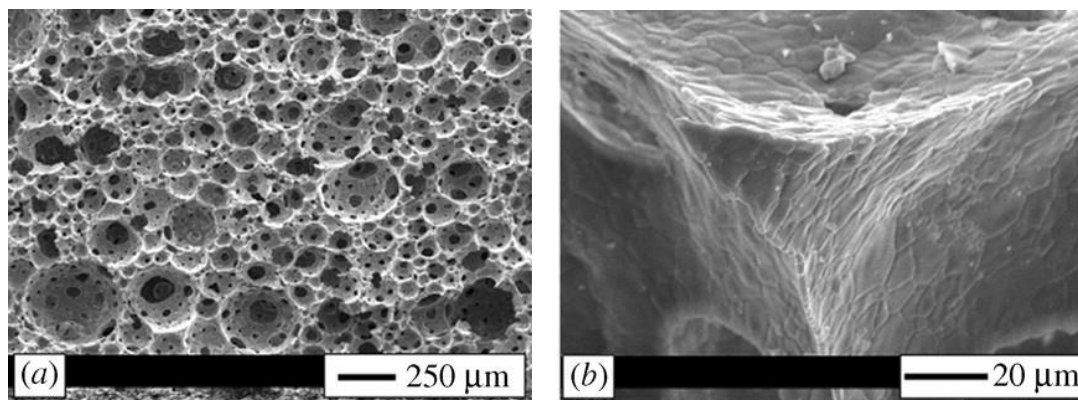
### II.2.1.2.2 Espumado directo

Por medio de esta técnica la porosidad del material se logra con la incorporación de una fase gaseosa o líquida en la suspensión que requiere de surfactantes, polvos cerámicos, solventes, [dispersantes](#) y [agentes gelantes](#). Además de un agente tensoactivo para reducir la tensión superficial de las diferentes fases gas-líquido y por lo tanto estabilizar la película que rodean a las burbujas de gas desarrolladas dentro de la [suspensión](#). Dicha estabilización solo funciona durante un período de tiempo limitado ya que varias transformaciones pueden ocurrir en la estructura



debido al adelgazamiento de las paredes de las burbujas, estos cambios en la estructura antes de la solidificación influyen sobre la distribución final, tamaño y espesor de pared de la celda, y la microestructura de la espuma sólida. Dichos cambios influyen directamente en las propiedades del material como la permeabilidad y la fuerza. Como ejemplo de la afectación que se produce cuando las películas que rodean a las burbujas permanecen intactas hasta la solidificación, se produce una espuma de celda cerrada, pero cuando las películas se rompen parcialmente se producen espumas de celda abiertas, en casos extremos un excesivo rompimiento de película puede conducir al colapso de la espuma.

En esta técnica se prepara una [emulsión](#) con el material que constituirá al cerámico celular en un solvente orgánico como la [acrilamida](#), ( (Barg et al, 2008); (He et al, 2009); (Xu et al, 2010); (Yang et al, 2012)). Posteriormente de formar la emulsión se lleva a cabo un espumado de la emulsión, la formación de espuma se puede obtener ya sea por factor mecánico (mezclado o agitación para introducir burbujas de aire), por burbujeo de un gas a través del líquido o un líquido volátil. Por último, se seca y sinteriza para conformar al material cerámico celular. A diferencia de la técnica de replicado, el espumado directo no produce cerámicos celulares con un mismo tamaño de celda, más bien existe una distribución del tamaño de las celdas el cual será función de la intensidad y forma de llevar a cabo el espumado “en verde”, es decir, cuando aún está presente la suspensión. Esta técnica permite la obtención de espumas de celda cerrada o abierta, con esta técnica el transporte de fluido dentro del material es más fino, además de tener puntales más densos y poseer una cantidad limitada de defectos. En la [Figura II-10 a\)](#) se aprecia una espuma cerámica obtenida por espumación directa y en la [Figura II-10 b\)](#) se muestra la estructura de los puntales.



*Figura II - 10: Micrografía de a) espuma cerámica de Hidroxiapatita obtenida por espumificación directa. b) Detalle de los puntales densos. (Colombo P. , 2006)*

### II.2.1.2.3 Generación de gases in situ

La formación de espuma se produce por la descomposición de algún material en este caso el proceso se inicia por el calor o por una reacción química (por ejemplo las reacciones de reticulación en resinas de silicona que conducen a la formación de agua, la oxidación de un sólido como el carbono o la formación de  $\text{CO}_2$  gas)

Esta técnica permite obtener materiales cerámicos celulares formados a través de la descomposición de un material, orgánico e inorgánico (Low N.M.P., 1980); (Altinkok, 2007); (Méar et al, 2007). Esta descomposición genera gases los cuales crean la espuma cerámica. En esta técnica se suelen utilizar algún carbonato, como material inorgánico, para la generación de  $\text{CO}_2$  el cual “infla” al material cerámico formando la estructura tridimensional espumosa. Algunos ejemplos interesantes son aquellos materiales en los cuales se les ha incorporado algún tipo de residuo industrial para la generación de gases. Dentro de los residuos utilizados se encuentran los siguientes: mezclas de virio e hidroxiapatita; vidrio reciclado y flogopita; cátodos de televisores mezclados con SiC o TiN; residuos de la elaboración de SiC mezclados con vidrio; sedimentos y residuos volcánicos, entre otros (Bernardo et al, 2007); (Méar et al, 2007); (Hasheminia et al, 2012), (Liao et al, 2012)). Cabe mencionar que esta técnica es muy parecida a la Técnica de *Espumado directo*, con la variación de que en esta técnica se introducen materiales que, al descomponerse, generan los gases que dan forma a la espuma. La apariencia del material es muy similar a la del *Espumado directo*, en la Figura II-11 a y b se observan las características de la *generación de gases in situ*.

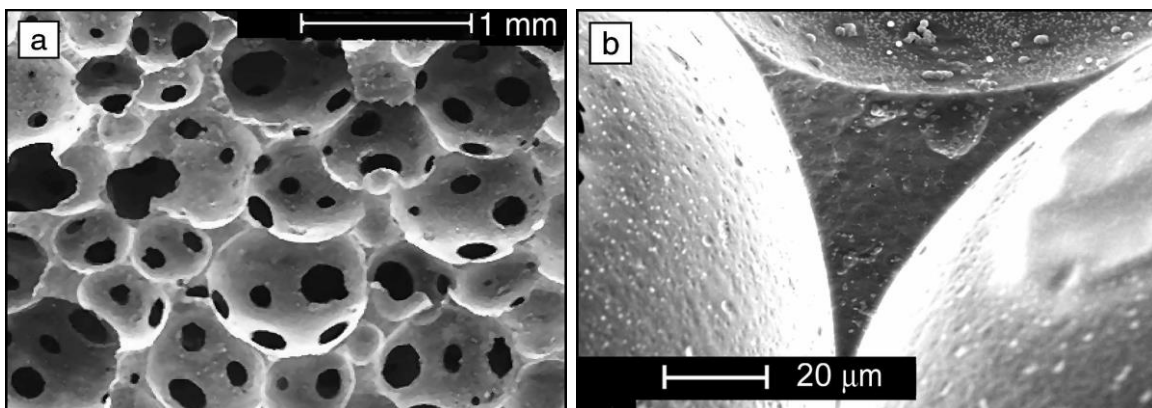
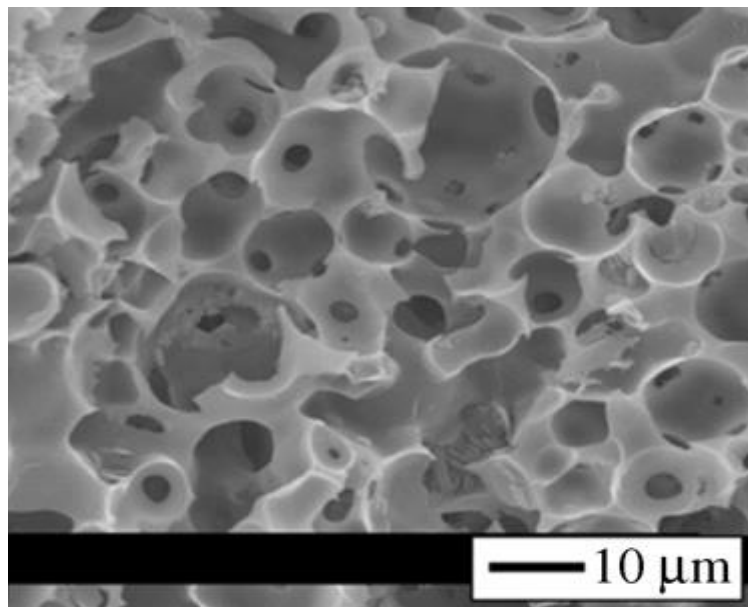


Figura II - 11: Micrografía de a) la espuma cerámica obtenida por la generación de gases in situ b) detalle de los puntales. (Colombo D. J., 2003)

#### II.2.1.2.4 Material de Sacrificio

La técnica de Material de Sacrificio o Burn-Out que produce un cerámico poroso cuando el material sólido que ocupa el espacio dentro de la matriz del componente desaparecen durante el calentamiento a elevadas temperaturas. Esta técnica consiste en utilizar un compuesto bifásico que se compone de una matriz de partículas continuas cerámicas o precursores y de una fase de sacrificio dispersa, que es inicialmente distribuida homogéneamente a través de la matriz, por último es extraída para generar poros dentro de la microestructura. Materiales como el almidón, cera, perlas poliméricas (polimetilmetracrilato, poliestireno, cloruro de polivinilo) negro de carbón, aserrín se han utilizado con diferentes porcentajes de éxito. El tamaño de poro y la forma son dependientes del material de sacrificio empleado. En la [Figura II-12](#) se aprecia la estructura formada por esta técnica.



*Figura II - 12: Espuma de SiC sintetizada utilizando micro perlas poliméricas. (Colombo P. , 2006)*

#### II.2.1.2.5 Sol-Gel

Es una técnica que se basa en la concentración de materiales orgánicos o compuestos órgano-metálico, esta técnica utiliza la transición de un sistema coloidal líquido llamado "Sol" a una fase sólida llamada "Gel". El precursor cerámico está sujeto a una serie de reacciones de hidrólisis y poli-condensación, para formar una suspensión coloidal o el "sol". La formación de los poros a cualquier escala consiste

en obtener una red inorgánica y continua alrededor de los bloques orgánicos ensamblados por surfactantes o polímeros definidos como plantillas que son ordenados en la estructura final. Esta técnica utiliza técnicas complementarias como la precipitación, rociado con pirolisis o emulsión, para obtener la porosidad, dentro de la técnica complementaria de emulsión se utiliza una combinación de “sol-gel” y surfactantes.

#### II.2.1.2.6 Gel-casting

La técnica de *Gel-casting* o *vaciado de gel* es una técnica nueva y muy reciente, que proporciona una alta resistencia mecánica a las espumas cerámicas pero el tamaño de la celda es más difícil de controlar. La técnica consiste en la [polimerización](#) de una solución acuosa de polvo cerámico con monómeros orgánicos para formar una espuma, obteniéndose cuerpos con porosidad abierta e interconectada, este método ha sido empleado para producir implantes óseos fabricando espumas con polvos de hidroxapatita.

#### II.2.1.2.7 Vaciado de Suspensiones

Es una técnica usada para la elaboración de compactos cerámicos, ya que permite el control sobre la porosidad deseada. La técnica consiste en el vertido de la suspensión cerámica dentro de un molde de yeso, que debido a su porosidad y fuerza de capilaridad del orden de 0.1 a 0.2 MPa, permite drenar el líquido de la suspensión vertida dentro del molde, durante el proceso de filtración las partículas cerámicas son depositadas en la pared del molde y gradualmente crece una capa consolidada, permitiendo que las paredes consolidadas se aproximen al centro del molde para formar una pieza sólida, después de cierto tiempo de secado la pieza es removida del molde para un secado y sinterizado. En la [Figura II-13](#) se muestra el esquema de esta técnica.

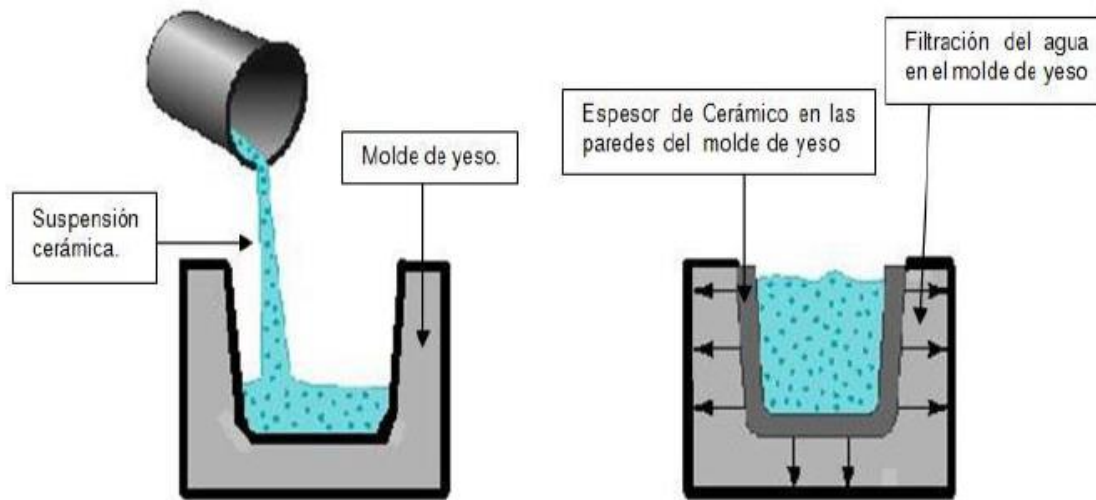


Figura II - 13: Técnica de Vaciado de suspensiones. (M.M. Enríquez-Gonzalez, 2012)

## II.2.2 Aplicaciones del material cerámico celular en la industria

Las aplicaciones generales que pueden tener los materiales cerámicos celulares están en función de las celdas que los conforman (abiertas o cerradas) las aplicaciones incluyen filtración de metales fundidos, filtración de gases calientes, quemadores radiantes, soporte de catalizadores, dispositivos biomédicos, muebles de horno, páneles estructurales de bajo peso, biorreactores, electrodos, refuerzo para metales, compuestos de matriz polimérica, componentes de pilas de combustible de óxido sólido, estructuras sándwich ligeras, disipadores de calor, electrodos e intercambiadores de calor. (Colombo P. , 2006) El hecho de que los cerámicos celulares puedan usarse en varias aplicaciones, les confiere la posibilidad de denominarlos materiales multifuncionales.

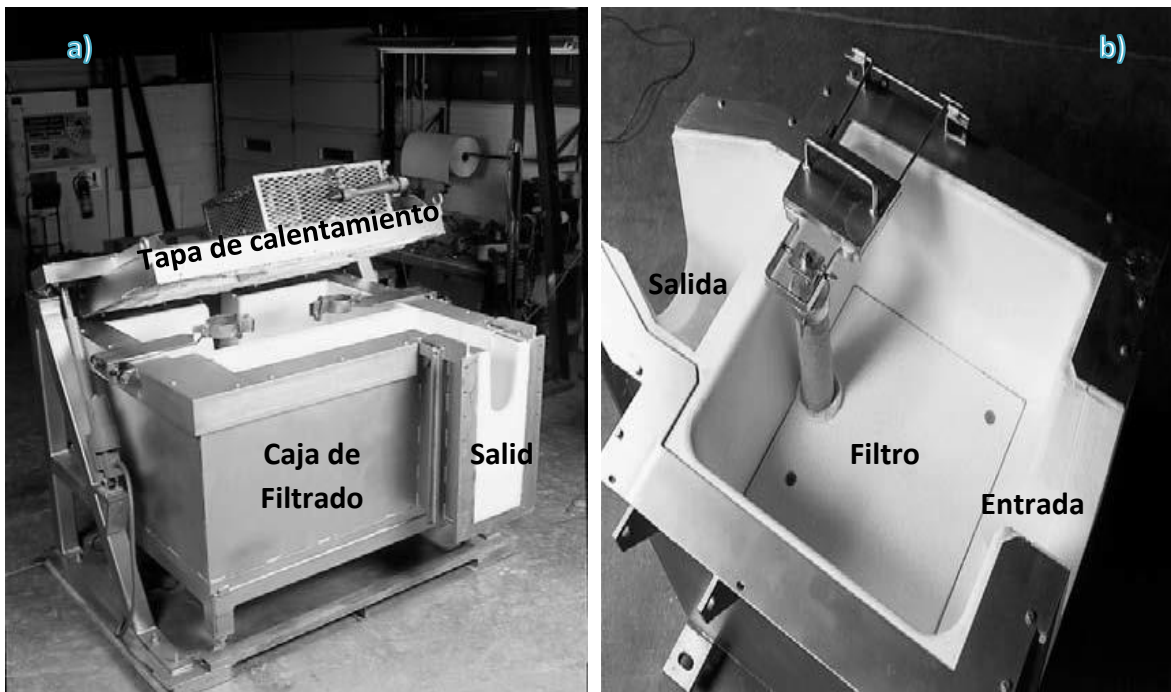
### II.2.2.1 Filtro para metales fundidos

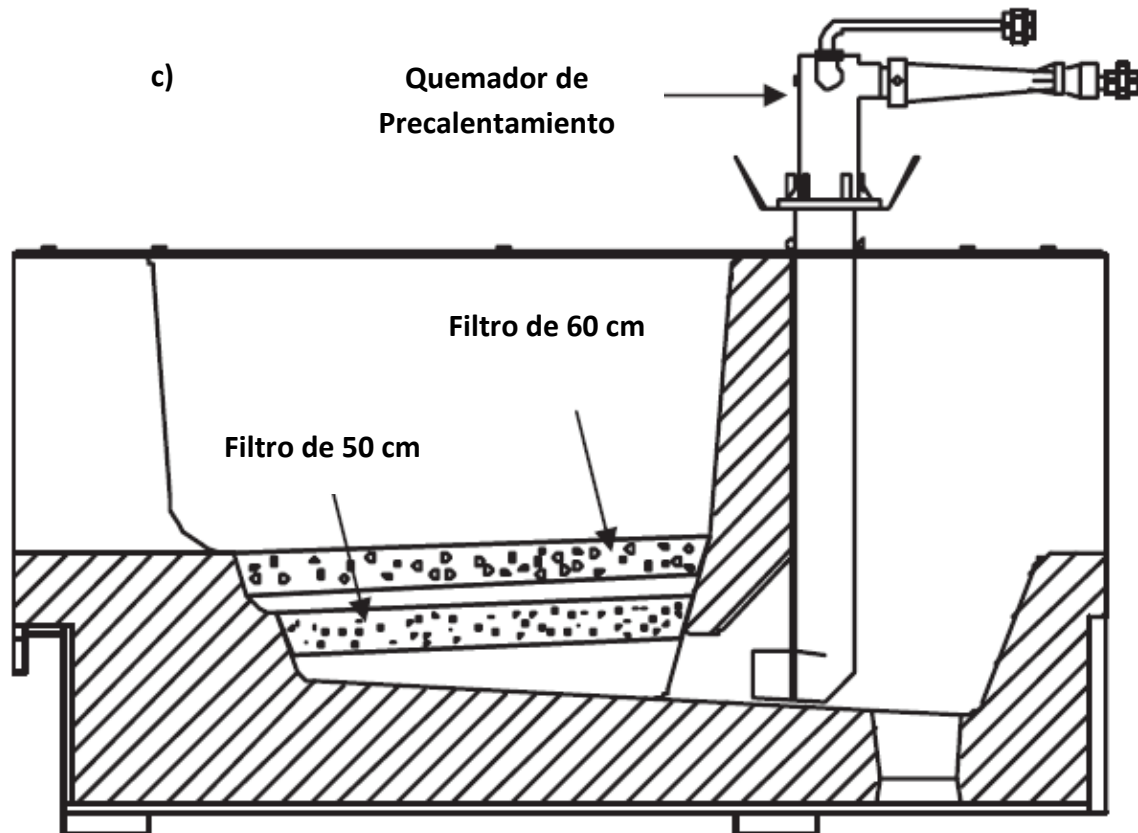
En la mayoría de las operaciones de fundición de metales, el proceso de fundición, transporte y aleación del metal en preparación y la preparación de las formas deseadas para la fundición pueden presentar inclusiones no metálicas indeseables en la masa fundida. Los metales fundidos son altamente reactivos y tienden a interactuar con los gases y refractarios durante etapas de procesamiento, fases



indeseables se [absorben](#) ya sea como líquido o sólido. Como ocurre al reaccionar el Aluminio y Hierro fundido con el Oxígeno atmosférico del aire para formar óxidos y fases de escoria líquida. Una vez que el metal se funde, las escorias pueden generar defectos que hacen al metal terminado inutilizable. En algunos casos las escorias son demasiado pequeñas y están en bajas concentraciones para ser detectadas en la colada del metal, por lo que estos defectos son detectados en el proceso de mecanizado y en las etapas de formación. Debido a esto, para obtener productos metálicos libres de defectos, es necesario eliminar estas imperfecciones no metálicas de la masa fundida, y uno de los métodos más eficaces para realizar esta tarea es el uso de filtros de espuma cerámica.

Los filtros de espuma cerámica (CFFs por sus siglas en inglés) se comenzaron a utilizar a principios de 1974, para la filtración de Aluminio fundido. Hoy en día, la filtración a través de las espumas cerámicas es de suma importancia en el procesamiento de varios metales. A nivel mundial un 50% del Aluminio forjado fundido utiliza este tipo de filtros lo que representa 650 000 filtros por año, cuyas dimensiones son de 18 x 66 cm de lado y 5 cm de espesor. La producción de piezas de Hierro fundido ocupa el segundo lugar en el uso de estos filtros con 400 000 000 filtros por año, con tamaños que varían de los 35, 150 y 300 mm<sup>2</sup> con espesores que van de los 13 a los 32 mm [Figura II-14](#)





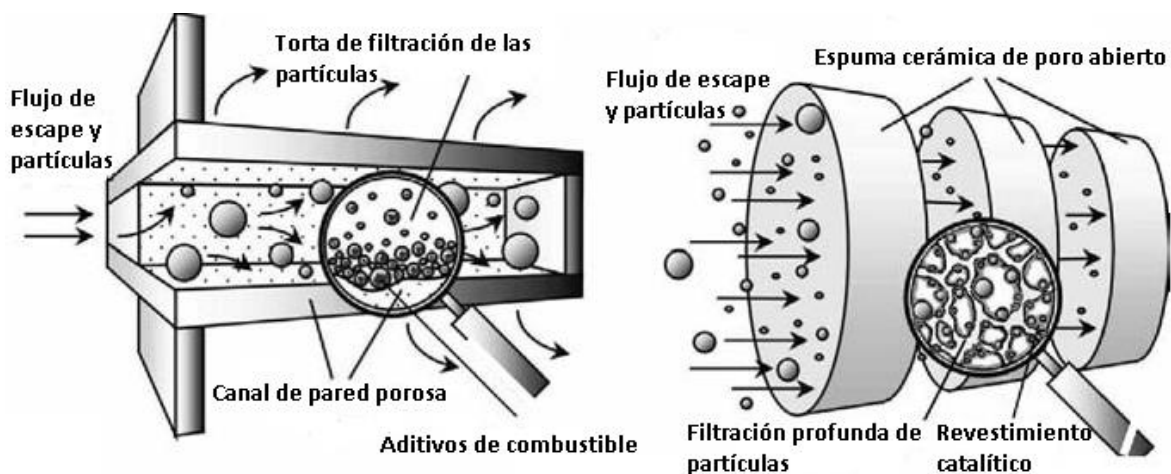
*Figura II - 14: Filtro Dúplex de 50 x 60 cm para metales a) vista general, b) vista superior del filtro, c) vista lateral. (Scheffer & Colombo, 2005)*

Otros productos metálicos como piezas de fundición acero, aleaciones de Cobre y súper aleaciones de alta temperatura se filtran rutinariamente con estos filtros. La mayoría de los filtros de espuma cerámica utilizados en la filtración de metales fundidos son fabricados por la técnica de replicación de espuma.

Los filtros de espuma cerámica proporcionan un medio eficaz de eliminar inclusiones de metal fundido, los filtros deben ser refractarios, resistentes a la corrosión, al choque térmico, soportar elevadas temperaturas y ser de bajo costo. Los filtros que se utilizan deben tener porosidad continua y el tamaño de poro constante para asegurar la repetitividad y rendimiento del filtro en las operaciones de procesamiento. Un ejemplo del uso de metal sin escorias u óxidos finales, es el papel Aluminio.

### II.2.2.2 Filtros de Gas

La filtración de gases a través de medios porosos puede llevarse a cabo por dos mecanismos, la filtración superficial o “pastel” e intersticial o filtración “de profundidad”. En la filtración superficial una torta del material filtrado se forma sobre el medio poroso filtrante durante el proceso. En la filtración profunda los filtros se saturan al retener las partículas dentro de su matriz porosa, mediante mecanismos como el impacto inercial, interceptación y la [difusión browniana](#). Se consideran filtros eficientes cuando se llega a tener un 95% eficiencia. Y filtros de baja eficiencia en un rango de 50 al 60%. En ambos casos se considera una caída de presión similar. En la [Figura II-15](#) se muestra un ejemplo de como los cerámicos celulares pueden ser utilizadas como filtros superficiales o profundos.



*Figura II - 15: Trampas de partículas para filtración de gases calientes. Izquierda monolito de panal y flujo de pared (filtración superficial). Derecha Trampa de espuma cerámica (filtración profunda). (Scheffer & Colombo, 2005)*

Una característica de los filtros de flujo de pared es el constante mantenimiento que tiene que dárseles “regeneración” ya que las partículas atrapadas provocan un aumento de contra presión. En cambio los filtros de espuma cerámica son conocidos como trampas “nonblockable” ya que las partículas atraviesan el filtro después de que este alcanza una cierta retención de masas, es decir se satura, esto permite que la caída de presión sea menor pero la eficiencia del filtro disminuye. Como se mencionó anteriormente las espumas cerámicas son utilizadas como filtros para metales, por su estabilidad térmica, alta porosidad, y tortuosidad. Estas características hacen atractiva a la espuma cerámica para un filtro acoplado a un catalizador.



### II.2.2.3 Filtros Catalíticos

Las ventajas que ofrece un filtro catalítico son amplias ya que se pueden simplificar las etapas, llevándose a cabo procesos de manera simultánea lo que conlleva a la reducción de costos, así como un ahorro y una mejor gestión de energía. Para aprovechar al máximo estas características los filtros catalíticos deben poseer:

- Buena [termoquímica](#) y estabilidad [termomecánica](#).
- Alta eficiencia en la separación de partículas (las partículas no deben penetrar a profundidad la estructura del filtro ya que esto daría lugar a la obstrucción de los poros y / o la desactivación del catalizador).
- Elevada actividad catalítica, que permita lograr la reducción catalítica casi completa a velocidades superficiales como las utilizadas industrialmente para la filtración de polvo que son de 10 – 80 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> h (en condiciones estándar) o incluso superior.
- Poca caída de presión
- Bajo costo.

Estas características pueden ser explotadas y aplicadas en calderas de carbón, incineradores, motores diésel entre otros, ya que estos equipos generan varios gases de combustión que se caracterizan por la emisión de partículas como cenizas y hollín, además de gases contaminantes como NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO. Los filtros de espumas cerámicas debido a sus propiedades básicas y el potencial de los materiales aplicados a la filtración de gases en los filtros catalíticos para la reducción simultánea de polvo (incluido el hollín) y gases contaminantes los hace una adecuada opción en procesos como los mencionados anteriormente y otros con características similares. [Figura II-16](#). La aplicación líder sin duda es la eliminación de partículas diésel de los gases de escape de los vehículos, por lo que los requisitos básicos de costo y durabilidad deben de ser competitivos. En los trabajos ya realizados ([Scheffer & Colombo, 2005](#)) se demostró que es posible lograr la conversión catalítica casi completa de gases contaminantes como el NO<sub>x</sub>, a velocidades de alimentación superficiales de interés industrial de 10 a 60 m<sup>3</sup> / m<sup>2</sup> h, a la cual puede tenerse la reducción catalítica útil, cabe mencionar que este tipo de catalizadores una vez saturados se pueden regenerar a través de diferentes procedimientos, dependiendo el tipo de catalizador y el soporte utilizado [Figura II-17](#). Aún se deben evaluar la resistencia de los filtros catalíticos a condiciones en las cuales el catalizador sea afectado como lo es en presencia de cenizas, azufre, compuestos clorados, vapor, etc.

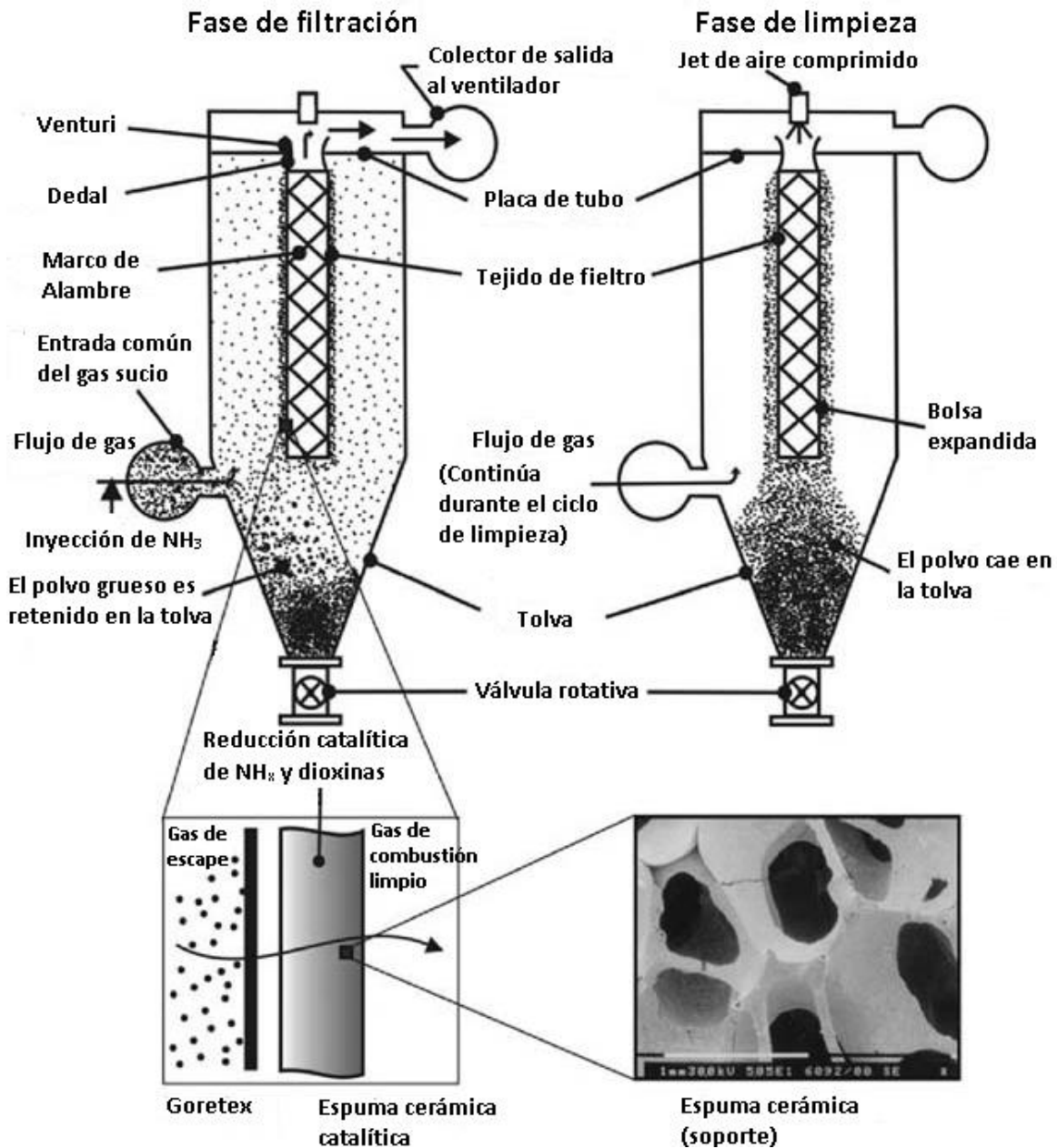


Figura II - 16: Vista esquemática de un filtro multifuncional para la reducción simultánea de cenizas, óxidos de Nitrógeno y Dioxinas. (Scheffer & Colombo, 2005)



*Figura II - 17: Vista de una espuma que contiene el catalizador  $Cs_4V_2O_7$  después del envejecimiento hidrotérmico. Lado izquierdo después de la regeneración por combustión de carbón en el horno a 450 °C. Lado derecho antes de la regeneración. (Scheffer & Colombo, 2005)*

#### II.2.2.4 Muebles de Horno

Los muebles de horno pueden ser definidos como aquellos artículos móviles, similares a las sillas y mesas, que son necesarias y útiles para la cocción de materiales (cerámicas, ladrillos, vajillas, etc.) a elevadas temperaturas. El mobiliario tradicional de horno es denso lo que se relaciona con resistencia mecánica, pero esta característica es desfavorable con respecto al consumo de energía, peso, ergonomía y resistencia al choque térmico en los ciclos térmicos en los que se emplean; los muebles de horno densos tienden a tener un último contenido de sílice que ayudan a reducir la expansión y el choque térmico. Para materiales en los que la sílice es un contaminante para los materiales que se hornearán contar con muebles de horno altamente porosos puede disminuir estas limitaciones. Una menor densidad, buena refractibilidad, estabilidad térmica son características de las espumas cerámicas que pueden ser transmitidas a los muebles de horno al utilizarse para su construcción, teniendo un mejor rendimiento comparado con los muebles de horno tradicionales, además de que los muebles de horno confeccionados de espuma cerámica al tener sílice libre se reduce su reactividad con los diferentes materiales. Si bien las ventajas que ofrece la espuma cerámica son considerables, se tiene una desventaja importante; una menor resistencia mecánica, un ejemplo de esto es el módulo de ruptura (MOR). El MOR de los muebles de horno de cerámicas reticuladas varía de 3 a 7 MPa, mientras que el de un mueble de horno tradicional puede ser de 30 a 70 Mpa o más. Por lo que las espumas cerámicas no podrían ser capaces de soportar cargas particularmente pesadas, o ser lo suficientemente elásticas para funcionar como un plato de empujé comparados con

los muebles densos. Pese a las desventajas que implica el usar muebles de horno confeccionados de espumas cerámicas, existen beneficios en aplicaciones como: Placas de 7x20x1 cm para sensores de oxígeno, 20x25x1.3 cm, placas para la disipación de los componentes de metal en el polvo, 10x10x1 cm, para uso en componentes eléctricos, y de 10x15x20 cm, para la cocción de arcillas refractarias de cerámica granulada. Existen diferentes nichos en los que se pueden remplazar a los muebles tradicionales de horno, en donde el rendimiento de la espuma cerámica añade valor al mercado tradicional.

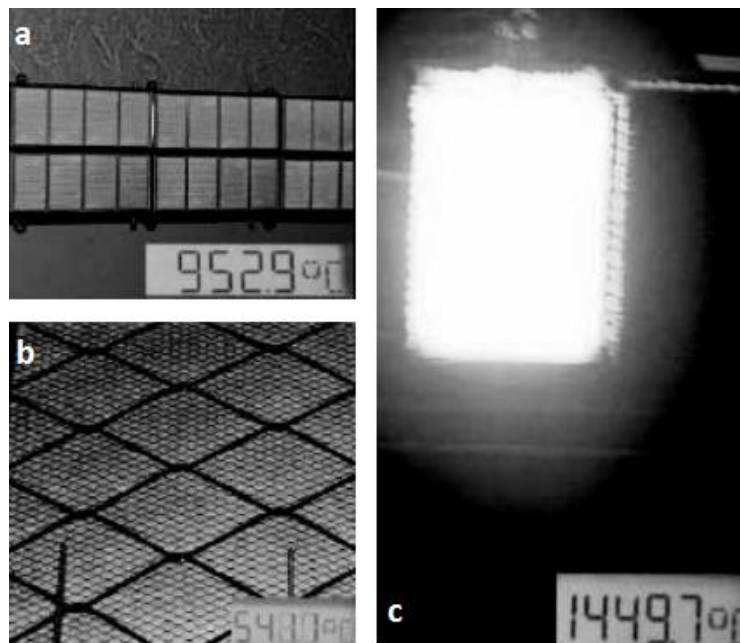
Entre las ventajas del uso de muebles de horno de cerámica celular se encuentran.

- Un mayor ciclo de vida en ciclos térmicos agresivos.
- Menor actividad reactiva entre el mueble de horno y el material con el que este en contacto.
- La reducción de las fuerzas de fricción generada durante la contracción de los materiales cocidos y la inhibición de los defectos causados por estas fuerzas.
- Menor uso de combustible, ya que se requiere menos energía para calentar los muebles.
- El diseño se ajusta a las necesidades de cada proceso.

### II.2.2.5 Quemadores porosos

Existen diferentes tipos de quemadores, los cuales se pueden agrupar en base al tipo de combustible (sólido, líquido o gas) y los requisitos de aplicación, (condiciones de funcionamiento, tamaño y límites de emisión). Hay dos tipos de emisiones de los quemadores que son de gran importancia: 1-Las emisiones debidas a la combustión incompleta, como Monóxido de Carbono e hidrocarburos sin quemar, y 2- Los subproductos de la combustión peligrosos tales como los Óxidos de Nitrógeno y los Óxidos de Azufre (gases de efecto invernadero y/o tóxico). La combustión incompleta puede mitigarse al realizar una combustión premezclada en lugar de difusión de llama, un mayor tiempo de residencia en la zona de reacción, un mejor aislamiento, mayor temperatura en la cámara de combustión y una mejor mezcla de reactivos. En cuanto a los subproductos de combustión, la cantidad de Óxidos de Azufre depende del contenido de Azufre en los combustibles, el cual es mayor en combustibles sólidos y menor en el gas natural. Los Óxidos de Nitrógeno que tienen mayor relevancia en términos de protección ambiental, dependen de la temperatura de combustión y el tiempo de permanencia a elevadas temperaturas. Los esfuerzos para reducir las emisiones de NOx, se basan en el desarrollo de quemadores con

menor temperatura de combustión, aquellos en los que hay una recirculación de gases y la combustión por etapas. Una disminución significativa de las emisiones de NO<sub>x</sub>, se logró en el desarrollo de quemadores porosos de superficies radiantes. (Scheffer y Colombo, 2005) Estos quemadores porosos generan una llama de “lámina” muy cercana a la superficie del quemador, que genera una alta temperatura, esto provoca que parte del calor liberado se irradie dentro del quemador, por lo tanto, la temperatura de combustión y las emisiones de NO<sub>x</sub> disminuyen. Otra mejora se logró mediante el desarrollo de quemadores radiantes porosos volumétricos, que atrapan la llama por completo dentro de la estructura porosa el cual tiene igual beneficios de que los quemadores radiantes pero con cargas térmicas superiores. Los soportes de quemadores se pueden agrupar como aquellos para la combustión catalítica, la combustión de superficie y para la volumetría de combustión de poro. [Figura II-18](#).



*Figura II - 18: Quemadores porosos operados con gas: a) Superficie radiante, b) Radiador catalítico, c) Volumétrico poroso. (Scheffer & Colombo, 2005)*

En los últimos años el uso de estructuras porosas cerámicas se ha incrementado utilizando cada vez más como soportes de quemadores para la combustión de gas natural de uso doméstico e industrial. La estructura de la cerámica celular ofrece una alternativa interesante en comparación con los quemadores de soporte metálico, ya que la temperatura de operación es mayor, se tiene una mejor extracción de calor de la superficie porosa radiante y potencialmente un mejor



rendimiento en materia de seguridad. En comparación con los quemadores radiantes convencionales que se limitan a una temperatura máxima de superficie de 1100°C debido a la dificultad de estabilización de llama, los quemadores porosos que utilizan como base la cerámica celular de soporte para el quemador y emplean la combustión volumétrica porosa en temple térmico (ver [Figura II-19](#)) que supera la mayoría de los inconvenientes de la estabilización de llama, ofrecen mejor rendimiento pero se requieren el empleo de cerámicas celulares estables a elevadas temperaturas y atmósferas agresivas. Entre los materiales más utilizados para los quemadores porosos se encuentran las espumas de Carburo de Silicio sinterizado S-SiC, así como espumas compuestas a base de SiC infiltrado en Silicio y estructuras mezcladores hechas de fibras de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, espumas o estructura de C / SiC. Todos los materiales son sustancias diferentes en lo que respecta a su fabricación y propiedades. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y ZrO<sub>2</sub> son materiales que pueden utilizarse a temperaturas superiores a 1650 °C, metales y materiales de SiC no tienen estas propiedades, sin embargo muestran alta resistencia mecánica, choque térmico y una buena conducción térmica.

Los campos de aplicación de los quemadores porosos dependen en gran medida de sus características, en la [Tabla II-3](#) se muestran las características de los materiales más utilizados como soporte de los quemadores porosos. Entre las aplicaciones que aprovechan las ventajas excepcionales tales como el diseño compacto, alta potencia, independencia de carga y un mínimo de residuos en las emisiones de gases, entre los quemadores porosos que se han desarrollado y probando los siguientes campos de aplicación:

- Fuente de calor para motores de vapor.
- Reactor de oxidación parcial térmica para la producción de Hidrógeno o síntesis de gas.
- Reactor para la destrucción controlada de hidrocarburos clorofluorados.
- Precalentador y quemador de gas de escape de los sistemas en pila de combustible.
- Quemador radiante de alta temperatura en hornos de fusión de vidrio.

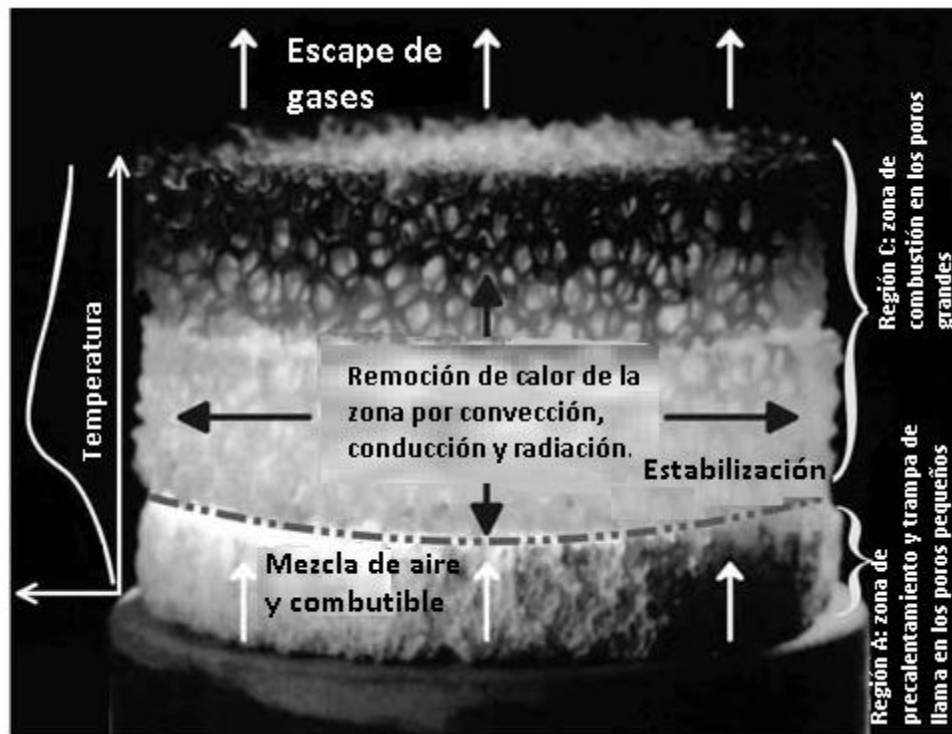


Figura II - 19: Quemador poroso con estabilización de llama de un temple térmico. (Scheffer & Colombo, 2005)

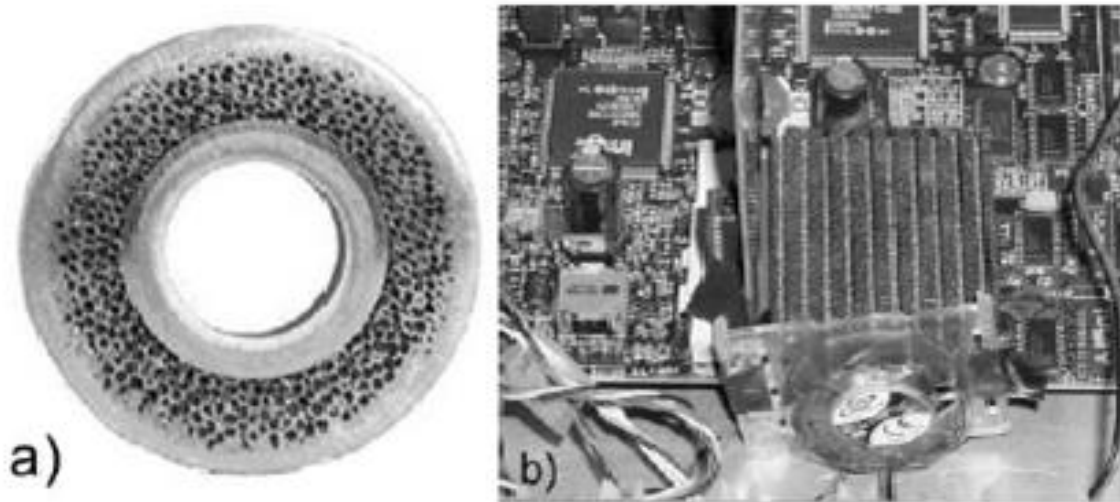
Tabla II- 3: Características de los materiales más utilizados como soporte de los quemadores porosos. (Scheffer & Colombo, 2005)

Propiedad	Unidad	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiC	ZrO <sub>2</sub>
Temperatura máxima de uso en el aire	°C	1900	1650	1800
Coefficiente de expansión térmica $\alpha$ (20-1000°C)	10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>	8	4-5	10-113
Conductividad térmica $\lambda$ a 20 °C	Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	20-30	80-150	2-5
Conductividad térmica $\lambda$ a 1000 °C	Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	5-6	20-50	2-4
Capacidad térmica específica	Jg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	0.9-1	0.7-0.8	0.5-0.6
Parámetro de resistencia térmica alto, $R$ ( $\sigma/E\alpha$ )	K	100	230	230
Parámetro de resistencia térmica medio, $R'$ ( $R/\lambda$ )	10 <sup>-3</sup> W m <sup>-1</sup>	3	23	1
Emisividad total a 2000 °K	-	0.28	0.9	0.31

### II.2.2.6 Intercambiadores de calor

Las espumas cerámicas de celda abierta fabricados por CVD (Deposición química de vapor) han sido propuestas como núcleos de intercambiadores de calor compactos en sistemas de refrigeración activos, de alta potencia con electrónica basada en SiC, debido a su alta conductividad térmica, excelente resistencia a la corrosión, y su coeficiente de expansión térmica que se complementa con el de los componentes electrónicos. Figura II-20. Al forzar el aire de refrigeración o agua a

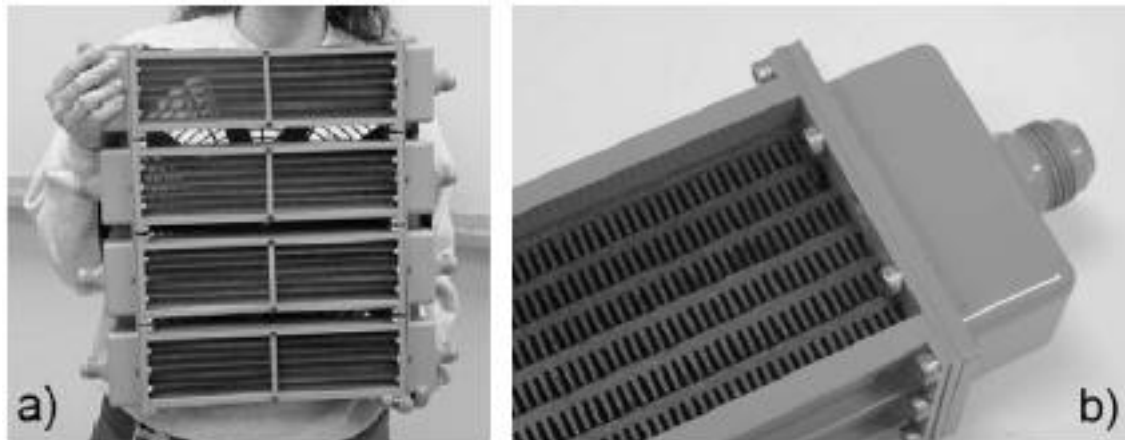
través de la espuma cerámica, el calor puede ser eliminado muy rápidamente. La mezcla turbulenta generada por la estructura interconectada de la espuma cerámica de celda abierta rompe continuamente la capa límite del fluido, por lo que se tiene una mejor transferencia de calor además de una baja caída de presión del fluido de refrigeración.



*Figura II - 20: a) Sección transversal de un intercambiador de calor de tubos de espuma de SiC. b) Disipador de calor, diseño de aleta de espuma de carbono, utilizada para enfriar un chip de computadora. (Scheffer & Colombo, 2005)*

Se han realizado ensayos en el radiador situado en la parte delantera de vehículos pesados, ya que debido a su tamaño crea una significativa cantidad de arrastre, lo que incrementa el consumo de combustible en velocidades de autopista, se ha demostrado que mediante aletas de una espuma de grafito, la misma carga térmica puede disiparse en una superficie menor [Figura II-21](#), sin embargo la caída de presión a través del prototipo de radiador fue mayor. Actualmente se realizan trabajos para disminuir el la caída de presión ya que un radiador más pequeño y ligero permitiría un mejor diseño de la cabina lo que mejoraría la aerodinámica, capacidad de carga y eficiencia del combustible de los vehículos pesados.

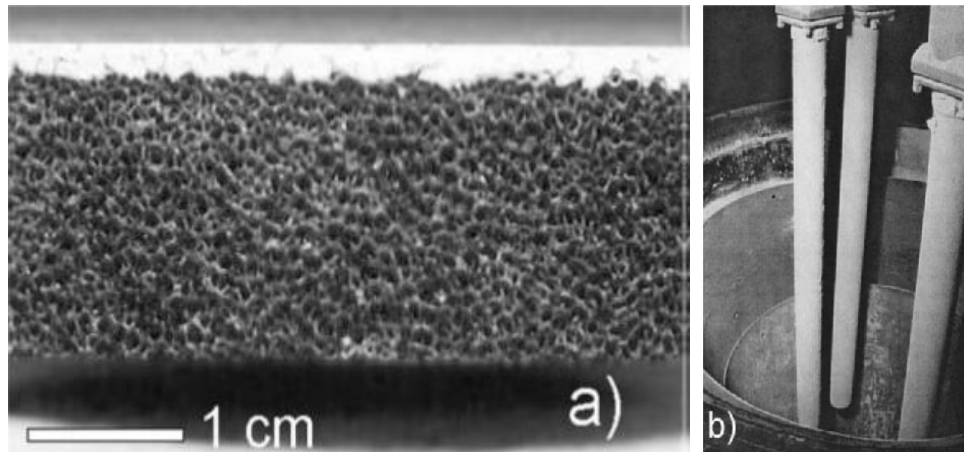




*Figura II - 21: a) Radiador modular de espuma de grafito de alta conductividad térmica. b) detalle del módulo. (Scheffer & Colombo, 2005)*

### II.2.2.7 Filtros dúplex

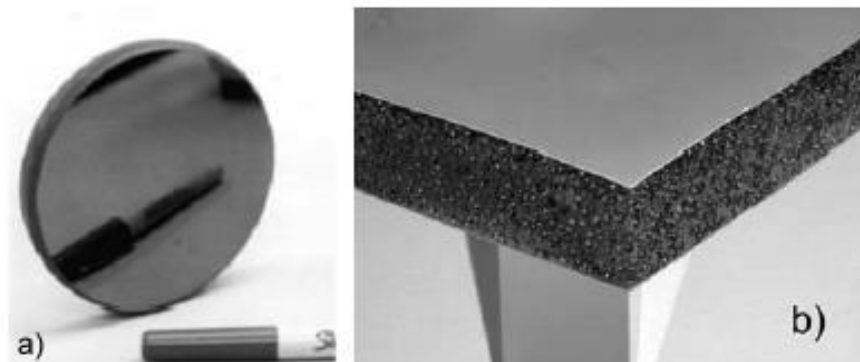
Los filtros dúplex, combinan dos porosidades en un solo filtro, una combinación común es 30/50 o 40/60 ppi pero no existen restricciones particulares. Los filtros de alúmina para fundición de metales desarrollados por Drache Umwelttechnik permiten filtrar una mayor cantidad de partículas que los filtros de espumas cerámicas convencionales, ya que tienen una menor liberación de partículas, especialmente durante filtrados largos, ya que cualquier partícula gruesa liberada en la capa superior son capturados por la capa inferior más fina, además de no requerir una caja de filtrado. Un filtro dúplex para gas construido con una membrana cerámica [Figura II-22](#) de filtración submicrométrica porosa acoplada a la superficie de la espuma cerámica de SiC de celda abierta le sirve como filtro grueso, elemento estructural, distribuidor de flujo y mezclador de gas en el proceso. La espuma cerámica también podría ser revestida con un catalizador para que tenga las funciones de convertidor catalítico, esta espuma se ha utilizado en aplicaciones que requieren la combustión de carbón.



*Figura II - 22: a) Sección transversal de un filtro duplex de gas caliente (espuma SiC recubiertas con una membrana cerámica). b) Filtros duplex-gas caliente (1 m de longitud, con base en espuma de SiC), cubiertas con partículas capturadas, utilizados en pruebas a temperatura y presión elevadas. (Scheffer & Colombo, 2005)*

### II.2.2.8 Estructuras de bajo peso

Se han fabricado estructuras ligeras “Paneles sándwich” con núcleos de espuma cerámica, en las que la espuma actúa como un elemento estructural y medio poroso, para aplicaciones en las que el bajo peso y la rigidez son cruciales. Se ha desarrollado un escudo de paneles de sándwich reforzado con fibras de SiC e infiltración química de vapor de SiC, en el núcleo de espuma para su aplicación en sistemas de protección térmica. Un ejemplo es un espejo óptico con aplicaciones espaciales [Figura II-23](#) la espuma de celda abierta sirve como una plataforma rígida ligera para la hoja del espejo.



*Figura II - 23: a) espejo con núcleo de espuma cerámica. b) Estructura de Panel de Sándwich de cerámica. (Scheffer & Colombo, 2005)*

## II.3 Generalidades de lodos

La potabilización de agua es la ejecución de una serie de operaciones unitarias y procesos encaminados a producir agua que no contenga contaminantes perjudiciales a la salud humana. Las aguas superficiales, fuente de agua para los sistemas de potabilización, son por lo general, más turbias que las aguas subterráneas y contienen un mayor número de sólidos suspendidos y bacterias. Para las aguas de tipo superficial es necesario aplicar [coagulantes](#) y [floculantes](#) que remuevan los contaminantes en suspensión, generando como resultado lodos. Al acumularse éstos y no darles una disposición final adecuada, contribuyen de manera importante a la contaminación de la atmósfera, del agua y del suelo, afectando los ecosistemas del área donde se depositen. En México, la definición de estos residuos, se inscribe en el marco normativo establecido en la ([NOM-004-SEMARNAT-2002, 2003](#)), relativa a lodos y biosólidos, especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes y disposición final

La mayor parte de las impurezas contenidas en el agua al tratarse se eliminan formando lodo, las características de este lodo dependen del origen de las aguas tratadas, ya sean de plantas potabilizadoras, plantas de tratamiento de aguas residuales, del mantenimiento urbano o municipal de alcantarillado; el aprovechamiento o disposición final de estos materiales después de su estabilización es crucial, para evitar la contaminación del lugar en donde son depositados, los mantos acuíferos cercanos y la población.

### II.3.1 Definición.

La norma ([NOM-004-SEMARNAT-2002, 2003](#)) define al lodo como: “un conjunto de sólidos con un contenido variable de humedad, proveniente del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, que no han sido sometidos a un proceso de estabilización”.

### II.3.2 Generación de lodos

Los procesos de coagulación-floculación-sedimentación o Tratamiento primario avanzado (TPA) para la potabilización de aguas superficiales generan un volumen significativo de residuos denominados lodos. El volumen o cantidad de lodos generados dependerá del tipo de coagulante empleado y las características del

agua cruda y a la calidad del agua a tratar. A continuación se darán algunos valores de generación de lodos. En Australia en el año 2006 se generaron 6000 Ton de lodos en base seca. De acuerdo a (Husillos Rodriguez, 2010) se estima que en Estados Unidos y en Europa se generan 7 y 10 millones de toneladas de lodos por año, respectivamente. En Taiwan se generan  $73 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/año de lodos (Chiang et al, 2009).

En lo que respecta a México, hasta el año 2011 la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) reportó la existencia de aproximadamente 699 plantas potabilizadoras. Todas ellas tratan alrededor de 135.13 m<sup>3</sup>/s de agua. De las plantas instaladas, 199 utilizan el TPA con una capacidad instalada de 92.4317 m<sup>3</sup>/s (Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación, 2010). Si bien en México no se tienen datos de generación de lodos, se puede estimar que la cantidad de lodos generados es significativa si se considera esta última cifra.

Dentro de las plantas potabilizadoras más grandes instaladas en México se encuentra la planta potabilizadora “Los Berros” (PPLB), ubicada en el municipio de Villa Victoria, Estado de México. Tiene una capacidad instalada para potabilizar 24 m<sup>3</sup>/s de agua tratándose en promedio alrededor de 15 m<sup>3</sup>/s de agua. Esto corresponde al 16.28% del total de la capacidad instalada que utiliza TPA en su tren de tratamiento. De acuerdo al estudio realizado por (Espejel, 2007), se estima que en la PPLB se genera una cantidad de lodos de 12 599.26 Ton/año para la época de estiaje y de 14 451.087 Ton/año para la época de lluvias. Esta es una gran preocupación para el personal de operación de la planta debido a que el almacenamiento de estos lodos necesita grandes extensiones de terreno dentro de la planta y de mayor personal para su manejo (Ramirez Zamora et al, 2008)

### II.3.3 Características fisicoquímicas de los lodos de plantas potabilizadoras

Debido a las características de estos residuos, que se componen principalmente por hidróxidos de Aluminio precipitados, silicatos y materia orgánica, se ha evaluado su uso en diversas aplicaciones industriales. Una disposición inadecuada de los lodos sin tratamiento origina la contaminación de fuentes de aguas naturales superficiales o subterráneas, así como de suelos ya que puede hacer la tierra estéril otorgándole una apariencia erosionada cuando se abandona o agota el lugar (Sandoval, 1998). Por otro lado, la alta cantidad de lodos generados y almacenados se puede ver como una oportunidad para aprovecharlos como materia prima de diferentes productos o procesos.

### II.3.4 Aplicación de lodos en la elaboración de materiales cerámicos

La elaboración de materiales cerámicos celulares utilizando residuos requiere de un agente espumante (Hasheminia et al, 2012) y de un proceso de [sinterización](#). Se han empleado residuos de pizarra (Leg Cambroner et al, 2005) leucóxeno concentrado (LC) (V.A. Kuzurman et al, 2008), cenizas de carbón de una central térmica y vidrio (J. Bossert et al, 2004), polvo de vidrio y [dióxido](#) (Hasheminia et al, 2012); mezclas de Silicio-Carbón (Carbón proveniente de cenizas de incineradores, de fondo y de la industria metalúrgica) y Carburo de Silicio (J.P. Wu et al, 2006); vidrio de residuos mineros de la extracción de feldespato, cal de los sistemas de reducción de gases de la industria del vidrio (E. Bernardo., 2007); mezcla de goethita procedente de la producción de zinc metálico, residuos ornamentales y residuos de vidrio (M. Pelino et al, 1997); mezclas de vidrio procedente de tubos catódicos y carburo de silicio (H.W. Guo et al, 2010); sedimentos de embalse y carbonato de sodio (Yi-Chong Liao, 2012).

Una de las principales características de los cerámicos celulares es su alta porosidad la cual es responsable de su baja densidad aparente. La variación del tamaño de partícula, la adición de materiales convencionales y residuos combustibles, así como la temperatura determinan la porosidad del material. Dentro de los residuos orgánicos utilizados para ese fin se encuentran los siguientes: aserrín, lodos, carbón, y coque. Entre los materiales inorgánicos utilizados están: perlita, diatomitas, calcita, piedra pómez, y vermiculita (Demir, 2007). Por otra parte, dentro de los residuos inorgánicos, se han utilizado los plásticos.

De manera muy clara se puede clasificar a los materiales cerámicos comunes (ladrillos, materiales de cocina, adornos, pisos, entre otros) de los cerámicos avanzados (aislantes eléctricos y térmicos, superconductores, refractarios, medios filtrantes). De igual forma se puede separar a los lodos generados en un proceso de tratamiento de aguas superficiales de aquellos provenientes de aguas residuales. La característica en común es la cantidad significativa generada que aumenta año con año.

Se realizó la valorización de lodos provenientes de una planta de tratamiento de aguas residuales para elaborar un material [vitrocerámico](#) (M. Garcia-Valles et al, 2011). El resultado fue un material sólido amorfo estable, que incorporó en la matriz vítrea componentes peligrosos para la salud.

Se considera que la valoración de este tipo de residuos para elaborar ladrillos constituye una buena opción para la remediación del ambiente. Aunque se han hecho esfuerzos para optimizar el proceso de elaboración de ladrillos con estos

residuos, la cantidad de lodo incorporado en la mezcla residuo:arcilla, no ha superado el 40% (Espejel, 2007). El análisis de los resultados obtenidos en este primer estudio indicaba que existe aún la capacidad de incrementar la cantidad de residuo, conservando o mejorando la calidad del producto obtenido. Esta hipótesis obtenida por inferencia estadística todavía requiere de una verificación experimental. En este estudio se determinó que la resistencia a la compresión de los ladrillos elaborados con una mezcla lodo/arcilla, de 20 y 40% de lodo, fue de 14.4 y 133.08 Mpa, respectivamente. Estos valores fueron casi cinco veces superiores al valor de resistencia a la compresión de un ladrillo convencional. Otra ventaja que presentaron estos materiales fue su baja densidad, la cual fue hasta un 70% menor respecto a un ladrillo convencional.

En el estudio de (Ramirez Zamora et al, 2008) se utilizaron los lodos generados en plantas potabilizadoras para producir productos cerámicos. Esta opción de valorización de lodos se basa en la presencia de aluminosilicatos en estos residuos. En ese estudio se mostró que los contaminantes tóxicos que pudieran estar presentes en esos residuos, como metales pesados, pueden quedar encapsulados en la matriz vítrea. De esta forma, se considera que la opción de utilizar esos residuos para elaborar cerámicos celulares no representa un riesgo a la salud y al ambiente. A bajas temperaturas, el proceso generó un ladrillo convencional, con una calidad ligeramente inferior a los productos comercialmente disponibles en el mercado. A temperaturas elevadas, la composición específica de la mezcla lodo:arcilla dio lugar a una reacción tipo peritética, en la cual los componentes (aluminatos, silicatos) reaccionaron para formar minerales de alta temperatura, liberando en el proceso un gas volátil, probablemente H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>. Las reacciones específicas todavía no se han determinado a detalle y requieren tanto del estudio del diagrama de fases de los óxidos correspondientes como de experimentos de optimización. Lo anterior debe corroborar la información termodinámica disponible para efectuar un análisis preciso de la evolución térmica de mezclas de minerales complejos, como es el caso. Típicamente, en una mezcla de tres óxidos puros, la temperatura de la reacción entre cuatro fases es una constante (a una presión dada). Sin embargo, las impurezas de los productos generan un estado de equilibrio más complejo, por lo que la temperatura de la reacción espumante dependerá de la relación lodo-arcilla en cada experimento. En cada caso, el producto obtenido se puede considerar como un sólido celular, en el cual la mayor fracción volumétrica es ocupada por una fase gaseosa, separada por una estructura ligera de paredes cerámicas. Por lo tanto, se distingue de las cerámicas para construcción existentes por una mayor porosidad total, una despreciable porosidad efectiva y una mayor relación resistencia-densidad. Como tal, se relaciona más con materiales celulares



como la madera, el hueso esponjoso, las [espumas elastoméricas](#) y espumas metálicas (Peng, 2000; Gibson y Ashby, 1999).

A las temperaturas que permiten la formación de la espuma cerámica, la fracción de la fase líquida en el material fue alta, lo que, junto con la liberación del gas volátil, dio origen a una pérdida de la geometría del ladrillo preformado. Esto se consideró, en primer instante, como una falla del proceso. En el actual proyecto, se pretende utilizar el mismo fenómeno a favor. Al llevar a cabo la reacción dentro de preformas cerradas, el cambio geométrico por la formación de la espuma se verá limitado por el contenedor, mientras que la presión interna por la reacción causará la formación de un cascarón más denso en la circunferencia del producto. Esta técnica para producir estructuras “sandwich” se ha optimizado en un alto grado para espumas metálicas y se ve reflejado también en materiales biológicos compuestos como la madera y el hueso (Evans, 1998; Gibson, 1997).

Si bien en el estudio previo (Espejel, 2007) se consideró que un alto contenido lodo/arcilla daba lugar a una pérdida excesiva de la geometría del producto, en el actual proceso se aumentará la cantidad de lodo para optimizar la relación entre fase sólida y gaseosa, con la adicional ventaja de maximizar la cantidad de residuo incorporado en el producto comercial. Para lo anterior, se debe determinar el mecanismo involucrado y las condiciones a las cuales los ladrillos obtenidos puedan tener una baja densidad ( $< 1.0 \text{ g/cm}^3$ ), un bajo porcentaje de absorción de agua (menor al 15%) y conservar una alta resistencia mecánica. Las relaciones entre peso específico y resistencia se han determinado desde hace cuatro décadas para materiales reticulares clásicos y las relaciones matemáticas que explican esta relación se conocen bien (Evans, 1998; Gibson, 1997).

En el trabajo de (Pacheco Flores, 2012) se realizó la formación de un material poroso a partir de mezclas de arcilla y lodo generado en una planta potabilizadora. La idea surge del trabajo de (Espejel, 2007) en el cual se evidenció la formación de un material esponjoso en el interior de los materiales cerámicos. En el trabajo de Espejel *et al.*, (2013) se plantean los posibles mecanismos de formación de esta espuma cerámica. Se lleva a cabo una generación de gases mediante la descomposición de FeOOH u FeOH (*reacción II-1*)



También se plantea la hipótesis de que la formación del “corazón negro” es el responsable de la también generación de gases (*reacción II-2*):



La anterior reacción se lleva a cabo principalmente mediante la presencia de óxidos de Fe y la descomposición, en carencia de oxígeno y a bajas temperaturas de materia orgánica. Por arriba de los 1000°C, el residuo de carbono generado tiende a generar CO<sub>2</sub> mediante la reducción química de óxidos de hierro (*reacción II-2*). De acuerdo a la ley de los gases ideales y a las medidas de las probetas elaboradas en el trabajo de [Espejel et al., \(2013\)](#), tan solo 75 μMol de gas se necesitan para producir una porosidad del 50% a 1200°C. Lo interesante de este trabajo es que no se adiciona algún aditivo para realizar la generación de los gases formadores de la espuma cerámica.

Otro material de composición similar al lodo generado en una planta potabilizadora son los sedimentos. ([Liao et al, 2012](#)), elaboraron un material cerámico celular a partir de la incorporación de CaCO<sub>3</sub> al sedimento formado en una presa en Taiwán.

De acuerdo a la revisión realizada por ([Babatunde y Zhao, 2007](#)), se consideran diez las opciones de uso de los lodos de mayor importancia de acuerdo a sus características fisicoquímicas, que se muestran en el [Anexo A](#).

En el [Anexo A](#) En la [Tabla A-1](#) a [A-4](#) se detallan las investigaciones realizadas sobre la utilización de este tipo de residuos.

Como se puede observar en la [Figura II-24](#), la mayoría de las aplicaciones se relaciona con la elaboración de cementos y morteros. Sin embargo, para llevar a cabo esto, es necesario eliminar la mayoría de la materia orgánica mediante calcinación. De hecho, la elaboración de materiales cerámicos y ladrillos implican también una etapa de tratamiento térmico en el cual la materia orgánica es eliminada. Esto podría ser aprovechado para elaborar un material cerámico ligero debido a la porosidad creada por la calcinación de la materia orgánica. Por otro lado, como lo plantean algunos trabajos ([Xu et al, 2010](#)), la elaboración de materiales cerámicos y ladrillos pueden retener compuestos tóxicos que pudieran estar contenidos en los lodos. Se considera también que el uso de los lodos en suelos representa una opción que puede retener el aluminio presente en los lodos mismo que puede ocasionar problemas a la salud ([Campdelacreu, 2012](#)).





Figura II - 24: Estudios de uso de lodos generados en plantas potabilizadoras. (Espejel, 2007)

De todos los estudios sobre el aprovechamiento del lodo generado en plantas potabilizadoras, en ninguno se ha planteado la elaboración de cerámicos celulares o cerámicos de alta porosidad. Otros estudios se han enfocado a la elaboración de materiales cerámicos empleando residuos y se muestran en la [Tabla II-4](#).

Tabla II- 4: Uso de lodos generados en plantas potabilizadoras en la elaboración de materiales cerámicos. (Espejel, 2007) (Espejel Ayala, 2013)

País	Descripción	Referencia
<b>Brasil</b>	Incorporación de hasta 20% de lodo en la mezcla con arcilla para elaborar materiales cerámicos.	(Teixeira, 2011)
<b>China</b>	Elaboración de baldosas con lodo, caolín, feldespato y arena.	(Xie, 2012)
<b>China</b>	Estabilización de metales pesados presentes en el lodo mediante la utilización de estos últimos para elaborar materiales cerámicos.	(Xu et al, 2010)
<b>China</b>	Material cerámico mezclando lodos fisicoquímicos (planta potabilizadora) y biológicos (planta de tratamiento de aguas residuales).	(Zou, 2009)
<b>Japón</b>	Preparación de cerámico vidriado con mezclas de lodo, residuos de vidrio y carbonato de calcio.	(Toya, 2007)
<b>Portugal</b>	Se recuperaron los lodos ricos en aluminio (24% de Al) mediante calcinación y lavado de las sales solubles, seguido de la remoción de sulfatos por precipitación como BaSO <sub>4</sub> .	(Ferreira & Olhero, 2002)
<b>España</b>	Atomización de los lodos. El producto es un polvo cerámico con un 13% de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> que puede ser comercializado para la elaboración de cerámica de calidad.	(Armenter Ferrando et al., 2002)



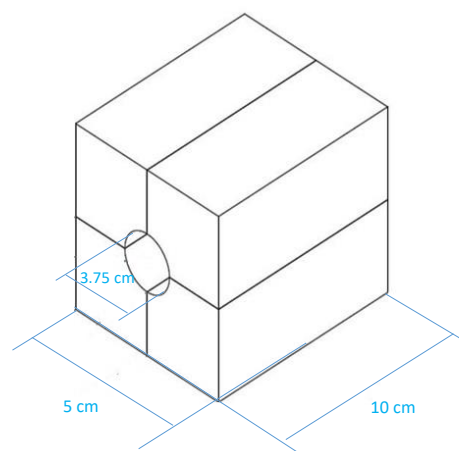
# **CAPÍTULO III. DESARROLLO EXPERIMENTAL**



### III.1 Materiales y reactivos

#### III.1.1 Lodos y moldes de los cerámicos celulares

La muestra de lodo fue colectada en las estructuras de almacenamiento de una planta potabilizadora. De acuerdo al estudio de [Ramírez et al., \(2005\)](#), la variabilidad de las características del lodo en la época de estiaje y de lluvias, no es significativa. De esta manera, la variabilidad de las características de los materiales cerámicos que se pueden elaborar con los lodos tampoco será significativa. Con base en ese resultado, únicamente se tomó una muestra por triplicado en la época de estiaje, directamente en los dos espesadores y en la estructura de almacenamiento de los lodos, ubicada en la planta potabilizadora. Las coordenadas del punto de muestreo son las siguientes: 19° 22' 39.72" N y 100° 04' 38.70" O. Por cuestiones de seguridad, las muestras de lodo se colectaron en la orilla de la estructura de almacenamiento debido a que ésta se encuentra completamente llena de lodos. Se diseñó un molde de acero inoxidable en el cual fueron cocidas las probetas elaboradas con arcilla y lodo. Este molde debía tener la suficiente estabilidad para que las piezas que lo conformaran no volcaran durante la colocación del sistema dentro del horno y durante el proceso de cocción. Para esto se utilizó un perfil de acero cuadrado. Las dimensiones de la barra se seleccionaron de acuerdo con su disponibilidad en el mercado y en el cumplimiento de las características requeridas para la elaboración de los especímenes. Las dimensiones del molde fueron de 10 cm de largo y 5 cm de ancho. Para esto se consideró utilizar perfil de acero cuadrado de una pulgada de ancho. Cuatro perfiles se soldaron y fueron cortados en tamaños de 10 cm. Posteriormente cada segmento fue barrenado hasta obtener una circunferencia de 3.75 cm de diámetro. En la [Figura III-1](#) se muestra la estructura del molde.



*Figura III - 1: Dimensiones del Molde de acero inoxidable utilizado.*

### III.1.2 Reactivos

Para la elaboración de los materiales cerámicos celulares se utilizó arcilla roja extraída de los campos de cultivo del municipio de San Andrés Chiautla, zona oriente del Estado de México, (19° 34' 21.12" latitud Norte y 98° 53' 34.85" longitud Este). Esta arcilla, denominada por los campesinos de la región como "Tierras de barro", es de origen aluvial con aluviones activos intermitentes y estables (Segura et al, 2000), con arcillas esmectíticas que se orientan aleatoriamente.

### III.2 Diseño experimental 3<sup>k</sup>

Se planteó realizar la experimentación siguiendo un diseño experimental factorial con lo cual se pueden evaluar diversos factores experimentales al mismo tiempo. Para este caso, los factores experimentales fueron los mostrados en la [Tabla III-1](#).

*Tabla III - 1: Valores centrales y externos en el diseño experimental propuesto para las pruebas de producción de cerámico celular.*

Factores	Niveles		
	-1	0	1
X <sub>1</sub> , porcentaje de lodo en la mezcla (lodo:arcilla), % p/p	30	45	60
X <sub>2</sub> , Tamaño de partícula lodo y arcilla (µm / N° de Malla)	500 / 35	410 / 40	355 / 50
X <sub>3</sub> , Temperatura de cocción °C	1150	1200	1250

Los valores extremos de estos factores experimentales se eligieron con base en una revisión de los resultados obtenidos por (Espejel Ayala, 2013) y (Pacheco Flores, 2012). El número de experimentos se determinó empleando la siguiente ecuación (Biles y Swain, 1980):

$$N = 3^k \quad \text{ecuación III - 1}$$

Dónde:

**N** = número de experimentos a realizar.

**K** = número de factores.

Para tres factores se tiene.

$$N = 3^3 = 27 \text{ experimentos}$$

De acuerdo con lo anterior, se prepararon 54 probetas (27 para cocer sin molde y 27 para cocer con molde, con un diámetro 3.75 cm, altura 10 cm). Cada combinación se realizó por duplicado, por lo tanto, se elaborarán 108 probetas.

### III.3 Descripción de la elaboración del material cerámico celular utilizando lodo y arcilla

La elaboración de las probetas puede dividirse en dos grandes etapas, la primera el acondicionamiento de las materias primas y la segunda la elaboración de la probeta. En la [Figura III-2](#) se muestran estas dos grandes etapas. Posteriormente se describirá en que consiste cada etapa.

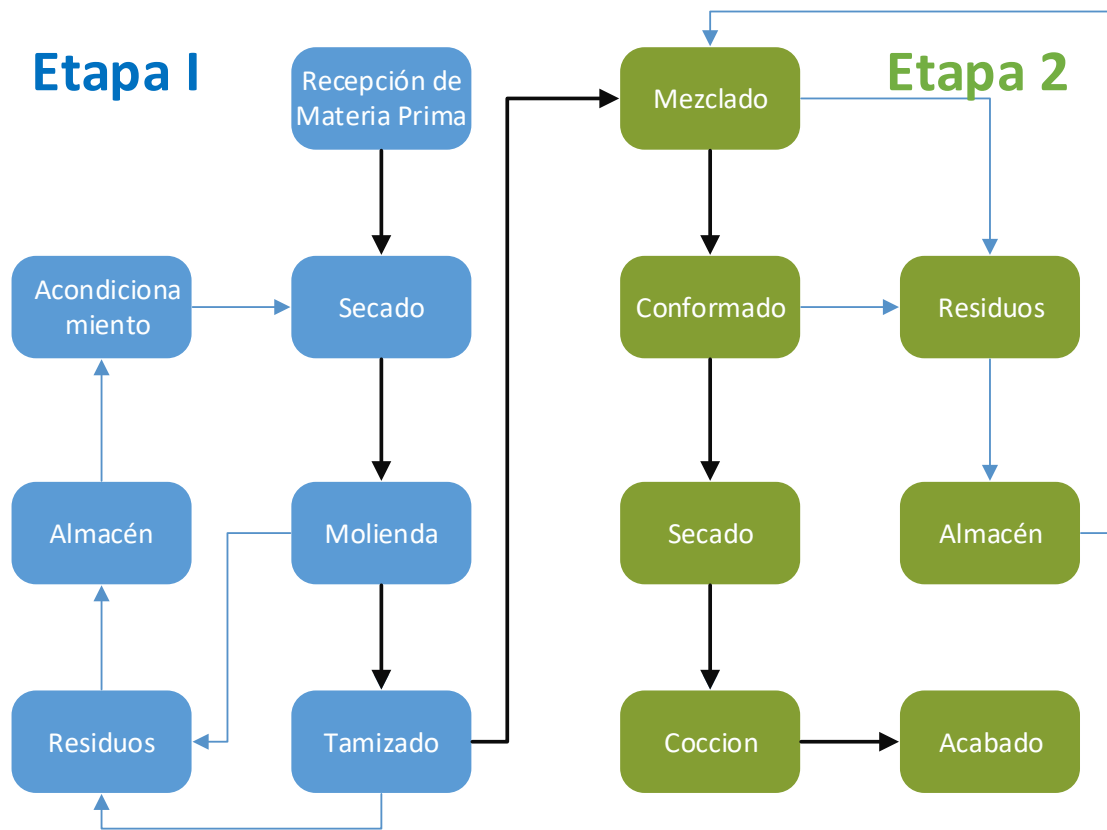


Figura III - 2: Descripción de las etapas del proceso de elaboración de la probeta.



### III.3.1 Secado de la arcilla roja y del lodo

El secado del lodo, con una humedad inicial de 96.5%, se realizó colocándolo en una capa de cinco a siete centímetros de espesor sobre un área de aproximadamente 15 m<sup>2</sup>. La arcilla roja, con una humedad de 4.95% aproximadamente, se colocó también en una capa de cinco a siete centímetros sobre un área de 6 m<sup>2</sup>. Ambos materiales se colocaron bajo los rayos del sol y cuando fue necesario el secado se hizo en un área cubierta para protegerlos de la lluvia. Se consideró seco el material cuando este no rebasó el 2% de humedad, tanto para el lodo como la arcilla. El material debe almacenarse en un lugar seco que no rebase el 40 % de humedad presente en el aire. El secado también puede realizarse en una estufa cuando las condiciones atmosféricas no permitan hacerlo a la intemperie, para lo cual se recomienda colocarlo en charolas de aluminio, (las dimensiones de la charola, dependerán del tamaño de la estufa que se utilizará) realizar una capa de material sobre la charola no mayor a 2.5 cm, de un espesor uniforme, el material a secar deberá estar en la estufa 24 a 48 hrs (el tiempo de secado dependerá de la variación que se presente en el peso constante, ya que se considera constante cuando no exista una diferencia mayor al 0.01% entre dos pesadas consecutivas) a 105 - 110°C. El porcentaje de humedad puede determinarse como:

$$w = \left( \frac{M_{sh}}{M_{ss}} - 1 \right) 100 \quad \text{Ecuación III-2}$$

Donde:

**w** = contenido de humedad gravimétrica.

**M<sub>sh</sub>** = masa del suelo húmedo.

**M<sub>ss</sub>** = masa del suelo seco.

### III.3.2 Molienda y Tamizado de la arcilla roja y del lodo

La molienda del lodo y de la arcilla roja se realizó en las instalaciones de los laboratorios de la carrera de Ingeniería Química Metalúrgica, ubicados en el Edificio D de la Facultad de Química de la UNAM. Se utilizó, una trituradora de mandíbulas, un pulverizador y un molino de bolas. Este último se empleó para obtener los tamaños de partícula deseados, ya que el tiempo de molido, carga y descarga del mismo fue el más rápido. El molino consiste en un tambor de acero de 20 cm de diámetro, en cada carga de molino se utilizaron dos kilos de bolas de acero de 1

pulgada, y 500g del material a moler, se hicieron diferentes valoraciones del molido y tiempo de tamizado. En la [Tabla III-2](#) se muestra un comparativo de los tiempos de molienda, estos tiempos son sólo útiles para el molino de bolas utilizado, de llegarse a emplear otro tipo de sistema de reducción de tamaño se tendrá que determinar el mejor tiempo y carga a emplear. El tamizado se llevó a cabo utilizando una serie de tamices con tamaños de apertura de acuerdo a la ASTM para llegar a la granulometría requerida en el diseño experimental. La agitación de los tamices se hizo en un equipo ROTAP Modelo: RX-29; colocando no más de cien gramos por tamiz por un tiempo de 10 minutos de agitación. Los tamices utilizados fueron los necesarios para obtener los tamaños de partícula señalados en la [Tabla III-1](#) (malla 35, 40 y 50).

*Tabla III - 2: Comparativos de tiempos de molienda empleados en un molino de bolas.*

Carga del Molino 500 g y 3 minutos de molienda		Carga del Molino 500 g y 2 minutos de molienda		Carga del Molino 500 g y 1 minutos de molienda	
Tamiz N° Malla Tyler	Cantidad Retenida (g)	Tamiz N° Malla Tyler	Cantidad Retenida (g)	Tamiz N° Malla Tyler	Cantidad Retenida (g)
14-30	175	14-30	210	<b>14-30</b>	<b>340</b>
35	35	35	40	<b>35</b>	<b>25</b>
40	50	40	50	<b>40</b>	<b>35</b>
50	50	50	50	<b>50</b>	<b>25</b>
PAN	190	PAN	150	<b>PAN</b>	<b>75</b>

### III.3. 3 Elaboración de probetas

El volumen de cada probeta es de 110.5 cm<sup>3</sup>, y para elaborar cada una de las probetas se requiere de aproximadamente 100g de mezcla seca (lodo-arcilla) de material esto debido a que dependiendo de la granulometría y los porcentajes de lodo y arcilla el material seco a utilizar puede variar. En la [Tabla III-3](#) se muestran las cantidades utilizadas para la preparación de una probeta con diferente granulometría pero el mismo porcentaje de lodo.

*Tabla III - 3: Cantidad de Mezcla seca utilizada para preparar una probeta.*

Tamiz N° Malla Tyler	% lodo	Lodo Usado (g)	Acilla Utilizada (g)
<b>35</b>	30	22.5	78.4
<b>40</b>	30	23.2	80.5
<b>50</b>	30	24.6	85.4

Las probetas se elaboraron utilizando moldes de acero inoxidable. La pasta se preparó en unos recipientes de plástico utilizando la cantidad de lodo y arcilla roja en cantidades señaladas en el diseño experimental y una cantidad de agua que correspondió entre 75 a 100 ml por probeta a elaborar, este valor al igual que el de la mezcla seca tiende a variar debido a la granulometría de la mezcla. El mezclado de la pasta se hizo con una espátula de metal hasta obtener una consistencia homogénea. Los moldes fueron llenados con la pasta y posteriormente se realizó una presión mecánica. La presión mecánica no fue cuantificada, esta fue lo suficiente para compactar la probeta dentro del molde, sin abrir el molde que contiene la pasta cerámica. En el [Anexo C Figura C-1](#) se muestra el prototipo de una maquina con la cual podría medirse la presión mecánica.

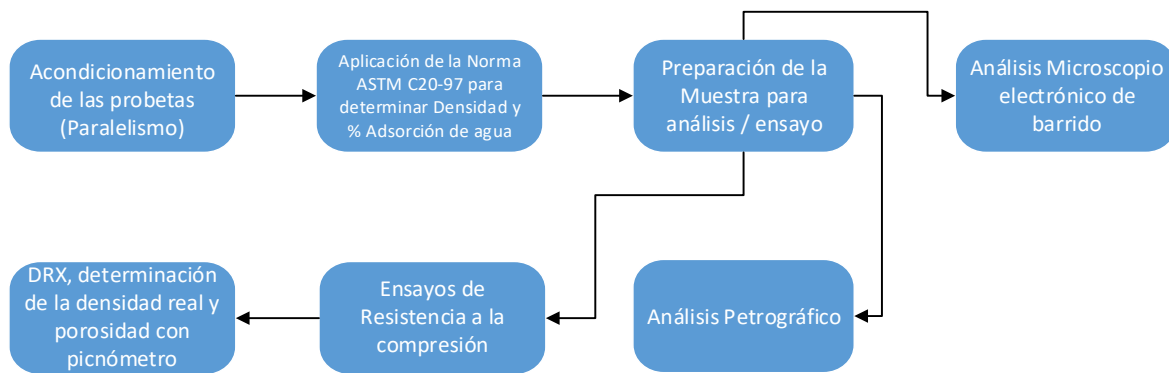
### III.3.4 Secado y cocción de las probetas

Las probetas elaboradas y que serían cocidas sin molde, se colocaron a la intemperie aproximadamente durante cinco días para su secado, mientras que las probetas que se cocerían con molde, se colocaron en la estufa a 110 °C durante 48 horas. Con esto se logró una evaporación lenta del agua en las piezas a fin de que, en la cocción, no existiera un desprendimiento brusco de ésta que pudiera fracturar las piezas. La cocción de las probetas se realizó en un horno eléctrico con perfil de temperatura programable (Marca Nabertherm, Modelo Program Controller SB) que operó a una velocidad de calentamiento de 3.5°C/min.

En el [Anexo C](#) se muestra la secuencia fotográfica del proceso de elaboración de las probetas cerámicas.

### III.4 Caracterización del material cerámico celular

Las probetas se caracterizaron empleando diferentes técnicas analíticas las cuales se muestran en la [Figura III-3](#)



*Figura III - 3: Metodología seguida para la caracterización de las probetas elaboradas con mezcla de lodo-arcilla siguiendo el diseño experimental 3<sup>k</sup>.*

### III.4.1 Densidad

#### Densidad real y aparente

La determinación de la densidad se llevó a cabo con base en la norma (ASTM C20-97.). La probeta fue sumergida totalmente en agua durante 2 horas. El peso saturado es aquel que se determina con la probeta totalmente húmeda y sin que el agua salga del material. Una vez determinado el peso saturado, se llevó a cabo la determinación del peso suspendido. Se colocó un vaso de precipitados con agua sobre una balanza granataria y se pesó. En el vaso con agua se sumergió el espécimen atado con un hilo teniendo el cuidado de que no tocara ni el fondo ni las paredes del vaso. Se registró el peso. El peso del recipiente con el espécimen suspendido menos el peso del recipiente con agua da el peso suspendido del espécimen (Pb).

La densidad real se calculó utilizando el método del picnómetro con el polvo residual del ensayo de resistencia a la compresión. Inicialmente se colocó a peso constante el picnómetro. En este caso se realizaron ensayos usando un picnómetro y matraces volumétricos no encontrando diferencias significativas por lo que posteriormente las determinaciones fueron realizadas utilizando matraces volumétricos de 50 ml.

Sin tarar el matraz se pesó aproximadamente 5 g de la muestra a determinar con al menos una precisión de 0.01g y se registró el peso exacto medido (P2). Se agregó agua destilada hasta 1/3 ó 1/2 de la capacidad total del picnómetro. Se colocó en calentamiento el picnómetro hasta ebullición al menos 2 horas evitando la sequedad

total. Esto permitió que el líquido llenara por completo el sólido y la eliminación de las burbujas de aire. Pasado este tiempo se dejó enfriar a temperatura ambiente. El matraz volumétrico fue llenado con agua hasta su marca de aforo y se pesó (P3). Se repitió el proceso por triplicado. Se decantó el sólido del matraz y se retiró para su disposición posterior.

La densidad aparente,  $\rho_a$ , se refiere a la relación entre la masa y un volumen dado. Para el caso de materiales cerámicos, se refiere al peso que presenta el volumen completo que ocupa el material, incluyendo los poros.

### III.4.2 Porcentaje de absorción de agua

Para fines de obtener la caracterización completa de materiales de construcción, de la cual el cerámico celular puede emplearse, se determinó el porcentaje de absorción de agua de estos materiales. A continuación se describe el procedimiento empleado. Para la determinación del porcentaje de absorción de agua, se siguió la metodología descrita en la norma (ASTM C20-97.) (*Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water*).

Los especímenes no deben tener partículas adheridas en su superficie. En primer lugar, se determina el peso seco. Esto se realiza colocando los especímenes durante 24 horas a una temperatura de 110° C para después pesarlos.

Una vez pesados se sumergen totalmente, en agua hirviendo durante dos horas y después se dejan durante 12 horas en agua. Con esto se conoce el peso de saturación. El porcentaje de absorción de agua se calculó de la siguiente manera:

$$\% \text{ Absorción} = \frac{100 (P_m - P_s)}{P_s} \quad \text{Ecuación III-3}$$

Dónde:

$P_m$  = peso suspendido del espécimen, gramos.

$P_s$  = peso seco del espécimen, gramos.

### III.4.3 Porosidad

La determinación de la porosidad se realizó mediante el cálculo del cociente de la densidad aparente entre la densidad real. (Gibson L.J. Asbby M. , 1999)

#### III.4.4 Resistencia Mecánica

La prueba de resistencia mecánica a la compresión se realizó en una máquina universal Instron con una celda de carga de 5 KN. Las probetas de cerámicos celulares fueron cortadas con un disco de diamante de tal manera que se asegurara el paralelismo de las probetas, siguiendo como guía las normas (NMX-C-083-ONNCCE, 2014), (NMX-C-036-ONNCCE, 2013) y así como, la norma ASTM-C-126-99.

#### III.4.5 Identificación de los minerales formados

La determinación de la composición mineralógica se realizó utilizando un Difractómetro Bruker D8 Advance de geometría Bragg Brentano, configuración  $\theta$ - $\theta$ , radiación Cu K $\alpha$ . La intensidad de difracción está en función del ángulo  $2\theta$ , de 10-70°  $2\theta$ . El límite inferior de detección de la técnica es de 5% en peso para compuestos pesados. La identificación de fases cristalinas se llevó a cabo empleando la base de datos Powder Diffraction File (PDF-2) del International Centre for Diffraction Data (ICDD). La microscopía electrónica de barrido se realizó en un microscopio electrónico de barrido de campo térmico de alta resolución, marca JEOL, modelo JSM-7600F.

Se realizó la determinación de mecanismo de formación de los materiales cerámicos celulares a partir de mezclas arcilla-lodo. Este último generado en una planta potabilizadora. Los resultados permitieron definir que los cerámicos celulares se forman mediante la generación in situ de gases. Estos gases, de acuerdo a la técnica de termogravimetría acoplada con espectrometría de masas, fueron CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y vapor de H<sub>2</sub>O. El primero se forma debido a la formación del “corazón negro”, “black coring” en inglés. Esto se debe a la interacción de átomos de carbono con especies de Fe. Estos últimos químicamente se reducen creando magnetita u otros óxidos que son disueltos en la matriz vítrea conformada principalmente por Si y Al. La determinación de la generación de SO<sub>2</sub> se llevó a cabo debido a la presencia de este elemento cuando se utiliza Sulfato de Aluminio como coagulante para potabilizar el agua en la planta potabilizadora. La generación de vapor de H<sub>2</sub>O a altas temperaturas, mayor a 1000°C se realizó debido a la descomposición de lepidocrocita, un Óxido de Hierro que químicamente contiene moléculas de agua, las cuales son desprendidas a altas temperaturas.





# **CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**



#### IV.1 Resultados de la caracterización de los materiales cerámicos celulares.

Se presentan los resultados obtenidos en la elaboración del material cerámico celular en forma de probetas cilíndricas a partir de mezclas lodo-arcilla siguiendo el diseño experimental  $3^k$ . Los factores experimentales empleados se muestran en la [Tabla IV-1](#)

*Tabla IV - 1: Valores centrales y extérnos en el diseño experimental propuesto para las pruebas de producción de cerámico celular.*

Factores	Niveles		
	-1	0	1
<b>A, Tamaño de partícula de lodo y arcilla, <math>\mu\text{m}</math> (No. Tamiz)</b>	500 (35)	410 (40)	355 (50)
<b>B, porcentaje de lodo en la mezcla, % p/p</b>	30	45	60
<b>C, Temperatura de cocción</b>	1150	1200	1250

Se prepararon 27 probetas (diámetro 3.75 cm, altura 10 cm). Cada combinación se realizó por duplicado por lo tanto se elaboraron 108 probetas.

Para identificar las probetas elaboradas se siguió la siguiente nomenclatura:

Ejemplo: **3530115**

**35**: número de tamiz, tamaño de partícula de 500  $\mu\text{m}$

**30**: porcentaje de lodo en la mezcla, (%)

**115**: temperatura de cocción, 1150° C

Del análisis de varianza (ANOVA) los resultados de densidad aparente se muestran en la [Tabla IV-2](#).

Tabla IV - 2: Características de las probetas elaboradas con arcilla y lodo generado en una planta potabilizadora. %Ab.: % de Absorción de agua; D. Ap.: Densidad aparente; D.R.: Densidad real; D. Rel.: Densidad relativa; Res: resistencia a la compresión.

Probeta	Porosidad	%Ab. agua	Densidad aparente, g/cm <sup>3</sup>	Densidad real, g/cm <sup>3</sup>	Densidad Relativa	Res, MPa	MPa*cm <sup>3</sup> /g
353011	46.82	30.01	1.00	2.48	0.403	0.79	0.79
354511	58.51	39.05	0.83	2.36	0.351	0.98	1.18
356011	59.69	41.40	0.90	2.33	0.387	0.0044	0.00
403011	47.97	29.06	1.03	2.36	0.437	1.19	1.16
404511	59.59	40.25	0.83	2.38	0.348	0.25	0.30
406011	66.66	42.04	0.81	2.32	0.349	3.02	3.73
503011	55.19	33.28	0.94	2.46	0.383	1.69	1.80
504511	51.02	36.07	1.03	2.43	0.424	0.23	0.22
506011	70.62	41.48	0.84	2.35	0.357	0.47	0.56
353012	86.46	40.64	0.74	2.29	0.323	0.42	0.57
354512	63.79	34.46	0.87	2.21	0.393	5.35	6.15
356012	62.37	31.82	0.90	2.26	0.407	5.02	5.58
403012	78.35	66.59	0.49	2.26	0.217	5.39	11.00
404512	70.50	34.23	0.83	2.31	0.360	4.87	5.87
406012	56.72	27.32	0.98	2.37	0.414	2.43	2.48
503012	73.22	64.64	0.50	2.22	0.226	3.89	7.78
504512	78.96	38.92	0.73	2.28	0.320	3.89	5.33
506012	60.69	24.49	0.99	2.13	0.466	6.18	6.24
3530125	73.27	54.20	0.60	2.24	0.267	3.45	5.75
3545125	88.22	75.90	0.40	2.20	0.182	1.00	2.50
3560125	73.29	32.95	0.87	2.32	0.375	0.67	0.77
4030125	81.50	96.39	0.38	2.05	0.185	3.43	9.03
4045125	81.39	78.46	0.41	2.20	0.186	2.46	6.00
4060125	52.96	23.57	0.98	2.09	0.470	0.15	0.15
5030125	71.92	56.15	0.61	2.19	0.279	4.51	7.39
5045125	64.40	38.41	0.84	2.27	0.370	5.34	6.36
5060125	68.52	38.68	0.81	2.18	0.371	6.51	8.04
353011	56.453	25.87	1.09	2.39	0.456	1.10	1.01
354511	59.901	30.22	1.00	2.21	0.452	1.06	1.06
356011	62.017	42.35	0.86	2.30	0.375	0.0048	0.01
403011	56.386	28.77	1.02	2.30	0.444	0.95	0.93
404511	62.103	33.54	0.98	2.38	0.411	0.23	0.23
406011	64.173	40.07	0.86	2.29	0.375	2.55	2.97
503011	71.255	86.28	0.45	2.38	0.189	1.89	4.20

Tabla IV-2 Características de las probetas elaboradas con arcilla y lodo generado en una planta potabilizadora. %Ab.: % de Absorción de agua; D. Ap.: Densidad aparente; D.R.: Densidad real; D. Rel.: Densidad relativa; Res: resistencia a la compresión (continuación).

Probeta	Porosidad	%Ab. agua	Densidad aparente, g/cm <sup>3</sup>	Densidad real, g/cm <sup>3</sup>	Densidad Relativa	Res, MPa	MPa*cm <sup>3</sup> /g
504511	59.162	31.36	0.96	2.36	0.407	0.45	0.47
506011	65.958	44.13	0.77	2.36	0.327	0.23	0.30
353012	73.168	68.00	0.46	2.23	0.207	0.57	1.24
354512	63.783	33.10	0.73	2.21	0.330	4.87	6.67
356012	61.509	30.07	0.88	2.37	0.372	3.63	4.13
403012	78.620	62.20	0.49	2.32	0.211	4.99	10.18
404512	66.667	42.48	0.70	2.30	0.305	5.10	7.29
406012	59.889	28.31	0.90	2.33	0.386	5.59	6.21
503012	71.168	36.25	0.81	2.27	0.357	5.72	7.06
504512	63.734	33.74	0.87	2.26	0.385	4.65	5.34
506012	58.337	39.72	0.81	2.24	0.362	5.33	6.58
3530125	79.929	60.00	0.27	2.16	0.125	2.99	<b>11.07</b>
3545125	74.421	44.05	0.72	2.25	0.320	1.36	1.89
3560125	63.519	33.13	0.79	2.21	0.357	4.52	5.72
4030125	83.209	99.70	0.32	2.10	0.152	1.65	5.16
4045125	79.856	67.63	0.48	2.10	0.228	1.09	2.27
4060125	53.180	24.62	0.96	2.21	0.435	4.35	4.53
5030125	71.818	61.15	0.59	2.18	0.270	0.94	1.59
5045125	60.572	32.36	0.89	2.21	0.403	2.17	2.44
5060125	61.897	38.68	0.86	2.20	0.391	5.50	6.40

En la mayoría de los experimentos, se formó un material cerámico celular con un 50 % de porosidad mínimo. El valor máximo fue de 86 %. Lo anterior junto con los valores de densidad real de aproximadamente 2.2 g/cm<sup>3</sup>, los cuales en combinación con la porosidad obtenida generó valores de densidad relativa de entre 0.27 y 0.41, mismos que corroboran que en la mayoría de los experimentos se formó un material cerámico celular.

El valor promedio del porcentaje de absorción de agua fue de 44.22 % con una desviación estándar de 18.3%. Posiblemente el valor de absorción de agua afecte negativamente en la calidad del material de tal manera que pudiera ser rechazado en la industria de la construcción. Por lo anterior se pudiera sugerir utilizar el material cerámico celular como revestimiento de paredes y plafones y no como material estructural o de carga. Por otra parte, el material cerámico celular puede utilizarse en la elaboración de concreto ligero.

Los resultados obtenidos muestran que en la mayoría de las pruebas o experimentos se produjo un material cerámico de estructura porosa debido a los valores de densidad aparente. Los máximos valores de densidad aparente que se obtuvieron fueron ligeramente superiores a 1.0, mientras que los valores mínimos fueron aproximadamente de 0.3. En el proceso de producción de materiales porosos se lleva a cabo la formación de espacios como resultado de la combustión de materiales orgánicos, principalmente. La idea de utilizar materiales alternativos a los convencionalmente utilizados en la elaboración de materiales cerámicos ha sido estudiada por (K. Koseoglu et al, 2010); (Sutcu & Akkurt, 2009); (Chiang et al, 2009); (Samara M. et al, 2009); Demir, 2007; (Balasubramanian et al, 2006); Demir et al., 2007; (Weng et al, 2003). En estos estudios se planteó utilizar residuos tales como lodos generados en plantas de tratamiento de agua y/o sedimentos, para la elaboración de los ladrillos cerámicos que pudieran clasificarse como materiales porosos.

Sin embargo, el material preparado en este trabajo sale de la clasificación de un material poroso convencional para entrar en la clasificación de material celular dadas las características mencionadas. Debido a esto, las aplicaciones que pueden darse a este material pueden ser como las siguientes: revestimiento de hornos, material aislante térmico y acústico, material corta fuego, entre otros. Por otro lado, también puede ser utilizado en la industria química como un soporte de catalizadores como los empleados en los convertidores catalíticos de los automóviles.

Los compuestos tóxicos que pudieran estar presentes en estos residuos, como metales pesados, pueden quedar encapsulados en la matriz vítrea, de esta forma, se considera que la opción de utilizar los residuos para elaborar el material celular constituye una opción que disminuye los impactos negativos hacia el medio ambiente. Aunque se han hecho esfuerzos para optimizar el proceso de elaboración del material cerámico celular con estos residuos, la cantidad de lodo incorporado en la mezcla lodo-arcilla, no ha superado el 40% debido a que un aumento en la cantidad de lodo o sedimento más allá de este valor, disminuye la resistencia del material. Lo anterior viene a confirmar una parte de la hipótesis planteada la cual considera que una mayor incorporación de lodo en la mezcla afecta negativamente la resistencia del material debido a la creación de huecos, o celdas, que pueden considerarse como defectos estructurales en estos materiales. De hecho, un material celular tendrá una menor resistencia mecánica que un material denso.

El valor máximo promedio de resistencia a la compresión de los materiales elaborados fue del orden de 5.5 MPa, los resultados se compararán con lo establecido en la norma ([NMX-C-441-ONNCCE, 2005](#)). Esta norma establece las características que de un elemento de construcción, de forma prismática rectangular obtenido por el moldeo, secado y cocción de pastas cerámicas, de barro, arcilla o similares, extruidos o comprimidos. Las probetas se pueden clasificar de acuerdo a la norma como ladrillo macizo. El valor mínimo de resistencia a la compresión que deben presentar esta clase de ladrillos es 2.45-2.94 MPa.

Es importante resaltar el hecho de que los máximos valores de resistencia a la compresión se obtuvieron con temperaturas de cocción de 1200 y 1250° C. Esto también confirma parte de la hipótesis planteada ya que se esperaba una mayor resistencia mecánica a mayores temperaturas debido a que una vez que se alcanza la coexistencia de la fase semilíquida con el gas, se crea un material con huecos o celdas con un diámetro inicial. Conforme transcurre el tiempo, el gas se agota por lo que queda una estructura semilíquida estilo “queso gruyer”. A mayores tiempos de cocción las paredes de las celdas se ensanchan y el diámetro de las celdas comienza disminuir por lo que la porosidad también se ve disminuida y se favorece la conformación de un material más denso.

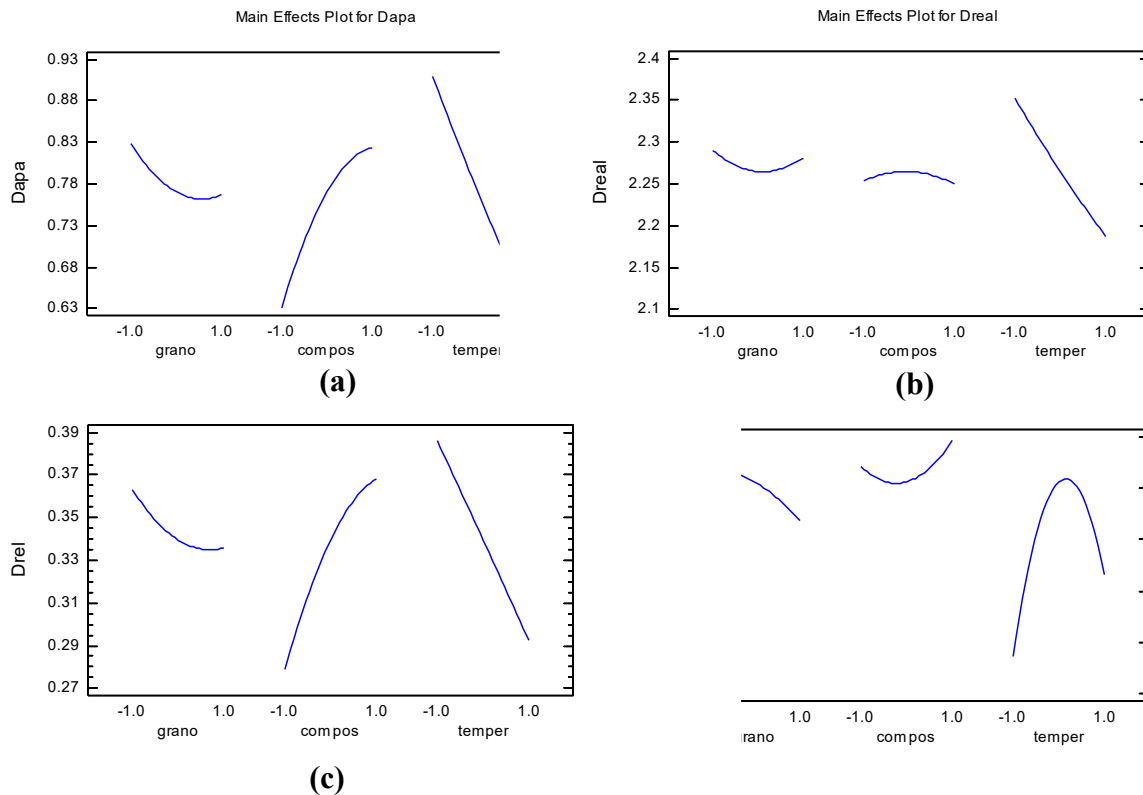
El mecanismo de formación del material cerámico celular con arcilla y lodos es del tipo de proceso de generación *in situ de gases* el cual requiere una adición del agente espumante. En muchos de los casos este agente espumante suele ser un carbonato y el gas responsable de la formación de la espuma cerámica es CO<sub>2</sub>. En este proceso, el desprendimiento del gas se realiza por descomposición de los carbonatos entre 700 y 900° C. en el caso del presente trabajo, la presencia de CO<sub>2</sub> se realiza por la formación del corazón negro y por la descomposición de lepidrocrocita. En la sección IV.4 se explica el mecanismo propuesto corroborado con termo gravimetría acoplada con espectrometría de masas. Con esta técnica se determinaron los gases emitidos en todo el intervalo de temperatura de cocción estudiado.

A continuación se presenta el análisis de los efectos por separado de los factores experimentales sobre las variables de respuesta en el diseño experimental 3<sup>k</sup>.



## IV.2 Análisis estadístico de los resultados experimentales: Determinación de los factores experimentales de influencia significativa

El **Grafico IV-1** muestra los efectos por separado de los factores experimentales



**Grafico IV - 1:** Principales efectos de los factores experimentales: *a)* densidad aparente, *b)* densidad real, *c)* densidad relativa y *d)* resistencia a la compresión.

El tamaño de grano del lodo y la arcilla se puede relacionar con el área disponible para llevar a cabo procesos de sinterización. Además, también relaciona la cantidad de material orgánico disponible y susceptible de ser oxidado (quemado) más rápidamente. Es decir, al reducir el tamaño de grano se puede favorecer el área de contacto entre las partículas aumentando la velocidad de fusión de las partículas con lo cual el grado de porosidad disminuiría. La resistencia a la compresión aumentó para tamaños de partícula menores debido a que existió menor área de contacto entre las partículas con la eventual disminución del grado de sinterización.

Al aumentar el tamaño de grano disminuyen los valores de densidad aparente, real y la densidad relativa. Sin embargo, en lo que respecta a densidad relativa, se aprecia una disminución de esta cuando aumenta el tamaño de grano para después incrementar ligeramente a mayores tamaños de grano. Como se mencionó, lo

anterior puede asociar a un mayor grado de sinterización con lo cual se comienzan a cerrar los poros formados. Otra posible explicación a esto es la formación de fases cristalinas de mayor densidad.

La composición del lodo tiene un efecto de aumentar el valor de densidad aparente. El valor de densidad relativa se ve afectado al aumentar significativamente cuando aumenta también la cantidad de lodo. Esto significa una mayor utilización de este residuo, sin embargo, disminuye significativamente el valor de la resistencia a la compresión. Tomando en cuenta que los materiales serán utilizados en la industria de la construcción, la disminución de la resistencia a la compresión es indeseable por lo que se debe considerar la utilización de cantidades menores de lodo para elaborar los materiales cerámicos celulares.

La incorporación de una mayor cantidad del lodo representa también mayor cantidad de materia orgánica adicionada para la formación del material cerámico celular. Esto afecta en el modo de cómo se lleva a cabo la formación de las nuevas estructuras cristalinas ya que la distancia entre las partículas consideradas para llevar a cabo la sinterización es mayor por lo que posiblemente se necesiten tiempos prolongados para obtener mayor grado de sinterización y mayores valores de resistencia a la compresión. Sin embargo, esto cerraría los poros o celdas formadas y su valor de densidad relativa (porosidad) disminuiría y así estos materiales ya no podrían ser considerados como cerámicos celulares. Lo anterior no podría ser considerado completamente negativo si se maximizara la resistencia a la compresión pero las propiedades de aislante térmico y acústico disminuirían, además, el peso de los materiales aumentaría significativamente y ya no habría ventajas de utilizar estos materiales respecto a los convencionalmente utilizados.

Respecto al efecto de la temperatura de cocción sobre los factores de respuesta existe una disminución de la densidad aparente, densidad real y densidad relativa al aumentar la temperatura de cocción. La creación de nueva porosidad debido a la emisión de gases y, por otro lado, el cierre de estos poros debido a fenómenos de sinterización. Esto favorece el valor de resistencia a la compresión la cual aumenta a la temperatura de 1200° C para después disminuir cuando la temperatura aumenta hasta 1250° C. Probablemente esta disminución depende de la porosidad formada y de la cantidad de las fases cristalinas y vítreas formadas. Es decir, la tendencia es hacia la formación de fases con valores de resistencia a la compresión menores.

Los resultados se compararán con lo establecido en la norma [\(NMX-C-441-ONNCCE, 2005\)](#)-Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso no estructural. Esta norma establece a los mismos como componente de forma prismática rectangular, fabricado con arcillas comprimidas o extruidas, mediante un proceso

de cocción o de otros materiales con procesos diferentes. Las probetas se pueden clasificar, de acuerdo a la norma (NMX-C-441-ONNCCE, 2005)- Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso no estructural. Como pieza maciza. En la Tabla 2 de la norma se presenta el valor mínimo de resistencia a la compresión que deben presentar estos ladrillos. Este valor es de 25-30 kgf/cm<sup>2</sup> (2.45-2.94 MPa).

Antes de cocer las probetas, es decir, a temperatura ambiente, se tiene estas “en verde” conformadas por los minerales y la materia orgánica presentes en el lodo y la arcilla. A 550° C aproximadamente ocurre la transición de  $\alpha$ -cuarzo a  $\beta$ -cuarzo. Esto implica un aumento de volumen del cuarzo. También se lleva a cabo la combustión de la materia orgánica presente. A demás se lleva a cabo el desprendimiento de moléculas de agua de la caolinita lo cual significaría una disminución del volumen. La transición del cuarzo, descomposición de la caolinita y la combustión de la materia orgánica crearía cierta porosidad en las probetas.

Aproximadamente a 700° C se llevaría a cabo la pérdida de agua de illita y la muscovita (arcillas) si estuvieran presentes. A 900° C se lleva a cabo una transición de fase de los aluminosilicatos presentes a una fase más densa de espinela. Conforme aumenta la temperatura se lleva a cabo una formación de una fase líquida de baja viscosidad y la formación de mullita. Esta se comienza a formar aproximadamente a 1100° C. A 1200° C la cantidad de fase líquida aumenta. Esta fase líquida obstruye la porosidad creada a bajas temperaturas. Lo anterior compacta a las probetas, disminuyendo la porosidad y aumentando su densidad. En las probetas cocidas a 1200° C con molde la porosidad permaneció aunque los valores de resistencia a la compresión fueron menores. Se tiene la hipótesis de que esta porosidad permaneció debido a la presencia de la fase líquida-sólida-gaseosa. Parte de los gases generados por la combustión de la materia orgánica y del agua desprendida quedan entre los intersticios generados en la probeta por las transiciones de fase del cuarzo y los minerales arcillosos como la caolinita. A mayores temperaturas, estos gases comienzan a generar presión y escapan creando la porosidad. Sin embargo, si la cantidad de fase líquida aumenta, los poros son llenados por esta fase líquida. En las siguientes Fotografías se puede apreciar la porosidad de los materiales cerámicos.

### IV.3 Análisis estadístico

A partir de los resultados obtenidos, utilizando el software Statgraphics Cevtursion XV, se realizó la determinación de la ecuación que permitiera calcular las condiciones óptimas para la cual se maximizó el valor de densidad aparente, densidad real, resistencia a la compresión y porosidad. En primer lugar, se muestra el análisis de la desviación estándar (ANOVA), se presenta la ecuación polinomial de regresión y las condiciones óptimas. En el análisis de ANOVA se determinan cuál de los factores experimentales presentan efecto estadísticamente significativo sobre los valores de las respuestas [Tabla IV-3](#). Se presenta el análisis estadístico de todas las variables experimentales consideradas aunque debe considerarse que, para fines del estudio y del planteamiento de la hipótesis, estrictamente se debería realizar solo el análisis de la densidad y la resistencia a la compresión.

*Tabla IV - 3: ANOVA correspondiente a la densidad aparente.*

Factor o interacción	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de cuadrados	Valor F	Valor P
A:grano	0.0336111	1	0.033611	1.34	0.2537
B:compos	0.332544	1	0.332544	13.24	0.0007
C:temper	0.626736	1	0.626736	24.96	0.0000
AA	0.00889259	1	0.008892	0.35	0.5549
AB	0.01815	1	0.018150	0.72	0.3999
AC	0.230104	1	0.230104	9.16	0.0042
BB	0.0219593	1	0.021959	0.87	0.3549
BC	0.254204	1	0.254204	10.12	0.0027
CC	0.000778704	1	0.000778	0.03	0.8610
Bloques	0.0327574	1	0.0327574	1.30	0.2597
Total error	1.0798	43	0.025111		

En la [Tabla IV-3](#) Los valores en rojo son los valores que corresponden a los factores experimentales de efecto significativo sobre el valor de la densidad aparente los cuales son: B, composición; C, temperatura de cocción; interacción AC, tamaño de grano: temperatura de cocción e, interacción BC, composición:temperatura de cocción.

A continuación se muestra la ecuación de regresión calculada a partir del análisis estadístico:

$$Dapa = 0.77037 - 0.0305556A + 0.0961111B - 0.131944C + 0.0272222A^2 - 0.0275AB - 0.0979167BC - 0.0427778B^2 + 0.102917BC + 0.00805556C^2$$

Donde:

**A:** tamaño de grano. **B:** composición del lodo. **C:** temperatura de cocción.

Los anteriores valores se deben considerar como valores codificados de acuerdo a la [Tabla IV-4](#) A partir de esta ecuación, se calculó el valor óptimo para la densidad aparente que se presenta a continuación:

$$\text{Valor óptimo} = 0.33 \text{ g/cm}^3$$

*Tabla IV - 4: Valores de los factores experimentales para obtener un valor de densidad aparente óptimo (mínimo).*

Factor	Valor codificado óptimo	Valor real óptimo
Tamaño de grano	1.0	500 $\mu\text{m}$ (número de malla 35)
Composición del lodo-arcilla (% de lodo)	-1.0	30%
Temperatura de cocción	1.0	1250° C

El valor óptimo calculado indica un valor de densidad aparente que está dentro en el orden establecido para materiales celulares. Este procedimiento se realizó para los factores experimentales mencionados. El análisis completo se presenta en el [Anexo B](#) de este trabajo. A continuación se presenta la [Tabla IV-5](#) que muestra el resumen de resultados.

Tabla IV - 5: Resumen del análisis estadístico para la densidad aparente, densidad real, densidad relativa y resistencia a la compresión de las probetas elaboradas.

Variables de respuesta	Factores o combinación de factores de efecto significativo	Ecuación de regresión calculada	Condiciones óptimas	Valor óptimo calculado
Densidad aparente	Composición Temperatura Tamaño de grano: temperatura Composición:temperatura	$D_{apa} = 0.77037 - 0.0305556A + 0.0961111B - 0.131944C + 0.0272222A^2 - 0.0275AB - 0.0979167AC - 0.0427778B^2 + 0.102917BC + 0.00805556C^2$	Tamaño de partícula: 350 $\mu\text{m}$ (No. Tamiz 50) Porcentaje de lodo en la mezcla, 30% Temperatura de cocción, 1250° C	0.33 g/cm <sup>3</sup>
Densidad real	Temperatura	$D_{real} = 2.26463 - 0.00444444A - 0.00194444B - 0.0825C + 0.0211111A^2 + 0.00791667AB + 0.00875BC - 0.0130556B^2 + 0.0275BC + 0.00527778C^2$	Tamaño de partícula: 500 $\mu\text{m}$ (No. Tamiz 35) Porcentaje de lodo en la mezcla, 30% Temperatura de cocción, 1150° C	2.411 g/cm <sup>3</sup>
Densidad relativa	Composición Temperatura Composición:temperatura	$D_{rel} = 0.339574 - 0.0136944A + 0.04475B - 0.0468056C + 0.0101944A^2 - 0.0128333AB - 0.045125BC - 0.0161389B^2 + 0.042875*BC - 0.000472222C^2$	Tamaño de partícula: 355 $\mu\text{m}$ (No. Tamiz 50) Porcentaje de lodo en la mezcla, 30% Temperatura de cocción, 1250° C	0.1527
Resistencia a la compresión	Temperatura Temperatura:temperatura	$Resis = 4.12225 - 0.506133A + 0.251922B + 0.7878C - 0.240022A^2 - 0.107533AB - 0.2658BC + 0.547478B^2 + 0.188783BC - 2.59002C^2$	Tamaño de partícula: 500 $\mu\text{m}$ (No. Tamiz 35) Porcentaje de lodo en la mezcla, 60% Temperatura de cocción, 1212° C	5.44 MPa

Las condiciones óptimas considerando todas las variables de respuesta al mismo tiempo se muestran en la [Tabla IV-6](#).

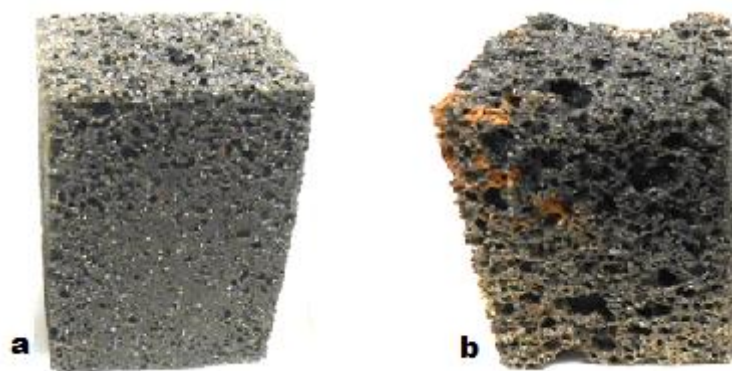
*Tabla IV - 6: Optimización de las condiciones de elaboración de probetas elaboradas considerando las cuatro variables de respuesta.*

Factor	Óptimo codificado	Óptimo real
A, Tamaño de partícula, $\mu\text{m}$	-0.509	$\sim 410 \mu\text{m}$ (No. Tamiz 40)
B, Porcentaje de lodo en la mezcla, % p/p	1.0	30%
C, Temperatura de cocción	-0.556	1212° C

Con estas condiciones se calcularon las variables de respuesta óptimas:

Densidad aparente,  $0.597 \text{ g/cm}^3$ , Densidad real,  $2.24 \text{ g/cm}^3$ , Densidad relativa, 0.266 y Resistencia a la compresión, 4.588 MPa.

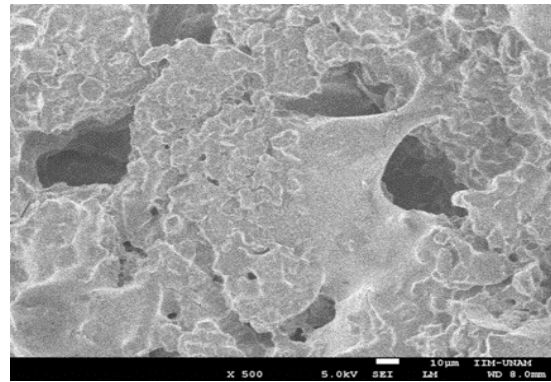
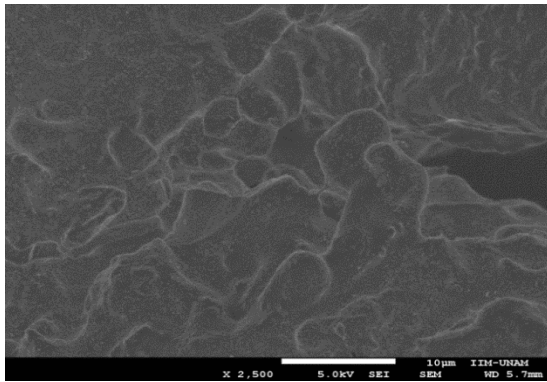
El valor obtenido de resistencia a la compresión es superior al establecido por la norma ([NMX-C-441-ONNCCE, 2005](#))- Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso no estructural - de 2.4516-2.9419 MPa. Por otro lado, el valor de densidad relativa es menor a 0.3 que es el valor límite establecido en literatura para considerar a un material como celular. ([Gibson y Ashaby, 2001](#)) En la [Figura IV-1](#) se puede apreciar la estructura celular de los materiales obtenidos.



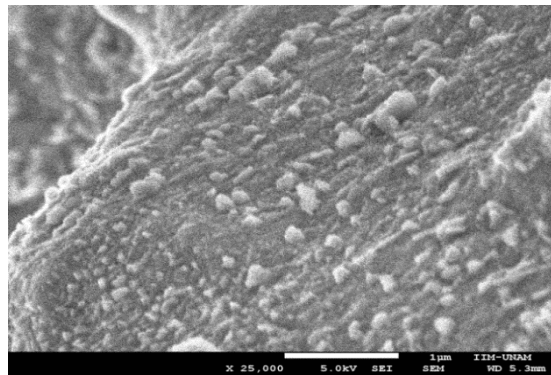
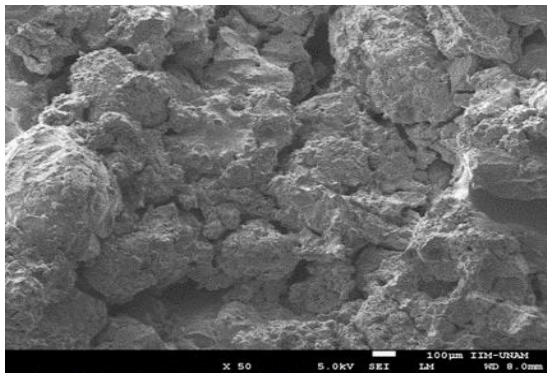
*Figura IV - 1: Cerámicos celulares obtenidos; elaborados con mezclas de lodo arcilla cocidos con molde, a) Tamaño de tamiz: 50, composición de lodo 30%, temperatura de cocción: 1200°C, densidad relativa: 0.338. b) Tamaño de tamiz 50; composición de lodo: 30%, Temperatura de cocción: 1250°C; y densidad relativa de 0.18.*



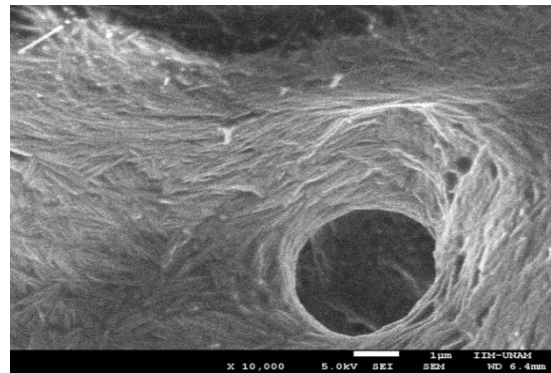
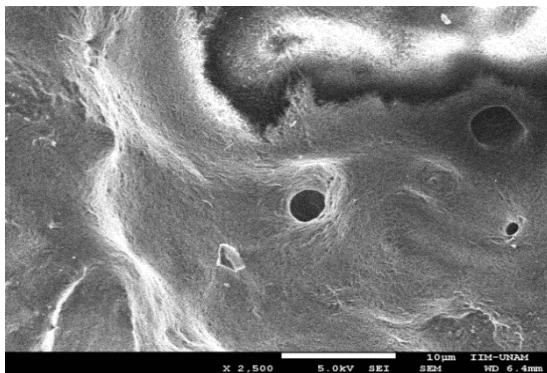
A continuación, se muestran imágenes de microscopía electrónica de barrido donde se observa la porosidad formada. [Figura IV-2.](#)



a) Tamiz: 40, composición-lodo: 30%; Temperatura de cocción: 1150°C.



b) Tamiz: 40, composición-lodo: 45%; Temperatura de cocción: 1200°C.



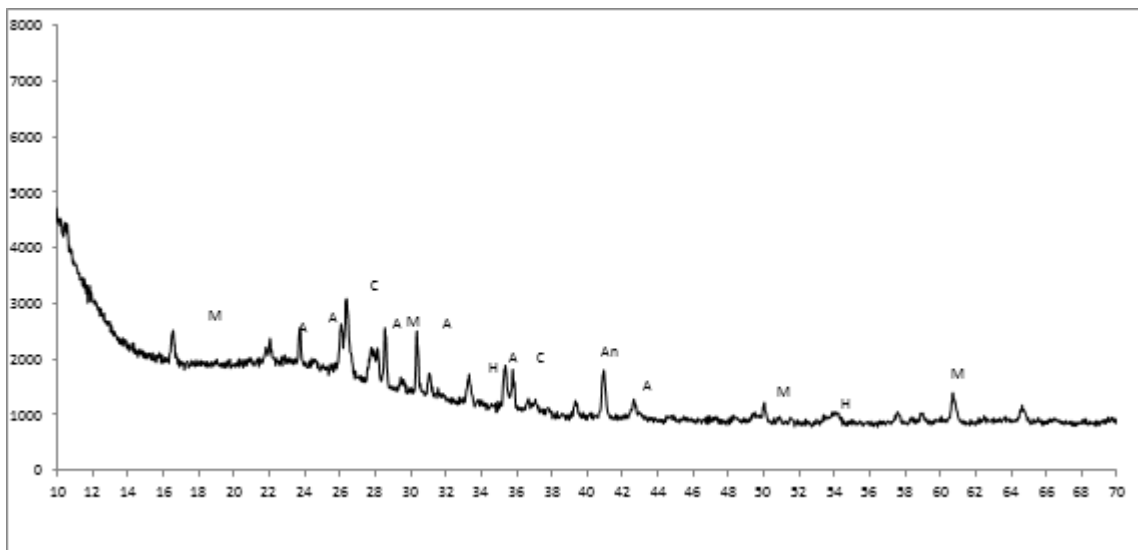
c) Tamiz: 35, composición-lodo: 30%; Temperatura de cocción: 1250°C.

*Figura IV - 2: Imágenes de Microscopía electrónica de barrido donde se aprecia la porosidad formada.*

Se observa una estructura porosa producto de la descomposición de la materia orgánica. Evidentemente se trata de la formación de un material poroso formado de

una manera similar a otros materiales donde se elaboraron ladrillos porosos utilizando residuos que contienen materia orgánica. Sin embargo, también se observa la presencia de poros creados por el desprendimiento de gases a una mayor temperatura a la utilizada para elaborar ladrillos. Este material sale de la clasificación de macroporosidad a ser un material celular debido a que el tamaño de las aberturas o celdas es del orden de estos materiales.

Los cerámicos celulares obtenidos se pueden denominar cerámicos vítreos. Lo anterior debido a que, de acuerdo al difractograma de Rayos X, no hay una línea base continua. En el [Grafico IV-2](#) se presenta un difractograma característico del material cerámico celular elaborado en este trabajo.



*Grafico IV - 2: Difractogramas correspondientes a probetas elaboradas con mezclas lodo:arcilla quemadas a 1200° C. M: mullita,  $2Si_2Al_6O_{13}$ ; C: cuarzo,  $SiO_2$ ; Cr: cristobalita;  $SiO_2$ ; A: albita,  $(Na, Ca)(Si, Al)_4O_8$ ; An: anhidrita,  $CaSO_4$ .*

Se observa el llamado halo amorfo lo que indica la presencia de material amorfo. Además, se indentificaron silicatos y sulfato de calcio. La presencia de este último se debe a que el lodo contiene una cantidad significativa de azufre debido a la adición de Sulfato de Aluminio en el proceso de potabilización del agua. [Gredmaier et al., \(2011\)](#) propusieron que puede existir la presencia de  $SO_2$  debido a reducción de azufre contenido en el material mediante un mecanismo similar al propuesto para la generación de  $CO_2$ . Es decir, el  $SO_2$  se genera por la Oxidación del Azufre elemental presente. Para que esto suceda, los Óxidos de Hierro ceden oxígenos y de esta manera se realiza el desprendimiento del gas. Dada la presencia de anhidrita, al parecer no se realizó la total evolución del Azufre a  $SO_2$  y parte de este reaccionó con el Calcio presente.

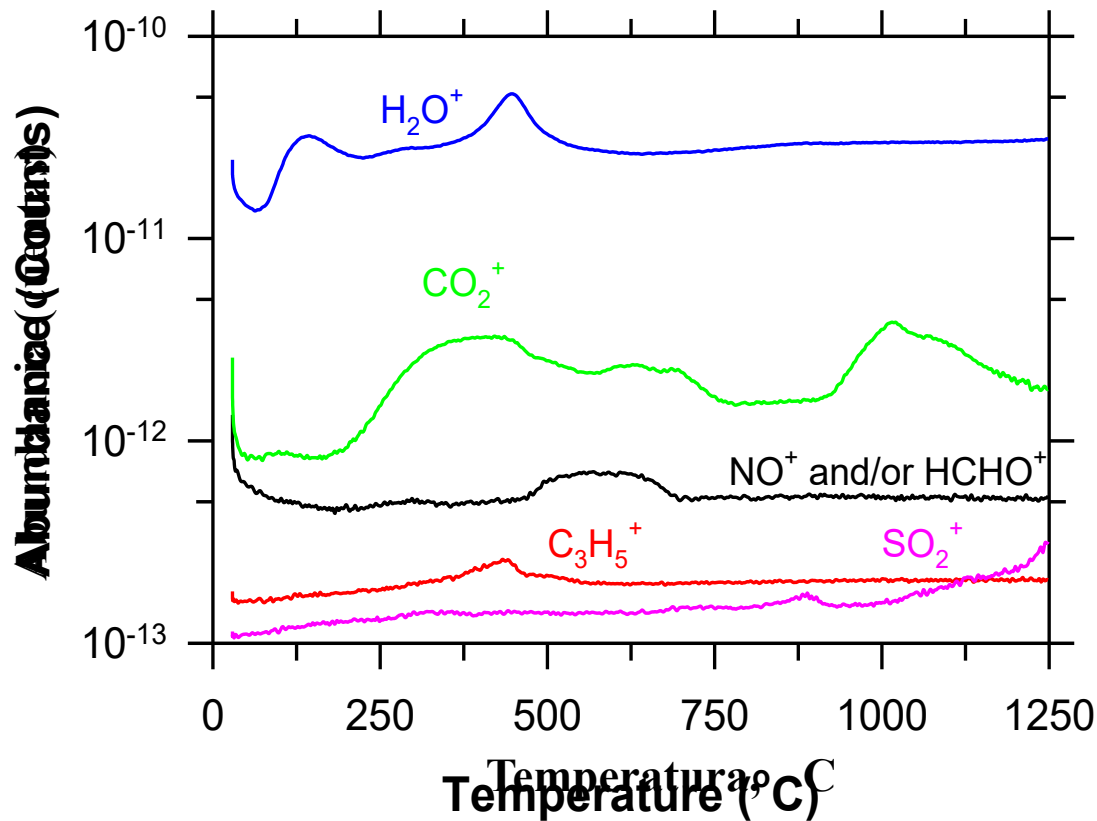
Como se mencionó, se dedujo la presencia de un vidrio que podría tener una composición de Al, Si y posiblemente Fe mediante la forma del difractograma característico del [grafico IV-2](#). Cabe señalar que todos los materiales elaborados presentaron el mismo difractograma con la variante de la intensidad de las señales de los compuestos cristalinos. La presencia de los elementos Si, Al y posiblemente Fe se corroboró realizando un análisis micro elemental mediante Microscopía Electrónica de Barrido [Tabla IV-7](#).

*Tabla IV - 7: Composición elemental de la fase vítrea formada en el material cerámico celular. Se puede apreciar un vidrio compuesto principalmente por Si, Al, Na, Ca y Fe.*

Elemento	%, p/p	Elemento	%, p/p	Elemento	%, p/p	Elemento	%, p/p
Na	3.54	Al	21.11	K	1.98	Fe	3.34
Mg	1.21	Si	65.42	Ca	3.37		

#### IV.4 Proceso de generación de la porosidad en la estructura celular

A partir de la hipótesis de que la formación de la estructura celular de los materiales cerámicos se llevó a cabo mediante la generación in situ de gases, a continuación se presentan los resultados para determinar la anterior hipótesis. Para su comprobación se utilizó un equipo para realizar análisis termo gravimétrico acoplado con un espectrómetro de masas. En el [Grafico IV-3](#) se muestra el termograma obtenido para una velocidad de calentamiento de 12.5° C/min.



*Grafico IV - 3: Gases identificados mediante la técnica de termo gravimetría acoplada con espectrometría de masas.*

Se observa en el [grafico IV-3](#) la presencia de  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ , materia orgánica ( $\text{HCHO}$ ) y  $\text{SO}_2$  como los gases generadores del cerámico celular. La generación de  $\text{H}_2\text{O}$  inicia a partir de los  $100^{\circ}\text{C}$  lo que se asocia con el secado del material. Se observa una señal de intensidad significativa a partir de  $500^{\circ}\text{C}$  lo que se atribuye a la deshidroxilación de arcillas. Posterior a esto, la señal disminuye pero aún a temperaturas mayores a  $1000^{\circ}\text{C}$  se observa su presencia. Lo anterior indica la deshidroxilación de lepidocrocita, un óxido de hierro que descompone a altas temperaturas (Wolska, 1981).

La presencia de  $\text{CO}_2$  en la formación del material cerámico se realiza primeramente por la descomposición de materia orgánica a partir de  $250^{\circ}\text{C}$  finalizando este proceso a los  $800^{\circ}\text{C}$ . Esta última corresponde a la descomposición de carbonatos. A temperaturas mayores a  $1000^{\circ}\text{C}$  se observa una señal intensa de  $\text{CO}_2$  lo que viene a confirmar la hipótesis de que la formación del llamado corazón negro (black coring) promueve la formación de la estructura celular. Lo anterior se realiza siguiendo la reacción:



A bajas temperaturas existe la combustión de la materia orgánica pero ésta se da de manera incompleta y se forma carbono el cual queda retenido en el material. A temperaturas mayores de 1000°C y las condiciones termodinámicas, físicas y químicas, el carbono escapa como CO<sub>2</sub>. Para la generación de CO<sub>2</sub> es necesario oxígeno el cual es tomado de los óxidos de hierro presentes siendo estos últimos reducidos químicamente.

Por último, la presencia de SO<sub>2</sub> se debe a que originalmente el lodo contiene sulfatos debido a la adición en el proceso de potabilización de Sulfato de Aluminio. Los sulfatos reaccionan para formar Sulfato de Calcio principalmente, posteriormente este se reduce hasta Sulfuro de Calcio y después se genera SO<sub>2</sub>.



A partir de lo anterior, se corrobora la hipótesis de que la generación de CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y vapor de agua son los responsables directos de la formación de la espuma cerámica.



# CONCLUSIONES





En este trabajo se optimizó un proceso para la obtención de un material cerámico celular utilizando arcilla y lodo generado en una planta potabilizadora. Los valores de resistencia a la compresión del material cerámico celular son adecuados para poder utilizarse en la industria de la construcción, pero no así los valores obtenidos en absorción de agua ya que los materiales que de acuerdo a la norma [NMX-C-441-ONNCCE 2005](#), que delimita las características de los materiales para construcción el material desarrollado está fuera de los límites permitidos. El utilizar el material creado como agregado ligero, es una opción viable pero para esto se tendría que establecer un proceso en que la estructura del material conformado se genere de tal manera que cada material estuviera sellado, es decir, durante el proceso de formación de estos, se crea un material cerámico celular que tiene un exterior completamente sólido, aunque debido a sus características podría tener otras aplicaciones.

La interacción entre un menor tamaño de partícula e incorporación de lodo así como una mayor temperatura de cocción aumenta la porosidad formada; sin embargo, disminuye la resistencia a la compresión. Por otro lado, una mayor cantidad de lodo incrementa la resistencia del material reduciendo la porosidad. El tamaño de grano empelado presentó un efecto significativo sobre los valores de las respuestas evaluadas, debido a que mientras que la partícula sea más pequeña, la interacción entre sus componentes es mayor. Lo anterior representa menor esfuerzo en el acondicionamiento de la materia prima y una disminución de los costos del proceso de elaboración de los materiales cerámicos celulares.

Las condiciones en el proceso para la obtención de una máxima resistencia a la compresión, y mayor porosidad fueron las siguientes: tamaño de grano, 360  $\mu\text{m}$ ; composición de lodo, 30%; temperatura de cocción, 1250° C. Con estas condiciones se obtuvo una densidad aparente de 0.33  $\text{g}/\text{cm}^3$ , densidad real de 2.411  $\text{g}/\text{cm}^3$ , densidad relativa de 0.15 (porosidad de 85%) y resistencia a la compresión de 5.44 MPa.

La formación de espuma cerámica se debió principalmente a la generación in situ de los siguientes gases:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  y vapor de agua. El  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  relacionados con la formación del corazón negro que en algunos procesos de elaboración de materiales cerámicos a base de arcilla está presente como producto de la combustión de la materia orgánica. El vapor de agua se debió a la descomposición de Lepidrocrocita, que es una hemetita hidratada.

Entre los beneficios que se obtienen de la generación de este material están los siguientes; Ambientalmente deja de ser necesario acondicionar una mayor superficie de almacenamiento para los lodos lo que implica alterar drásticamente el

lugar para este fin, además de esto se recupera espacio en las tarquinas que ya están alcanzado su límite máximo de almacenamiento. Socialmente estos residuos dejan de ser un malestar para los pobladores de áreas cercanas ya que se elimina paulatinamente el foco de infección al reducir los lodos generados por el TPA. Económicamente se puede obtener ingresos al confeccionar el residuo para que sirva como filtro, soporte o material aislante.

# RECOMENDACIONES



### Recomendación 1

Debido a que el material cerámico celular está conformado por arcilla y la composición de ésta varía de un yacimiento a otro, este parámetro debe de revisarse cada vez que se produzcan estos materiales para ajustar la cantidad a agregar y así evitar grandes variaciones en sus propiedades, ya que no se tienen datos de lo que estas variaciones podrían provocar en la formación del material cerámico. En el caso del lodo, aunque proviene de una planta potabilizadora y es sometida al mismo proceso de tratamiento de agua superficial, las características del agua a tratar no siempre son las mismas, por lo que también se recomienda revisar su composición.

Como ya se mencionó, las aplicaciones de un cerámico celular son muy diversas y éstas dependen de las características físicas y químicas del material, por lo que realizar la determinación de permeabilidad y conductividad térmica nos daría idea más amplia acerca de las aplicaciones que tiene el material desarrollado. Para realizar la determinación de conductividad térmica se propone realizarlo de acuerdo a la norma [ASTMA C-518 2004](#), se requiere de una placa del material de dimensiones que no se podría confeccionar con el horno empleado, pero podría adaptarse el método debido a la capacidad del horno que se utilizó.

### Recomendación 2

Realizar pruebas para disminuir la temperatura de formación de la espuma cerámica ya que una desventaja en el proceso es el desgaste de la preforma (molde) en el que se elabora la probeta, por lo cual se debe de buscar otro material que tenga un menor desgaste y que no afecte el desarrollo del material cerámico.



# **GLOSARIO**





**Absorción:** Proceso en el cual una sustancia se incorpora o asimila dentro de otra.

Química Analítica Séptima Edición Douglas A. Skoog, Donald M. West, F. James Holler, Stanley R. Crouch.

**Adsorción:** Proceso en el que una sustancia experimenta una unión física con la superficie de un sólido.

Química Analítica Séptima Edición Douglas A. Skoog, Donald M. West, F. James Holler, Stanley R. Crouch.

**Acrilamida:** Es un producto químico intermedio (un monómero) empleado en la síntesis de poliacrilamidas. Se emplea también para retirar sólidos en suspensión de las aguas residuales de la industria antes de su vertido, reutilización o eliminación.

<http://www.uprm.edu/biology/profs/velez/acrilamida.htm>

**Agentes Gelantes:** Material orgánico que permite la coagulación de la estructura de la suspensión previamente estabilizada con resistencias muy superiores a las alcanzadas en ausencia de dichos aditivos.

Tendencias en el conformado de suspensiones cerámicas. R. Moreno. Instituto de Cerámica y Vidrio, CSIC, 28500 Arganda del Rey, Madrid.

**Aglutinante:** Son materiales capaces de unir fragmentos de uno o más materiales para formar un conjunto compacto. Dependiendo la forma en cómo se realice la unión, estos se denominan aglomerantes o conglomerantes. En los aglomerantes la unión tiene lugar en procesos físicos (barro). En los conglomerantes la unión ocurre mediante transformaciones químicas (yeso, cal, cemento).

<https://sites.google.com/site/materialesdeconstruccion/clasificacion-de-los-materiales-de-construccion/materiales-aglutinantes>

**Análisis de Varianza:** Es el procedimiento para determinar si existen diferencias significativas entre varias poblaciones (método para comparar dos o más medias) o grupos.

**Anisotropía:** La anisotropía es una consecuencia de la estructura interna del material. Un material es anisótropo cuando sus propiedades dependen de la orientación según la cual se hace la medición de ellas.

<http://edafologia.ugr.es/optmine/intro/isoanis.htm>  
[file:///C:/Users/Administrador/Downloads/04\\_Anisotropia\\_y\\_textura.pdf](file:///C:/Users/Administrador/Downloads/04_Anisotropia_y_textura.pdf)

**Caolinita:** Es un silicato de aluminio hidratado formado normalmente por la descomposición de Feldespatos y otros silicatos de aluminio. Es una arcilla blanca muy pura que se utiliza para la fabricación de porcelanas y de aprestos para almidonar. También es utilizada en ciertos medicamentos y como agente adsorbente.

Filosilicatos 1:1, Universidad Politécnica de Valencia.

**Cerámico Celular:** material de baja densidad relativa, de estructura y propiedades definidas de acuerdo al método y material con el que fue elaborado.

**Choque Térmico:** Esfuerzo que se desarrolla en un material de manera repentina al sufrir un cambio brusco de temperatura.

<http://www.parro.com.ar/definicion-de-choque+t%E9rmico>

**Conductividad Térmica:** Valor caracterizado por la capacidad de un cuerpo físico en transmitir la energía térmica de un punto a otro, si entre los mismos se crea una diferencia de temperatura.

[http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Basic/cardenas\\_lb/cap1.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Basic/cardenas_lb/cap1.pdf)

**Cristobalita:** (Sílice) sólido cristalino (como arena) incoloro e inodoro. Se utiliza en la elaboración de vidrio soluble, sustancias refractarias y abrasivas, objetos de cerámica, esmaltes, y en compuestos abrasivos de limpieza y pulido.

Glosario terminológico para el estudio de las cerámicas arqueológicas. César M. Heras y Martínez.

**Cuarzo:** Mineral formado por bióxido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), con cristales hexagonales que terminan piramidalmente en sus extremos. Se utiliza como desgrasante cerámico.

Glosario terminológico para el estudio de las cerámicas arqueológicas. César M. Heras y Martínez.

**Densidad:** La masa de una sustancia dividida entre su volumen.

Química Undécima Edición 2013. Raymond Chang, Kenneth A. Goldsby

**Difusión:** Migración de especies en una solución desde una región de concentración alta a una más diluida.

Química Analítica Séptima Edición Douglas A. Skoog, Donald M. West, F. James Holler, Stanley R. Crouch

**Difusión Browniana:** Movimiento aleatorio que se observa en partículas microscópicas que se hallan en un medio fluido

<https://isidavila.files.wordpress.com/2012/06/movimiento-browniano.pdf>

**Diópsido:** Es un mineral piroxeno monocíclico  $MgCaSi_2O_6$  del grupo VIII (silicato). Presente en rocas magmáticas, mármoles y silicatos de calcio.

<https://es.wikipedia.org/wiki/Di%C3%B3psido>  
<http://www.mineral-s.com/diopsido.html>

**Dispersante:** Mantiene dispersas las partículas de polvo cerámico, el cual permite obtener una suspensión de la viscosidad baja y totalmente estable.

Revista Mexicana de Materiales Compuestos y avanzados 2012 N° 9 Artículo de Revisión sobre Espumas Cerámicas. M.M. Enriquez-Gonzalez, . Rodriguez-Reyes, M.G. Hinojosa-Ruiz, M.I. Pech-Canul.

**Emulsión:** Gotas de un líquido disperso en otro.

Química Undécima Edición 2013. Raymond Chang, Kenneth A. Goldsby

**Espumas Elastoméricas:** Espuma flexible de células cerradas hecha de caucho natural o sintético, o una mezcla de ambos, y que contiene otros polímeros y

elementos químicos que pueden ser modificados por aditivos orgánicos o inorgánicos.

<http://www.andimat.es/sobre-aislamiento/conceptos-basicos-del-aislamiento/aislamiento-termico-definiciones-ordenadas-alfabeticamente>

**Matriz Cerámica:** Material del cual se encuentra constituido la estructura cerámica.

**Metacaolinita:** Mineral cementante suplementario, debido a que es un aluminosilicato activado térmicamente que se produce al calcinar el caolín entre 500 y 600°C.

Efectos de la Adición de Metacaolín en el cemento Pórtland. Universidad Nacional de Colombia 2006. Juan Camilo Restrepo Gutiérrez. Oscar Jaime Restrepo Baena. Jorge Iván Tobón.

**Mullita:**  $3Al_2O_3 - 2SiO_2$  Es un material con un excelente comportamiento a alta temperatura, aunque no posee unas propiedades mecánicas muy buenas a temperatura ambiente. Se caracteriza por presentar baja constante dieléctrica, bajo coeficiente de expansión, alto punto de fusión, alta resistencia a la fluencia y alta estabilidad mecánica a altas temperaturas, presentando una mejor respuesta al choque térmico que la alúmina.

Instituto de Cerámica y Vidrio de Madrid. Caracterización por contacto de cerámicas nanocompuestas Alúmina / Mullita 2008.

**Pirólisis:** Descomposición química de materia orgánica causada por el calentamiento en ausencia de oxígeno, utilizando por lo general atmosferas controladas, inertes o al vacío.

**Pirolización:** Pirólisis de materia orgánica.

**Polimerización:** Reacción química en la cual moléculas de elevada masa molecular a partir de monómeros.

Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales, Cuarta Edición, William F. Smith, Javad Hashemi, Phd. 2006

**Sinterización:** Es el proceso en el que las partículas finas de un material cerámico se unen químicamente al someterlas a una temperatura suficientemente alta para que ocurra una difusión atómica entre las partículas.

Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales, Cuarta Edición, William F. Smith, Javad Hashemi, Phd. 2006

**Sistema coloidal:** Dispersión de partículas de una sustancia (la fase dispersa) entre un medio dispersor, formado por otra sustancia.

Química Séptima Edición Raymond Chang Williams College

**Surfactante:** Son agentes químicos "activos en superficie" generalmente compuestos orgánicos anfífilos que en medios acuosos migran hacia las superficies acuosas para que su componente hidrosoluble permanezca en la fase acuosa y el hidrófobo quede fuera de esa fase, y ahí ejercen diversas funciones: humedecen, emulsifican, dispersan y solubilizan; favorecen o impiden la formación de espuma; son antiestáticos y lubricantes; también dan brillo y afectan a ciertas propiedades reológicas.

<http://biomodel.uah.es/model2/lip/surfactantes.htm>

**Suspensión:** Mezcla heterogénea formada por un sólido en polvo (solute) o pequeñas partículas no solubles (fase dispersa).

Revista Mexicana de Materiales Compuestos y avanzados 2012 N° 9 Artículo de Revisión sobre Espumas Cerámicas. M.M. Enriquez-Gonzalez, . Rodriguez-Reyes, M.G. Hinojosa-Ruíz, M.I. Pech-Canul.

**Termomecánica:** Cambios físicos producidos por la temperatura.

<http://www.wordreference.com/definicion/termomec%C3%A1nico>

**Termoquímica:** Estudio de los cambios de calor en las reacciones químicas.

Química Séptima Edición Raymond Chang Williams College

**Vitrocerámico:** Son piezas cerámicas formadas en estado vítreo y que posteriormente se les deja cristalizar durante un tratamiento térmico, para conseguir mejor resistencia y tenacidad.

Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Donald R. Askeland. Tercera Edición. 1998

# REFERENCIAS





- Altinkok, A. (2007). Compressive behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC ceramic composite foams fabricated by decomposition of aluminum sulfate aqueous solution. *Journal of Composite Materials*(41), 1361-1373.
- ASTM C20-97. (s.f.). *Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Babatunde y Zhao. (2007). Constructive approach toward water treatment works sludge management: an international review of beneficial reuses. *Critical reviews in Environmental Science and Technology*.(37), 129-164.
- Balasubramanian et al, J. S. (2006). Reuse of textile effluent treatment plant sludge in building materials. *Waste Management*(26), 22-28.
- Barg et al, S. S. (2008). Cellular ceramics by direct foaming of emulsified ceramic powder suspensions. *Journal of American Ceramic Society*(91), 2823-2829.
- Bernardo et al, E. C. (2007). Reutilization and stabilization of wastes by the production of glass foams. *Ceramics International*(33), 963-968.
- Campdelacreu, J. (2012). Enfermedad de Parkinson y enfermedad de Alzheimer: factores de riesgo ambientales. *Neurología*. Doi:10.1016/j.nrl.2012.04.001.
- Chiang et al, K.-Y. C.-H.-R.-L. (2009). Lightweight bricks manufactured from water treatment sludge and rice husks. *Journal of Hazardous Materials*, 171, 76-82.
- Colombo, D. J. (Abril de 2003). Cellular Ceramics: Intriguing Structures, Novel Properties, and Innovative. *MRS Bulletin*, 28(4), 296-300.
- Colombo, P. (15 de Junary de 2006). Conventional and novel processing methods for celledar ceramics. *PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS A and THE ROYAL SOCIETY*, 364.
- CONAGUA. (2011). *Agenda del agua 2030*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- E. Bernardo. (2007). Micro- and macro-cellular sintered glass-ceramics from wastes. *Journal of the European Ceramic Society*(27), 2415-2422.
- Espejel Ayala, F. (2013). *Propiedades mecanicas y microestructura de céramicas celulares producidas mediante la valorización de lodos generados en plantas potabilizadoras*. Facultad de Ingeniería UNAM, Materiales y Manufactura. Divicion de Mecanica Industrial, México DF.

- Espejel, F. (2007). *Valoración de los lodos generados en plantas potabilizadoras para elaborar productos cerámicos*. UNAM, Instituto de Ingeniería., México D.F.
- Gibson L.J. Ashby, M. (1999). *Cellular solids, Structure and properties* (Second Edition ed.). United Kingdom: Cambridge University Press.
- Gibson L.J. Ashby, M. (1999). *Cellular solids, Structure and properties*. (Second Edition ed.). United Kingdom: Cambridge University Press.
- H.W. Guo et al, Y. G. (2010). Preparation of high strength foam glass–ceramics from waste cathode ray tube. *Elsevier - Materials Letters*(64), 997-999.
- Hasheminia et al, S. N. (2012). Preparation and characterization of diopside-based glass-ceramic foams. *Ceramics International*(38), 2005-2010.
- Hasheminia et. al, A. N. (2012). Preparation and characterisation of diopside-based glass-ceramic foams. *ceramics International*, 38.
- He et al, X. Z. (2009). 3D interconnective porous alumina ceramics via direct protein foaming. *Materials Letters*(63), 830-832.
- Husillos Rodriguez, N. M. (2010). *Re-use of drinking water treatment plant (DWTP) sludge: Characterization and technological behavior of cement mortars with sludge additions*. *Cement and Concrete Research*.
- J. Bossert et al, E. F. (2004). Liquid Phase Sintering of Dense and Porous Glass-Ceramics. *Science of Sintering*(36), 87-92.
- J.P. Wu et al, A. R. (2006). Glass ceramic foams from coal ash and waste. *Advances in Applied Ceramics-Institute of Materials, Minerals and Mining*, 105(1), 32-39.
- K. Koseoglu et al, M. P. (2010). “Encapsulating fly ash and acidic process waste water in brick structure,”. *Journal of Hazardous Materials*(176), 957-964.
- Leg Cambroner et al, J. R.-R. (2005). Obtención de espumas a partir de residuos de pizarra. *Sociedad española de Cerámica y Vidrio*, 44(6), 368-372.
- Liao et al, Y.-C. H.-Y. (2012). Glass foam from the mixture of reservoir sediment and Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. *Ceramics International*(38), 4415-4420.
- Low N.M.P. (1980). Fabrication of cellular structure composite material from recycled soda-lime glass and phlogopite mica powders. *Journal of Materials Science*(15 ), 1509-1517.
- M. Garcia-Valles et al, M. A.-F. (2011). Materiales vitrocerámicos a partir de lodos procedentes de una estación de depuración de aguas residuales urbanas (en la

- Ciudad de El-Sadat, Egipto). *Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 50(5), 261-266.
- M. Pelino et al, C. C. (1997). Preparation and properties of glass-ceramic. *Jurnal of Materials Science*(32), 4655-4660.
- M.M. Enríquez-Gonzalez, M.-R. M.-C. (2012). Artículo de Revisión sobre Espumas Cerámicas. *Revista Mexicana de Materiales Compuesto y Avanzados*, 1-19.
- Mata, M. P. (2008). *COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MATERIALES CELULARES DE CARBURO DE SILICIO*. Madril.
- Méar et al, F. Y. (2007). Mechanical behavior and thermal and electrical properties of foam glass. *Ceramics International*(33), 543-550.
- NMX-C-441-ONNCCE. (2005). ORGANISMO NACIONAL DE NORMALIZACION Y CERTIFICACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN Y EDIFICACIÓN, S.C. *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-BLOQUES, TABIQUES O LADRILLOS Y TABICONES PARA USO NO ESTRUCTURAL-ESPECIFICACIONES*. DISTRITO FEDERAL, MEXICO.
- NOM-004-SEMARNAT-2002. (2003). *Lodos y Biosólidos-Especificaciones y limites maximos permicibles de contaminantes para su aprobechamiento y dispocion final*. México.
- Pacheco Flores, A. (2012). *Exploración de las condiciones óptimas de producción de cerámicos celulares mediante el reciclado de lodos de potabilización de agua*. Tesis de Ingeniería Mecánica, UNAM, Facultad de Ingeniería.
- Ramirez Zamora et al, R. C. (2008). Valorization of drinking water treatment sludges as raw materials to produce concrete and mortar. *American Journal of Environmental Sciences*(4), 223-228.
- Samara M. et al, Z. L. (2009). "Valorization of stabilized river sediments in fired clay bricks: Factory scale experiment,". *Journal of Hazardous Materials*(163), 701-710.
- Sandoval, L. Y. (1998). *Estudio piloto para reducir el volumen de lodos de plantas potabilizadoras*. Istituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Scheffer, M., & Colombo, P. (2005). *Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications*. State College, Pennsylvania, USA: WILEY-VCH.
- Segura et al, C. M. (2000). *Suelos arcillosos de la zona oriente del Estado de México*. Obtenido de UACH: [www.chapingo.mx/terra/contenido/18/1/art35-44.pdf](http://www.chapingo.mx/terra/contenido/18/1/art35-44.pdf)
- SEMARNAT. (2013). *Estadísticas del Agua en México, Edicion 2013*. CONAGUA.

- Sutcu, M., & Akkurt, S. a. (2009). "Utilization of recycled paper processing residues and clay of different sources for the production of porous anorthite ceramics,". *Journal of the European Ceramic Society*(30), 1785-1793.
- V.A. Kuzurman et al, I. V. (2008). CERAMIC FOAM MATERIALS BASED ON WASTES. *Glass and Ceramics*, 65(11-12), 399-401.
- W D Callister. (1996). *Introduccion a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Reverté.
- Weng et al, C.-H. L.-F.-C. (2003). Utilization of sludge as brick materials. *Advances in Environmental Research*(7), 679-685.
- Wolska, E. (1981). The structure of hydrohematite. *Zeitschrift für Kristallographie*(154), 69-75.
- Xu et al, C. W. (2010). Cellular silica-based ceramics prepared by direct foaming at high temperature. *Ceramics International*(36), 923-927.
- Yang et al, F. L.-A. (2012). Effects of sintering temperature on properties of porous mullite/corundum ceramics. *Materials Letters*(73), 36-39.
- Yi-Chong Liao, & C.-Y. (2012). Glass foam from the mixture of reservoir sediment and Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. *Ceramics International*(38), 4415-4420.

**ANEXOS**



### Anexo A. Investigaciones realizadas sobre la utilización de lodos.

A continuación, se enlistan estas opciones de la revisión realizada por Babatunde y Zhao, 2007:

**Como material en la industria de la construcción:**

- 1.- Elaboración de ladrillos.
- 2.- Materiales para cementos.
- 3.- En pavimento y trabajos de geotecnia.

**Aplicaciones en suelos:**

- 4.- Mejorador estructural de suelos
- 5.- Para mantener el pH de suelos (efecto buffer).

**Uso en tratamiento de aguas residuales:**

- 6.- Recuperación y reuso del coagulante
- 7.- Como coagulante
- 8.- Como adsorbente
- 9.- Como acondicionador (aumentar la turbiedad del agua)
- 10.- Como sustrato en humedales artificiales.

*Tabla A- 1: Uso de los lodos generados en plantas potabilizadoras en la elaboración de ladrillos. (Espejel, 2007) (Espejel Ayala, 2013)*

País	Descripción	Referencia
Taiwan	El lodo se mezcló con cascarilla de arroz y se elaboraron ladrillos que se cocieron a 1100° C	(Chiang et al, 2009)
Reino Unido	Se realizó un estudio sobre la viabilidad de obtener ladrillos con un alto contenido de ceniza incinerada del lodo de aguas residuales tratadas	(Anderson M., 2003)
Taiwán	Se evaluó el efecto del secado del lodo a diferentes temperaturas para elaborar ladrillos. Un secado a 105°C es suficiente para que el lodo sea incorporado en los ladrillos sin necesidad de calcinación	Pan y Huang (2004)
España	Utilización del lodo en la fabricación de matrices cerámicas porosas como el ecobrick	(Elías, 2000)



<b>Reino Unido</b>	Se muestra el potencial que resulta al incorporar lodos provenientes de coagulantes de sales de Aluminio y sales férricas en procesos de manufactura de cemento y ladrillo	Dillion <i>et al.</i> , (1996)
--------------------	--	--------------------------------

*Tabla A- 2: Uso de lodos generados en plantas potabilizadoras en la elaboración de materiales cerámicos. (Espejel, 2007) (Espejel Ayala, 2013)*

País	Descripción	Referencia
<b>China</b>	Se elaboraron baldosas con lodo, caolín, feldespato y arena.	(Xie, 2012)
<b>Brasil</b>	Incorporación de hasta 20% de lodo en la mezcla con arcilla para elaborar materiales cerámicos.	(Teixeira, 2011)
<b>China</b>	Se llevó a cabo la estabilización de metales pesados presentes en el lodo mediante la utilización de estos últimos para elaborar materiales cerámicos.	(Xu et al, 2010)
<b>China</b>	Se elaboró un material cerámico mezclando lodos fisicoquímicos (planta potabilizadora) y biológicos (planta de tratamiento de aguas residuales).	(Zou, 2009)
<b>Japón</b>	Se realizó la preparación de cerámico vidriado con mezclas de lodo, residuos de vidrio y Carbonato de Calcio.	(Toya, 2007)
<b>Portugal</b>	Se recuperaron los lodos ricos en aluminio (24% de Al). El tratamiento de recuperación consistió en la calcinación y lavado de las sales solubles, seguido de la remoción de sulfatos por precipitación como BaSO <sub>4</sub> . Los lodos calcinados y lavados pueden ser fácilmente dispersados y usados para producir cerámicos de alta alúmina.	(Ferreira & Olhero, 2002)
<b>España</b>	Se llevó a cabo un secado por atomización de los lodos. El producto es un polvo cerámico con un 13% de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> que puede ser comercializado para la elaboración de cerámica de calidad.	(Armenter Ferrando et al., 2002)

*Tabla A- 3: Uso de los lodos generados en las plantas potabilizadoras en la elaboración de cementos y morteros. (Espejel, 2007) (Espejel Ayala, 2013)*

País	Descripción	Referencia
<b>Brasil</b>	Elaboración de agregado para concreto ligero mezcla lodo-aserrín. Elaboración de morteros con mezclas lodo-residuos de la construcción.	(Sales, 2011)
<b>China</b>	Se preparó eco-cemento empleando residuos de mármol, de un desarenador (planta de tratamiento de aguas residuales) y lodo (planta potabilizadora).	(Yen, 2011)
<b>España</b>	Los lodos fueron atomizados y utilizados como aditivo para la elaboración de morteros.	(Husillos Rodriguez, 2010)
<b>México</b>	Utilización en la formulación de mortero.	(Ramirez Zamora et al, 2008)
<b>Portugal</b>	Los lodos fueron secados a 105 °C y 700 °C para posteriormente ser mezclados con cemento tradicional y elaborar mortero.	(Goncalves, November 2004)

<b>Taiwán</b>	Elaboraron clinker de cemento a partir de los lodos deshidratados producidos en la planta potabilizadora.	(Pan, 2004)
<b>Colombia</b>	Se utilizó el lodo como cementante. El lodo fue calcinado, molido y mezclado con cal, dando como resultado un cemento con la calidad del fabricado tradicionalmente.	(Salazar-Jaramillo, 2003)
<b>Reino Unido</b>	Los lodos fisicoquímicos con mayor contenido de Aluminio y altas concentraciones de sólidos presentan un potencial mayor para la elaboración de cemento. Aquellos que contienen grandes cantidades de hierro son mejores en la elaboración de ladrillos.	(Goldbold, 2003)
<b>Singapur</b>	El lodo deshidratado se mezcló con cal y arcillas para producir cemento (hasta un 40% en peso).	(Tay J. H., 2002)
<b>Japón</b>	El lodo seco y fragmentado puede utilizarse como materia prima en la producción del cemento Portland sin producir mal olor ni emisiones de polvo.	(Onaka, 2000)
<b>España</b>	Los lodos de las plantas potabilizadoras contienen altas concentraciones de óxidos de aluminio y menos impurezas que el PAVAL. Este material está compuesto básicamente por óxido de aluminio y puede ser utilizado en la producción de concreto y morteros.	(Cano, 2000)

*Tabla A- 4: Uso de lodos generados en plantas potabilizadoras en suelos. (Espejel, 2007) (Espejel Ayala, 2013)*

<b>País</b>	<b>Descripción</b>	<b>Referencia</b>
<b>Sudáfrica</b>	Realizaron la caracterización fisicoquímica de los lodos producidos en 6 plantas potabilizadoras con la finalidad de determinar si cuentan con las características para ser aplicados en suelos agrícolas o en actividades de tipo industrial.	(Titshall, 2005)
<b>Canadá</b>	Se reporta el uso benéfico en agricultura de lodos con contenido de aluminio.	(MENV, 2003)
<b>Francia</b>	Se consideró la aplicación en suelos agrícolas y el vertido en suelo para ser reincorporado como medio natural.	(Adler, 2002))
<b>Estados Unidos</b>	Se estudiaron las propiedades de los lodos de plantas potabilizadoras para ser aplicados como sustituto de suelo en cultivos de tomate. Los resultados mostraron que el lodo debe de contener los niveles de nutrientes adecuados y niveles bajos de fototoxicidad (NO <sub>3</sub> -N), además de presentar alta densidad.	(Dayton & Basta, 2001)
<b>Estados Unidos</b>	Los lodos con contenido de Hidróxidos de Aluminio y de cal se aplicaron a suelos con exceso de nutrientes. El Aluminio Absorbió el Nitrógeno y Fósforo disueltos en el suelo y previene la eutroficación y crecimiento de hierbas no deseadas.	(Gallimore L.E., 1999)

*Tabla A- 5: Uso de lodos generados en plantas potabilizadoras como material adsorbente. (Espejel, 2007) (Espejel Ayala, 2013)*

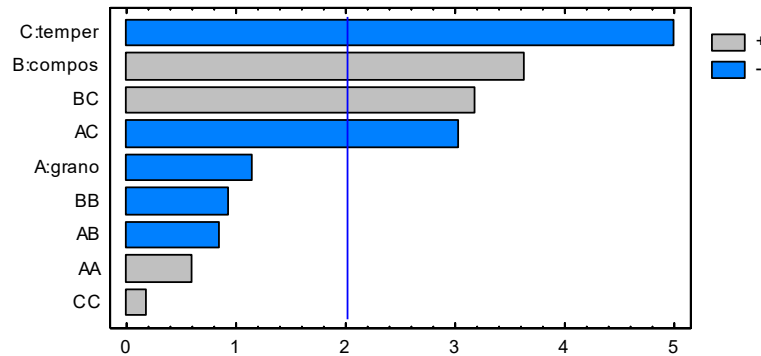
País	Descripción	Referencia
China	Pruebas de adsorción de fósforo con lodos de aluminio y hierro.	(Tie, 2010)
China	Adsorción de Fósforo con lodos de Aluminio.	(Yang, 2009)
China	Adsorción de Fósforo con lodos de Hierro.	(Tian, 2009)
Malasia	Adsorción de Cobre y Zinc.	(Hanani, 2008)
Irlanda	Se llevó a cabo la adsorción de diferentes especies de Fósforo sobre lodo procedente del sistema de secado de la planta potabilizadora.	(Razali, 2007)
Corea	Bio-adsorción de Cadmio sobre el lodo seco.	(Beom Choi, 2006)
España	El lodo se utilizó como material adsorbente en la filtración de aguas contaminadas por Boro y Flúor.	(Bosch, 2002)

*Tabla A- 6: Uso de lodos generados en plantas potabilizadoras en otras aplicaciones. (Espejel, 2007) (Espejel Ayala, 2013)*

País	Descripción	Referencia
China	Se llevó a cabo la recirculación de la mezcla lodo-Carbón activado para mejorar el proceso de potabilización.	(Qi, 2011)
Irlanda	Se utilizó el lodo como sustrato para un humedal artificial y de esta manera poder adsorber el fósforo contenido en el agua residual.	(Li, 2010)
México	Síntesis de zeolita A, X y P con lodo de una planta potabilizadora.	(Sánchez., 2010)
China	Se recuperó con Ácido Sulfúrico el Aluminio contenido en los lodos y éste se recirculó en el proceso de potabilización.	(Xu, 2009)
Corea del Sur	Síntesis de zeolita A y sodalita.	(Yuo, 2007)
España	Se utilizaron como agentes de floculación de aguas residuales y de encolado en la industria papelera. Otra posibilidad es la obtención de Sulfato o Hidróxido de Aluminio.	(Bielza, 2002)
Japón	Se llevó a cabo la recirculación del lodo con policloruro de Aluminio (PAC) como coagulante (proceso térmico y activación con Ácido Clorhídrico)	(Ebie, 2000)
Rusia	Utilización de los lodos como agente químico en el tratamiento de macroemulsión para reducir la dosis de $Al_2(SO_4)_3$ .	(Yunusov & Khudaiberganova., 1984)

### Anexo B. Análisis estadísticos de los resultados.

El diagrama de Pareto muestra de manera gráfica los factores experimentales sobre las variables de respuesta seleccionadas. En primer lugar, se muestra el diagrama de Pareto para la variable de respuesta Densidad aparente [Figura B.1](#)

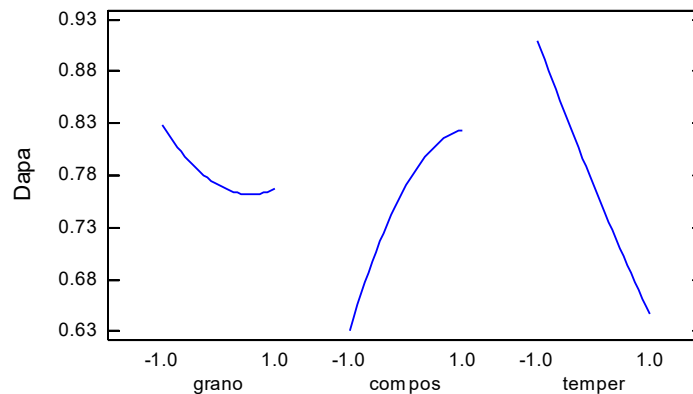


*Figura B - 1: Diagrama de Pareto para la variable de respuesta densidad aparente.*

Los factores y combinación de factores de efecto significativo sobre la densidad aparente fueron:

- Temperatura
- Composición (lodo:arcilla)
- Interacción Composición: Temperatura
- Interacción Tamaño de grano: Temperatura

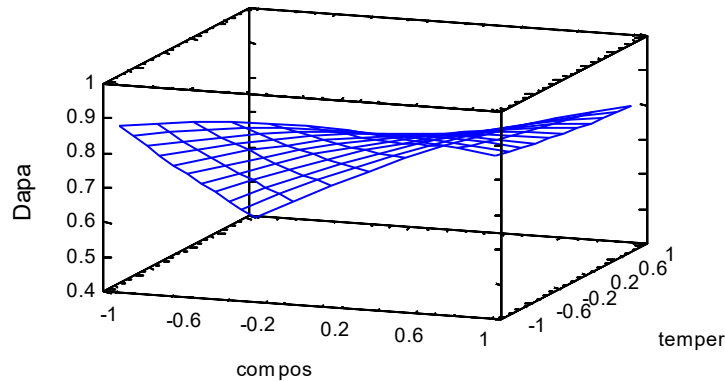
Los efectos individuales sobre la densidad aparente se muestran en la [Figura B.2](#).



*Figura B - 2: Efectos individuales sobre la variable de respuesta densidad aparente.*

A mayor tamaño de grano y mayor temperatura, la densidad aparente disminuye. Por otro lado, a mayor composición de lodo, la densidad aparente aumenta.

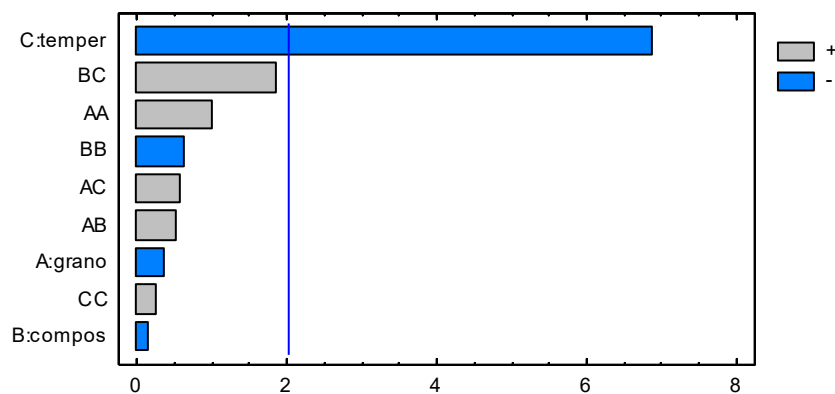
A continuación se muestra la superficie de respuesta para la densidad aparente **Figura B.3.**



**Figura B - 3:** Superficie de respuesta para la variable de respuesta densidad aparente.

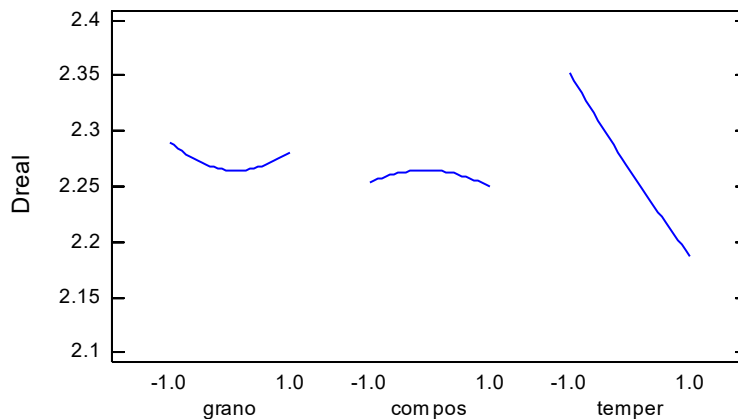
La figura muestra una superficie con una típica “punto silla” indicando que no se puede realizar la optimización de la densidad aparente con los factores experimentales seleccionados.

En seguida se muestra el diagrama de Pareto para la densidad real.



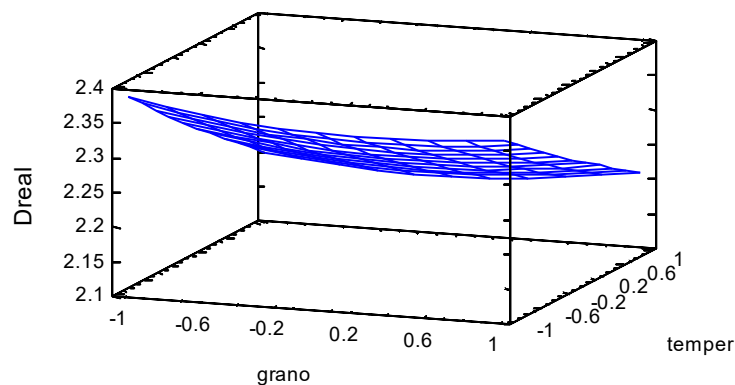
**Figura B - 4:** Diagrama de Pareto para la variable de respuesta densidad real.

Solo se ve el efecto significativo de la Temperatura por lo que no se puede realizar la optimización solo considerando a este factor experimental sobre la densidad real. Los individuales se muestran en la [Figura B.5](#).



*Figura B - 5: Efectos individuales sobre la variable de respuesta densidad real.*

Se observa que el Tamaño de grano y la composición no muestran un efecto significativo en el valor de densidad real. Por otro lado, el aumento de la Temperatura significa una disminución en el valor de la densidad real. La superficie de respuesta se muestra en la [Figura B.6](#).



*Figura B - 6: Superficie de respuesta para la variable de respuesta densidad real.*

No se observa que en el intervalo seleccionado de los factores experimentales se pueda realizar la optimización de la densidad real. Seguidamente se muestra el diagrama de Pareto para la densidad relativa. [Figura B.7](#).

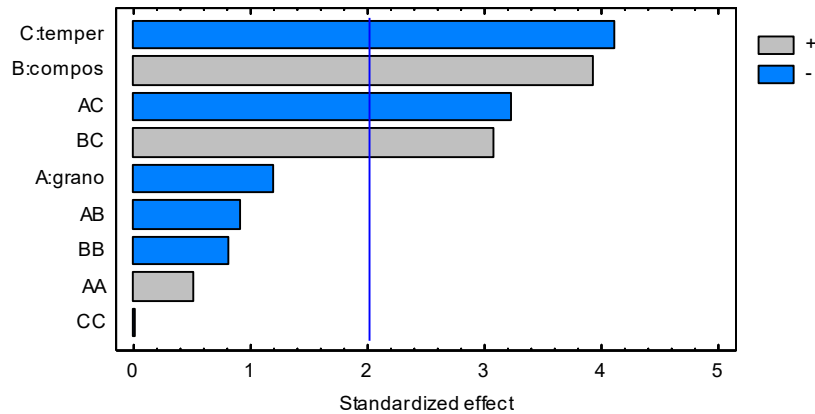


Figura B - 7: Diagrama de Pareto para la variable de respuesta densidad relativa.

Los factores y combinación de factores de efecto significativo sobre la densidad relativa fueron:

- Temperatura
- Composición (lodo:arcilla)
- Interacción Composición: Temperatura
- Interacción Tamaño de grano: Temperatura

Los efectos individuales sobre la densidad aparente se muestran en la Figura B.8.

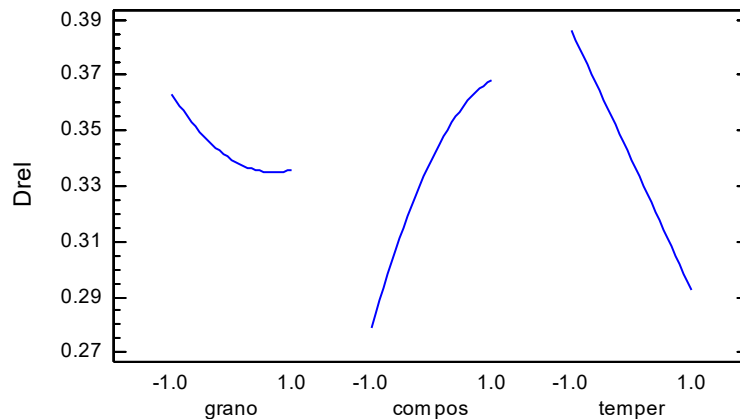
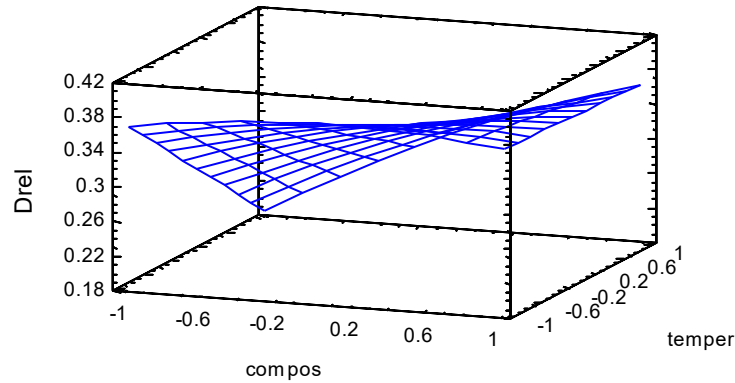


Figura B - 8: Efectos individuales sobre la variable de respuesta densidad relativa.

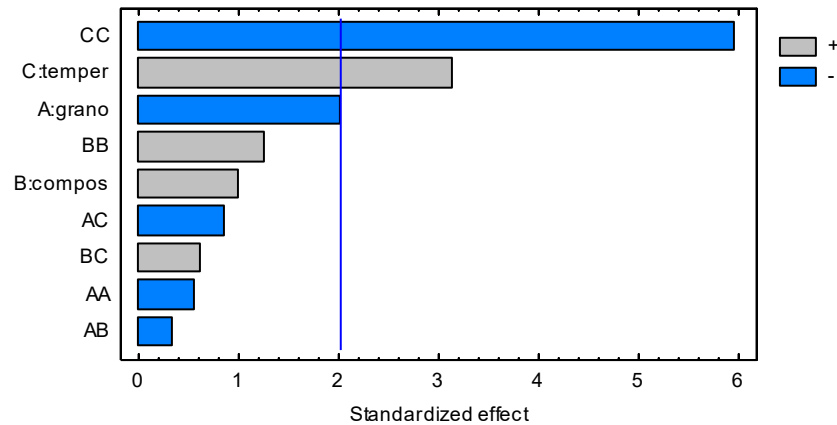
A mayor tamaño de grano y mayor temperatura, la densidad relativa disminuye. Por otro lado, a mayor composición de lodo, la densidad relativa aumenta.

A continuación se muestra la superficie de respuesta para la densidad relativa. *Figura B.9.*



*Figura B - 9: Superficie de respuesta para la variable de respuesta densidad relativa.*

El análisis estadístico de la resistencia a la compresión se muestra a continuación. *Figura B.10.*



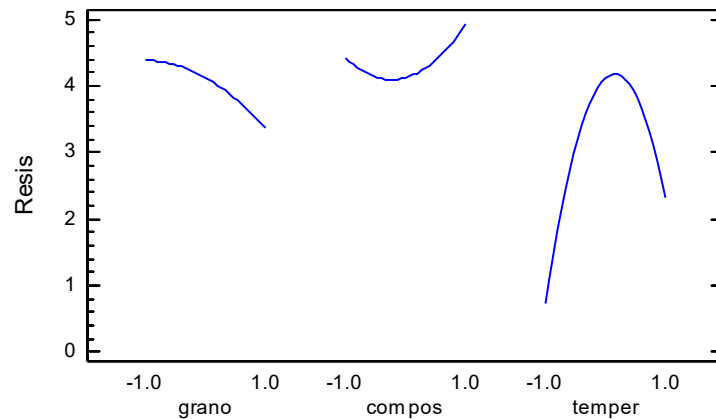
*Figura B - 10: Diagrama de Pareto para la variable de respuesta resistencia a la compresión.*

Los factores y combinación de factores de efecto significativo sobre la densidad relativa fueron:

- Temperatura: Temperatura
- Temperatura

Los efectos individuales sobre la resistencia a la compresión se muestran a continuación:

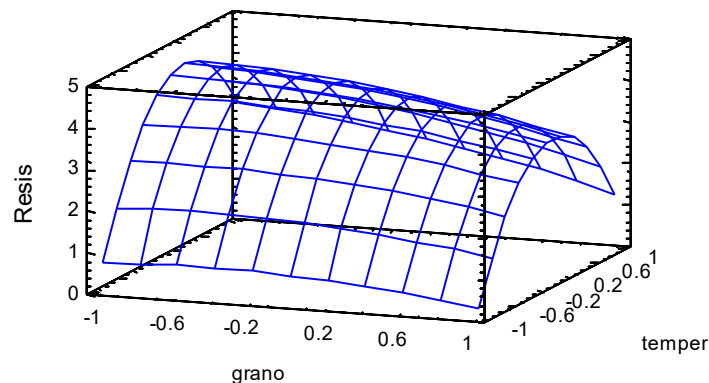




*Figura B - 11: Efectos individuales sobre la variable de respuesta resistencia a la compresión.*

A mayor tamaño de grano la resistencia aumenta. A mayor composición del lodo en la mezcla, la resistencia aumenta. La temperatura muestra una disminución de la resistencia conforme aumenta la Temperatura aunque se observa un máximo a una temperatura intermedia.

En seguida se muestra la superficie de respuesta para la resistencia a la compresión.



*Figura B - 12: Superficie de respuesta para la variable de respuesta resistencia a la compresión.*

Como se observa, existe la posibilidad de mantener una máxima resistencia a una temperatura intermedia mientras que los valores de tamaño de grano no son significativos

Anexo C. Anexo Fotográfico.

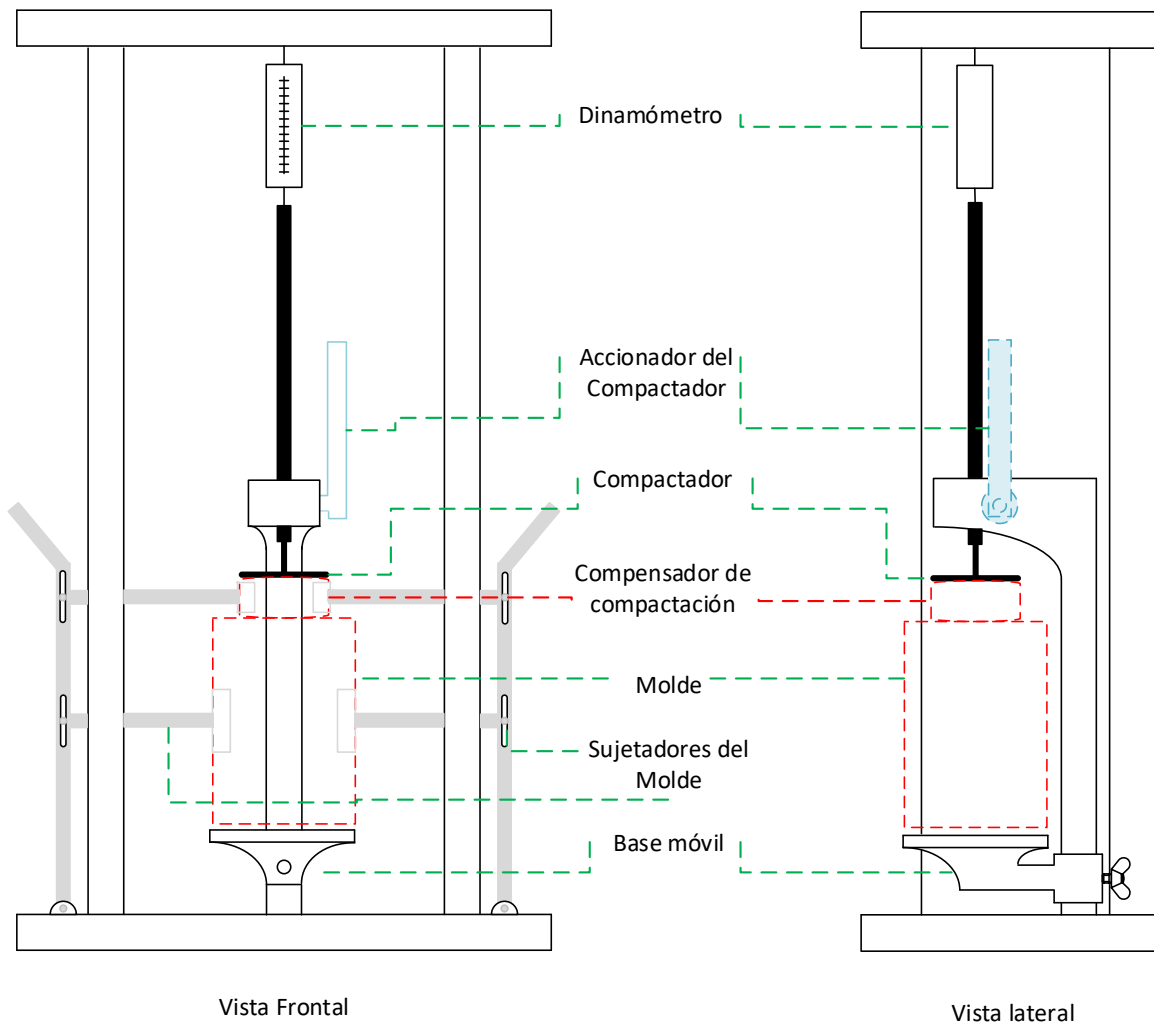


Figura C - 1: Esquema propuesto del equipo para cuantificar la presión mecánica, usada al elaborar las probetas.

A continuación, se muestran fotografías de las diferentes etapas, pruebas y características de los materiales desarrollados.



Fotografía 1. Molienda del lodo y arcilla.



Fotografía 2. Preparación de la Pasta Cerámica.



Fotografía 3. Secado de las probetas con y sin molde



Fotografía 4. Cocido de las probetas, con y sin molde.



**Fotografía 5** Del lado Izquierdo, Probeta 5030125 A. Del lado derecho, Probeta 5030125 M A



**Fotografía 6.** Del lado Izquierdo Prueba de resistencia a la compresión. Del lado derecho Determinación de la densidad real por medio del método del picnómetro.