



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Exploración de las condiciones  
óptimas de producción de  
cerámicos celulares mediante el  
reciclado de lodos de  
potabilización de agua**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO MECÁNICO**

**P R E S E N T A:**

**ALFONSO PACHECO FLORES**

**DIRECTOR DE TESIS  
DR. RAFAEL SCHOUWENAARS**

**COTUTOR  
ING. HUGO ALBERTO DURÁN CORTÉS**





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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: DR. ARMANDO ORTIZ PRADO  
Secretario: DR. VÍCTOR HUGO JACOBO ARMENDÁRIZ  
Vocal: DR. RAFAEL SCHOUWENAARS  
1<sup>er</sup> Suplente: DRA. ROSA MARÍA RAMÍREZ ZAMORA  
2<sup>do</sup> Suplente: ING. HUGO ALBERTO DURÁN CORTÉS

Lugar donde se realizó la tesis:  
FACULTAD DE INGENIERÍA E  
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

**TUTOR DE TESIS**

---

DR. RAFAEL SCHOUWENAARS.

## **Agradecimientos:**

A mi Mamá Esmeralda por el apoyo, paciencia, ejemplo y amor incondicional que siempre me muestra.

A mi Papá Alfonso por preocuparse por mí, por apoyarme, alentarme a ser cada día mejor y por haberme brindado la oportunidad de esta gran experiencia en la universidad.

A mis hermanos Priscila y Greg, mil gracias por ser parte de mi vida, por darme ánimos, por apoyarme y hacer mi vida especial.

A Karen por compartir esos momentos tan especiales.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por proporcionarme la educación para crecer y por permitirme ser parte de tan magnífica institución.

Al Ing. Hugo Alberto Durán Cortés y al Dr. Fabricio Espejel Ayala por su amistad, apoyo y conocimiento aportado.

Agradezco profundamente los valiosos comentarios y observaciones de mis sinodales: Dr. Armando Ortiz Prado, Dr. Víctor Hugo Jacobo Armendáriz y a la Dra. Rosa María Ramírez Zamora.

Un agradecimiento muy especial al Dr. Rafael Schouwenaars por su paciencia y enseñanzas.

# Índice

Prólogo	5
Objetivo	6
Capítulo 1. Introducción	7
1.1. Valorización de desechos industriales	7
1.2. Uso del lodo (Residuo de potabilización) en la elaboración de material para construcción	8
Capítulo 2. Antecedentes	13
2.1. Características generales del proceso de potabilización de agua	13
2.2. Descripción general del proceso de operación de una planta potabilizadora	14
2.2.1 Coagulación-Floculación	14
2.2.2 Sedimentación	15
2.3. Definición de Lodo	16
2.3.1. Diferentes tipos de Lodos	16
2.3.2. Biosólidos	17
2.3.3. Características de los Lodos	18
2.4. Cerámicos	19
2.4.1. Silicatos	19
2.4.2. Arcillas	20
2.5. Sólidos Celulares	22
2.5.1. Estructuras de los Sólidos Celulares	23
2.5.2. Propiedades de los Sólidos Celulares	23
2.5.3. Aplicaciones de los Sólidos Celulares	25
2.6. Cerámicos Celulares	26
2.6.1. Fabricación de Cerámicos Celulares	27
2.7. Sólidos Porosos	28
2.8. Características Generales de los ladrillos	29
2.9.1. Proceso de fabricación	33
2.9. Técnicas de caracterización	34
2.9.1. Ensayo de compresión	34

2.9.2. Difracción de Rayos-X	36
2.9.3. Microscopia Petrográfica	38
Capítulo 3. Desarrollo experimental	41
3.1. Elaboración del molde	41
3.2. Elaboración de probetas	43
3.3. Proceso de cocción	43
3.4. Obtención de la densidad, porosidad y absorción de agua	44
3.5. Ensayo de compresión	46
3.6. Láminas delgadas y difracción de Rayos-X	47
Capítulo 4. Resultados	48
4.1. Composición 30-70 (lodo-arcilla), temperatura 1050°C	48
4.2. Composición 45-55 (lodo-arcilla), temperatura 1050°C	49
4.3. Composición 60-40 (lodo-arcilla), temperatura 1050°C	51
4.4. Composición 30-70 (lodo-arcilla), temperatura 1150°C	52
4.5. Composición 45-55 (lodo-arcilla), temperatura 1150°C	54
4.6. Composición 60-40 (lodo-arcilla), temperatura 1150°C	57
4.7. Composición 30-70 (lodo-arcilla), temperatura 1200°C	59
4.8. Composición 45-55 (lodo-arcilla), temperatura 1200°C	61
4.9. Composición 60-40 (lodo-arcilla), temperatura 1200°C	64
Capítulo 5. Discusión	70
5.1. Consideraciones que se deben tomar en cuenta en el proceso de fabricación.	70
5.2. Inconvenientes para calcular las propiedades intensivas	70
5.3. Problemática para el cálculo de la porosidad	74
5.4. Comportamiento Mecánico	76
5.5. Efecto en el uso de molde	77
5.6. Análisis de datos	78
Conclusiones	81
Referencias bibliográficas	82

## Prólogo

La presente tesis forma parte de un proyecto multidisciplinario en donde intervienen la Facultad de Ingeniería y el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México que tiene como principal objetivo la obtención de un material cerámico celular con características mecánicas de resistencia a la compresión extraordinarias a partir de una mezcla de arcilla y lodo. Este trabajo consiste en una parte exploratoria y preliminar.

La realización de la fase experimental consistió en la obtención del material y las caracterización de las propiedades de éste incluyendo pruebas mecánicas. Se llevó a cabo en las instalaciones de los laboratorios del Instituto de Ingeniería y de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería, dentro de la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales (UDIATEM). El trabajo de Tesis fue dirigido por el Doctor Rafael Schouwenaars Franssens.

El trabajo se divide en cinco capítulos. En el primero se explica brevemente y a manera de introducción algunos conceptos relacionados con el estudio del material trabajado. En el capítulo dos se analizan algunos antecedentes teóricos relacionados con el origen del material, características, aplicaciones y técnicas de caracterización, cuya correcta aplicación es fundamental para el análisis de los resultados que se obtendrán a partir del proceso experimental que se explicará a detalle en el capítulo tres.

Los resultados obtenidos a partir de la experimentación se muestran en el capítulo cuatro. Destacan las propiedades mecánicas que se consideran importantes en materiales de construcción. También se encuentran los resultados obtenidos por cada una de las técnicas de caracterización mencionadas en el capítulo anterior. Seguido a esto, el capítulo cinco contiene el análisis e interpretación de los resultados. Se enfatiza en los parámetros que influyen durante el proceso de fabricación y el comportamiento del material. Por último se presentan las conclusiones generadas del trabajo de la tesis.

### **Objetivo**

Para disminuir la excesiva acumulación de lodo, desecho obtenido como resultado del proceso de potabilización de agua, esta tesis tiene como objetivo: “Explorar las condiciones óptimas para la fabricación de un cerámico celular mediante la mezcla de arcilla y lodo y con esto dotar a las investigaciones futuras de una guía que permita optimizar el proceso de producción, con la finalidad de lograr la obtención de un nuevo material con características extraordinarias para su aplicación, en la industria de la construcción como en otras”.

## Capítulo 1. Introducción

### 1.1 Valorización de desechos industriales

La enorme cantidad de residuos industriales que genera la sociedad es un problema con importante connotación económica, implicaciones ambientales y ecológicas y con frecuencia un tema sanitario. Es por esto que la valoración de desechos industriales es un tema amplio y de gran interés que ha estado sujeto a constante investigación debido a que son una fuente de contaminación. Estos estudios abarcan industrias como la agrícola, la petrolera, tratamiento de aguas y minera.

Dentro de los ejemplos a citar, en la mayor refinería de petróleo en México en Cadereyta Nuevo León, el residuo más importante que se genera es el coque de petróleo (3000 toneladas por día). Investigaciones realizadas por Ramírez Zamora *et al.* (2000) y Schouwenaars *et al.* (2004) estudiaron la factibilidad de reutilizar el coque de petróleo, con alto contenido de azufre, para la producción de carbón activado y utilizar el coque en el tratamiento de agua (eliminación de metales pesados y fenol). En estas investigaciones, se realizó la caracterización físico-química y las pruebas de absorción de plata con cinco diferentes absorbentes: coque bruto de petróleo, tres coques activados mediante activación química con  $H_3PO_4$ , NaOH y  $ZnCl_2$  como agentes activadores químicos y, un agente comercial activador de carbono (LQ1000).

Se determinó que el coque activado con  $H_3PO_4$  presentó una mayor capacidad de absorción de mercurio y plata. Con lo anterior se demostró que el proceso es muy prometedor para la producción de carbón activado destinado a la eliminación de metales pesados presentes en aguas residuales.

Otra investigación sobre la utilización de residuos realizada por los autores antes mencionados fue encaminada a optimizar, a través de la Metodología de Superficie de Respuesta, las condiciones del proceso de elaboración de materiales cerámicos mediante la utilización de lodos generados en una planta potabilizadora mezclados con arcilla para elaborar ladrillos (Ramírez Zamora *et al.*, 2008).

El análisis de resultados en este estudio permitió determinar que la optimización adicional es posible debido a que se obtuvo un ladrillo de baja densidad y propiedades mecánicas similares a las de un producto comercial.

El gran interés en la valorización de este tipo de residuos es principalmente debido a su gran cantidad generada. En la Planta Potabilizadora “Los Berros” perteneciente al

sistema Cutzamala, se estima una generación de hasta 14,451 toneladas por año (Ramírez Zamora, *et al.*, 2008).

## 1.2 Uso del lodo (Residuo de potabilización) en la elaboración de material para construcción

Por las características de este tipo de residuos, compuestos principalmente por hidróxidos de aluminio precipitados (Espejel, 2007), se puede plantear la posibilidad de ser reutilizados en diversas aplicaciones industriales. Una de ellas es la industria de la construcción. A continuación se describen algunos estudios relacionados a la utilización de este tipo de residuos.

### Fabricación de materiales cerámicos para la construcción a partir de lodo generado en una estación de tratamiento de agua potable (Cerdeño, 2006)

En un estudio realizado por el Departamento de Materiales de Construcción de la Asociación para la Investigación y Desarrollo Industrial de los Recursos Naturales (AITEMIN) se utilizó lodo generado en una Estación de Tratamiento de Aguas Potables en Asturias, como materia prima en la fabricación de productos cerámicos. El análisis químico y mineralógico del lodo indicó que está compuesto en un 75% de minerales arcillosos y el resto en minerales calcáreos (calcita), cuarzo y hasta 2.5% de materia orgánica (Cerdeño, 2006).

En ese estudio se elaboraron probetas con técnicas y equipos similares a los usados en la industria cerámica. Se realizaron mezclas de lodo y arcilla empleada comúnmente en la fabricación de materiales cerámicos para la construcción.

Se llegó a una proporción de 2% del lodo y el resto de arcilla. Las características que cumplieron estos especímenes se muestran a continuación y cumplen con la Norma Española UNE-EN 771-1:2003 titulada: Especificaciones de piezas para fábrica de albañilería. Parte 1: Piezas de arcilla cocida.

Tabla 1.1 Especificaciones de piezas para fábrica de albañilería: Piezas de arcilla cocida (UNE-EN 771-1:2003 ).

Parámetro	Valores
Dimensiones (mm)	240x90x120
Densidad aparente( $g/cm^3$ )	0.76±0.08
Densidad absoluta( $g/cm^3$ )	1.88±0.19
Resistencia a la compresión (MPa)	6.6
Adherencia (MPa)	0.15
Absorción de agua (%)	6

### Uso de lodo para la elaboración de agregados para la construcción incluyendo ladrillo (Weng, *et al.*, 2003)

En este estudio se evaluaron ladrillos fabricados con lodo seco proveniente de 34 plantas de tratamiento de aguas residuales en Taiwán. Debido al volumen de desechos generados anualmente de aproximadamente 0.67 millones de toneladas, se intentó darle una utilidad a este tipo de residuos cada vez más difícil encontrar lugares adecuados para su disposición final en rellenos sanitarios. Además, con esta tecnología se logró la inmovilización de metales pesados de la matriz, oxidación de materia orgánica y reducción de patógenos debido al proceso de cocción.

Las muestras de lodo fueron tomadas de un secador, a una temperatura de 250 °C. La arcilla se obtuvo de una fábrica de ladrillos local. La Tabla 1.2 muestra las características de lodo deshidratado, lodo seco y la arcilla utilizada para la fabricación.

Tabla 1.2. Características de lodo y arcilla

Características	Lodo deshidratado	Lodo seco	Arcilla
pH	7.19	7.27	8.09
Densidad ( $g/cm^3$ )	1.16	1.75	2.52
Materia volátil (combustión a $550\pm 50^\circ C$ por 3 h) (% peso)	56.9	61.3	5.9
Contenido de humedad (%)	84.1	41.0	1.4
Pérdida por ignición ( $800\pm 50^\circ C$ por 3 h) (% peso)	94.6	76.6	7.9
Metales (mg/kg)			
Cd	3	5	< 0.1
Cr	537	1713	16
Cu	29	212	85
Co	10	24	5
Fe	5265	18 070	8530
Ni	167	1131	20
Pb	3	35	< 0.1
Zn	264	628	98

El proceso de fabricación de las muestras, inició con la mezcla de diferentes proporciones de lodo. Se usó una máquina de vacío para extraer el aire contenido en la mezcla para evitar cuarteaduras durante el proceso de cocción. La mezcla fue vaciada en

una serie de moldes con las siguientes dimensiones: longitud 230 mm, ancho 110 mm y espesor 60 mm. Después de 24 horas de reposo y otras 24 horas de secado a 103°C, se sometieron a un proceso de cocción en un intervalo de temperatura de 880, 920, 960 y 1000°C por 6 h y un contenido de lodo de 0, 10, 20, 30 y 40%.

Para fines de análisis de los resultados, la Tabla 1.3 presenta la clasificación de los ladrillos, de acuerdo a sus propiedades físicas.

Tabla 1.3 Criterios para ladrillos (CNA, 1999)

Característica	Ladrillo de 1era clase	Ladrillo de 2da clase
Densidad aparente ( $g/cm^3$ )	1.8-2.0	1.8-2.0
Contracción a la cocción (%)	8, máximo	8, máximo
Peso perdido en la ignición (%)	15, máximo	15, máximo
Absorción de agua (%)	15, máximo	19, máximo
Resistencia a la compresión (MPa)	14.71, mínimo	9.81, mínimo

Se determinó que el contenido óptimo de humedad (COH) fue del 23%. Este parámetro es muy importante ya que afecta el desempeño del ladrillo.

Las pruebas realizadas para determinar la absorción de agua en las diferentes mezclas muestran que el porcentaje de absorción de agua se incrementó a menor temperatura de cocción y mayor cantidad de lodo. Cuando la mezcla presentó menos del 15% de lodo y fue cocido a una temperatura mayor de 960 °C, el porcentaje de absorción de agua corresponde a ladrillos de primera clase. Por otro lado, con un contenido de 30% de lodo a 1000°C, el ladrillo obtenido se puede clasificar como de segunda clase.

Respecto al parámetro contracción por la cocción, a mayor temperatura y porcentaje de lodo en la mezcla esta aumenta. Normalmente para un ladrillo convencional este porcentaje debe ser menor a 8%. Los ladrillos elaborados con 10, 20 y 30% de lodo cocidos a 880 y 920° C cumplen con este parámetro. Incluso, el ladrillo elaborado con 40% de lodo y cocido a 880°C presentó una contracción por cocción menor al 8%.

Entre mayor fue el contenido de lodo incorporado, mayor fue el % de pérdidas por ignición. Tomando en cuenta que el límite máximo es del 15%, con menos de 10 % de lodo en la mezcla se cumple este criterio. El valor de densidad de los materiales elaborados resultó ser inversamente proporcional a la cantidad de lodo contenido en las mezclas. Este resultado está estrechamente relacionado con la cantidad de agua absorbida. La temperatura de cocción también puede afectar la densidad de las partículas de los ladrillos. Los resultados muestran que el aumento de la temperatura resulta en un aumento de la densidad de estas partículas.

La resistencia a la compresión indica que depende en gran medida de la cantidad de lodo en el ladrillo y la temperatura de cocción. Con 10 % de lodo añadido a la pieza cerámica y cocida a 1000°C, la resistencia mecánica puede ser tan alta como los ladrillos convencionales. Con un 20% de lodo y una cocción también a 1000° C, se obtuvo un ladrillo de primera clase. Un ladrillo elaborado con un 30% de lodo y cocido a 1000°C, el producto obtenido se pudo clasificar de segunda clase.

Este trabajo demostró las condiciones adecuadas para el uso de lodo seco como sustituto de arcilla para producir un ladrillo de calidad. La proporción de lodo en la mezcla y la temperatura de cocción son dos factores claves que afectan la calidad de los ladrillos. En conclusión, la proporción recomendada de lodo en el ladrillo es de 10%, con un contenido óptimo de humedad del 24% y una temperatura de cocción entre 880°C y 960°C.

### **Uso de cenizas obtenidas a partir de lodos de depuración como material para la elaboración de ladrillos (Lin, *et al.*, 2001)**

Realizaron pruebas con la ceniza resultante de la incineración del lodo obtenido de plantas tratadoras de agua. La mezcla de la ceniza con la arcilla se realizó en proporciones de 0, 10, 20, 30, 40 y 50%; y temperaturas de cocción de 950, 1000 y 1050°C.

El COH determinado en este caso fue de 13 a 15%. Los resultados obtenidos en relación a la absorción de agua muestran que este se incrementa proporcionalmente respecto a la cantidad de cenizas añadida y se reduce al aumentar la temperatura de cocción. El contenido óptimo de ceniza para un ladrillo, para que cumpla las características de primera clase respecto al valor de absorción de agua, fue de menos del 25% cocido a 1050 °C.

El valor de porcentaje de contracción por la cocción presentó una relación lineal con la proporción de ceniza a partir del 10 % y hasta el 50% de ceniza añadida. El aumento de la temperatura generó un incremento en el porcentaje de contracción. Un ladrillo de buena calidad se obtuvo con las siguientes características: un contenido de ceniza mayor al 15% y cocido a 950 °C; un contenido de ceniza mayor al 20% y cocido a 1000°C; un contenido de ceniza mayor al 30% y cocido a 1050°C.

El aumento de porcentaje de ceniza produjo una disminución en la pérdida de peso del ladrillo aunque todas las muestras cumplieron con el criterio de pérdida de peso. La densidad aparente de los ladrillos resultó ser inversamente proporcional a la cantidad de cenizas añadida en la mezcla.

Los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión muestran que el contenido óptimo de ceniza fue del 20% y la temperatura de cocción fue de 1000° C, para obtener una resistencia mayor a 24.5 MPa (Chang, *et al.*, 2003). Cabe destacar que todos

los materiales cumplieron con las características de los materiales de segunda clase respecto al valor de resistencia a la compresión, incluso los elaborados con 50% de cenizas.

### Capítulo 2. Antecedentes

En el presente capítulo se abordan los conceptos básicos del proceso de potabilización de agua, enfatizando aquellos conceptos en los que la obtención del lodo está directamente relacionada. También se mencionan los diferentes tipos de lodos para entender el efecto que presentarían al utilizarlos como materia prima en la elaboración de materiales cerámicos.

Además se lleva a cabo la descripción de los cerámicos, los silicatos y específicamente de las arcillas como principales materiales conformadores de los materiales cerámicos estudiados. Los sólidos celulares y en especial los cerámicos celulares son temas que están directamente relacionados con el tipo de material obtenido. Al respecto se mencionan cuestiones referentes a las propiedades de estos materiales como su estructura, aplicaciones y métodos de fabricación. Debido a las características estructurales del material a estudiar se hará una descripción general de los sólidos porosos. Las características de los ladrillos y de su proceso de fabricación son importantes mencionar ya que estos sirven de guía para evaluar la posible aplicación como material estructural en la industria de la construcción. Por último se describirán técnicas de caracterización como el ensayo de compresión para determinar su comportamiento mecánico y la resistencia del material. La Difracción de Rayos-X (DRX) permitirá identificar los compuestos formados. Además, la microscopía petrográfica complementará esta caracterización mineralógica, así como permitirá observar la porosidad formada en los materiales.

#### 2.1 Características generales del proceso de potabilización de agua

El agua conforma tres cuartas partes de la superficie de la Tierra localizada principalmente en mares, lagos, ríos, manantiales, etc. Por otro lado, constituyen en su mayoría el peso de todas las plantas y animales incluyendo al ser humano. Sin embargo esta agua puede contener componentes disueltos o suspendidos. De aquí el hecho de que no toda el agua puede ser apta para el consumo humano. Por ejemplo, el agua de mar contiene una cantidad importante de minerales salinos que la hacen inadecuada para su consumo. Para el caso del agua de mar, se debe llevar a cabo el proceso de desalinización para disminuir el contenido de sales disueltas y hacerla adecuada para su consumo. En el caso del agua denominada como dulce, el proceso para convertirla adecuada para su consumo humano se denomina potabilización. El proceso de potabilización de agua es la ejecución de una serie de operaciones unitarias y procesos encaminados a producir agua apta para el consumo humano que no contenga contaminantes perjudiciales con características químicas y microbiológicas.

El suministro de agua potable implica diversos aspectos entre los que se encuentra la adecuación de su calidad para consumo humano. Para ello se requiere encontrar la forma más conveniente de hacerlo, tanto desde el punto de vista técnico como del económico. Lo más común es efectuar el suministro de agua a partir de las denominadas fuentes convencionales, compuestas por las aguas subterráneas (acuíferos) y las superficiales como ríos, lagos y presas (CNA, 2007).

### **2.2 Descripción general del proceso de operación de una planta potabilizadora**

En el caso del denominado Tratamiento Primario Avanzado (TPA), este proceso inicia con la recepción de agua cruda en un tanque de almacenamiento. Posteriormente el agua es bombeada a la caja de distribución de los canales Parshall que son una estructura hidráulica que permite medir la cantidad de agua que pasa por una sección de un canal (Pedroza, 2001). En la mayoría de los casos sólo se usa para hacer una mezcla rápida. En este caso se hace precloración y se agrega sulfato de aluminio en forma líquida, aprovechando la transición de canal a tubería para una buena dilución antes de su llegada a los tanques de floculación. Una vez agregado floculante, el líquido se pasa al tanque de floculación hidráulica en donde por medio de un movimiento de agitación lenta, se propicia la formación de flóculos, posteriormente a esto el agua pasa al tanque de sedimentación y después a un sistema de filtración y cloración en línea, para finalmente ser bombeado a la red de distribución. Los lodos recolectados en los tanques de sedimentación son distribuidos a unos concentradores de lodos y posteriormente son espesados y transferidos a una laguna de almacenamiento. La Figura 2.1 muestra el tren de tratamiento de una planta potabilizadora.

#### **2.2.1 Coagulación-Floculación**

Ya que las aguas superficiales son generalmente más turbias que las aguas subterráneas y contienen un mayor número de sólidos suspendidos y bacterias, es necesario aplicar coagulantes para mover los sólidos suspendidos generando como resultado lodos. La coagulación-floculación es el proceso mediante el cual se añaden al agua compuestos químicos, sulfato de aluminio  $Al_2(SO_4)_3$  y los policloruros de aluminio (PACs), principalmente para reducir las fuerzas que separan a los sólidos suspendidos menores a 10  $\mu m$  (orgánicos e inorgánicos) para que formen aglomerados o flóculos.

Este proceso se lleva a cabo en dos etapas. La primera es denominada coagulación. Aquí las fuerzas interparticulares responsables de la estabilidad de los coloides, son reducidas o anuladas por la adición de reactivos apropiados. La segunda etapa se denomina floculación. En esta las colisiones entre las partículas originadas como consecuencia de la agitación favorecen el crecimiento de flóculos que posteriormente son eliminados mediante la sedimentación. En la práctica, la primera etapa se realiza mediante un mezclado rápido para dispersar el coagulante y favorecer su contacto con las partículas en

suspensión. La segunda se efectúa en forma lenta con el fin de promover la formación y el aumento de tamaño y/o densidad de los flóculos formados. Estos últimos son eliminados finalmente del agua por medios físicos como la sedimentación, flotación o filtración (CNA, 2007). Los contaminantes que se eliminan por coagulación son aquellos que poseen un alto peso molecular y son hidrófobos. La coagulación-floculación elimina parcialmente compuestos orgánicos solubles.

### 2.2.2 Sedimentación

La sedimentación o clarificación es una operación unitaria diseñada para concentrar y remover sólidos suspendidos, este proceso actúa por gravedad debido al peso y tamaño de la partícula. El sedimentador es la estructura que reduce la velocidad del agua para que se puedan realizar el proceso de sedimentación, esto incluye la factibilidad para recoger y descargar los lodos que se crean, así como concentrarlos para facilitar su manejo, tratamiento y disposición. Puede ser de dos tipos: simple o secundaria. La sedimentación simple se emplea para retirar sólidos más pesados sin someterlo a otro proceso, ya que mientras mayor sea el tiempo de reposo mayor será el asentamiento de estos sólidos, por otra parte, la sedimentación secundaria ocurre cuando se aplica un coagulante para producir el asiento de la materia sólida contenida en el agua.

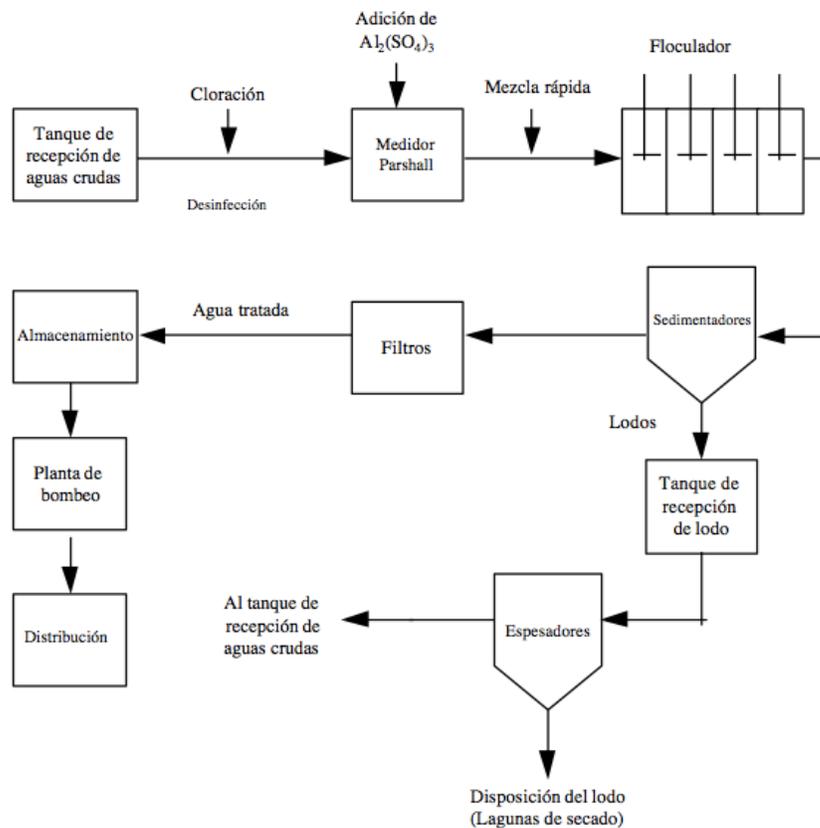


Figura 2.1 Tren de tratamiento de una planta potabilizadora

### 2.3 Definición de Lodo

Las actividades de desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, así como en las correspondientes a la operación de las plantas potabilizadoras y de plantas de tratamiento de aguas residuales generan lodos (NOM-004-SEMARNAT-2002).

De acuerdo a la fuente de suministro de agua se generarán diferentes tipos de lodos de acuerdo a sus contaminantes. Dentro de estos contaminantes se encuentran:

- Partículas que se decantan de forma natural o provienen del tratamiento físico-químico.
- Exceso de microorganismos procedentes del tratamiento de la materia orgánica disuelta.
- Material mineral que no es biodegradable.

Todos estos productos se suspenden en diferentes concentraciones y el líquido resultante se denomina “lodo” (SFN<sup>1</sup>, 2003).

#### 2.3.1 Diferentes tipos de Lodos

Este tipo de residuos pueden clasificarse de la siguiente manera (SFN, 2003):

- Lodo Primario.

El lodo primario proviene del proceso de sedimentación en una planta de tratamiento. Se forma a partir de partículas grandes y/o densas y tiene un bajo nivel de contenido de sólidos volátiles.

- Lodos Biológicos.

Proviene del tratamiento biológico del agua residual. Se origina de una mezcla de microorganismos. Estos son principalmente bacterias que forman flóculos bacterianos a través de la síntesis de exo-polímeros. Una simple decantación en el clarificador separa fácilmente los flóculos bacterianos del agua tratada.

- Lodos mezclados.

Son una mezcla de lodo primario y lodo biológico con una relación de 35% a 45% de

---

<sup>1</sup> SNF: SNF Group. Francia

lodo primario y de 65% a 55% de lodo biológico. Este tipo de mezcla permite una fácil deshidratación por las propiedades intrínsecas del mismo que se encuentra entre los otros dos tipos.

- Lodos digeridos.

El lodo digerido proviene de una etapa biológica de estabilización. Los lodos sometidos a esta estabilización son lodos orgánicos o mixtos. Se puede realizar bajo diferentes temperaturas (mesófilico o termófilo) y con o sin presencia de oxígeno (aerobia o anaerobica). El objetivo de este proceso es modificar las propiedades del lodo para su mejor manipulación.

- Lodos fisicoquímicos.

Este tipo de lodo es resultado de un tratamiento fisicoquímico del agua. Está compuesto por flóculos originados mediante los procesos de coagulación-floculación y sedimentación usando agentes químicos como el sulfato de aluminio o el cloruro férrico. Las características de estos lodos es el resultado directo de los productos químicos utilizados (coagulantes orgánicos o minerales) y por supuesto de los contaminantes en el agua. Los lodos químicos son los sólidos generados en los procesos de tratamiento de agua por la acción de un agente químico al combinarse con las impurezas del agua. Otros residuos considerados como lodos fisicoquímicos son los provenientes de unidades como filtros y sedimentadores (RAS<sup>2</sup>, 2000).

- Lodos Minerales.

Este nombre se le da a los lodos producidos durante el procesamiento de minerales tales como minas, canteras o los procesos de minería. Su naturaleza es de partículas minerales de diferentes tamaños, incluyendo arcillas. Aunque existen distintos tipos de lodos como se mencionó, el presente trabajo referirá a los lodos fisicoquímicos.

### **2.3.2 Biosólidos**

Los biosólidos son el producto originado después de un proceso de estabilización de lodos provenientes del tratamiento de las aguas residuales. La estabilización se realiza para reducir su nivel de patogenicidad, así como la susceptibilidad a la descomposición.

---

<sup>2</sup> RAS: Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. Colombia

Históricamente conocida como lodos de aguas residuales, los biosólidos son el material sólido orgánico producido a partir de procesos de tratamiento de aguas residuales privadas o comunitarias que pueden ser provechosamente utilizado para otros fines (EPA<sup>3</sup>, 1999).

### 2.3.3 Características de los Lodos

Se ha considerado que los lodos por sus características propias, o por las adquiridas después de un proceso de estabilización, pueden ser susceptibles de aprovechamiento. Para esto deben cumplir con los límites máximos permisibles de contaminantes establecidos en Norma Oficial Mexicana o en su caso se dispongan en forma definitiva como residuos no peligrosos. Lo anterior para mitigar sus efectos contaminantes hacia el medio ambiente y proteger a la población en general (NOM-004-SEMARNAT-2002). En un estudio realizado previamente sobre los lodos residuales de la planta potabilizadora “Los Berros” se presentan las características del lodo, el cual está constituido principalmente por sólidos fijos, y destacando el aluminio, hierro y sílice. Además, se observa una baja concentración de sólidos volátiles que muestra la escasa presencia de materia orgánica.

Tabla 2.1 Características de lodo producido en la planta potabilizadora de Los Berros (IMTA<sup>4</sup>, 2005).

Muestra	pH	Al(mg/L)	Fe(mg/L)	Si(mg/L)	ST(g/L)	STF(g/L)	STV(g/L)
1	7.14	50.0	~	46.0	0.575	0.47	0.105
2	7.09	~	~	~	0.923	~	~
3	7.15	23.0	5.61	19.0	0.4425	~	~
4	6.51	157.0	34.38	98.90	2.025	2.3	0

Al=Aluminio; Fe=Hierro; Si=Sílice ; ST=Sólidos Totales; STF=Sólidos totales fijos; STV=Sólidos totales volátiles; ~ No determinado.

En este cuadro se puede apreciar que la composición de estos residuos tiene una gran cantidad de sílice, así como materiales como aluminio y el hierro.

<sup>3</sup> EPA: *Environmental Protection Agency Municipal and Industrial Solid Waste Division*

<sup>4</sup> IMTA: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Jiutepec.

### 2.4 Cerámicos

El término “cerámico” proviene de la palabra griega “keramikos” que significa “cosa quemada”. Este término se utilizó para indicar que las propiedades deseadas de estos materiales se alcanzan después de un tratamiento térmico a alta temperatura que se denomina cocción (Callister, 2003). Los materiales cerámicos son compuestos químicos inorgánicos formados generalmente por elementos metálicos y no metálicos. Debido a que este tipo de materiales tienen una amplia gama de propiedades mecánicas y físicas las aplicaciones varían desde productos de alfarería, fabricación de ladrillos y azulejos, utensilios de cocina, tubos de albañilería, vidrio, materiales refractarios, fibras y abrasivos.

Por su enlace interatómico, que puede ser de carácter iónico o covalente, predominando el enlace iónico, los materiales cerámicos por lo general son duros, frágiles, con un alto punto de fusión, baja conductividad eléctrica y térmica, buena estabilidad química y térmica y elevada resistencia mecánica. Teóricamente la resistencia de los materiales cerámicos debe ser más alta que la de los metales, debido a que los enlaces atómicos que los constituyen son más fuertes que los enlaces metálicos. Comparado con otros, la mayoría de los materiales cerámicos son más ligeros que los metales y más pesados que los polímeros. Los puntos de fusión son más altos que la de los metales. La conductividad térmica y eléctrica así como los coeficientes de expansión son mucho menores que en los metales (Groover, 2004).

Existen tantas clasificaciones de los materiales cerámicos como criterios que se adopten para las mismas. Una clasificación más generalizada es la basada de acuerdo al proceso que son sometidos, por lo que pueden clasificarse de la siguiente forma:

- Cerámicos ordinarios o tradicionales: se utilizan a temperatura ambiente.
- Cerámicos refractarios: Se utilizan a temperaturas elevadas, compuestos fundamentalmente de sílice, alúmina y algunos óxidos metálicos.

#### 2.4.1 Silicatos

Los silicatos son el grupo de minerales de mayor abundancia pues constituyen más del 95% de la corteza terrestre. Además pertenecen al grupo de más importancia geológica por ser petrogénicos, es decir, los minerales que forman las rocas. Todos los silicatos están compuestos por silicio y oxígeno. Estos elementos pueden estar acompañados de otros entre los que destacan aluminio, hierro, magnesio y calcio. Los silicatos forman la mayoría de las rocas, arenas y arcillas.

A menudo los silicatos no son considerados iónicos puesto que tienen un significativo carácter covalente en los enlaces Si-O, los cuales son direccionales y relativamente fuertes

(Callister, 2003). Este es el caso del sílice que químicamente es el silicato más sencillo y también es llamado dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) siendo una de las principales materias primas para la elaboración de cerámicos. Los tetraedros de silicio-oxígeno (Figura 2.2) son las unidades estructurales fundamentales de la sílice.

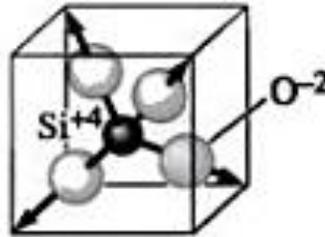


Figura 2.2. Tetraedro silicio-oxígeno ( $\text{SiO}_4^{4-}$ ).

El sílice es el principal componente del vidrio y otros materiales cerámicos incluyendo los refractarios y los abrasivos. Este material se encuentra disponible en la naturaleza en varias formas como lo es el cuarzo, la forma cristalina del sílice y la más importante. Debido a la abundante presencia de la arena, el sílice es un material relativamente fácil de obtener y por lo tanto económico. Otras formas menos comunes son la tridimita, la cristobalita, la sílice amorfa, el pedernal, el ópalo y las diatomeas (Mari, 1998).

#### 2.4.2 Arcillas

Las arcillas son el producto de la disgregación parcial o total de rocas ígneas por acción del agua o agentes atmosféricos, como el dióxido de carbono, la temperatura y la presión durante muy largos periodos de tiempo (miles de años). Por esta razón el término “arcilla” no corresponde a una composición química o mineralógica definida. Las arcillas son mezclas de diversas especies minerales y su composición depende de la roca matriz y el proceso de meteorización (Mari, 1998). Las arcillas más comunes se basan en el mineral denominado caolinita, otras arcillas varían en termino de composición de los ingredientes básicos y por la adición de otros elementos como el magnesio, el sodio y el potasio.

Las arcillas consisten en finas partículas de silicato de aluminio hidratado que se convierten en una sustancia plástica y fácil de moldear cuando se mezcla con agua. Las impurezas contenidas en estos materiales dan origen a diferentes familias de arcillas. Las impurezas de origen mineral presentes en las arcillas (“de origen secundario” por ser de origen de meteorización geológica, y de cuarzo libre, que tiene el mismo origen), también contiene en proporción variable de minerales de “origen primario”. Estos últimos son restos de rocas ígneas originales como feldespatos, micas, cuarzo y otros. Mari (1998) hace un

listado de arcillas más comunes y describe su contenido en masa de minerales y materia orgánica en cada una de ellas, como se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Composición química típica de distintas arcillas, % en masa (Mari, 1998).

	( $SiO_2$ )	( $Al_2O_3$ )	( $Fe_2O_3$ )	( $CaO$ )	( $MgO$ )	( $Na_2O$ + $K_2O$ )	( $TiO_2$ )	Pérdida por calcificación
“China clay” (Inglaterra)	48.3	37.6	0.5	0.1	-	1.6	-	12.0
“Ball clay” (USA)	46.9	33.2	2.0	0.3	0.4	0.7	-	16.5
Arcilla refractaria (USA)	42.8	39.7	1.1	0.1	0.3	0.2	2.2	13.8
Arcilla para azulejo (España)	43.7	15.0	4.84	13.2	2.5	4.7	0.5	15.03
Caolín para porcelana	48.0	36.0	0.6	-	-	2.0	0.4	12.2
Arcilla roja para cañería	60.0	21.0	6.0	0.5	1.5	4.0	-	7.0
Arcilla roja para ladrillos comunes	35- 65	10-25	5-8	5-10	2-8	2-6	1-2	10-15
Montmori- lonita (Francia)	51.1	19.7	0.8	1.6	3.2	0.1	-	23.0

( $SiO_2$ )=Sílice; ( $Al_2O_3$ )=Alúmina; ( $Fe_2O_3$ )=Óxido de hierro; ( $CaO$ )=Óxido de calcio;  
( $MgO$ )=Óxido de magnesio; ( $Na_2O+K_2O$ ) =Óxido de Sodio+ Óxido de potasio;  
( $TiO_2$ )=Dióxido de titanio.

## 2.5 Sólidos Celulares

La palabra *célula* deriva del latín *cella* que significa “pequeño compartimiento, espacio cerrado”. Específicamente se enfoca a grupos de células. Los sólidos celulares se pueden definir como un material que está compuesto por un conjunto o un ensamble de pequeños compartimientos con bordes o caras sólidas interconectadas (Gibson, 1999). Estos materiales son muy comunes en la naturaleza como por ejemplo, la madera, el corcho, las esponjas y el coral. En la actualidad el hombre ha fabricado sus propios sólidos celulares con materiales orgánicos, cerámicos y metales. Una de las características más importantes de los sólidos celulares es lo que llamamos *densidad relativa*, definida por:

$$\rho = \frac{\rho^*}{\rho_s}$$

donde:

$\rho^*$  = Densidad del material celular.

$\rho_s$  = Densidad del material que forma el sólido.

Los materiales celulares pueden alcanzar densidades relativas del orden de 0.001 en espumas de ultra baja densidad, hasta valores de entre 0.15 y 0.4 para maderas. Gibson y Ashby (1999) se refieren a materiales con una densidad relativa inferior a 0.3 como verdaderos sólidos celulares. Algunos ejemplos de densidades relativas en materiales celulares están dados en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Densidad relativa de algunos materiales celulares.

Material	$\rho$
Espumas especiales de densidad ultra baja	0.001
Espumas poliméricas	0.05-0.20
Corcho	0.14
Madera	0.15-0.40

Casi cualquier material puede ser espumado. Los más comunes y fáciles son los polímeros. Los metales, cerámicos y vidrios pueden ser fabricados en celdas. Según su origen este tipo de materiales pueden clasificarse en:

- Naturales: madera, corcho, esponja, coral y hueso.
- Artificiales: espumas, poliuretano, polietileno, esponjas metálicas, cerámicos celulares y pan.

### 2.5.1 Estructuras de los Sólidos Celulares

La estructura de los materiales celulares es de dos tipos (Figura 2.3). El más simple es el formado por una matriz bidimensional de polígonos que se agrupan para cubrir un área plana, como las celdas hexagonales de las abejas. Por esta razón a estos materiales bidimensionales se denominan panal de abejas o *honeycombs* en inglés. En otras ocasiones las células son poliedros o cuerpos tridimensionales que se agrupan para llenar el espacio como las espumas (Gibson, 1999). Las estructuras de los sólidos celulares a su vez pueden dividirse en dos grupos, celdas abiertas o cerradas. Los materiales de celdas abiertas consisten en una red interconectada de varillas donde el material se encuentra en el borde de las celdas. Las estructuras de celda cerrada están formadas por una red interconectada de placas o cáscaras, aislando cada celda de las adyacentes (Grenestedt, 1999).

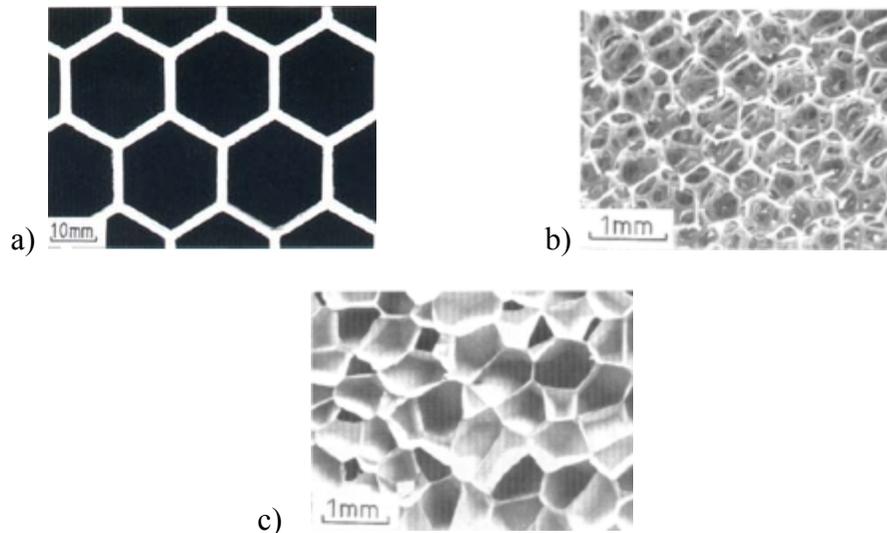


Figura 2.3 Ejemplos de sólidos celulares (Gibson, 1999). a) Sólido bidimensional: b) Sólido tridimensional con celdas abiertas: c) Sólido tridimensional con celdas cerradas

### 2.5.2 Propiedades de los Sólidos Celulares

Los sólidos celulares (cerámicos, polímeros, metales) tienen propiedades que dependen tanto de la topología como del material que está hecho. De las tres clases, las espumas de polímeros son las más ampliamente investigadas y es a partir de estos estudios que se deriva la gran parte de la comprensión actual de estos materiales. Seguido de esto, el avance en las técnicas para la formación de espumas metálicas amplía el conocimiento. De las tres clases, los cerámicos celulares son los menos caracterizados (Scheffler y Colombo, 2005).

Los principios que influyen en las propiedades celulares son comunes en las tres clases. Los tres factores dominantes son:

- Las propiedades del sólido del que está hecha la espuma o el sólido celular.
- La topología (conectividad) y la forma de las celdas.
- La densidad relativa  $\rho^* / \rho_s$  de la espuma o el sólido celular.

Al igual que los sólidos densos los materiales celulares poseen propiedades físicas, mecánicas y térmicas que pueden medirse a través de los mismos métodos. El amplio rango que abarcan las propiedades de estos materiales los hace aptos para cumplir funciones que los sólidos densos o convencionales no son capaces de cumplir.

La Figura 2.4 muestra el rango de cuatro propiedades: la densidad, la conductividad térmica, el módulo de Young y la resistencia a la compresión la barra azul muestra el rango que abarca la propiedad para los sólidos convencionales. La barra roja muestra el rango posible para espumas, este enorme rango en las propiedades crea aplicaciones para espumas que no pueden ser cumplidas por sólidos convencionales. Lo anterior ofrece un campo potencial para la inventiva ingenieril.

Las bajas densidades en estos materiales permiten el diseño de componentes ligeros y rígidos tales como panales, grandes estructuras portátiles y todo tipo de componentes con flotabilidad. La baja conductividad térmica permite un aislamiento térmico seguro y económico. La baja rigidez hace a las espumas ideales para un amplio rango de aplicaciones de amortiguamiento. Por ejemplo, espumas elastoméricas que son los materiales estándares usados para asientos. La baja rigidez y la gran deformación en compresión hace a las espumas atractivas para aplicaciones de absorción de energía.

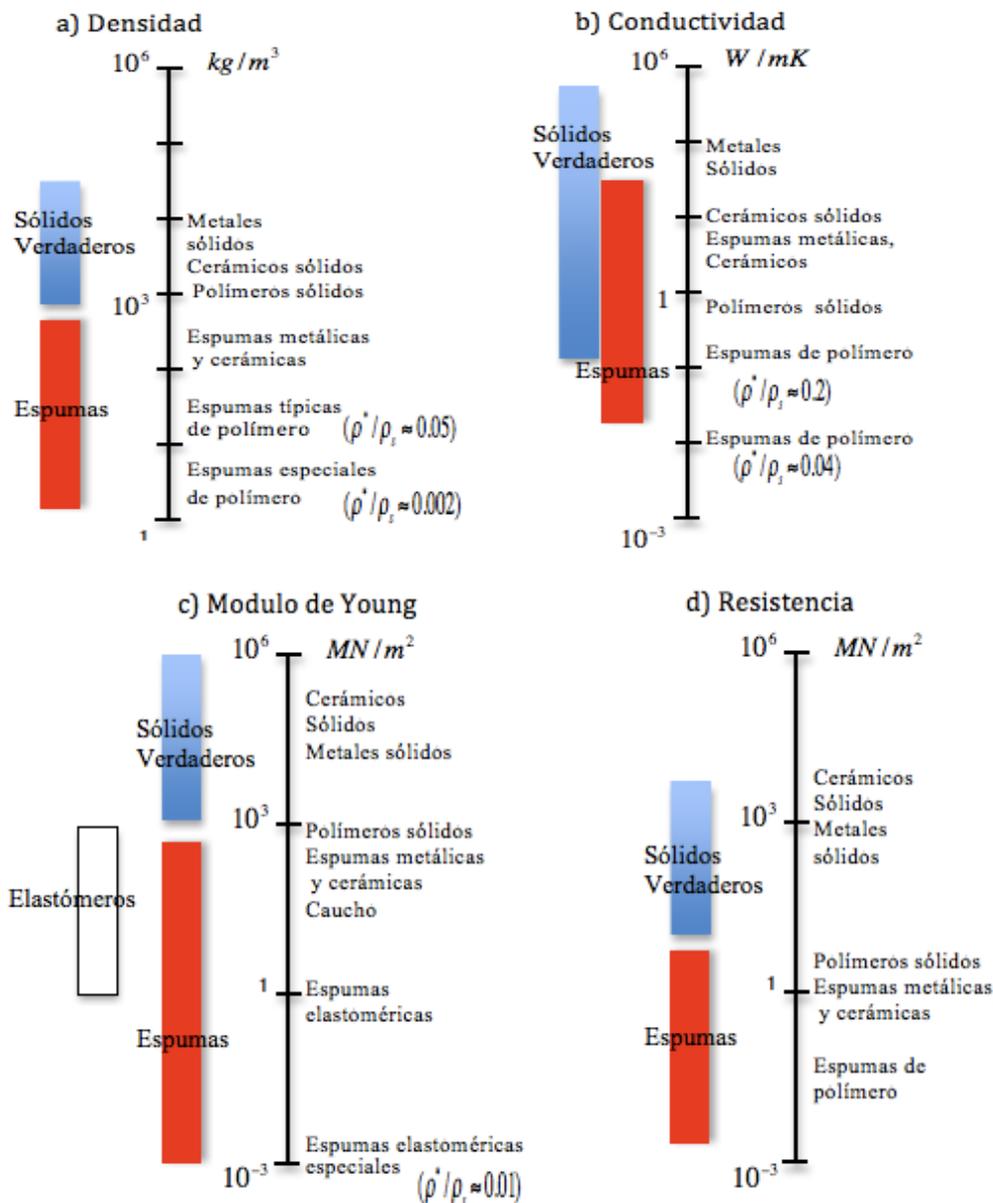


Figura 2.4 Rango de propiedades disponibles (Gibson, 1999). a) densidad, b) conductividad térmica, c) módulo de Young, d) resistencia

### 2.5.3 Aplicaciones de los Sólidos Celulares

Los cuatro diagramas de la Figura 2.4 se relacionan con las cuatro áreas de mayor aplicación de los materiales celulares: aislamiento térmico, empaquetamiento, usos estructurales y de flotabilidad. A continuación se dará una breve explicación de estas cuatro áreas ya mencionadas (Gibson, 1999).

### **a) Aislamiento térmico**

La mayor aplicación para espumas poliméricas o de vidrio son las de aislamiento térmico debido a su bajo coeficiente de conductividad térmica. Esta propiedad se debe al gran volumen de aire contenido en el cuerpo. Productos tan sencillos como las tazas desechables de café o los elaborados aislantes utilizados en cohetes para viajes espaciales explotan esta propiedad. La baja masa los hace aptos para realizar investigaciones a altas y ultra bajas temperaturas ya que requiere menor costo para enfriar y calentar.

### **b) Embalaje**

El segundo mayor uso que se les ha dado a los sólidos celulares es el embalaje o empaquetamiento ya que absorben una gran cantidad de energía. La baja densidad se traduce en empaques ligeros, reduciendo los costos de manipulación y envíos. En la actualidad las espumas más utilizadas para este fin son las hechas de poliestireno, poliuretano y polietileno.

### **c) Estructural**

Muchos materiales celulares que se encuentran en la naturaleza son estructurales: madera, hueso y coral. Todos ellos soportan grandes cargas estáticas y cíclicas por largos periodos de tiempo. De igual forma materiales artificiales como los paneles sándwiches de fibras de vidrio o panales de abeja de aluminio son rígidos y resistentes para cumplir esta función en aviones, vehículos y embarcaciones.

### **d) Flotabilidad**

Los sólidos celulares de celdas cerradas hechas de espumas plásticas se utilizan para el soporte de estructuras flotantes y como flotadores de barcos. Su gran resistencia a la corrosión y oxidación hacen de estos productos una gran alternativa ya que las estructuras de celdas cerrada mantienen la flotabilidad incluso después de que se haya dañado el material.

Debido a que este trabajo se enfoca a la obtención de un material cerámico celular se hará una breve descripción sobre los cerámicos celulares.

## **2.6 Cerámicos Celulares**

Los cerámicos celulares ocurren en la naturaleza tales como piedra pómez, el coral y el hueso. Durante los últimos años ha habido un aumento significativo en el interés en la producción y el uso de materiales cerámicos altamente porosos. Esto está asociado principalmente con la oferta de las propiedades anteriormente mencionadas. Este tipo de materiales comprenden espumas, estructuras de panal, fibras o matrices que incluyen

aplicaciones como filtros, membranas, soportes de catalizadores, aislantes térmicos, materiales refractarios, paneles estructurales de bajo peso (Scheffler y Colombo, 2005).

Como sucede en cualquier material celular, el tamaño celular, la morfología y el grado de interconexión son factores importantes que influyen en las posibles aplicaciones de estos materiales. En estructuras de celda cerrada predominan los usos como aislantes térmicos mientras que las estructuras de celda abierta son necesarias para los usos que implican el transporte de fluidos, tales como filtros y catalizadores.

También dentro de este tipo de materiales podemos encontrar el denominado hormigón celular con densidades aparentes que van desde los  $100 \text{ kg/m}^3$  hasta poco más de  $1600 \text{ kg/m}^3$  (Scheffler y Colombo, 2005).

### 2.6.1 Fabricación de Cerámicos Celulares

El proceso de fabricación de los materiales celulares puede ser muy basto ya que un solo proceso no es lo suficientemente flexible para su fabricación. Esto ha conducido a una gran variedad de rutas siendo desarrolladas y patentadas en muchos países. Sin embargo pueden ser dividido en tres categorías (Scheffler y Colombo, 2005):

**Replicación de espumas de polímeros:** mediante la aplicación de una suspensión cerámica a una matriz polimérica de celda abierta, esta suspensión se seca en el lugar de la plantilla de polímero, siendo ésta quemada y la cerámica sinterizada. Este tipo de proceso da lugar a materiales de celdas muy abiertas que debido a la quema del polímero deja huecos puntuales que reducen las propiedades mecánicas de la espuma final.

**Formación de espumas por agitación mecánica o desprendimiento de gases:** este enfoque produce probablemente la más amplia gama de estructuras celulares y sus propiedades. Son generalmente estructuras menos abiertas que las espumas por replicación. Aunque se considera una gran gama de aplicaciones, muchas están en proceso de desarrollo todavía.

Este método consiste básicamente en dispersar un gas en forma de burbujas en una suspensión cerámica. Hay dos enfoques básicos para lograr esto.

- Incorporar un gas externo mediante la formación de espuma mecánicamente, la inyección de una corriente de gas o la aplicación de un aerosol.
- Evolución o desprendimiento de gas.

**Incorporación de aditivos de sacrificio:** aditivos volátiles o combustibles que se pierden durante la cocción pueden ser incorporados en la cerámica. Un enfoque particular para la formación de cerámicas porosas utiliza almidón como aglutinante y formador de

poros. Otro material orgánico que se utiliza para la formación de espumas es la clara de huevo.

### 2.7 Sólidos Porosos

Los materiales porosos están definidos como sólidos que contienen poros. En general los materiales porosos tienen una porosidad de 0.2-0.95. La porosidad es el factor que indica el volumen de poros con respecto al volumen total. Gibson y Ashby (1999) se refieren a materiales con una densidad relativa inferior a 0.3 como verdaderos sólidos celulares, diferenciándolos así de los materiales porosos (Figura 2.5).

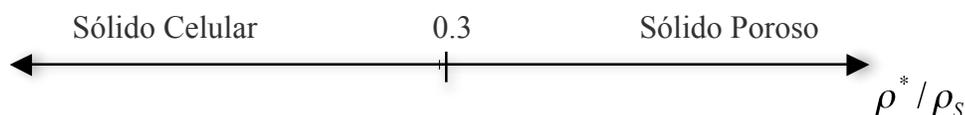


Figura 2.5 Densidad relativa de los materiales.

Muchos materiales porosos han sido usados en diferentes aplicaciones. Estos pueden ser clasificados por diferentes criterios como tamaño y forma de poro, material y método de producción. Sin embargo las clasificaciones más usuales son por el tamaño de poro y por forma de poro considerando las aplicaciones del material poroso.

La clasificación de los materiales porosos basados en el tamaño de poro está dada por *The International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC) que ha recomendado una nomenclatura específica como a continuación se muestra en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Clasificación de materiales porosos por el tamaño de poro.

Tipo de material	Diámetro de poro.
Microporoso	Menor a 2nm
Mesoporoso	Mayor a 2nm y menor a 50nm
Macroporoso	Mayor a 50nm

Recientemente se han desarrollado materiales cerámicos porosos con alta estabilidad térmica, alta resistencia, resistente a la erosión y corrosión. Las excelentes propiedades de los cerámicos porosos hace posible usarlos en varias condiciones de operación, comparados con los polímeros, vidrios y metales porosos. Pese a estas excelentes propiedades, el potencial de la cerámica porosa no se ha realizado plenamente debido a sus problemas bien conocidos, estos incluyen, fragilidad, falta de control de tamaño de poro, falta de métodos para su procesamiento continuo y manufactura (Ishizaki, *et al.*, 1998).

Basado en su geometría, la Figura 2.6 ilustra algunas geometrías de poros.

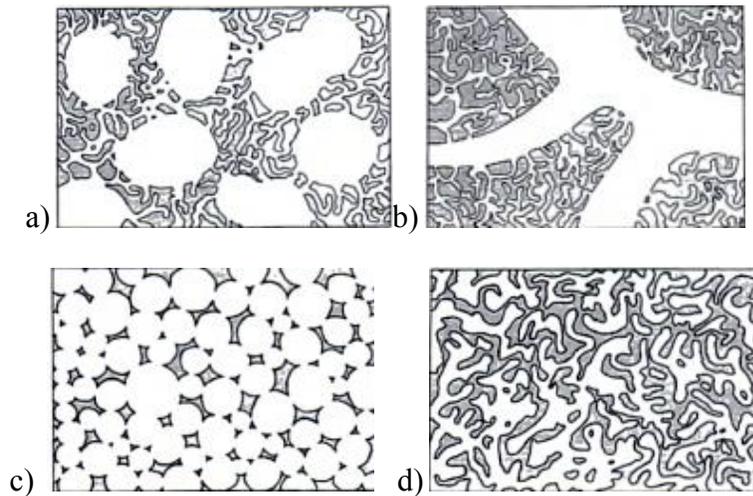


Figura 2.6 Diferentes configuraciones porosas (Ishizaki, *et al.*, 1998). a) En esta geometría de poro, poros grandes están conectados con poros pequeños. Materiales sinterizados porosos con agentes formadores de poros tiene esta geometría: b) En esta estructura de poro hay redes de poros pequeños y grandes: c) Esta configuración se produce haciendo burbujear una mezcla de cerámica, o mediante el uso de una gran cantidad de agente formador de poros o por el recubrimiento de una espuma de polímero con un material cerámico y quemando el polímero: d) Una red interconectada de poros se observa en vidrios porosos producidos por lixiviación.

## 2.8 Características generales de los ladrillos

Los ladrillos y bloques cerámicos son elementos de forma paralelepípedo ortogonal, sólidos o huecos, fabricados mediante el moldeo de extrusión o compresión, secado y cocción de arcilla (N-CMT-2-01-001/02).

Los elementos que sirven principalmente de materia prima del ladrillo son silicio y aluminio. También contienen pequeñas cantidades de otros materiales, como lo son los óxidos metálicos. El color, la resistencia y la textura del ladrillo terminado depende de la composición química de la arcilla y el método de fabricación utilizado (Valverde, 2001).

Los ladrillos y bloques cerámicos pueden ser clasificados, por su fabricación, en dos tipos: hechos en maquina (Mq) o a mano (Mn) y se clasifican en los subtipos y grados de calidad indicados en la Tabla 2.5 y 2.6 según la norma N-CMT-2-01-001/2.

Tabla 2.5 Clasificación de los ladrillos y bloques cerámicos (N-CMT-2-01-001/2).

Fabricación	Subtipos	Grados de calidad
Con maquina (Mq)	<b>Macizos:</b> en toda su masa. Admite perforación perpendiculares a sus caras	A-B-C-D
	<b>Perforados:</b> tienen perforaciones generalmente perpendiculares a las caras mayores y su distribución sobre la superficie total es uniforme	B-C-D
	<b>Huecos verticales:</b> los huecos están dispuestos perpendicularmente a la cara mayor del ladrillo o bloque.	C-D
	<b>Huecos horizontales:</b> los huecos están dispuestos paralelamente a la cara de mayor del ladrillo o bloque.	D-E
A mano (Mn)	<b>Macizos:</b> usualmente no llegan a desarrollar ligas cerámicas y son solamente macizos	E

Según su grado de calidad y uso, conforme la Tabla 2.5 cumplirá con los requisitos que se indican a continuación:

Tabla 2.6 Usos recomendables de los ladrillos y bloques cerámicos (N-CMT-2-01-001/2).

Grado de calidad	Uso		
	Requerimientos estructurales	Requerimientos climatológicos	Requerimientos funcionales
A	Aptos para albañilería soportante bajo esfuerzos elevadas (con o sin armado)	Aptos para climas severos con heladas y alta precipitación pluvial	Aptos para uso al exterior o interior en muros aparentes de una o dos caras
B	Aptos para albañilería soportante bajo esfuerzos moderadas (con o sin armado)	Apto para climas con probabilidades de heladas y moderada precipitación pluvial	Apta para uso al exterior o interior en muros aparentes de una o dos caras
C	Aptos para albañilería bajo cargas moderadas de compresión axial	Aptos para condiciones climatológicas medias de país, con poca	Aptos para uso al exterior o interior

		probabilidad de heladas y moderada precipitación pluvial	en muros aparentes
D	Aptos para albañilería simple o reforzada no soportante y con cargas bajas de compresión axial	Aptos para climas benignos y de moderada precipitación pluvial con sellador o revestimiento igual al grado C	Aptos para uso al exterior o interior en muros aparentes de una cara. Para los ladrillos huecos se requiere un impermeabilizante en muros exteriores
E (Fabricados con máquina)	Aptos para albañilería simple o reforzada no soportante y con cargas bajas de compresión axial	Aptos para climas benignos y de baja precipitación pluvial	Aptos para uso en muros exteriores con revestimiento o sellador y en muros interiores
E (Fabricados a mano)	Aptos para albañilería simple o reforzada no soportante y con cargas bajas de compresión axial	Aptos solamente para climas benignos y de escasa precipitación pluvial	No se acepta para muros aparentes al exterior sin revestimiento

La norma NMX-C-006-1976 LADRILLOS BLOQUES CERAMICOS DE BARRO, ARCILLA Y/O SIMILARES, especifica las características físicas como la resistencia a la compresión, adhesión y absorción de agua, que se indican en la Tabla 2.7 ó 2.8 ya sea fabricados con máquina o mano. Las dimensiones nominales para la elaboración de ladrillos se especifican en la Tabla 2.9.

Tabla 2.7 Características físicas para ladrillos y bloques cerámicos fabricados con máquina (NMX-C-006- 1976).

Características	Subtipo										
	Macizo				Perforado			Hueco vertical	Hueco horizontal		
	Grado de calidad										
	A	B	C	D	B	C	D	C	D	D	E
Resistencia a la compresión simple; MPa, mínima.	20	12	8	4	8	6	4	10	4	4	2

Adhesión; MPa, mínima.	0.4	0.3	0.2	0.1	0.3	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1
Absorción de agua; %, máxima.	12	16	18	20	16	18	20	16	18	18	20

Tabla 2.8 Características físicas para ladrillos y bloques cerámicos fabricados a mano (NMX-C-006- 1976).

Características	Valor
	Subtipo Macizo, Grado de calidad E
Resistencia a la compresión simple; MPa , mínima.	2
Adhesión; MPa, minima.	0.15
Absorción de agua; %, máxima.	24

Tabla 2.9 Dimensiones nominales para ladrillos (NMX-C-006- 1976).

Medidas nominales		Medidas de fabricación (cm)	
		Mq	Mn
Largo	30	29	28
	20	19	18
Ancho	10	9	---
	15	14	13.5
	20	19	18.5
	30	29	---
Altura o peralte	5	4.5	---
	7.5	6.5	6
	10	9	8.5
	15	14	---
	20	19	---
	30	29	---

Los ladrillos y materiales similares no deben presentar disgregación al tacto. Al limpiarlos en agua limpia a temperatura de entre 15 y 30 °C. El color y la textura de los ladrillos o bloques cerámicos deben ser uniformes.

### 2.8.1 Proceso de fabricación

Existen varias formas de fabricar ladrillos. Estos pueden ser: moldeados a mano, prensados mecánicamente o fabricados en galletera, posteriormente son secados y por último cocidos en un horno (Reveret, 1979). A continuación se describirá brevemente el proceso:

**Moldeado a mano.**-El ladrillo tradicional es un material elaborado con arcilla amasada con agua. La arcilla se coloca en gradillas o moldes de madera para dar la forma adecuada, retirando el excedente mediante una tablilla de madera o metal. El molde se remoja o se cubre con arena para evitar que la arcilla se pegue al desmontar la pieza. Este procedimiento es el más empleado, pues es sencillo y el más económico.

**Prensado mecánico.**-La pasta cerámica se coloca en moldes de acero y se comprime. De esta manera se obtiene un ladrillo de tamaño y forma regular, con aristas perfectas y superficies lisas. Los ladrillos se distribuyen sobre vagonetas especiales que los desplazan lentamente a través del horno. Con este método se obtiene un aumento en la producción, economía en el precio de costo y mejor calidad de los productos.

**Galletera de hélice.**- Esta máquina trabaja con pasta blanda o semidura, la arcilla amasada es extruida a través de una apertura rectangular. En este proceso se obtiene una barra continua que se hace descansar sobre una masa de acero y posteriormente se corta en piezas por medio de un alambre para después ser secados y quemados.

#### Secado

El objetivo de este procedimiento es eliminar la humedad contenida en la mezcla parte obtenida por exposición al ambiente para evitar la evaporación brusca dentro del horno que trae como consecuencias grietas, roturas o deformaciones. Este procedimiento consiste en colocar los ladrillos en un lugar ventilado y protegido del sol y agua. El secado se puede realizar de las siguientes formas.

- Secado al aire libre
- Secado encima del horno
- Hornos secadores de cámaras
- Secadores de túneles

#### Cocción

Durante este proceso la arcilla moldeada y secada es sometida al fuego para producir un ladrillo resistente y uniforme. Modificaciones en la masa de los ladrillos, a medida que se va elevando la temperatura en los hornos, son de carácter físico y químico.

El ladrillo moldeado pierde a 120 °C, el resto de agua intercalada entre los poros de la arcilla, el agua combinada químicamente en la arcilla abandona al ladrillo a los 200-300 °C. El ladrillo se endurece y ya no se reblandece al sumergirlo en agua. Si aumenta la temperatura los componentes orgánicos se queman. Cuando la temperatura ha ascendido a unos 800-1000°C, correspondiente al grado máximo de cocción, se denota la porosidad en la masa y una disminución de peso por las modificaciones desarrolladas, hasta los 1000°C aproximadamente (hablando de arcillas corrientes para ladrillos) empieza el llamado reblandecimiento o vitrificación de la arcilla.

Los hornos están contruidos de ladrillos refractarios. Combustibles como petróleo, gas, aserrín y carbón son usados para alimentar el horno. La parte más caliente del horno puede alcanzar una temperatura media de 1065°C, la temperatura puede variar dependiendo de la arcilla utilizada, toma alrededor de 30 horas la cocción de un ladrillo en un horno automatizado y unos 2 días en un horno tradicional (BIA<sup>5</sup>, 1998).

### **2.9 Técnicas de caracterización**

La variedad y complejidad de la composición química y de la constitución estructural de los materiales cerámicos es mucho mayor que las que estudia la metalurgia, es por ello que la composición química global no es suficiente para explicar o predecir sus propiedades, por lo que es de suma importancia su constitución estructural o composición mineralógica. Las técnicas utilizadas para poder entender el comportamiento de estos materiales son: el ensayo de compresión, la difracción de rayos-x y el análisis petrográfico.

#### **2.9.1 Ensayo de compresión**

Los ensayos de compresión se utilizan cuando se desea conocer el comportamiento del material bajo deformaciones permanentes grandes (plásticas), tal como ocurre cuando tienen un comportamiento frágil a tracción (Callister, 2003).

En la actualidad existen máquinas de pruebas mecánicas que incluyen transductores que aportan los desplazamientos de la celda de carga, los cuales proporcionan datos para calcular la deformación de la muestra. La versatilidad de contar con una máquina como la mostrada en la Figura 2.7 es que además de realizar ensayos de compresión se pueden hacer ensayos de tracción y flexión.

---

<sup>5</sup> BIA: Brick Industry Association. USA



Figura 2.7 Máquina universal.

Durante el ensayo de compresión se lleva un registro de la carga aplicada a la probeta y el cambio en su longitud. Cuando el ensayo de compresión se realiza de manera correcta, es posible obtener ciertas propiedades mecánicas muy importantes del material, tales como el esfuerzo de compresión y la deformación.

Para muestras cerámicas a compresión, el esfuerzo se calcula como la fuerza aplicada por la máquina entre el área de la sección transversal de la muestra.

$$\sigma = \frac{F}{A_o}$$

También por medio de esta prueba se calcula la deformación producida en el material a medida que se le aplica la fuerza.

$$\varepsilon = \frac{l_t - l_o}{l_o} = \frac{\Delta l}{l_o}$$

en donde:

$l_o$  = Es la longitud original antes de aplicar la carga

$l_t$  = Es la longitud instantánea

$\Delta l$  = Alargamiento producido por la deformación

### 2.9.2 Difracción de Rayos-X (DRX)

En la identificación de minerales arcillosos se utilizan técnicas como la DRX para la identificación de la composición química de los granos, así como la determinación de la constitución estructural del material (Mari, 1998). Otras aplicaciones de los rayos X incluyen el análisis químico cualitativo y cuantitativo. Muchos de los conocimientos actuales de la disposición atómica y molecular de los sólidos resultan de las investigaciones mediante DRX, además, los rayos X tienen gran importancia en el desarrollo de nuevos materiales.

El fenómeno de difracción ocurre cuando una onda encuentra una serie de obstáculos separados regularmente, que son capaces de dispersar la onda y están separados por distancias comparables en magnitud a la longitud de onda. Los rayos X interactúan con los electrones que rodean a los átomos por ser su longitud de onda del mismo orden de magnitud que el radio atómico, la interacción de los rayos X con los arreglos periódicos de átomos usualmente proveen información estructural y tipo de átomo encontrados en su camino (Chang, 2004).

La difracción de rayos X se produce cuando un conjunto de planos atómicos de un cristal se pone en posición de difractar una onda incidente. La interferencia entre la onda de rayos X en el interior del cristal puede ser constructiva o destructiva que se traducen en intensidad detectable o nula, respectivamente.

La Figura 2.8a se considera la onda 1 y 2, que tiene la misma longitud de onda ( $\lambda$ ) y están en fase en O-O', donde se supone que presentan dispersión al recorrer diferentes caminos. Se aprecia que estas ondas dispersadas 1' y 2' continúan en fase. Se dice que se refuerzan mutuamente (interferencia constructiva) y se suma sus amplitudes. Esta es una manifestación de la difracción y los rayos difractados están compuestos de gran número de ondas dispersas que se refuerzan mutuamente.

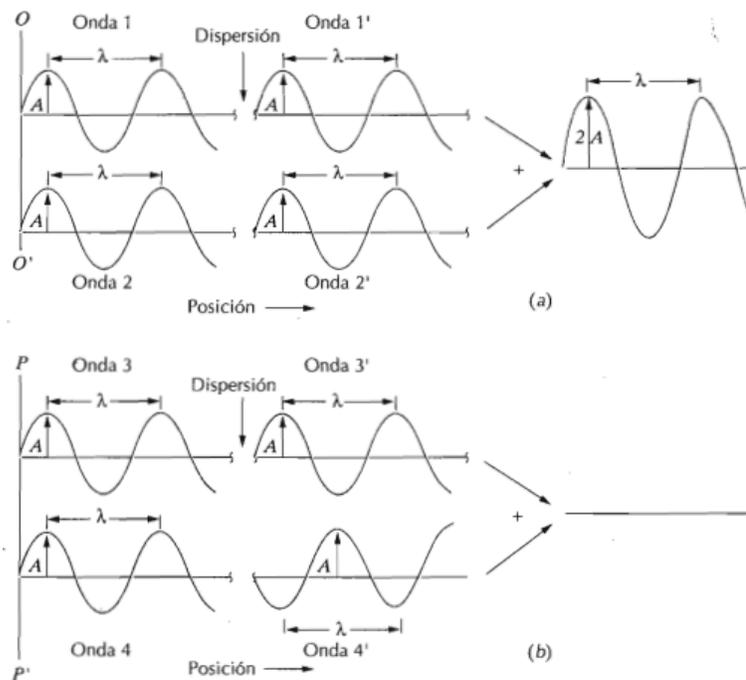


Figura 2.8 Ondas en fase (Callister, 2003). a) interferencia constructiva.  
b) interferencia destructiva.

Otra relación de fase que no conduce al reforzamiento mutuo está ilustrado en la Figura 2.8b, donde la diferencia entre las longitudes de los caminos después de la dispersión es un número impar de semilongitud de onda. Las ondas dispersas no están en fase y las amplitudes se anulan entre sí o interfieren destructivamente, obteniendo una onda resultante con amplitud cero como se muestra a la derecha de la imagen.

### Ley de Bragg

En la Figura 2.9 se consideran dos planos paralelos A-A' y B-B' que están separados por una distancia interplanar  $d_{hkl}$ , un haz paralelo en fase de rayos X de longitud  $\lambda$  incide en estos planos según un ángulo  $\theta$ . Dos rayos de este haz señalados como 1 y 2 son dispersados por los átomos P y Q. Según un ángulo  $\theta$  con los planos, ocurre una interferencia constructiva de los rayos dispersos 1' y 2' siempre que la diferencia de recorrido entre ambos rayos se un número entero,  $n$ , de longitud de onda.

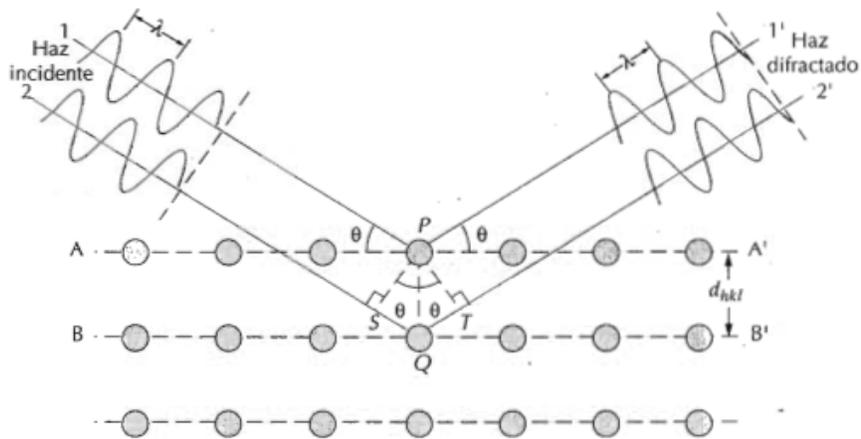


Figura 2.9 DRX por los planos atómicos (Callister, 2003).

Es decir, la condición para la difracción es:

$$n\lambda = \overline{SQ} + \overline{QT}$$

por lo tanto

$$n\lambda = d_{hkl} \text{sen}\theta + d_{hkl} \text{sen}\theta$$

Y finalmente la siguiente ecuación es conocida como Ley de Bragg; donde  $n$  es el orden de difracción, que puede ser cualquier número entero siempre que  $\text{sen}\theta$  no exceda la unidad.

$$n\lambda = 2d_{hkl} \text{sen}\theta$$

De esta manera tenemos una simple expresión que relaciona la longitud de onda de los rayos X y la distancia interatómica con el ángulo que incide del haz difractado. Si no se cumple la ley de Bragg, la interferencia es no constructiva.

### 2.9.3 Microscopía Petrográfica

La microscopía petrográfica o de polarización se utiliza para la identificación y estimación cuantitativa de los componentes minerales de las rocas ígneas, rocas metamórficas o materiales sintéticos. El objetivo de la petrografía es determinar la naturaleza de dicho sistema, permite conocer las relaciones mutuas entre cristales o granos (textura y microestructura), composición modal, clasificación petrográfica y porosidad (Castro, 1989).

El auxiliar más importante de la petrografía ha sido el microscopio petrográfico, este se diferencia de los microscopios ordinarios principalmente por una disposición que permite examinar las rocas también en luz polarizada. Este artificio de luz polarizada consiste en una simple lámina polaroide que está incorporada siempre en el camino de los rayos luminosos. La Figura 2.10 muestra un microscopio petrográfico.



Figura 2.10 Microscopio Petrográfico.

La platina sobre la cual descansa la preparación gira alrededor del eje óptico del instrumento y lleva un círculo graduado para poder determinar el comportamiento de cada mineral en distintas direcciones con respecto a la posición del polarizador.

Debido a la anisotropía que presentan gran parte de los materiales, la propagación de la luz puede variar fuertemente según la dirección que se considere, si a esto unimos que la luz normal, como otras radiaciones electromagnéticas, presentan un movimiento ondulatorio en el que las ondas vibran perpendicularmente a la dirección de propagación pero en diferentes planos. Se comprende que la interacción de los cristales con la luz y la consideración de la dirección o de la orientación es absolutamente determinante. Esto implica la necesidad de dotar al microscopio de una fuente de luz polarizada que vibra en un solo plano y se consigue mediante un filtro polarizador y de una platina giratoria que ayuda a orientar los minerales.

Muchos materiales tienen sus átomos distribuidos uniformemente (cúbicos y amorfos) y tienen las mismas propiedades ópticas independientemente de la dirección. Cuando la luz atraviesa materiales de este tipo, la velocidad es la misma en todas direcciones es por ello que se denominan isotrópicos. Por otra parte los materiales anisotrópicos cuya organización

crystalina es diferente (hexagonal, tetragonal, rómbica, entre otras) poseen sus constituyentes de manera asimétrica y varían según la dirección, en consecuencia las ondas luminosas varían diferente.

Los materiales isotrópicos son unirrefringentes o tienen una refracción sencilla mientras que los anisotrópicos son birrefringentes o muestran una propiedad de doble refracción. En la luz polarizada no solo se diferencian fácilmente los cristales unirrefringentes de los birrefringentes, sino que también nos ofrece un sistema cómodo para determinar el sistema cristalino y las propiedades ópticas del mineral a examinar (Bruhns, 1964).

Cada vez que las ondas de luz salen del espécimen lo hace de manera desfasada pero son recombinadas al pasar por otro filtro denominado filtro analizador. Para observar los minerales en el microscopio de luz transmitida se requieren muestras que sean lo suficientemente delgadas para permitir el paso de luz con un grado de absorción pequeño, para esto se corta el material y se prepara mediante procedimientos abrasivos. Estas muestras de 24 x46 mm y un espesor de 0.030 mm, se denominan “láminas delgadas”.

### Capítulo 3. Desarrollo Experimental

Durante la preparación de este trabajo se elaboraron las probetas de material cerámico celular y posteriormente fueron sometidas a estudio. En esta sección se explicará brevemente cada uno de los procesos. Los puntos a desarrollar son los siguientes:

- Elaboración de molde
- Elaboración de probetas
- Proceso de cocción
- Obtención de la densidad
- Ensayo de compresión
- Laminas delgadas y DRX

Aunque se describirán por separado los puntos listados anteriormente, cabe mencionar que para el desarrollo de algunos de éstos se requirieron pruebas preliminares que involucraron más de un proceso en conjunto.

#### 3.1 Elaboración del molde

En el trabajo de Espejel (2007), se elaboraron ladrillos cerámicos con propiedades de alta resistencia mecánica. Los ladrillos cocidos a temperaturas mayores a 1250 °C presentaron deformación impidiendo la caracterización mecánica. Para evitar este problema se elaboraron los especímenes en moldes.

La manufactura del molde representó un gran reto debido a las condiciones extremas a las que se deben someter. Se debe considerar que el molde debe cumplir con las características necesarias para permitir al material sufrir cambios dimensionales cuando es sometido a temperaturas mayores a 1000° C. Es necesario que la composición del molde fuera de un material tal que no sufriera alguna reacción con el material, además que resistiera el proceso de cocción sin que se degradara o deformara. Es por esto que se seleccionó utilizar acero común sin ningún tipo de recubrimiento. Inicialmente se utilizó un tubo de acero con diámetro interno de 16.68 mm y un diámetro externo de 17.98mm con una longitud de 40mm (Figura 3.1), estas dimensiones fueron seleccionadas considerando la prueba de compresión en donde la altura de la probeta debe ser el doble que el diámetro según las norma ASTM C39/C 39 M-99 y NMX-C-083-ONNCCE-2002.

Sin embargo, al realizar algunas pruebas preliminares fue inevitable que el cerámico celular formado se adhiriera al molde impidiendo la extracción. Como segunda opción y tratando de evitar esto se utilizó el mismo tubo seccionándolo longitudinalmente para permitir que el material pudiera expandirse. En este caso se presentó el inconveniente de que esta configuración era muy inestable para su manipulación dentro del horno, con sus respectivos termopares. Además de que el molde formaba una protuberancia longitudinal en función del corte realizado en el material.

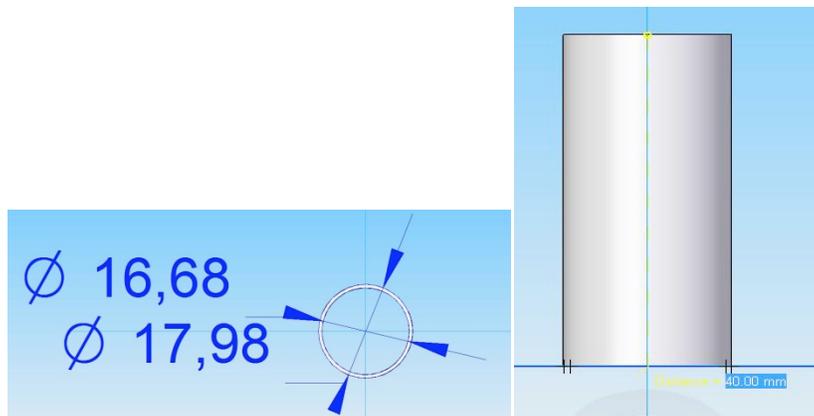


Figura 3.1 Dimensiones del molde utilizando tubo de acero

Finalmente, basado en la experiencia anterior, se diseñó un tercer molde el cual tuviera la suficiente estabilidad para que sus partes no volcaran al colocarse dentro del horno pero que tuvieran la capacidad de permitir la expansión térmica del material en el momento de la cocción.

Para la elaboración de este molde se utilizó una barra de acero laminado en frío de sección cuadrada, seleccionando las dimensiones de la barra de acuerdo a las requeridas para la elaboración de los especímenes y lo disponible en el mercado. Las dimensiones del molde fueron ligeramente modificadas tomando en cuenta la interacción de los termopares dentro de la muestra y poder así medir la temperatura durante el desarrollo de la prueba de cocción. El diámetro interno del molde se diseñó de 18.875mm o 5/8'' y altura de 60mm. Para la manufactura fue necesario utilizar un taladro de columna y un proceso de fresado para obtener paredes internas con acabados finos que permitieran obtener probetas para ensayo adecuadas. Como se muestra en la Figura 3.2 se mantiene la geometría interna del molde para poder así obtener probetas cilíndricas necesarias para la prueba de compresión.

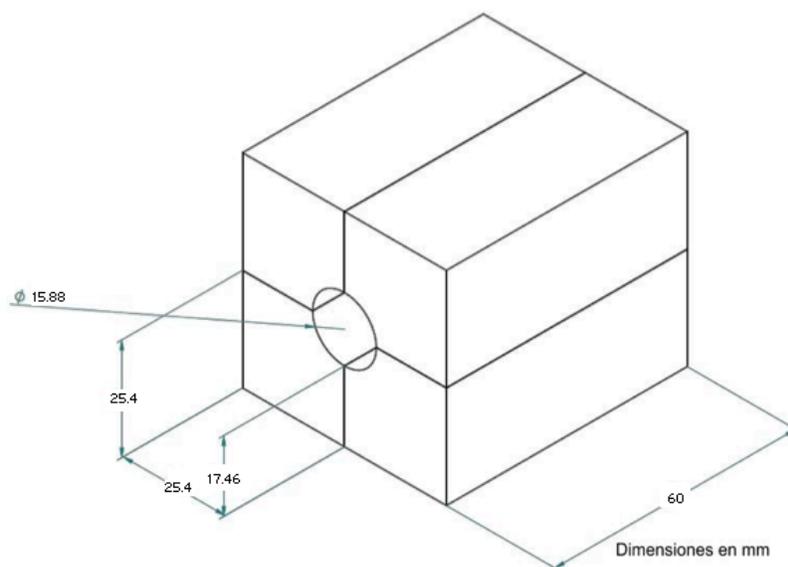


Figura 3.2 Molde definitivo utilizado para la obtención de cerámica celular

### 3.2 Elaboración de probetas

El lodo utilizado para realizar las pruebas se extrajo de los sistemas de almacenamiento de lodos denominados “tarquinas” de la planta potabilizadora “Los Berros”, del Sistema Cutzamala de la CNA. La planta se ubica en el municipio de Villa Victoria, Estado de México a unos 30 km de Valle de Bravo. La arcilla roja fue obtenida de una ladrillera tradicional en el municipio de San Andrés Chiautla, Estado de México.

La preparación de la arcilla y el lodo en el secado, molienda y tamizado se realizó de acuerdo al diseño experimental realizado por Espejel (2007), como se describe brevemente a continuación. La arcilla como el lodo fueron secados colocándolos al sol por un lapso de 10 días. Después se molieron en los Laboratorios de Ingeniería Química Metalúrgica, de la UNAM. Primeramente, las partículas de mayor tamaño se pasaron por una trituradora de minerales y después se pasaron por un pulverizador marca McCool Pulverize 61/2 F.

El lodo y arcilla que se utilizó fue el acumulado en la charola después del tamiz No. 200 (diámetro de apertura de 75  $\mu\text{m}$ ). Una vez obtenida la materia prima se procedió a pesar tres distintas composiciones de lodo-arcilla como muestra la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Composición lodo-arcilla para elaboración de cerámicas.

Composición,% p/p	Lodo	Arcilla
C1	30	70
C2	45	55
C3	60	40

Obtenidas las composiciones se agregó agua parcialmente, mezclando manualmente con una espátula de plástico hasta obtener una mezcla homogénea de carácter pastoso semejante a la consistencia de una pasta dental. Seguido se colocó la pasta dentro de los moldes con la mano y auxiliado de un pequeño trozo de madera con el fin de tener una probeta libre de burbujas de aire que pudieran modificar la estructura final de la misma. Es importante mencionar que para mantener la forma de la probeta durante el secado y la manipulación al colocarlo en el horno se sujetaron las piezas que conforman el molde, amarrándolas con un delgado hilo de lana, esto para permitir que durante el proceso de cocción se degradara sin impedir la expansión del molde y el material. También, para fines comparativos, se prepararon muestras sin molde para someterla a cocción.

### 3.3 Proceso de cocción

Una vez obtenidas las diferentes composiciones se alistaron las muestras para su cocción en un horno eléctrico marca Hevi Duty (Figura 3.3), los valores de temperatura utilizados fueron 1050,1150 y 1200°C. Esto fue para cada una de las composiciones lodo-arcilla, sometiéndolas a cocción en lotes de tres probetas, colocando una de cada

composición a la misma temperatura y para las temperaturas de 1150 y 1200°C se anexaron aquellas que no tenían molde.



Figura 3.3 Horno eléctrico marca Hevi Duty para pruebas de cocción

Puestas dentro del horno se comenzó la prueba de cocción aumentando la temperatura gradualmente hasta llegar a la temperatura deseada y se dejó cocer por un lapso de 60 minutos. La temperatura fue censada cada 10 minutos para tener un buen control de este parámetro en el horno. Esto fue para cada prueba de cocción realizada.

#### **3.4 Obtención de la densidad, porosidad y absorción de agua**

La prueba para determinar la densidad de los especímenes se llevó a cabo con base en la norma ASTM C 20-97 (Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water) esto fue únicamente para el procedimiento que deben llevar las probetas para su pesado.

En primera instancia se limpiaron las probetas con el fin de remover las partículas adheridas. Después los especímenes se mantuvieron a peso constante calentándolos a 110 °C durante 24 horas para después pesarlos y así obtener el peso seco (D).

Seguido de esto, se tomaron los especímenes y se colocaron en agua hirviendo durante 2 horas en un recipiente. Después se mantuvieron alrededor de 12 horas sumergidos en el agua y a continuación se determinó el peso suspendido. Para determinar el peso suspendido (S) primero se colocó un recipiente con agua sobre la balanza y se pesó. En el recipiente con agua se sumergió el espécimen atado a un hilo asegurándose que no se tocara el fondo ni los extremos del recipiente y se pesó. El peso del recipiente con el espécimen suspendido menos el peso del recipiente con agua da el peso suspendido del espécimen.

Una vez medido el peso suspendido (S), se secó el espécimen sólo con un trozo de papel, removiendo las gotas que se encontraran en la superficie y se pesó de nuevo obteniendo de esta manera el peso saturado (W).

El volumen total,  $V_T$ , se calculó sustrayendo el peso suspendido del peso saturado, ambos en gramos:

$$V_T, cm^3 = \frac{W - S}{\rho_{H2O}}$$

La porosidad, P, se expresa como un porcentaje que relaciona el volumen del material en el espécimen y el volumen total. Se calculó de la siguiente manera:

$$P_T, \% = \left[ 1 - \frac{V_m}{V_T} \right] \times 100$$

donde  $V_m$  se calcula como sigue:

$$V_m = \frac{D}{\rho_{th}}$$

$\rho_{th}$  = Densidad teórica

$$\rho_{th} = 2.6(g/cm^3)$$

La absorción de agua, A, es expresada como porcentaje que relaciona el peso del agua absorbida y el peso del espécimen seco. Se calcula de la siguiente manera:

$$A, \% = \left[ \frac{W - D}{D} \right] \times 100$$

La densidad real,  $\rho_{real}$ , en gramos por centímetro cúbico es el cociente del peso seco dividido por el volumen de masa. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$\rho_{real}, \frac{g}{cm^3} = \frac{D}{V_m}$$

La densidad aparente,  $\rho_{ap}$ , en gramos por centímetro cúbico, es el resultado del cociente del peso seco dividido por el volumen aparente. Tomado en cuenta que el volumen aparente considera el volumen de masa y el volumen de poros cerrados. Se calcula de la siguiente manera:

$$V_{ap} = D - S$$

$$\rho_{ap} = \frac{D}{V_{ap}}$$

La Resistencia específica,  $Re$ , en MPa entre kilogramo por metro cúbico es el cociente del esfuerzo máximo entre la densidad aparente. Se calcula de la siguiente manera:

$$Re = \frac{\sigma_{max}}{\rho_{ap}}$$

#### 3.5 Ensayo de compresión

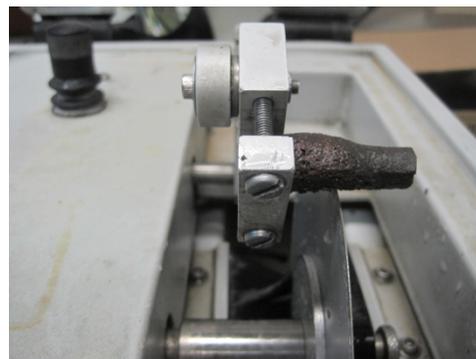
Al no existir requerimientos estrictamente delimitados para este tipo de material en pruebas de compresión, la prueba se basó en las normas ASTM C39/C 39M (Standard Test Method for Compressive Strength of Cilindrical Concrete Specimens) y NMX-C-083-ONNCCE-2002 (Industria de la Construcción-Concreto-Determinación de la Resistencia a la Compresión-Método de Prueba).

Después de la obtención de densidad de las muestras, se dejaron secar a 100 °C por 24 horas con el fin de eliminar cualquier rastro de humedad que modificara las propiedades mecánicas del material. Debido a que en el ensayo de compresión las caras laterales de las muestras cilíndricas deben presentar un paralelismo adecuado, se empleó una máquina cortadora con disco de diamante (Figura 3.4a) para lograr el paralelismo apropiado. Al sujetar la muestra para realizar el corte fue importante no ejercer demasiada presión en las abrazaderas para no dañar la muestra (Figura 3.4b).

Para prevenir abrasiones indeseables y fracturas, la velocidad de corte del disco se recomienda que sea de 600 RPM. Si la superficie lateral de las muestras cilíndricas son desiguales o existen irregularidades, éstas se pueden desbastar con una lija de carburo de silicio de No. 100 aplicada en seco.



a)



b)

Figura 3.4 a) Máquina cortadora con disco de diamante: b) Corte de probeta cilíndrica.

Una vez preparadas las probetas se colocaron directamente en la plataforma de ensayo (Figura 3.5) para proceder la prueba. Las probetas fueron ensayadas en una

máquina para pruebas universales marca Instron modelo 4206, con una celda de carga de 5 kN a una velocidad de 0.5 mm/min. Como ya se mencionó, la geometría de las probetas y las características del ensayo se realizó de acuerdo a la normas ASTM C39/C 39M y NMX-C-083-ONNCCE-2002.



Figura 3.5 Muestra colocada para realizar el ensayo de compresión.

#### 3.6 Láminas delgadas y difracción de rayos X

La preparación de las láminas delgada para el análisis por microscopía petrográfica se realizó en la empresa Wagner Petrographic ubicada en los Estados Unidos de Norte América estado de Utah. El material que se tomó para esta preparación fue el obtenido al cortar la probetas para los ensayos de compresión. Las características de las muestras fueron de tipo estándar de 24x46 mm y 0.030 mm.

La determinación de la composición mineralógica de la muestra de lodos se realizó en 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).

## Capítulo 4. Resultados

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos en la caracterización de los materiales cerámicos celulares. Los parámetros determinados fueron: densidad, resistencia a la compresión, identificación de minerales formados mediante análisis petrográfico y DRX. Para lograr un correcto manejo de los datos obtenidos en laboratorio se ha utilizado *Microsoft Excel®*, con la finalidad de presentar adecuadamente los resultados y con ello facilitar su interpretación.

Los resultados se presentarán de acuerdo a la temperatura de cocción y composición de las probetas. Se mostrará una foto del material obtenido, así como sus respectivos valores de densidad, gráfica esfuerzo-deformación, difractogramas y finalmente imágenes de láminas delgadas. Los difractogramas mostrados corresponden a los materiales cocidos a la temperatura más alta de acuerdo a sus propiedades mostradas. Los datos obtenidos se presentaran por composición lodo-arcilla: 30-70, 45-55 y 60-40% y temperatura de cocción. Se presentarán primeramente las pruebas de menor temperatura. Al final se presentarán las de mayor temperatura.

### 4.1 Composición 30-70 (lodo-arcilla), temperatura 1050°C

Para esta composición se obtuvieron dos probetas. La Figura 4.1 muestra las imágenes de los materiales obtenidos. Como se puede apreciar el material obtenido presentó una apariencia de un ladrillo convencional con un tono naranja característico de este tipo de ladrillo. Evidentemente no se pudo obtener un material celular aun cuando la cocción se realizó con molde.

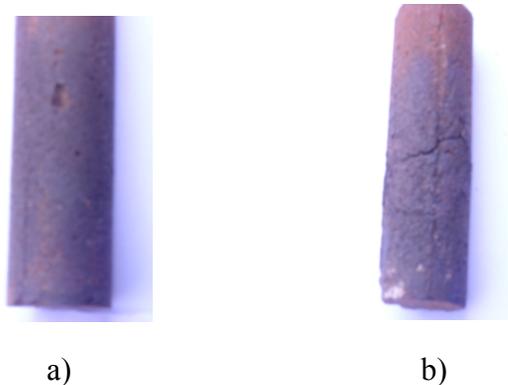
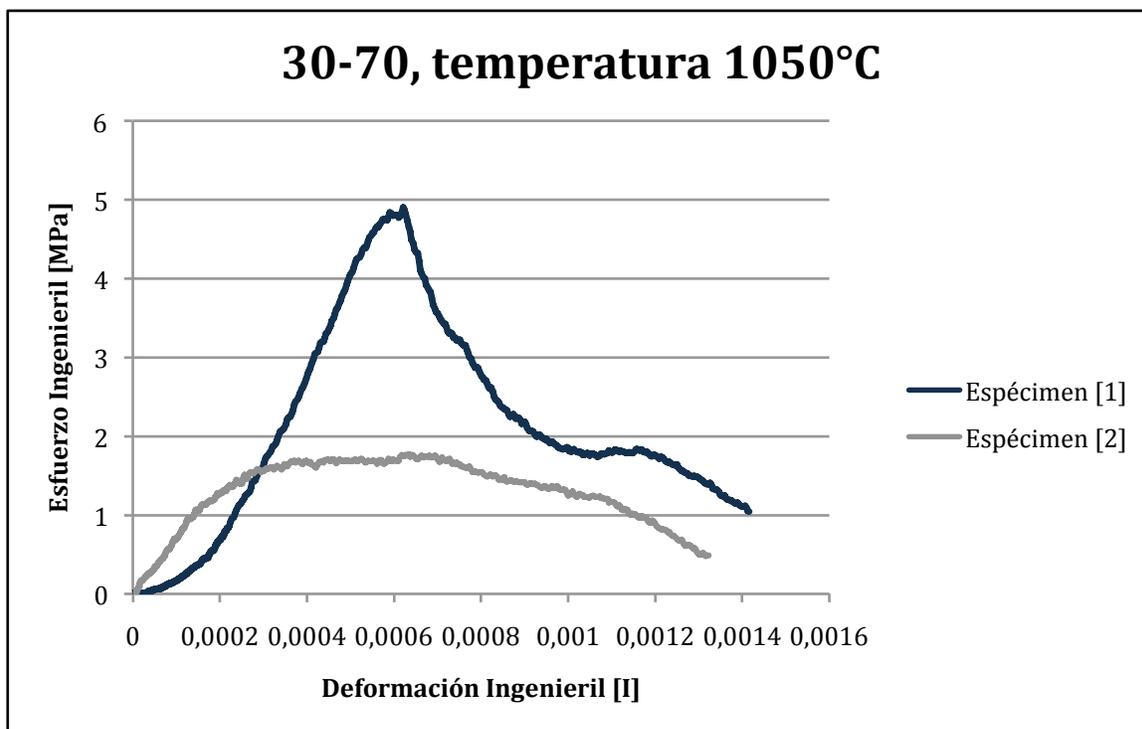


Figura 4.1 a) Espécimen [1] con composición 30-70 lodo-arcilla a 1050° C: b) Espécimen [2] con composición 30-70 lodo-arcilla a 1050 °C.

Tabla 4.1. Resultados de la caracterización física de las probetas elaboradas con mezclas lodo-arcilla 30-70 y cocidas a 1050° C.

Muestra	Porosidad, %	Absorción de agua, %	Densidad real, [g/cm <sup>3</sup> ]	Densidad aparente, [g/cm <sup>3</sup> ]	Densidad relativa	Resistencia Máxima, [MPa]	Resistencia específica [MPa/(kg/m <sup>3</sup> )]
30-70 [1]	35.15	24.2	2.84	1.68	0.54	4.90	0.00318
30-70 [2]	34.76	24.3	2.88	1.69	0.53	1.72	0.00100

Los valores de porosidad, absorción de agua y densidades son muy similares debido a que son las mismas composiciones. Sin embargo la resistencia máxima de la muestra [2] comparada con la [1] es 65% menor. Esto es probablemente debido a las pequeñas muescas o fisuras formadas por el aire atrapado al ser elaborada la probeta. Esto provoca concentradores de esfuerzos. La Gráfica 4.1 muestran la mayor resistencia.



Gráfica 4.1 Esfuerzo-deformación con composición 30-70 lodo-arcilla, cocidos a 1050 °C, especímenes [1] y [2].

#### 4.2 Composición 45-55 (lodo-arcilla), temperatura 1050°C

Las dos probetas obtenidas de esta composición no formaron el material celular deseado como se observa en la Figura 4.2. Ambas probetas fueran cocidas con molde y bajo las mismas condiciones de elaboración.

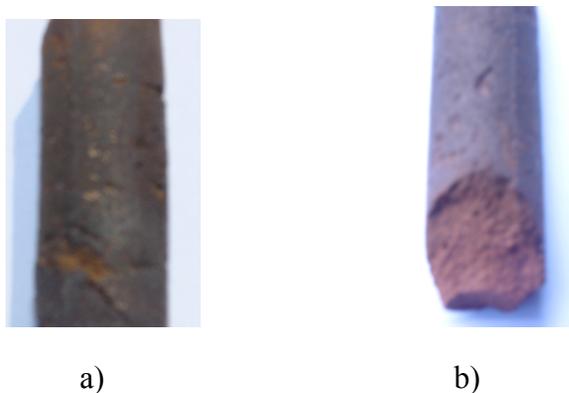


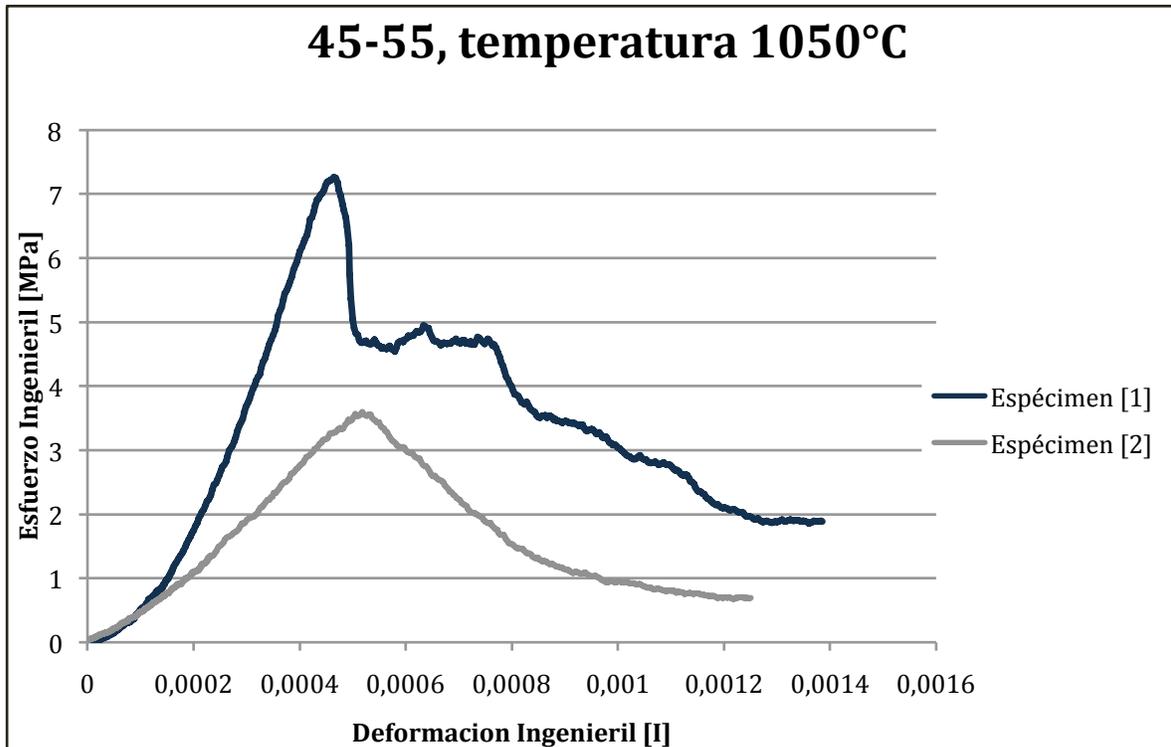
Figura 4.2 a) Espécimen [1] con composición 45-55 lodo-arcilla a 1050 °C: b) Espécimen [2] con composición 45-55 lodo-arcilla a 1050 °C.

La Tabla 4.2 muestra las propiedades del material para esta composición.

Tabla 4.2. Resultados de la caracterización física de las probetas elaboradas con mezclas lodo-arcilla 45-55 y cocidas a 1050° C.

Muestra	Porosidad, %	Absorción de agua, %	Densidad real, [g/cm <sup>3</sup> ]	Densidad aparente, [g/cm <sup>3</sup> ]	Densidad relativa	Resistencia Máxima, [MPa]	Resistencia específica [MPa/(kg/m <sup>3</sup> )]
45-55 [1]	36.6	24.1	2.73	1.64	0.60	7.25	0.00442
45-55 [2]	37.6	28	2.97	1.62	0.54	3.53	0.00217

Los valores de las propiedades para estos especímenes son prácticamente los mismos pero una vez más los concentradores de esfuerzos influyen en la resistencia del material. Esto se puede ver en la Gráfica 4.2.



Gráfica 4.2 Esfuerzo-deformación con composición 45-55 lodo-arcilla, cocidos a 1050 °C, especímenes [1] y [2].

#### 4.3 Composición 60-40 (lodo-arcilla), temperatura 1050°C

Debido a la fragilidad de este material sólo se obtuvo una probeta ya que al momento de realizar el corte con el disco de diamante las demás probetas se destruyeron. En la Figura 4.3 se muestra el material obtenido.

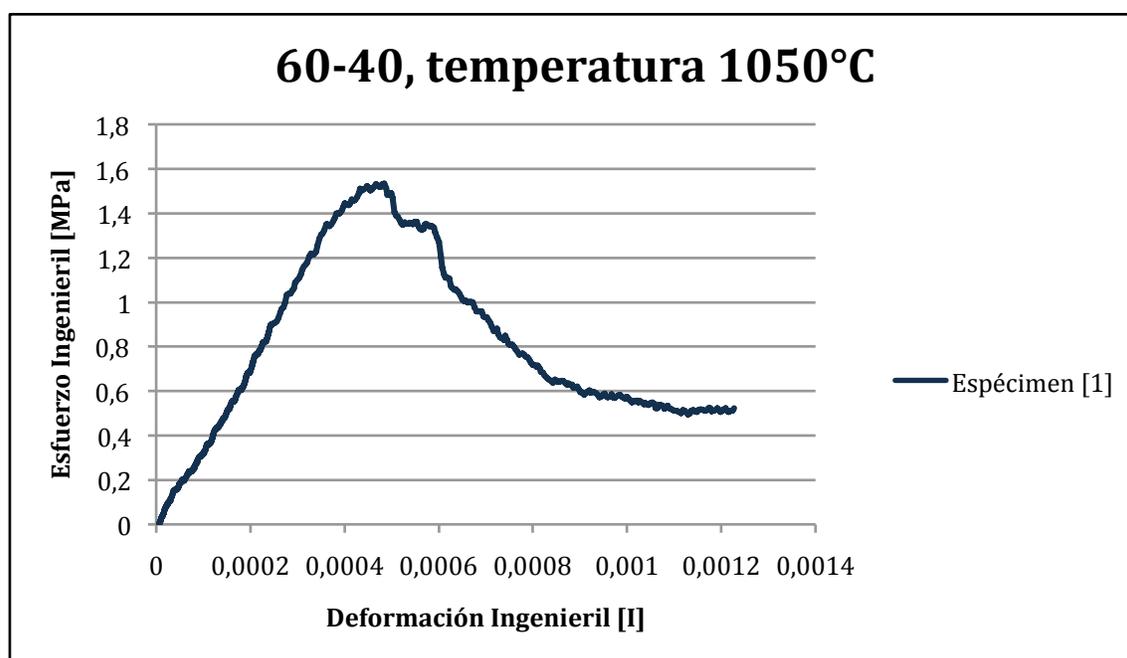


Figura 4.3 a) Espécimen con composición 60-40 lodo-arcilla, 1050 °C.

Tabla 4.3. Resultados de la caracterización física de las probetas elaboradas con mezclas lodo-arcilla 60-40 y cocidas a 1050° C.

Muestra	Porosidad,%	Absorción de agua,%	Densidad real, [g/cm <sup>3</sup> ]	Densidad aparente, [g/cm <sup>3</sup> ]	Densidad relativa	Resistencia Máxima, [MPa]	Resistencia específica [MPa/(kg/m <sup>3</sup> )]
60-40 [1]	35.4	32.6	3.71	1.68	0.45	1.53	0.00091

La resistencia máxima disminuye considerablemente respecto a las muestras anteriores según la Gráfica 4.3.



Gráfica 4.3 Esfuerzo-deformación con composición 60-40 lodo-arcilla, cocido a 1050 °C, espécimen [1].

#### 4.4 Composición 30-70 (lodo-arcilla), temperatura 1150°C

Las probetas que se muestran en la Figura 4.4 pertenecen a la composición 30-70, cocidas a una temperatura de 1150°C realizadas con molde (C/M). Se puede apreciar en ambos casos la formación de material poroso y es evidente la deformación por contracción térmica.

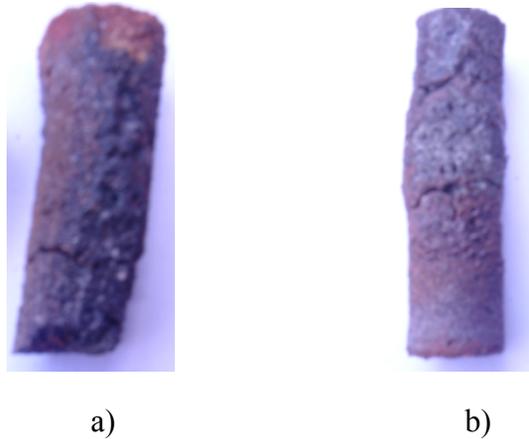
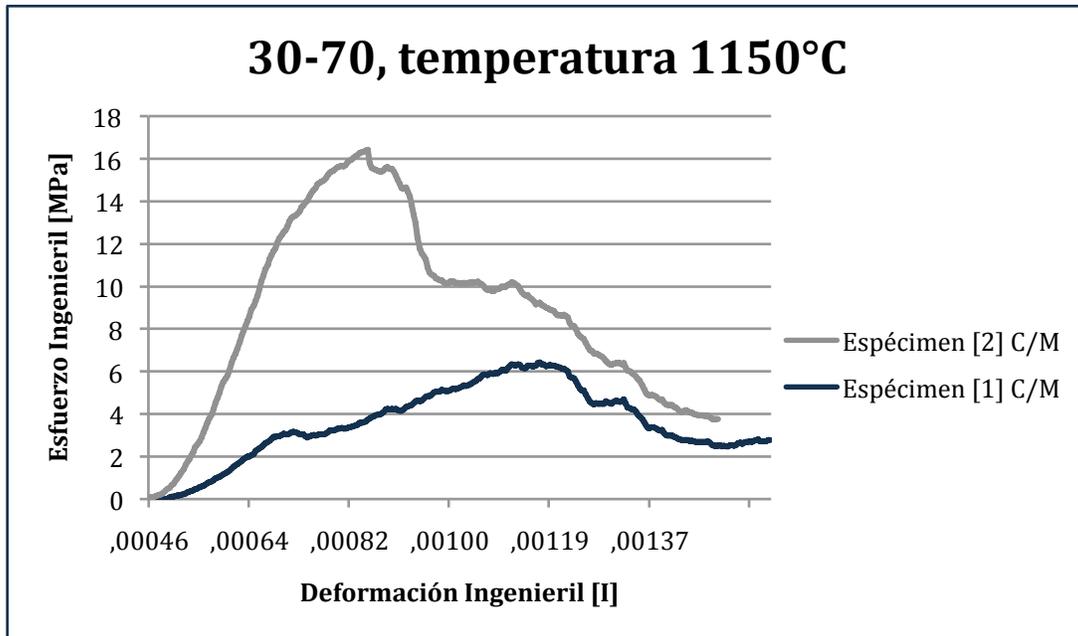


Figura 4.4 a) Espécimen [1] con composición 30-70 lodo-arcilla a 1150 °C: b) Espécimen [2] con composición 30-70 lodo-arcilla a 1150 °C.

Tabla 4.4. Resultados de la caracterización física de las probetas elaboradas con mezclas lodo-arcilla 30-70 y cocidas a 1150° C.

Muestra	Porosidad, %	Absorción de agua,%	Densidad real, [g/cm <sup>3</sup> ]	Densidad aparente, [g/cm <sup>3</sup> ]	Densidad relativa	Resistencia Máxima, [MPa]	Resistencia específica [MPa/(kg/m <sup>3</sup> )]
30-70 [1]	31	17.1	2.58	1.79	0.69	6.42	0.00358
30-70 [2]	36.5	9.6	1.96	1.65	0.84	16.30	0.00987

Como se ve en la Gráfica 4.4 el espécimen [2] presentó una mayor resistencia a la compresión. Esto es muy probablemente debido a la deformación por efecto de la temperatura que sufrió el espécimen [1].



Gráfica 4.4 Esfuerzo-deformación con composición 30-70 lodo arcilla, cocido a 1150 °C, espécimen [1].

#### 4.5 Composición 45-55 (lodo-arcilla), temperatura 1150°C.

En este caso se obtuvieron 4 probetas de las cuales dos fueron realizadas con molde (C/M) y dos sin molde (S/M). Lo anterior fue realizado con el fin de observar la diferencia en las propiedades de ambas técnicas. Los cuatro especímenes fueron cocidos en las mismas condiciones. La Figura 4.5 presenta la apariencia del material cocido sin molde. Como se puede observar ambas probetas presentan la misma apariencia que la de un ladrillo convencional.



a)



b)

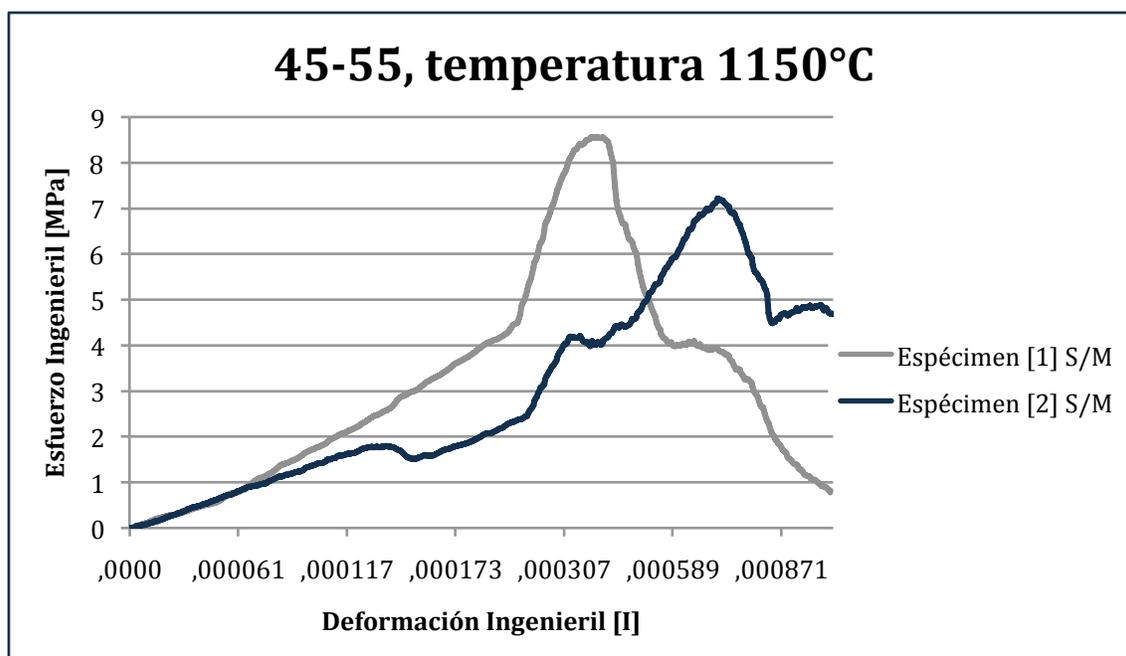
Figura 4.5 a) Especímen [1] con composición 45-55 lodo-arcilla a 1150 °C sin molde:  
b) Especímen [2] con composición 45-55 lodo-arcilla a 1150 °C sin molde.

La siguiente tabla muestra las propiedades obtenidas de los especímenes cocidos con la técnica sin molde.

Tabla 4.5. Resultados de la caracterización física de las probetas elaboradas con mezclas lodo-arcilla 45-55 y cocidas a 1150° C sin molde.

Muestra	Porosidad,%	Absorción de agua,%	Densidad real, [g/cm <sup>3</sup> ]	Densidad aparente, [g/cm <sup>3</sup> ]	Densidad relativa	Resistencia Máxima, [MPa]	Resistencia específica [MPa/(kg/m <sup>3</sup> )]
45-55 [1]	44.2	30.6	2.61	1.45	0.55	8.21	0.00565
45-55 [2]	19	14.4	3.02	2.10	0.69	7.22	0.00342

Los valores de resistencia máxima en estas dos probetas son muy similares (Gráfica 4.5).



Gráfica 4.5 Esfuerzo-deformación con composición 45-55 lodo-arcilla, cocidos a 1150 °C. Especímenes [1] y [2] sin molde.

Los especímenes realizados con molde se muestran en la Figura 4.6. Se puede observar que se obtuvo la estructura de un material cerámico celular..

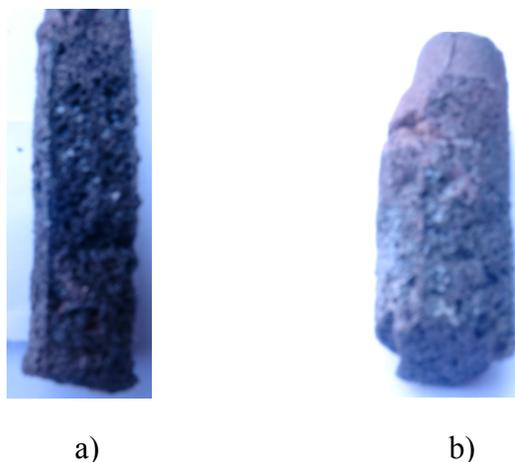


Figura 4.6 a) Espécimen [1] con composición 45-55 lodo-arcilla a 1150 °C sin molde;  
b) Espécimen [2] con composición 45-55 lodo-arcilla a 1150 °C sin molde.

La siguiente tabla muestra las propiedades obtenidas de los especímenes cocidos con la técnica que emplea molde.

Tabla 4.6. Resultados de la caracterización física de las probetas elaboradas con mezclas lodo-arcilla 45-55 y cocidas a 1150° C con molde.

Muestra	Porosidad,%	Absorción de agua,%	Densidad real, [g/cm <sup>3</sup> ]	Densidad aparente, [g/cm <sup>3</sup> ]	Densidad relativa	Resistencia Máxima, [MPa]	Resistencia específica [MPa/(kg/m <sup>3</sup> )]
45-55 [1]	33.42	24.6	3.01	1.73	0.57	2.20	0.00127
45-55 [2]	28.42	49.5	23.88	1.86	0.07	3.61	0.00193

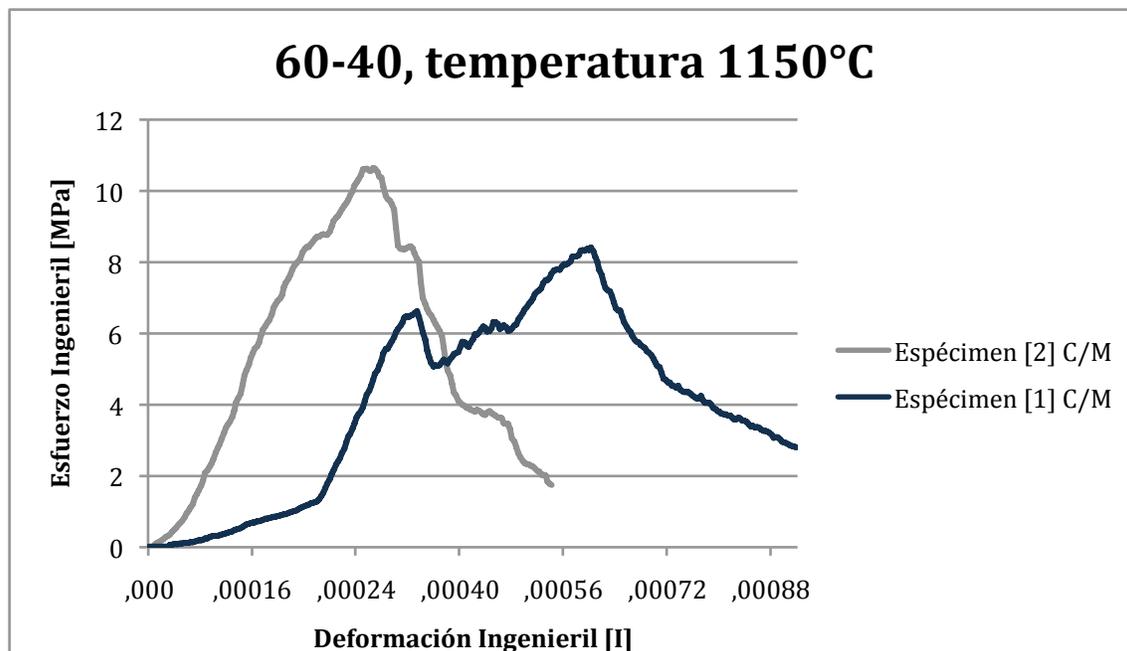
Los valores de resistencia disminuyeron considerablemente para este material con estructura porosa (Gráfica 4.6). Además se aprecia que la curva de esfuerzo ingenieril es típico de un cerámico celular.



La siguiente tabla muestran las propiedades obtenidas de los especímenes cocidos con la técnica que emplea molde.

Tabla 4.7. Resultados de la caracterización física de las probetas elaboradas con mezclas lodo-arcilla 60-40 y cocidas a 1150° C con molde.

Muestra	Porosidad, %	Absorción de agua,%	Densidad real, [g/cm <sup>3</sup> ]	Densidad aparente, [g/cm <sup>3</sup> ]	Densidad relativa	Resistencia Máxima, [MPa]	Resistencia específica [MPa/(kg/m <sup>3</sup> )]
60-40 [1]	30.3	22.8	3.08	1.81	0.58	8.41	0.00418
60-40 [2]	35.3	32.5	3.71	1.68	0.45	10.64	0.00633



Gráfica 4.7 Esfuerzo-deformación con composición 60-40 lodo-arcilla. Cocidos a 1150 °C, especímenes [1] y [2] con molde.

#### 4.7 Composición 30-70 (lodo-arcilla), temperatura 1200°C.

Para esta temperatura y esta composición sólo se pudo obtener una probeta que fue realizada sin molde ya que el espécimen cocido con molde sufrió una gran deformación. Se muestran los materiales obtenidos en la Figura 4.8.

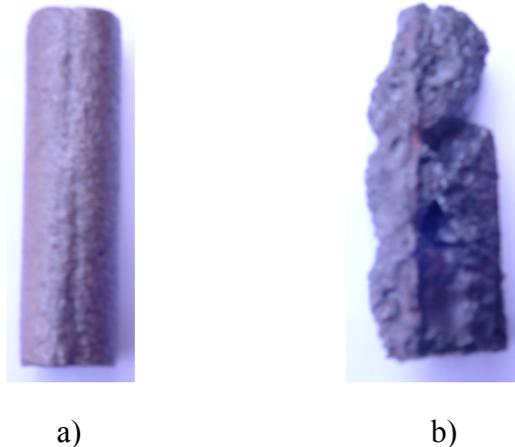


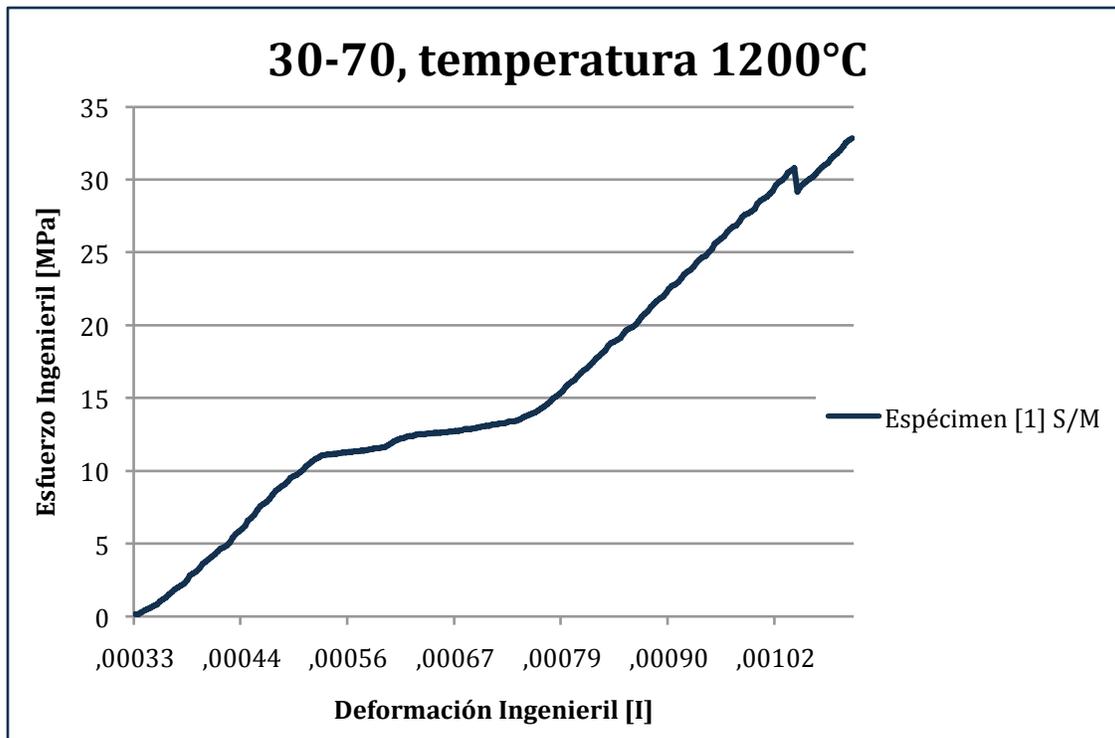
Figura 4.8 a) Espécimen [1] con composición 30-70 lodo-arcilla a 1200 °C sin molde:  
b) Espécimen [2] con composición 30-70 lodo-arcilla a 1200 °C con molde (no ensayado).

En la siguiente tabla sólo aparecen las propiedades del espécimen [1] que fue el sometido al ensayo de compresión.

Tabla 4.8. Resultados de la caracterización física de las probetas elaboradas con mezclas lodo-arcilla 30-70 y cocidas a 1200° C con molde.

Muestra	Porosidad,%	Absorción de agua,%	Densidad real, [g/cm <sup>3</sup> ]	Densidad aparente, [g/cm <sup>3</sup> ]	Densidad relativa	Resistencia Máxima, [MPa]	Resistencia específica [MPa/(kg/m <sup>3</sup> )]
30-70 [1]	29.75	0.85	1.85	1.82	0.98	32.82	0.0179

Como se observa en la Figura 4.8a, bajo estas condiciones no se obtuvo un material poroso celular pero las propiedades mecánicas mostradas en la Grafica 4.8 son evidencia de que este material tiene propiedades muy interesantes para su empleo en aplicaciones con alta resistencia a la compresión. Esta probeta superó la celda de carga de 5KN y no se llegó a su destrucción.



Gráfica 4.8 Esfuerzo-deformación con composición 30-70 lodo-arcilla. Cocido a 1200 °C, espécimen [1] sin molde.

El difractograma de este material se muestra en la Figura 4.9 y la siguiente tabla muestra los minerales identificados mediante este análisis en todos difractogramas.

Tabla 4.9. Minerales cristalinos presentes en las probetas elaboradas con mezclas lodo-arcilla (identificados mediante DRX).

Compuesto	Símbolo	Fórmula Química
Mullita	M	$Al_6Si_2O_{13}$
Tridimita	T	$SiO_2$ (triclínico)
Cristobalita	Cr	$SiO_2$ (tetragonal)
Cuarzo	C	$SiO_2$ (romboédrico)
Albita	A	$NaAlSi_3O_8$
Anhidrita	An	$Ca(SO_4)$
Hematita	H	$Fe_2O_3$

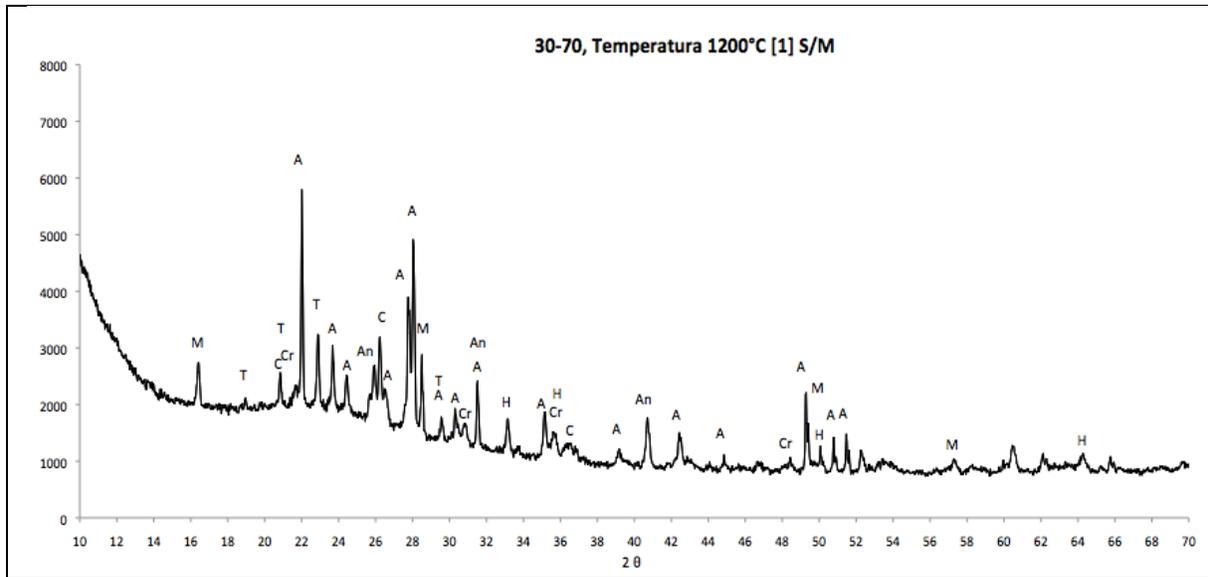


Figura 4.9 Difractograma para la composición de 30-70 lodo-arcilla a 1200°C sin molde.

#### 4.8 Composición 45-55 (lodo-arcilla), temperatura 1200°C

Los especímenes obtenidos para esta composición fueron 2. Uno se realizó con molde (C/M) y el otro sin molde (S/M). Ambas fueron elaboradas bajo las mismas condiciones de cocción. La Figura 4.7 muestra la apariencia de los materiales obtenidos.



a)



b)

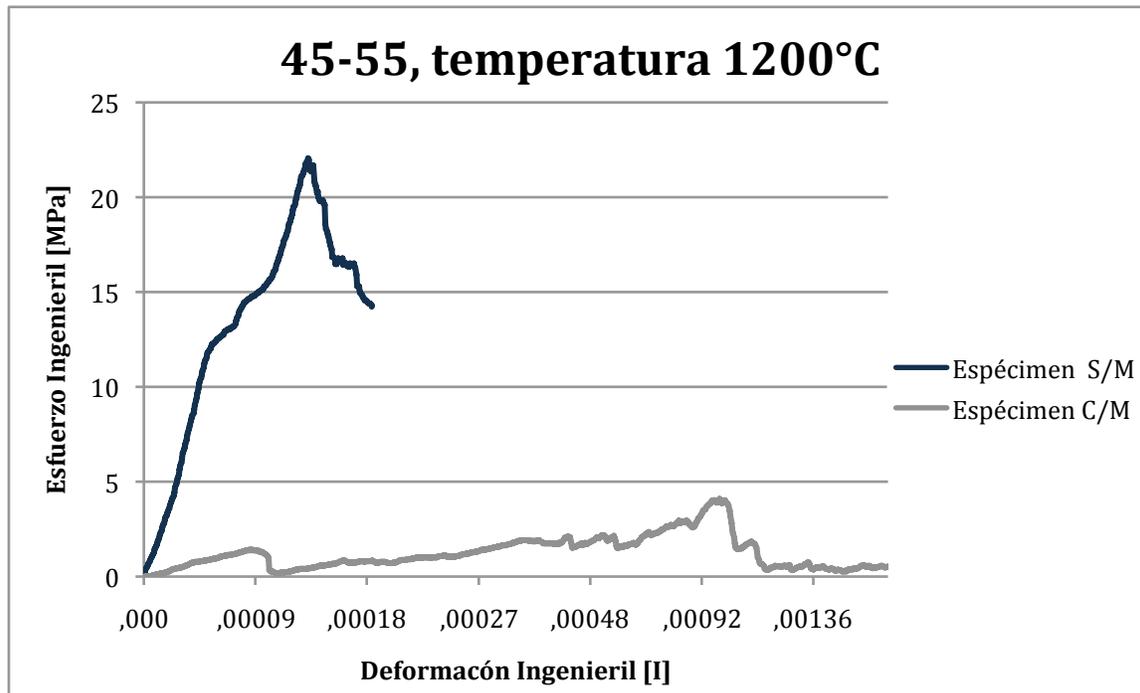
Figura 4.10 a) Especímen [1] con composición 45-5 lodo-arcilla a 1200 °C sin molde:  
b) Especímen [1] con composición 45-55 lodo-arcilla a 1200 °C con molde.

El espécimen realizado con molde formó un material poroso mientras que el que fue cocido sin molde tiene una apariencia sólida con ausencia de poros apreciados a simple vista. La siguiente tabla muestra las propiedades de cada uno de ellos.

Tabla 4.10. Resultados de la caracterización física de las probetas elaboradas con mezclas lodo-arcilla 45-55 y cocidas a 1200° C con molde.

Muestra	Porosidad,%	Absorción de agua,%	Densidad real, [g/cm <sup>3</sup> ]	Densidad aparente, [g/cm <sup>3</sup> ]	Densidad relativa	Resistencia Máxima, [MPa]	Resistencia específica [MPa/(kg/m <sup>3</sup> )]
45-55 [1] sin molde	35.39	7.6	1.92	1.67	0.86	22.31	0.0132
45-55 [1] con molde	53.24	47	2.81	1.21	0.43	4.08	0.00335

La Gráfica 4.8 muestra el comportamiento del material realizado sin molde y también el comportamiento del material poroso obtenido mediante el empleo de molde.



Gráfica 4.9 Esfuerzo-deformación con composición 45-55 lodo-arcilla. Cocidos a 1200 °C, especímenes S/M sin molde y C/M con molde.

Los difractogramas realizados para esta composición se muestran en la Figura 4.11 y 4.11 para el material cocido sin molde y con molde, respectivamente.

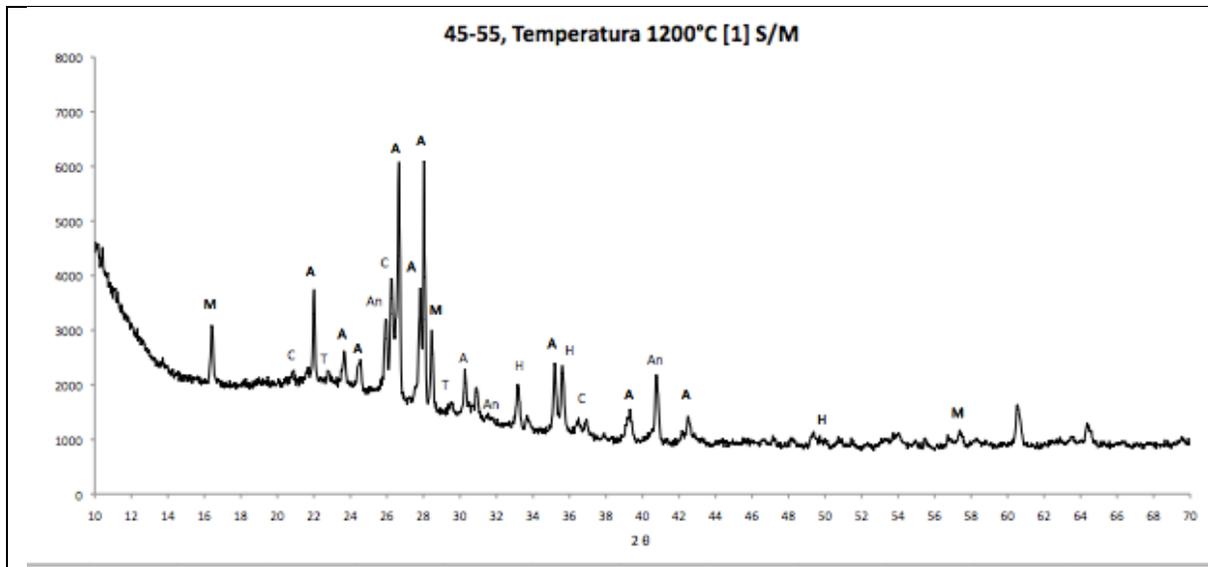


Figura 4.11 Difractograma para la composición de 45-55 lodo-arcilla a 1200°C sin molde.

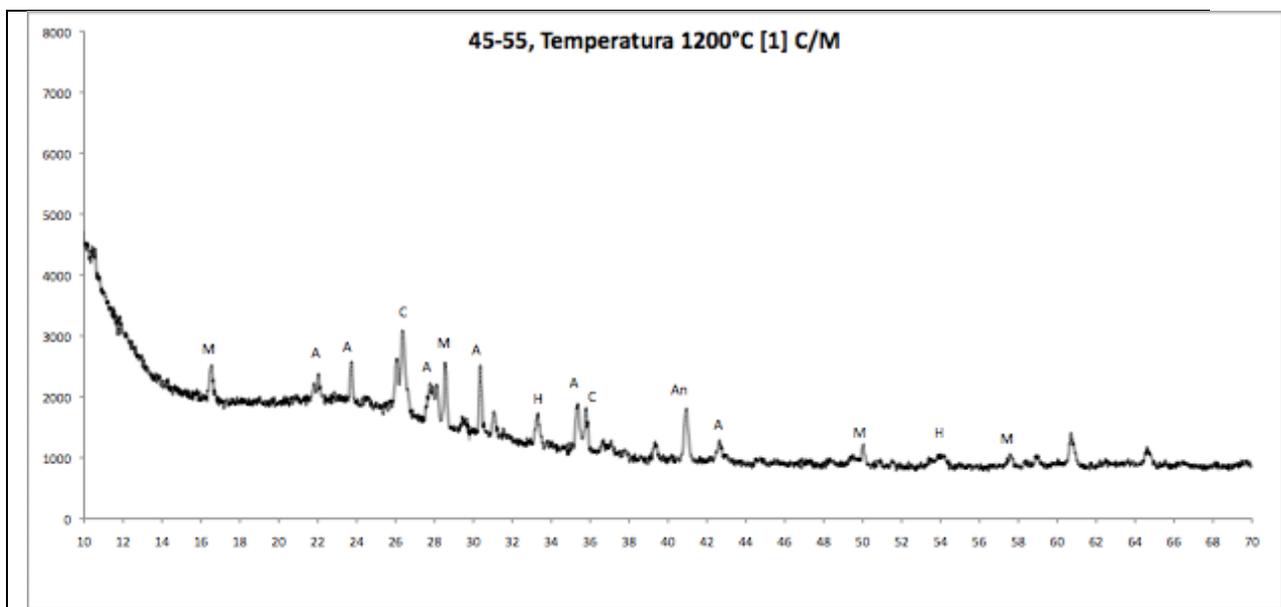


Figura 4.12 Difractograma para la composición de 45-55 lodo-arcilla a 1200°C con molde.

#### 4.9 Composición 60-40 (lodo-arcilla), temperatura 1200°C.

De igual manera que en la anterior para esta composición se elaboraron 2 muestras, una cocida con molde (C/M) y otra sin molde (S/M). Ambas muestras fueron cocidas bajo las mismas condiciones. La Figura 4.13 muestra la apariencia de estos materiales.

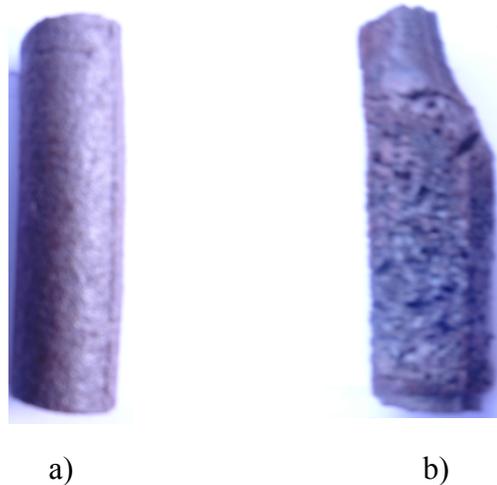


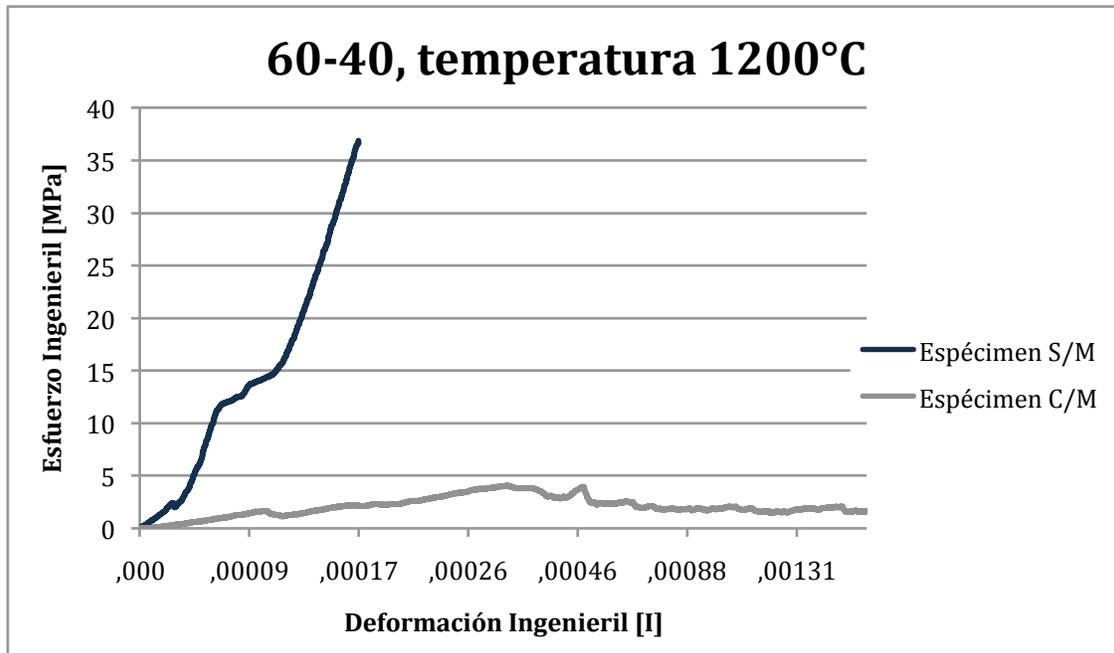
Figura 4.13 a) Espécimen [1] con composición 60-40 lodo-arcilla a 1200 °C sin molde;  
b) Espécimen [1] con composición 60-40 lodo-arcilla a 1200 °C con molde.

Como muestra la Figura 4.13 el espécimen cocido sin molde no presentó una estructura porosa. Por el otro lado, el material cocido con molde generó la estructura de un material celular. La siguiente tabla muestra las propiedades obtenidas para estos materiales.

Tabla 4.11. Resultados de la caracterización física de las probetas elaboradas con mezclas lodo-arcilla 60-40 y cocidas a 1200° C con molde.

Muestra	Porosidad,%	Absorción de agua,%	Densidad real, [g/cm <sup>3</sup> ]	Densidad aparente, [g/cm <sup>3</sup> ]	Densidad relativa	Resistencia Máxima, [MPa]	Resistencia específica [MPa/(kg/m <sup>3</sup> )]
60-40 [1] sin molde	32.18	3.25	1.87	1.76	0.94	36.88	0.02091
60-40 [1] con molde	36.71	32.45	3.52	1.64	0.46	4.05	0.00246

El material sin molde obtuvo una resistencia mayor a la capacidad de la celda de carga sin sufrir ninguna fisura (Gráfica 4.10). El material poroso presentó una resistencia significativamente menor.



Gráfica 4.10 Esfuerzo-deformación con composición 45-55 lodo arcilla. Cocido a 1200 °C; especímenes S/M sin molde y C/M con molde.

Los difractogramas para esta composición se muestran en la Figura 4.14 para el material realizado sin molde y 4.15 para el que se empleó molde.

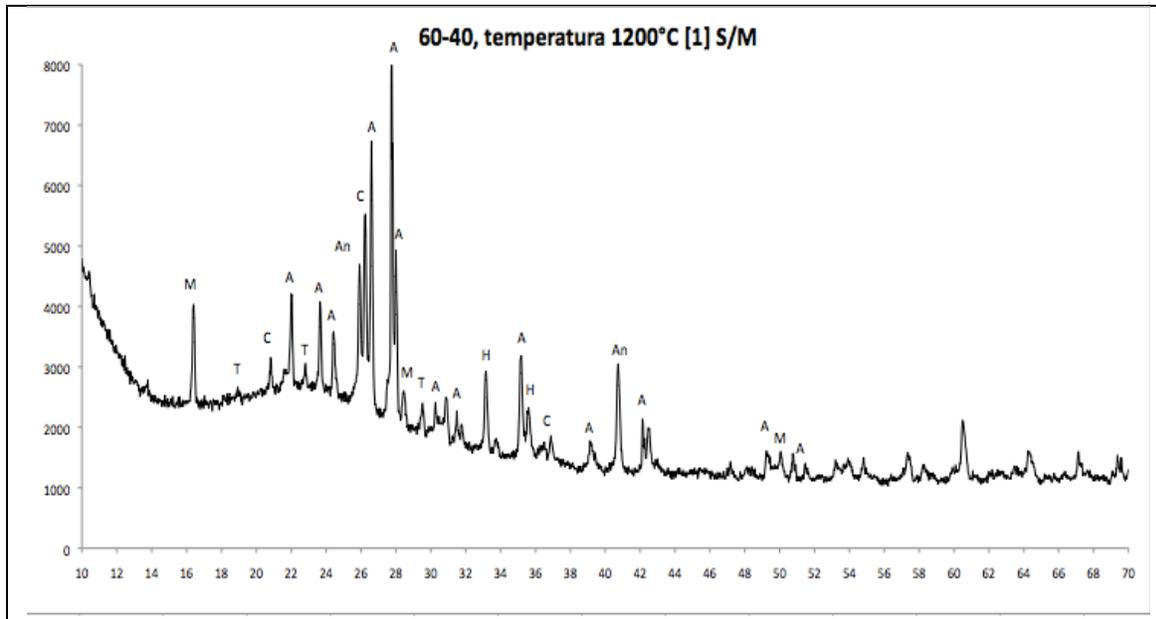


Figura 4.14 Difractograma para la composición de 60-40 lodo-arcilla a 1200°C sin molde.

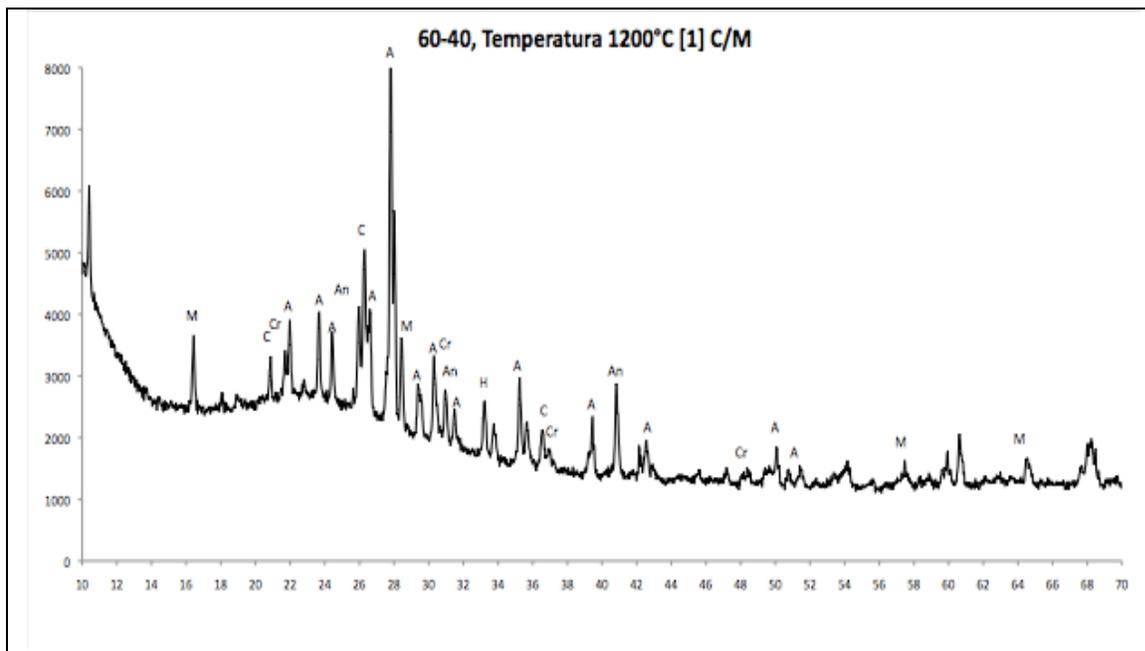


Figura 4.15 Difractograma para la composición de 60-40 lodo-arcilla a 1200°C con molde.

De acuerdo al análisis petrográfico realizado a las probetas, se observó un aumento del tamaño de grano de los minerales con respecto al inicial y se identificaron principalmente cuatro componentes: material amorfo, cuarzo, plagioclasas y piroxenos

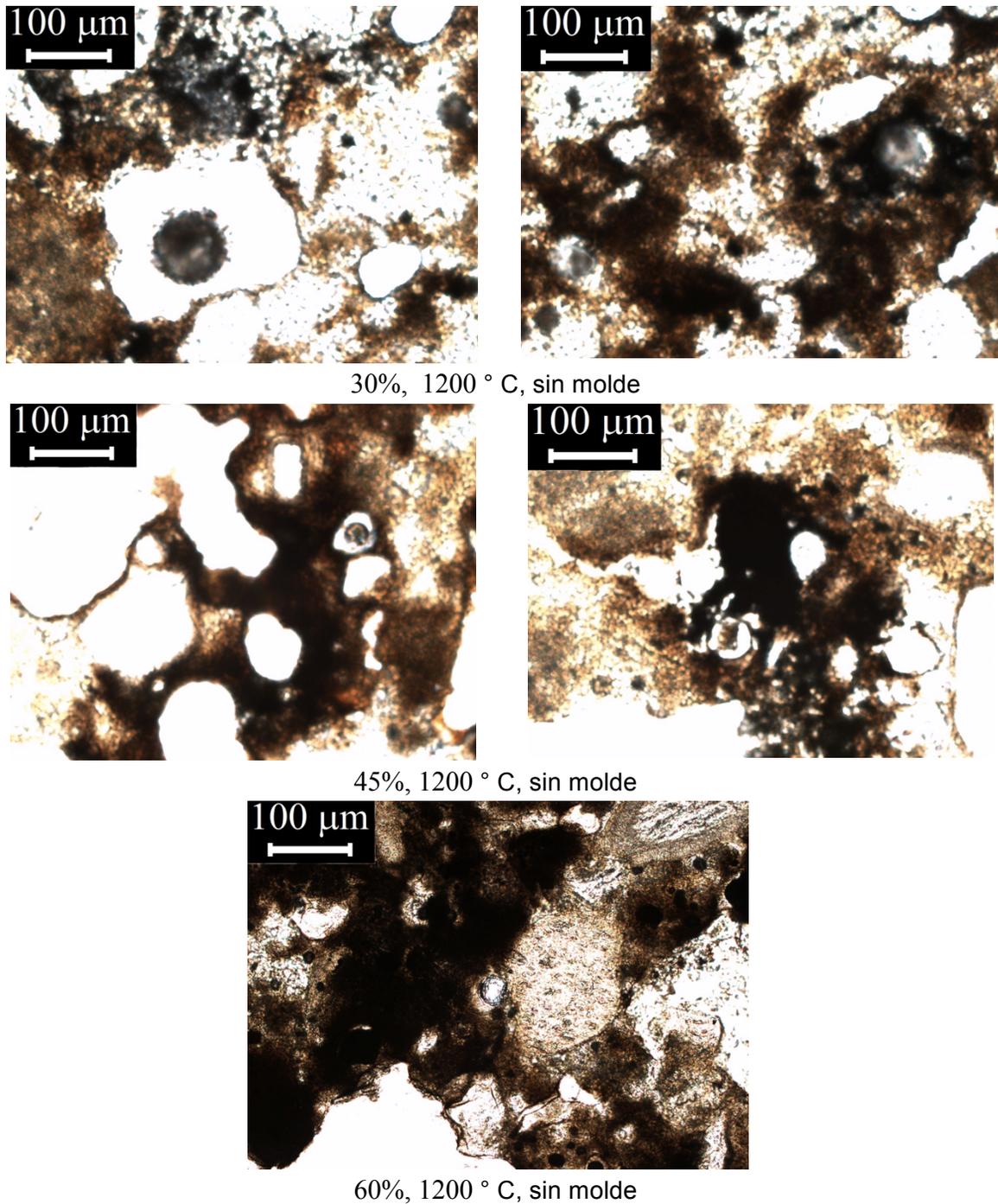


Figura 4.16. Fotomicrografías tomadas en microscopio de polarización de las probetas elaboradas con lodo: arcilla a 1200 ° C, sin molde.

En la Figura 4.16 se aprecian cristales bien definidos de mayor tamaño respecto al material inicial (Figura 4.17). A esta temperatura se propició la formación de material

amorfo. Este último se aprecia como las zonas de color negro. Este material tiene disueltos pequeños cristales de minerales que son de color más claro.

La formación de la fase vítrea está presente para todas las composiciones lodo-arcilla de las probetas. También se aprecian diferentes tamaños de los minerales debido al crecimiento de estos cristales generado por el enfriamiento lento que sufrió el material. Este enfriamiento lento se debió a que las probetas no se retiraron del horno sino hasta que la temperatura disminuyó hasta temperatura ambiente (aproximadamente 24 horas después de la cocción).

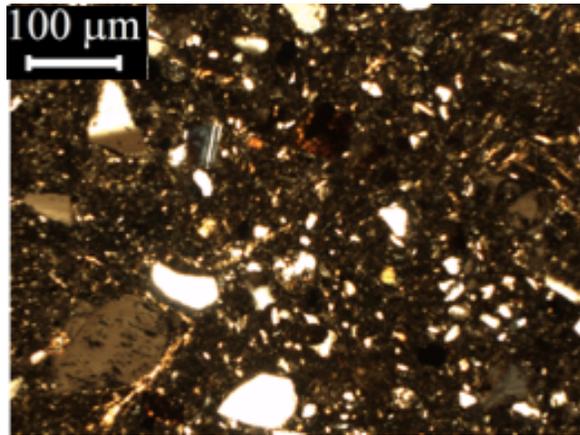


Figura 4.17 Fotomicrografías tomadas en microscopio de polarización del lodo de la planta potabilizadora.

La Figura 4.18 muestra imágenes escaneadas a partir de las láminas delgadas preparadas para hacer el análisis petrográfico. Se observa la variabilidad de la porosidad generada en los materiales debido a la temperatura de cocción y técnica empleada en la misma (con molde o sin molde).

Los materiales con mayor porosidad son aquellos en los que su cocción se realizó con molde. También se observan algunos poros de mayor tamaño, resultado de aire atrapado durante el moldeo de las probetas.

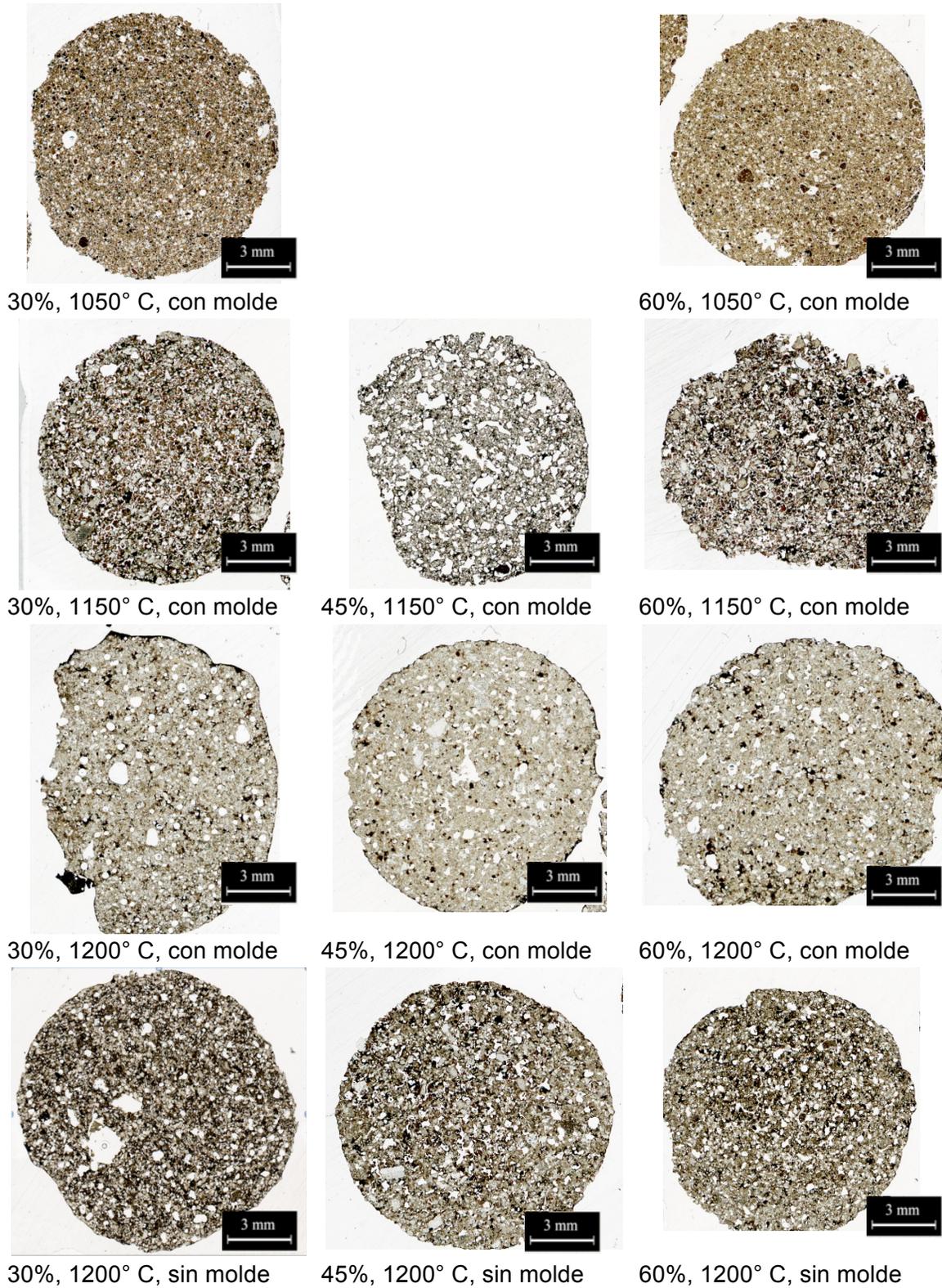


Figura 4.18. Imágenes de láminas delgadas escaneadas (análisis petrográfico).

## Capítulo 5. Discusión

### 5.1 Consideraciones que se deben tomar en cuenta en el proceso de fabricación

En el capítulo de Desarrollo Experimental se explicó brevemente el procedimiento necesario para la fabricación del material. Dentro de esto se encontraron inconvenientes que se deben tomar en cuenta para pruebas futuras como lo es el uso de los moldes utilizados. Estos moldes presentaron una deformación marcada después de dos eventos en el horno y esto afecta la geometría de las probetas.

Por simple observación, las probetas cocidas a 1050 °C no lograron obtener las características deseadas de una estructura celular. Las muestras cocidas a 1150 °C y 1200 °C realizadas con molde presentaron una apariencia porosa característica de un sólido celular. Este último fue denominado como cerámico celular basado en la definición dada por Gibson (1999). Esta definición afirma que un material celular está compuesto por un conjunto o un ensamble de pequeños compartimientos con bordes o caras sólidas interconectadas. Por otro lado, Scheffler y Colombo, (2005), afirman que existe un material cerámico denominado hormigón celular con densidades aparentes que van desde los 100 kg/m<sup>3</sup> hasta poco más de 1600 kg/m<sup>3</sup>.

Por otro lado, aquéllas probetas que fueron cocidas a estas 1150 y 1200° C sin molde no formaron la estructura. Muy probablemente se debió a que las probetas no tuvieron el resguardo de los moldes que impidió el escape de los gases que se originaron en las probetas. Esto se confirma al observar la parte superior de las muestras ya cocidas con molde ya que solo en esta parte no se formó la estructura del cerámico celular. Además presentaron una contracción por la cocción principalmente debido a la liberación de estos gases que no fueron resguardados parcialmente por el molde.

### 5.2 Inconvenientes para calcular las propiedades intensivas

Uno de los factores que se tomó en cuenta desde un inicio y además que es indispensable para poder tener una caracterización adecuada del material obtenido, fue el cálculo de las propiedades intensivas: densidad real, densidad aparente, densidad relativa, porcentaje de absorción de agua, porcentaje de porosidad y resistencia específica.

Inicialmente se calcularon estos valores de acuerdo a la norma ASTM C 20-97 (Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water). Sin embargo los resultados obtenidos mediante esta norma no fueron del todo acertados e incluso se podría decir que no fueron congruentes. Aunque presentan características físicas similares, los resultados no

fueron correctos debido a que la norma antes citada no fue realizada para este tipo de material con gran porosidad superficial.

Tomando en cuenta que no todas las expresiones de la norma ASTM C 20-97 fueron usadas, se hizo un análisis detallado del origen de las fórmulas para verificar que éstas fueran correctas. De esta forma se consideraron aquellas que fueron útiles para el cálculo de resultados.

Se tiene que cada uno de las probetas contiene poros de diferentes tipos. Se considera que el volumen total ( $V_T$ ) de la probeta está dado por la siguiente ecuación:

$$V_T = V_m + V_{pc} + V_{pa} \quad 5.1$$

Dónde:

$V_m$  = Volumen de la masa del material

$V_{pc}$  = Volumen de poros cerrados

$V_{pa}$  = Volumen de poros abiertos

Se consideró que los poros cerrados o inaccesibles son aquéllos en los que el agua no llega en el proceso de inmersión del material para obtener el peso saturado de la muestra. Dentro del material hay poros abiertos o accesibles (Pa) y poros cerrados o inaccesibles (Pc) e idealmente se deberían calcular de la siguiente manera.

$$Pa = \frac{V_{pa}}{V_T} \times 100\% \quad 5.2$$

$$Pc = \frac{V_{pc}}{V_T} \times 100\% \quad 5.3$$

La porosidad total es la suma de las porosidades anteriores obteniendo una ecuación como la que sigue

$$\text{Porosidad Total} \quad P_T = \frac{V_{pa} + V_{pc}}{V_T} \times 100\% \quad 5.4$$

Denotando el peso cómo (D), el peso saturado (W), el peso suspendido (S), la masa del espécimen saturado es igual a la siguiente ecuación:

$$W = D + V_{pa}\rho_{H_2O} \quad 5.5$$

El volumen de los poros no tiene masa ya que están llenos de aire y ésta se desprecia. Por lo tanto se consideró que están completamente saturados de agua para poder hacer una cuantificación ideal del peso saturado (W). Con esto y el empleo de la ecuación anterior se tiene que el volumen de poros abiertos se calcula como:

$$V_{pa} = \frac{W - D}{\rho_{H_2O}} \quad 5.6$$

Para la masa de la probeta suspendida (S) y tomando en cuenta el principio de Arquímedes que afirma que el empuje de un cuerpo, sumergido total o parcialmente en un líquido, está dado por la masa del cuerpo multiplicado por la gravedad como se muestra en la siguiente ecuación.

$$E = mg = \rho_l g V \quad 5.7$$

Por lo que haciendo una suma de fuerzas se tiene:

$$S(g) + W(g) = \text{Empuje}$$

$$S(g) = g(W) - E$$

$$S(g) = g(W) - \rho_{H_2O} V_T(g)$$

Finalmente el peso suspendido es

$$S = W - \rho_{H_2O} V_T \quad 5.8$$

y el volumen total en función de la ecuación anterior queda como:

$$V_T = \frac{W - S}{\rho_{H_2O}} \quad 5.9$$

Si se considera un volumen aparente  $V_{ap}$  que es la suma del volumen de masa y el volumen de poros cerrados :

$$V_{ap} = V_m + V_{pc} \quad 5.10$$

Sustituyendo la ecuación 5.5 en 5.8 se tiene:

$$\rho_{H_2O}(V_T - V_{pa}) = D - S \quad 5.11$$

Ahora, de la ecuación 5.1, se puede deducir lo siguiente:

$$V_T - V_{pa} = V_m - V_{pc} = V_{ap} \quad 5.12$$

Entonces de lo anterior se tiene que el volumen aparente es:

$$V_{ap} = \frac{D - S}{\rho_{H_2O}} \quad 5.13$$

Tomando en cuenta que el cálculo de la porosidad total:

$$P_T = \frac{V_{pa} + V_{pc}}{V_T} \times 100\% \quad 5.14$$

Despejando y sustituyendo de 5.12 en 5.14

$$P_T = 1 - \frac{V_m}{V_T} \times 100\% \quad 5.15$$

Para el cálculo de la porosidad abierta se tiene que:

$$P_a = \frac{V_{pa}}{V_T} = \frac{V_T - V_{ap}}{V_T} \times 100\% \quad 5.16$$

Y para el cálculo de porosidad cerrada:

$$P_c = \frac{V_{pc}}{V_T} = \frac{V_m - V_{ap}}{V_T} \times 100\% \quad 5.17$$

Relativo a la absorción de agua, que es la máxima cantidad de agua que puede entrar en los poros accesibles, la fórmula es como a continuación se muestra:

$$A = \frac{W - D}{D} \times 100\% \quad 5.18$$

### 5.3 Problemática para el cálculo de la porosidad

Las fórmulas desarrolladas anteriormente, relativas a la porosidad dieron resultados incongruentes de la misma forma que sucedió con las fórmulas de la norma anteriormente mencionada. Esto es debido a que las muestras contienen una gran cantidad de poros en toda la superficie del espécimen. Al sacar la probeta del agua para obtener el peso saturado. Estos poros no tiene forma de contener el líquido y es evidente que algunos poros sólo estan parcialmente saturados de agua o incluso no lo están.

Por lo anterior, apoyándose en los análisis de DRX, se asumió una densidad teórica de 2.6 (g/cm<sup>3</sup>) tomando en cuenta las siguientes densidades de los materiales identificados en el material cerámico celular.

Tabla 5.1. Valores de densidad de los minerales identificados en las probetas elaboradas.

Compuesto	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
Cuarzo	2.65
Vidrio	2.49
Mullita	3.36
Albita	2.61

Debido a que las probetas no tuvieron una geometría regular, se consideró la ecuación 5.9 para el cálculo del volumen y junto con esto se obtuvo el peso teórico ( $M_T$ ) del espécimen asumiendo que no presenta porosidad alguna y todo el cuerpo está formado por un material con una densidad de 2.6 (g/cm<sup>3</sup>), calculándose con la siguiente fórmula:

$$M_T = V_T \rho_{th} \quad 5.19$$

Una vez obtenido el peso teórico del material y con el peso seco (D) se obtuvo el volumen de la masa ( $V_m$ ) de la siguiente manera:

Si

$$D = V_m \rho_{th} \quad 5.20$$

Por lo tanto

$$V_m = \frac{D}{\rho_{th}} \quad 5.21$$

La porosidad se calculó de acuerdo a la ecuación 5.15 como se demuestra a continuación. Para esto se consideró que  $M_M$  es el peso del material que ocuparía en el lugar ocupado por los poros.

$$M_M = M_T - D \quad 5.22$$

Por lo que

$$V_P \rho_{th} = V_T \rho_{th} - V_m \rho_{th} \quad 5.23$$

$$V_P = \frac{V_T - V_m}{V_T} = 1 - \frac{V_m}{V_T} \times 100\% \quad 5.24$$

De esta forma se demuestra que la ecuación 5.15 y 5.24 son equivalentes. Para el cálculo de densidades real se tiene que:

$$\rho = \frac{M}{V_m} \quad 5.25$$

M=Peso del sólido

Considerando que  $M=D$  y el cálculo de volumen aparente ( $V_{ap}$ ), se tiene que se puede calcular la densidad real como sigue:

$$\rho_{real} = \frac{D}{V_{ap}} \quad 5.26$$

Por último, la densidad aparente se calculó sabiendo que:

$$\rho_{ap} = \frac{M}{V_T} \quad 5.27$$

Sustituyendo

$$\rho_{ap} = \frac{D}{V_T} \quad 5.28$$

#### 5.4 Comportamiento Mecánico

En el capítulo anterior se mostraron las propiedades de cada uno de los materiales obtenidos según el porcentaje de lodo y temperatura. Los datos obtenidos resultaron ser variados respecto a las diferentes composiciones de las probetas cocidas a una misma temperatura. Esto, como ya se mencionó, es probablemente debido a la gran porosidad superficial que presentan los materiales y que influye directamente en el peso saturado y suspendido que se utilizan para el cálculo de las densidades, porosidad y porcentaje de absorción de agua.

En algunos casos se presentaron fenómenos que influyeron considerablemente en el valor de las propiedades mecánicas. Uno de los más importantes fue la deformación por contracción térmica en el material y las fisuras formadas por burbujas de gas en las probetas.

Si se comparan los resultados de resistencia a la compresión con lo establecido en la norma NMX-C-006-1976 titulada: Ladrillos bloques cerámicos de barro, arcilla y/o similares, que establece a los mismos como elementos de construcción y presenta el valor mínimo de resistencia a la compresión en los clasificados como realizados a mano de 1.96-2.94 [MPa] ó 20-30 kg/cm<sup>2</sup>, se tiene lo siguiente:

Tabla 5.2. Resistencia a la compresión de las probetas cocidas a 1050° C.

Composición de lodo, %	Temperatura	Modo de cocción	Resistencia, [MPa]
30	1050° C	Con molde	4.9
45	1050° C	Con molde	7.25

Para la temperatura de cocción de 1150° C se obtuvieron probetas que también superaron los valores de resistencia a la compresión establecido para ladrillos elaborados a mano.

Tabla 5.3. Resistencia a la compresión de las probetas cocidas a 1150° C.

Composición de lodo, %	Temperatura	Modo de cocción	Resistencia, [MPa]
30	1150° C	Con molde	16.3
45	1150° C	Sin molde	8.21
45	1150° C	Con molde	3.61
60	1150° C	Con molde	10.64

Dentro de la misma norma existe la clasificación la cual se refiere a los ladrillos elaborados con una máquina extrusora con un resistencia mínima de 19.61-24.52 [MPa] ó 200-250 kg/cm<sup>2</sup>. Estos valores se pudieron obtener para las probetas cocidas a 1200° C con las siguientes características:

Tabla 5.4. Resistencia a la compresión de las probetas cocidas a 1200° C.

Composición de lodo,%	Temperatura	Modo de cocción	Resistencia, [MPa]
30	1200° C	Sin molde	32.83
45	1200° C	Sin molde	22.32
60	1200° C	Sin molde	36.89

Las probetas cocidas a 1200°C sin molde presentaron mayores valores de resistencia a la compresión. Las probetas cocidas con molde presentaron resistencias necesarias para ser clasificados como ladrillos hechos a mano.

### 5.5 Efecto en el uso de molde

Debido a que las características del material cambiaron por el uso molde en la cocción de las probetas a 1150°C y 1200°C, es conveniente discutir este fenómeno con el fin de comprenderlo mejor. Al existir cuarzo en el material, a 573°C se presenta una transformación de fase  $\alpha \rightarrow \beta$  con un considerable aumento de volumen del cuarzo. También se llevó a cabo la combustión de la materia orgánica presente y el desprendimiento de agua de la caolinita lo cual causó una disminución del volumen de la probeta. Además, a los 700°C aproximadamente, las arcillas pierden agua químicamente ligada a ellas. Esto propicia la formación de poros en el material por los gases liberados. Conforme aumentó la temperatura formó una fase líquida de baja viscosidad y también comenzó aparecer mullita a 1100°C. Se tiene la hipótesis de que los materiales cocidos con molde presentan una gran porosidad debido de que los gases formados durante el proceso antes mencionado son contenidos parcialmente por el molde lo que maximiza la porosidad. Junto con la fase líquida, estos gases generan presión hasta escapar formando poros. Por el contrario lo que pasa con los que no se usó molde, que permiten la liberación de estos gases más fácilmente y la porosidad formada a baja temperatura es sustituida por la fase líquida que aumenta con la temperatura (1200°C) y compacta las probetas haciendo también más denso el material.

Si bien una sola sección delgada no puede representar la porosidad total de las probetas como se reportó en el capítulo anterior, se puede apreciar los cambios que presentaron éstas respecto a la temperatura de cocción y técnica empleada. En las probetas

cocidas a 1050°C se aprecia un tamaño de poro menor respecto a las cocidas a 1150 y 1200°C. Conforme aumentó la temperatura de cocción, la porosidad disminuyó así como el tamaño de los poros. A esta última temperatura la fase líquida llenó los poros que mantuvieron un mayor tamaño a 1150°C.

Los materiales con mayor resistencia a la compresión fueron aquellos cocidos a 1200°C sin molde. Es importante destacar el interés en las composiciones 30% y 60% de lodo ya que en la primera la resistencia a la compresión fue mayor al límite máximo de la celda de carga utilizada en la maquina universal. Por el otro lado, la probeta elaborada con 60% de lodo no sufrió daño. Lo anterior significa que la resistencia de este material podría ser igual o tal vez mayor a las propiedades de un concreto de alta resistencia que según la ASTM es de 55 MPa o 560.84 kg/cm<sup>2</sup>.

### 5.6 Análisis de datos

En el presente trabajo se ha esquematizado el proceso de obtención de dos productos, uno con altas propiedades de compresión que son aquellos obtenidos a 1200°C y cocidos sin molde. Estos pueden tener una posible aplicación en la industria de la construcción como material de alta resistencia. Por otro lado, los que fueron cocidos con moldes que, aunque algunos mostraron propiedades mecánicas aceptables, su gran porosidad y resistencia a altas temperaturas los hace adecuados para su aplicación en el filtrado de gases y soportes para catalizadores.

Debido a que las propiedades de los materiales resultaron dispersas por las técnicas empleadas para su obtención y las características propias del material como alta porosidad y geometría irregular, para fines de investigación y desarrollo tecnológico no hay duda de que el modelo planteado es de gran utilidad. Si embargo, se propone realizar la medición de la densidad real y del volumen de masa mediante el Método del Picnómetro. El picnómetro es un matraz calibrado de vidrio de 25 ó 50 ml, cerrado con un tapón esmerilado, hueco y que termina por su parte superior en un tubo capilar con graduación. El volumen se puede determinar con gran precisión, además de requerir de una pequeña cantidad de material pulverizado, no existe la posibilidad de retención de burbujas y no involucra la porosidad dando así datos precisos de la densidad real.

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos de densidad real, densidad aparente y porosidad calculados mediante la norma ASTM C 20-97, solo se mostraran estos valores ya que los referentes a densidad relativa y resistencia específica dependen de los anteriores.

Tabla 5.5. Resultados de la caracterización de las probetas siguiendo la metodología señalada en la norma ASTM C 20.97.

ASTM C 20-97					
Muestara, % lodo	Temperatura, °C	Técnica de cocción	Densidad real [g/cm <sup>3</sup> ]	Densidad aparente, [g/cm <sup>3</sup> ]	Porosidad, %
30	1050	Con molde	1.69	1.20	40.83
30	1050	Con molde	1.70	1.20	41.18
45	1050	Con molde	1.65	1.18	39.75
45	1050	Con molde	1.62	1.12	45.40
60	1050	Con molde	1.68	1.09	54.74
30	1150	Con molde	1.79	1.37	30.74
30	1150	Con molde	1.65	1.43	15.76
45	1150	Sin molde	1.45	1.00	44.53
45	1150	Sin molde	2.11	1.62	30.39
45	1150	Con molde	2.69	1.62	66.16
45	1150	Con molde	1.86	0.97	92.21
60	1150	Con molde	1.81	1.28	41.35
60	1150	Con molde	1.68	1.09	54.74
30	1200	Sin molde	1.83	1.80	1.56
45	1200	Sin molde	1.68	1.49	12.76
45	1200	Con molde	3.35	1.71	95.93
60	1200	Sin molde	1.76	1.67	5.73
60	1200	Con molde	1.65	1.07	53.39

En general los datos obtenidos fueron inconsistentes de acuerdo a los estudios realizados mediante difracción de rayos X ya que en esta se identifican materiales con una densidad promedio de 2.6 g/cm<sup>3</sup>, remarcando esta inconsistencia en los datos en color verde principalmente y aquellos datos en color rojo simplemente son imposibles, es por ellos que estos datos calculados con la norma fueron descartados.

Por otro lado, los datos obtenidos mediante las fórmulas analizadas en el presente trabajo se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5.6. Resultados de la caracterización de las probetas siguiendo la metodología descrita en el presente trabajo.

Fórmulas trabajadas					
Muestra, % lodo	Temperatura, °C	Técnica de cocción	Densidad real [g/cm <sup>3</sup> ]	Densidad aparente, [g/cm <sup>3</sup> ]	Porosidad, %
30	1050	Con molde	2.85	1.68	35.15
30	1050	Con molde	2.88	1.69	34.76
45	1050	Con molde	2.73	1.64	36.58
45	1050	Con molde	2.97	1.62	37.60
60	1050	Con molde	3.71	1.68	35.38
30	1150	Con molde	2.58	1.79	31.02
30	1150	Con molde	1.96	1.65	36.53
45	1150	Sin molde	2.61	1.45	44.20
45	1150	Sin molde	3.02	2.10	19
45	1150	Con molde	3.01	1.73	33.42
45	1150	Con molde	23.88	1.86	28.42
60	1150	Con molde	3.08	1.81	30.35
60	1150	Con molde	3.71	1.68	35.38
30	1200	Sin molde	1.85	1.82	29.75
45	1200	Sin molde	1.92	1.67	35.39
45	1200	Con molde	2.81	1.21	53.24
60	1200	Sin molde	1.87	1.76	32.18
60	1200	Con molde	3.52	1.64	36.71

Se pueden observar de la misma manera valores ilógicos como el marcado en rojo. Además también hay otros valores inconsistentes, como los señalados en verde. Los valores de porosidad son adecuados. Sin embargo, la inconsistencia en éstos es evidente pues algunas porosidades de materiales en las que se usó molde son similares a aquellas en las que no se utilizó molde.

## Conclusiones

La metodología planteada resultó una herramienta que, al ser utilizada correctamente, sin duda traerá grandes beneficios a las investigaciones futuras. Lo anterior ayudará a la optimización de los procesos para la obtención del material cerámico. De esta manera se direccionará a aplicaciones específicas como el caso de material para construcción de alta resistencia o soportes para catalizadores y filtros.

Parte fundamental de la caracterización de este material es la obtención de la densidad y porosidad, por lo que considerando que con los métodos disponibles (Norma ASTM C 20-97) los resultados fueron muy dispersos. Debido a esto se aplicó una metodología distinta con lo que se mejoró las incongruencias, sobre todo en los valores de porosidad.

Se ha podido observar que hay parámetros que influyen de manera significativa en las propiedades mecánicas y estructurales. Basado en esto, se puede lograr una optimización con la finalidad de establecer los parámetros de estudio, como lo es la temperatura que interviene de manera importante a partir de los 1150°C. Por lo tanto se descartan las temperaturas menores a 1150° C. Se debe tener precaución al llegar a los 1300°C debido a la reacción de interacción que pudieran ocurrir entre los componentes de las probetas y las paredes del horno.

El uso del molde está relacionado directamente con la estructura del material obtenido. Las condiciones extremas a las que fueron sometidos, hacen que su uso sea limitado a pocos eventos debido a la deformación sufrida a causa de las temperaturas empleadas.

El contenido significativo de material amorfo en las probetas cocidas a la mayor temperatura y sin molde indica que la porosidad cerrada es parte fundamental para su adecuado comportamiento mecánico. Por el contrario a las probetas cocidas con molde, estas contienen una porosidad accesible mucho mayor, siendo ésta favorable para aplicaciones de filtrado principalmente.

Se deben considerar cuidadosamente cada una de los parámetros mencionados y discutidos durante el capítulo 5 para que de esta forma se pueda optimizar el proceso durante las siguientes investigaciones. Si bien el presente trabajo realizó la exploración preliminar para el desarrollo de estos materiales es evidente que la valorización de este lodo es factible.

**Referencias bibliográficas**

- 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*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM C39/C 39 M-99. *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- BIA.(1998). *Bricklaying: Brick and Block Masonry*. USA: Brick Industry Association.
- Bruhns.W. (1964). *Petrografía*. 1<sup>er</sup>.ed.México:Unión Tipográfica Editorial Hispano-America.
- Callister,W.D. (2003). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Barcelona: Reverté.
- Castro D.A.(1989). *Petrográfica básica*. España: Editorial Paraninfo.
- Cerdeño del Castillo, F.J y Pérez Lorenzo, A.(2006). *Viabilidad técnica de uso de lodos de Estaciones de Tratamiento de Aguas Potables (ETAO) en fabricación de materiales cerámicos para la construcción*. España: Conarquitectura No 30.
- Chang,S.L.(2004).*X-Ray Multiple-Wave Diffraction:Theory and Application*.1<sup>er</sup>. ed. Alemania: Springer.
- Chaparro,W.(2006).*Electricidad para estudiantes de ingeniería mecánica*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- CNA (Comisión Nacional del Agua).(2007). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. México.
- Enviroment Protection Agency.(1999). *Biosolids Generation, Use, and Disposal in the United States*. EPA 530-R99-009.USA:EPA.
- Espejel Ayala, F. (2007). *Valoración de lodos generados en plantas de potabilizadoras para elaborar productos cerámicos*.Tesis,Maestria en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería.
- Gibson, L. J. & Ashby, M. F. (1999) .*Cellular Solids*. Cambridge, U.K:Cambridge University Press.
- Grenestedt, J. L. (1999). *Effective elastic behavior of some models for 'perfect' cellular solids* . Estocolmo, Suecia: International Journal of Solids and Structures.

- Groover, M. (2004). *Fundamentals of modern manufacturing*. 2nd. ed., USA: John Wiley and Sons.
- Ishizaki, K. Komarneni, S. Nanko, M. (1998). *Porous Materials*. Gran Bretaña: Kluwer Academic Publishers.
- Kingery W.D. (1976). *Introduction to Ceramics*. 2nd. ed., New York: J. Wiley.
- Lin Deng-Fong and Weng Chih-Huang. (2001). *Use of sew sludge ash as brick material*. Journal of Environmental Engineering, Vol. 127, No 10.
- Mari A, Eduardo. (1998). *Los Materiales Cerámicos*. Buenos Aires, Argentina: Librería y Editorial Alisina.
- Maskew Fair, Gordon, Charles Geyer John y Okun, Daniel. (1994). *Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales*. México: Limusa.
- NOM-004-SEMARNAT-2002. *Norma Oficial Mexicana. Protección Ambiental*. Publicada en el Diario Oficial el 15 de agosto de 2003.
- Norma Mexicana NMX-C-006-1976. *Ladrillos Bloques cerámicos de barro, arcilla y/o similares*.
- Norma Mexicana NMX-C083-ONNCCE-2002. *Industria de la Construcción-Concreto-Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cilindros de Concreto-Método de Prueba*.
- Norma N-CMT-2-01-001/02. (2002). *Características de los materiales, Ladrillos y bloques cerámicos*. México: Secretaría de Comunicaciones y Transporte.
- Pedroza Gonzáles, E. (2001). *Canal Parshall*. México: Comisión Nacional del Agua e Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Ramírez Zamora R.M, Espejel Ayala F, Chavez Garcia L, Durán Moreno A. y Schouwenaars R. (2008). *Optimization of the preparation conditions of ceramic products using drinking water treatment sludges*. Journal of Environmental Science and Health Part. 42:1562-1568.
- Ramírez Zamora R.M, Schouwenaars R. y Durán Moreno A. (2000). *Production of activated carbon from petroleum coke and its application in water treatment for the removal of metals and phenol*. Water Science and Technology, Vol. 42, Nos 5-6, Págs 119-126.
- RAS (2000). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico: Sistemas de Potabilización*. Sección II. Título C. Colombia.

- Reverté P.(1979). *La industria ladrillera*.3<sup>a</sup>.ed. Buenos Aires, Argentina: Editorial Reverté.
- Rockwell Automation.(2001).*Módulo de entradas de termopares/mV CompactTM I/O: Manual del usuario*. USA:Rockwell International Corporation.
- Sandoval Yoal L., Motellano Palacios L., Martín Domínguez A., Sánchez Guzmán L., Santana Ramírez Ma. De L., Morán Plata M.(2005). *Tratabilidad de los lodos producidos en la potabilización del agua*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Jiutepec.
- Scheffler. M y Colombo.P .(2005).*Cellulard Ceramics:Structure, Manufacturing, Properties and Applications*. Alemania:Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA Weinheim.
- Schouwenaars R, Durán Moreno A. y Ramírez Zamora R.M. (2004). *Primary silver extraction with a high sulphur activated petroleum coke*. Water Science and Technology, Vol 49.
- SNF Floerger.(2003).*Sludge Dewatering*. Francia.
- Valverde M. E. (2001). *Ladrillos cerámicos de perforación vertical para vivienda*. Tesis, Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Nacional Autónoma de México, ENEP Aragón.
- Weng Chih-Huang, Lin Deng-Fong and Chiang Pen-Chi.(2003).*Utilization of sludge as brick materials*. Advance Environmental Resercher.7:679-685.