



Universidad Autónoma de Baja California

Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería

T E S I S

"Material cerámico partiendo de residuos sólidos de planta de tratamiento de agua"

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

QUÍMICO INDUSTRIAL

PRESENTA

LEOPOLDO GARCIA CABRERA

Tijuana, B. C.

Marzo 2016

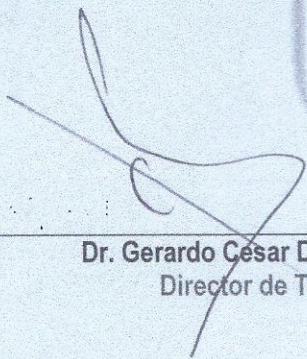
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

FOLIO No. 69
Tijuana, B. C., a 18 de noviembre de 2015.

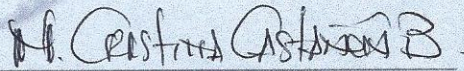
C. Leopoldo García Cabrera
Pasante de Químico Industrial
Presente

El tema para su examen profesional, en la Opción **Tesis** es propuesto por el **Dr. Gerardo Cesar Díaz Trujillo** y **Dra. María Cristina Castañón Bautista** quienes son responsables de la calidad del trabajo que usted presenta, referido al tema: ***"Material cerámico partiendo de residuos sólidos de planta de tratamiento de agua"***, el cual deberá desarrollar de acuerdo con el siguiente orden:

- I. Resumen
- II. Antecedentes
- III. Objetivos y metas
- IV. Materiales y métodos
- V. Resultados y discusiones
- VI. Conclusiones
- VII. Futuras líneas de investigación
- VIII. Bibliografía



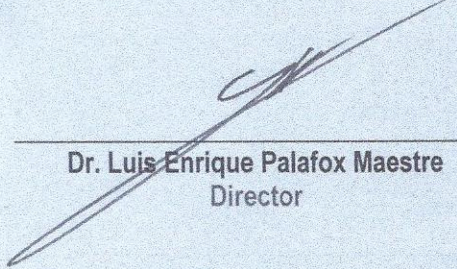
Dr. Gerardo Cesar Díaz Trujillo
Director de Tesis



Dra. María Cristina Castañón Bautista
Codirectora de Tesis



Dr. José Luis González Vázquez
Subdirector



Dr. Luis Enrique Palafox Maestre
Director

AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

Se contó con apoyo financiero de la *Universidad Autónoma de Baja California a través de la Dirección de Investigación y Postgrado* mediante una *Beca*, dentro de programa de apoyo para investigación.

Para lograr hacer efectivo el *Objetivo General*, plantearon una serie de objetivos específicos dentro de los cuales se encuentran:

- Dar *continuidad* en el ámbito regional la investigación dentro del área de aprovechamiento de residuos industriales para generar subproductos, a fin de disminuir el volumen de residuos destinados a confinamiento.
- *Promover* la colaboración entre instituciones educativas en el campo de la investigación,
- Generar grupo de investigadores multidisciplinarios dentro del *Cuerpo Académico de Química Aplicada* a fin de logran un avance mas acelerado en el proceso de caracterización aplicando técnicas utilizadas dentro del proceso de análisis de materiales.

A raíz de estos objetivos, se genera una serie de proyectos de tesis a nivel Licenciatura dentro del cual se encuentra uno en la carrera de Químico Industrial que lleva como título: "*Material cerámico partiendo de residuos sólidos de planta de tratamiento de agua*" que permite ofrecer el presente trabajo de investigación dentro de la *labor experimental* que se esta realizando en la Universidad Autónoma de Baja California en colaboración con el Instituto de Investigaciones en Materiales

de la Universidad Nacional Autónoma de México, institución incluida dentro del grupo de colaboradores.

Se desea hacer patente el agradecimiento a **MC. Adriana Tejeda** por el apoyo brindado en soporte técnico en la caracterización mineralógica por medio de Difracción de Rayos X.

INDICE

	Pagina
Introducción	1
Antecedentes	
Materiales Cerámicos	2
Su estructura	5
Comportamiento Óptico de los cerámicos.	9
Propiedades	10
Aplicaciones	11
Comportamiento refractario	12
Comportamiento eléctrico	13
Propiedades mecánicas de la cerámica	16
Materias primas	17
Arcilla	18
Oxido de silicio (Sílice)	21
Feldespato	21
Procesamiento de Cerámicas	23
Sinterización	26
Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales Tijuana - San Diego (PITAR)	30
Objetivos y Metas	
Objetivo principal.	33
Objetivo Inmediato	33
Objetivos Mediatos	34
Metas	35

Materiales Y Métodos	
Materiales	36
Métodos	37
Caracterización Mineralógica	38
Difracción de Rayos X	38
Resultados y Discusiones.	
Caracterización de ceniza de residuo de planta de tratamiento de agua.	44
Materiales obtenidos	45
Determinación de Propiedades Físicas	46
Caracterización mineralógica	47
Conclusiones.	50
Futuras líneas de investigación.	51
Bibliografía	52

1. INTRODUCCION

La cerámica aparece por vez primera en el Neolítico, cada pueblo y cultura ha empleado y descubierto sus propias técnicas para trabajar la arcilla y ha plasmado su visión del mundo social y natural sobre ella. La abundancia de esta materia prima, presente en casi todas las regiones del planeta, le confiere un carácter universal. La Cerámica y la piedra natural, que se considera un material cerámico pétreo, han constituido el principal material de construcción durante miles de años. En la actualidad, la roca ha sido sustituida por nuevos materiales artificiales, más ligeros y disponibles, y ha quedado limitada al revestimiento de fachadas, ornamentación y pavimentación. Sin embargo, cada día la investigación hace aparecer nuevos materiales cerámicos que encuentran sus campos de aplicación en industrias como la electrónica y la aeronáutica. Para cada necesidad que surge en el mercado, se investiga a la busca de un material idóneo, a la medida de esa necesidad que se desea cubrir. De modo que se puede decir que los materiales cerámicos reflejan en su evolución la historia tecnológica de la humanidad, paso a paso, desde la Prehistoria hasta nuestros días.

Actualmente esta industria de cerámica continúa siendo muy relevante, dada la inclusión en sus procesos de material primas alterna, puntualmente residuos de composición inorgánica de origen industrial. Dentro de este tipo de residuos, se ubica el generado en el proceso de tratamiento de agua residual. Proponiendo alternativas de reutilización, los sistemas cerámicos son ideales, dirigidos hacia su uso en; construcción, cementos, materiales cerámicos y vitrocerámicos, ayudando a su vez a disminuir los costos.

2. ANTECEDENTES

2.1 Materiales Cerámicos



La palabra cerámica deriva del griego κεραμική, de κεραμος (keramiké), que significa, "sustancia quemada". [1]

La historia de la cerámica va unida a la historia de casi todos [2] los pueblos del mundo. Abarca sus mismas evoluciones y fechas y su estudio está unido a las relaciones de los hombres que han permitido el progreso de este arte.

La invención de la cerámica se produjo durante la revolución neolítica, cuando se hicieron necesarios recipientes para almacenar el excedente de las cosechas producido por la práctica de la agricultura. En un principio esta cerámica se modelaba a mano, con técnicas como el pellizo, el colombín o la placa (de ahí las irregularidades de su superficie), y tan solo se dejaba secar al sol en los países cálidos y cerca de los fuegos tribales en los de zonas frías. Más adelante comenzó a decorarse con motivos geométricos mediante incisiones en la pasta seca, cada vez más compleja, perfecta y bella elaboración determinó la aparición de un nuevo oficio: el del alfarero.

Los primeros restos de cerámica que fueron endurecidos al sol datan de 9000 años habiendo sido encontrados en Anatolia, hoy parte de Turquía. Por su parte, los primeros restos de cerámica que fueron cocidos con [3] fuego aparecieron junto

con los campos sedentarios del Neolítico en Asia Menor (Mesopotamia y Palestina) en el 6500 a. C.

Aparece al mismo tiempo que el hombre inicial el cultivo de cereales y la domesticación de animales. Inicialmente fue usada con fines domésticos para fabricar contenedores, vasijas, que han sido encontradas en tumbas, como objetos que acompañaban a los muertos.



Las piezas más antiguas que han sido encontradas normalmente son de un barro burdo, modelado tanto a partir de rollos como de bloques aplastados y/o vaciados con alguna herramienta (rascador). Están quemadas a "fuego abierto" a bajas temperaturas.

Su decoración incluye engrifado, impresiones con sellos o con cuerdas y las formas más comunes son cálices o campanas, al punto de que a este período se le conoce como "cultura caliciforme".

La cerámica neolítica tiene un vigor extraordinario, con sus formas fuertes y a pesar de sus burdos materiales y su aparente escasez de significado.

En antiguas civilizaciones Europeas, destacaron las vasijas prehelénicas, hacia 3500 a. C. la cerámica cardial, originaria de España y África, que tenía como característica incrustaciones de conchas.



A principios de este milenio, el centro de producción más importante fue la isla de Creta que se caracterizaba por sus decorados de flores y zoomórficos marinos.

Este lugar de importancia pasó después a Grecia con sus

piezas de decoración geométrica del siglo VII a. C. y las posteriores de retratos negros sobre fondo rojo. Las cerámicas etrusca y romana tuvieron una gran influencia de la griega y no aportaron mucho, con la excepción de las piezas que eran estampadas con rodillos grabados, estas piezas fueron llamadas terra sigillata.

Los árabes por su parte tuvieron mezclas de su cerámica y la china, esto dio muchos resultados muy ricos, que se reflejaron en nuevas técnicas. La cerámica árabe fue difundida por toda Europa por medio de España. La principal característica de la cerámica islámica, son los trabajados decorados.

En el lejano oriente, China tuvo el primer lugar en importancia, porque aparte del empleo de materiales como el gres y el caolín, perfeccionaron los hornos de alta temperatura, lo que les permitió trabajar con porcelanas mucho antes que los europeos. Corea sirvió de paso para que las técnicas chinas llegaran a Japón, la cerámica japonesa se destacó por la sencillez en los decorados.

México fue uno de los principales productores de la cerámica precolombina. La mayoría de la cerámica americana se destaca por un decorado muy colorido, al mismo tiempo que no se usaron los esmaltes.



En la cerámica mesoamericana destacan los mayas, toltecas, aztecas, totonacas, zapotecas y culturas de Occidente. Además es necesario mencionar la cerámica



pintada y bruñida hecha en lo que actualmente sería el Norte de México y Sur de Estados Unidos, misma que hasta la fecha sigue manteniendo una gran calidad.

En la Europa del siglo XV en adelante destacaron las

lozas con vidriados de plomo y estaño. El intento fallido de imitación de la porcelana china dio lugar a diversos tipos de porcelanas de pasta blanda que tuvieron un buen éxito hasta que se descubrió la verdadera porcelana en el siglo XVIII.

En España destacaron las lozas con lustres metálicos. Después destacan las porcelanas realizadas en muchas partes de Europa como Alemania y Francia, entre otras. En la producción de cerámica en general destacan Dinamarca Italia, entre las más importantes. [4]

2.2 Su estructura

Los materiales cerámicos son compuestos químicos o soluciones complejas, que comprenden fases que contienen elementos metálicos y no metálicos. Sus enlaces iónicos o covalentes les confieren una alta estabilidad y son resistentes a las alteraciones químicas. A temperaturas elevadas pueden conducir iónicamente, pero muy poco en comparación con los metales. Son generalmente aislantes. Tienen una amplia gama de propiedades mecánicas, sin embargo, su comportamiento mecánico real suele ser menos predecible que el de los metales. Los materiales cerámicos no son tan simples como los metales, sin embargo pueden clasificarse y estudiarse en función de sus estructuras cristalinas. [5]

Se llama cristales a los acomodamientos atómicos repetitivos en las tres dimensiones. Esta repetición de patrones tridimensionales se debe a la coordinación atómica dentro del material, algunas veces este patrón controla la forma externa del cristal. El acomodamiento atómico interno persiste, aunque la superficie externa se altere. Los acomodamientos cristalinos pueden tomar uno de siete principales patrones de acomodamiento cristalino. Estos están estrechamente

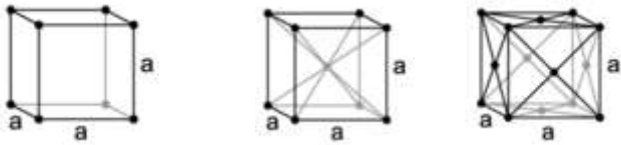
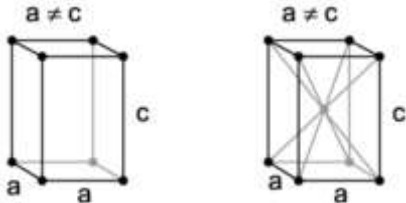
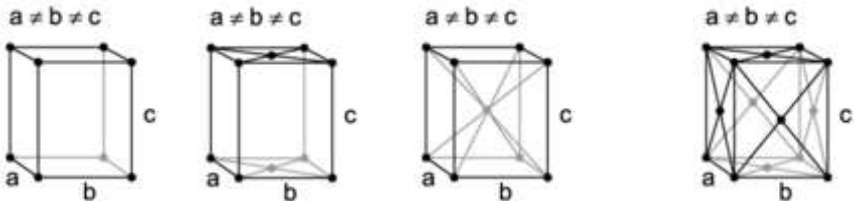
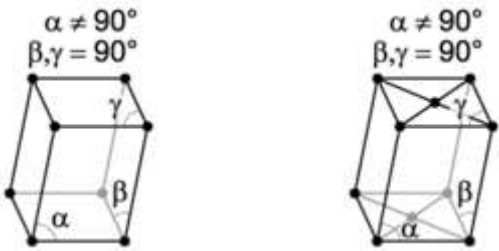
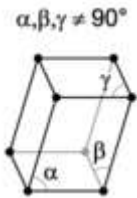
relacionados con la forma en la que se puede dividir el espacio en iguales volúmenes por superficies planas de intersección.

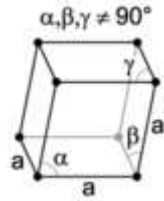
Ahora bien, para determinar completamente la estructura cristalina elemental de un sólido, además de definir la forma geométrica de la red, es necesario establecer las posiciones en la celda de los átomos o moléculas que forman el sólido cristalino; lo que se denominan puntos reticulares. Las alternativas son las siguientes:

- ✓ P: Celda primitiva o simple en la que los puntos reticulares son sólo los vértices del paralelepípedo.
- ✓ F: Celda centrada en las caras, que tiene puntos reticulares en las caras, además de en los vértices. Si sólo tienen puntos reticulares en las bases, se designan con las letras A, B o C según sean las caras que tienen los dos puntos reticulares.
- ✓ I: Celda centrada en el cuerpo que tiene un punto reticular en el centro de la celda, además de los vértices.
- ✓ C: Primitiva con ejes iguales y ángulos iguales ó hexagonal doblemente centrada en el cuerpo, además de los vértices.

Combinando los 7 sistemas cristalinos con las disposiciones de los puntos de red mencionados, se obtendrían 28 redes cristalinas posibles. En realidad, como puede demostrarse, sólo existen 14 configuraciones básicas, pudiéndose el resto obtener a partir de ellas. Estas estructuras se denominan redes de Bravais [6], como se puede observar en la Tabla 1.

Tabla 1. Redes de Bravais

Sistema	Ejes	Ángulos Axiales
Cúbico	$a_1=a_2=a_3$	Todos los ángulos = 90° 
Tetragonal	$a_1=a_2 \neq a_3$	Todos los ángulos = 90° 
Ortorrómbico	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$	Todos los ángulos = 90° 
Monociclico	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$	2 ángulos = 90°, 1 ángulo $\neq 90^\circ$ 
Triciclico	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$	Todos los ángulos diferentes, ninguno = 90° 

Hexagonal	$a_1=a_2=a_3 \neq c$	Ángulos = 90° y 120° 
Romboedral	$a_1=a_2=a_3$	Todos los ángulos iguales, pero ninguno de 90° 

Cristales Cúbicos. Los átomos pueden acomodarse en un patrón cúbico con tres diferentes tipos de repetición: cúbico simple (cs), cúbico de cuerpos centrados (ccc), y cúbico de caras centradas (ccac).

- Cúbico simple. Es hipotética para metales puros, pero representa un buen punto de partida. Además de las tres dimensiones axiales a iguales y los ejes en ángulos rectos, hay posiciones equivalentes en cada celdilla. Cada celdilla tiene contornos idénticos al centro a los de todas las celdillas unitarias en el cristal. Del mismo modo, cualquier posición específica es idéntica en todas las celdillas unitarias.

- Cúbico de cuerpos centrados. Cada celdilla unitaria tiene un átomo en cada vértice del cubo y otro átomo en el centro del cuerpo del cubo.

- Cúbica de caras centradas. Este tipo de estructura se caracteriza por que en la esquina de cada celdilla unitaria y en centro de cada cara hay un átomo, pero no hay ninguno en el centro del cubo.

- Cristales Hexagonales. Existen dos representaciones de las celdillas unitarias hexagonales simples. Este tipo de celdillas no tienen posiciones internas que sean equivalentes a las posiciones esquina. Además, existen estructuras hexagonales. Compactas que se caracterizan por tener cada átomo en una capa situada exactamente arriba o debajo de los intersticios entre tres átomos de las capas adyacentes. Así, cada átomo toca tres átomos de capa bajo un plano, seis átomos en su propio plano y tres en la capa superior.

2.3 Comportamiento Óptico de los cerámicos.

En ciertos materiales cerámicos, la brecha de energía entre las bandas de valencia y conducción es tal, que un electrón que pase a través de ella, producirá fotones dentro del espectro visible del ojo humano. Esta luminiscencia se observa como dos efectos distintos: fluorescencia y la fosforescencia. En la fluorescencia, todos los electrones excitados vuelven a la banda de valencia y los fotones correspondientes son emitidos una fracción de segundo después de haberse eliminado el estímulo. Predomina una longitud de onda, que corresponde a la brecha de energía E_g . Los materiales fosforescentes tienen impurezas que introducen un nivel donante dentro de la brecha de energía. Los electrones estimulados bajan primero al nivel de donante y quedan atrapados, por lo que deberán escapar para regresar a la capa de valencia. Esto se traduce en un retardo antes de que los fotones sean emitidos, porque después de haber eliminado el estímulo, los electrones capturados por el nivel donante escapan de forma gradual. La intensidad de esta luminiscencia está dada por: $\ln I/I_0 = t/\tau$, donde τ es el tiempo de relajación, que es una constante conocida del material. Después de tiempo t posterior a la eliminación de la fuente, la intensidad de la luminiscencia disminuirá de I_0 a I . Los materiales fosforescentes son muy importantes en la operación de las pantallas de televisión.

Debido a la naturaleza tan diversa de este tipo de materiales, es prácticamente imposible generalizar su comportamiento. Por ejemplo, en cuanto a reflectividad, los vidrios típicos están próximos a 0.05, lo que, entre otras razones, explica su transparencia; mientras que las porcelanas comunes, sin ser tan reflejantes como los metales están por arriba de este dato, y son consideradas opacas.

Los cerámicos aislantes tienen una brecha de energía muy grande entre las bandas de energía y de conducción. Si la potencia de los fotones incidentes es menor a la brecha de energía, ningún electrón ganará la suficiente como para escapar de la banda de valencia y, por tanto, no ocurrirá absorción.

La transparencia en los vidrios puede verse afectada por dos factores: una pequeña cantidad de porosidad (menos del 1% del volumen), puede crear una dispersión tal de fotones que el vidrio se vuelve opaco; y los precipitados cristalinos, particularmente aquellos con un índice de refracción muy distinto al material de la matriz, que de igual forma causan dispersión. Así, precipitados o poros más pequeños generan una mayor reducción en la transmisión de los fotones [5].

2.4 Propiedades

La cerámica ha acompañado al hombre desde años inmemorables y fue pasando de la artesanía, que se regía por métodos empíricos, a convertirse gradualmente en una industria con tecnología propia, asimilando las leyes de las ciencias exactas y dando origen a una nueva ciencia con principios que le son propios y una perspectiva protagónica en los cambios del mundo.

La nueva ciencia encontró aplicación en muchos productos que no eran precisamente cerámica artesanal y paso a ser la "Ciencia de los silicatos". Así se reúnen junto a la cerámica, el vidrio, monocristales, ferroeléctricos, cementos, esmaltes vítreos,

porcelanas y abrasivos. El avance científico siguió y la vieja cerámica pasa a ser reconocida como ciencia y tecnología de los artículos que tienen como componente esencial a materiales inorgánicos no metálicos.

Los nuevos materiales cerámicos llamados de Hi performance poseen propiedades que los hacen capaces de resolver los mas variados problemas tecnológicos y permiten suplir materiales tradicionales.

Dentro de los cerámicos, aunque parezca ilógico podemos agrupar materiales tan dispares, tecnológicamente hablando, como el ladrillo común y los superconductores o cerámicos especiales.

Ejemplos de materiales cerámicos; Nitruro de silicio (Si_3N_4), utilizado como polvo abrasivo., Carburo de boro (B_4C), usado en algunos helicópteros y cubiertas de tanques, Carburo de silicio (SiC), empleado en hornos microondas, en abrasivos y como material refractario, Diboruro de magnesio (MgB_2), es un superconductor no convencional, Óxido de zinc (ZnO), un semiconductor, Ferrita (Fe_3O_4) es utilizado en núcleos de transformadores magnéticos y en núcleos de memorias magnéticas, Esteatita, utilizada como un aislante eléctrico, Ladrillos, utilizados en construcción, Óxido de uranio (UO_2), empleado como combustible en reactores nucleares, Óxido de itrio, bario y cobre ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$), superconductor de alta temperatura.

2.5 Aplicaciones A continuación detallamos algunas aplicaciones de los materiales cerámicos de acuerdo con sus distintas propiedades.

2.5.1 Comportamiento refractario

Algunos materiales cerámicos pueden soportar temperaturas extremadamente altas sin perder su solidez. Son los denominados materiales refractarios. Generalmente tienen baja conductividad térmica por lo que son empleados como aislantes. Por ejemplo, partes de los cohetes espaciales son construidos de azulejos cerámicos que protegen la nave de las altas temperaturas causadas durante la entrada a la atmósfera.



Los requisitos principales para considerar a un material refractario como bueno son que no se ablande o derrita y que se mantenga sin reacciones bajo las temperaturas de uso. El último requisito se relaciona con los mencionados anteriormente: la auto descomposición y reacción a otros componentes que podrían presentarse, incluso aquellos que podrían ser perjudiciales.

La porosidad toma una importancia adicional en la cerámica refractaria. Mientras la porosidad se reduce la resistencia, la capacidad de carga y la resistencia ambiental se incrementa a medida que la densidad del material aumenta. Sin embargo, mientras la densidad incrementa la resistencia al shock térmico (quebraduras como resultado del rápido cambio de temperatura), las características de aislamiento se reducen. Muchos materiales son usados en estados muy porosos y es frecuente encontrar materiales combinados: una capa porosa con buenas propiedades de aislamiento combinada con una delgada chaqueta de material más denso que provee resistencia.

Tal vez sea sorprendente que estos materiales puedan ser usados a temperaturas en donde se licúan parcialmente. Por ejemplo, los ladrillos refractarios de dióxido de silicio (SiO_2), usados para recubrir hornos de fundición de acero, trabajan a temperaturas superiores a $1650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($3000\text{ }^{\circ}\text{F}$), cuando algunos de los ladrillos comienzan a licuarse. Diseñados para esa función, una situación sin sobresaltos requiere un control responsable sobre todos los aspectos de la construcción y uso.

2.5.2 Comportamiento eléctrico

Una de las áreas de mayores progresos con la cerámica es su aplicación a situaciones eléctricas, donde pueden desplegar un sorprendente conjunto de propiedades:

La mayoría de los materiales cerámicos no son conductores de cargas móviles, por lo que no son conductores de electricidad. Cuando son combinados con fuerza, permite usarlos en la generación de energía y transmisión.

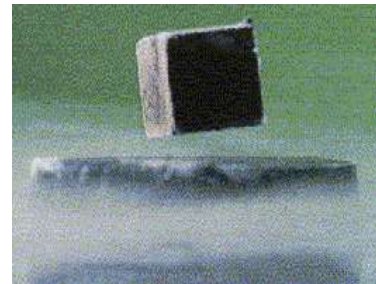
Las líneas de alta tensión son generalmente sostenidas por torres de transmisión que contienen discos de porcelana, los cuales son lo suficientemente aislantes como para resistir rayos y tienen la resistencia mecánica apropiada como para sostener los cables.



Una sub-categoría del comportamiento aislante es el dieléctrico. Un material dieléctrico mantiene el campo magnético a través de él, sin inducir pérdida de energía. Esto es muy importante en la construcción de condensadores eléctricos. [7].

La cerámica dieléctrica es usada en dos áreas principales: la primera es la pérdida progresiva de dielectricidad de alta frecuencia, usada en aplicaciones tales como microondas y radio transmisores; la segunda, son los materiales con alta dielectricidad constante (ferroeléctricos). Aunque la cerámica dieléctrica es inferior frente a otras opciones para la mayoría de los propósitos, generalmente ocupa estos dos nichos muy bien.

Bajo ciertas condiciones, tales como temperaturas extremadamente bajas, algunas cerámicas muestran superconductividad. La razón exacta de este fenómeno no es conocida, aunque se diferencian dos conjuntos de cerámica superconductora. [8]



Un pequeño imán levita cuando se coloca sobre una cerámica superconductora de $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ sumergida en nitrógeno líquido.

El compuesto estequiométrico $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, generalmente abreviado YBCO o 123, es particularmente muy conocido porque es fácil de hacer, su manufactura no requiere ningún material particularmente peligroso y tiene una transición de temperatura de 90 K (lo que es superior a la temperatura del nitrógeno líquido, 77 K). La x de la fórmula se refiere al hecho que debe ser ligeramente deficiente en oxígeno, con un x por lo general cercano a 0.3.

El otro conjunto de cerámicas superconductoras es el diboruro de magnesio. Sus propiedades no son particularmente destacables, pero son químicamente muy distintos a cualquier otro superconductor en que no es un complejo de óxido de cobre ni un metal. Debido a esta diferencia se espera que el estudio de este material conduzca a la interiorización del fenómeno de la superconductividad.

Hay cierto número de cerámicas que son semiconductoras. La mayoría de ellas son óxidos de metales de transición que son semiconductores de tipos II-IV, como el óxido de zinc.

La cerámica semiconductor es empleada como sensor de gas. Cuando varios gases son pasados a través de una cerámica policristalina, su resistencia eléctrica cambia. Ajustando las posibles mezclas de gas, se pueden construir sensores de gas sin demasiado costo.

Un material ferroeléctrico es aquel que espontáneamente posee una polarización eléctrica cuyo sentido se puede invertir mediante aplicación de un campo eléctrico externo suficientemente alto (histéresis ferroeléctrica). Estos materiales exhiben múltiples propiedades derivadas de su polarización espontánea, en ausencia de un campo eléctrico externo, y de la posibilidad de su inversión (memorias de ordenador). La polarización espontánea puede modificarse mediante campos eléctricos (electrostricción) o de tensiones mecánicas (piezoelectricidad) externos y mediante variaciones de la temperatura (piezoelectricidad). La polarización espontánea y su capacidad de modificación es también el origen de la alta constante dieléctrica o permitividad de los ferroeléctricos, que tiene aplicación en condensadores.

Un material piezoeléctrico es aquel que, debido a poseer una polarización espontánea, genera un voltaje cuando se le aplica presión o, inversamente, se deforma bajo la acción de un campo eléctrico. Cuando el campo eléctrico aplicado es alterno, este produce una vibración del piezoeléctrico. Estos materiales encuentran un rango amplio de aplicaciones, principalmente como sensores -para convertir un movimiento en una señal eléctrica o viceversa-. Están presentes en micrófonos, generadores de ultrasonido y medidores de presión. Todos los ferroeléctricos son

piezoeléctricos, pero hay muchos piezoeléctricos cuya polarización espontánea puede variar pero no es invertible y, en consecuencia, no son ferroeléctricos.

Un material piroeléctrico desarrolla un campo eléctrico cuando se calienta. Algunas cerámicas piroeléctricas son tan sensibles que pueden detectar cambios de temperatura causados por el ingreso de una persona a un cuarto (aproximadamente 40 microkelvin). Tales dispositivos no pueden medir temperaturas absolutas, sino variaciones de temperatura y se utilizan en visión nocturna y detectores de movimiento. (12)

2.6 Propiedades mecánicas de la cerámica

Los materiales cerámicos son generalmente frágiles o vidriosos. Casi siempre se fracturan ante esfuerzos de tensión y presentan poca elasticidad, dado que tienden a ser materiales porosos. Los poros y otras imperfecciones microscópicas actúan como entallas o concentradores de esfuerzo, reduciendo la resistencia a los esfuerzos mencionados. Estos materiales muestran deformaciones plásticas. Sin embargo, debido a la rigidez de la estructura de los componentes cristalinos hay pocos sistemas de deslizamientos para dislocaciones de movimiento y la deformación ocurre de forma muy lenta. Con los materiales no cristalinos (vidriosos), la fluidez viscosa es la principal causa de la deformación plástica, y también es muy lenta. Aún así, es omitido en muchas aplicaciones de materiales cerámicos.

Tienen elevada resistencia a la compresión y son capaces de operar en temperaturas altas. Su gran dureza los hace un material ampliamente utilizado como abrasivo y como puntas cortantes de herramientas. Muy bueno. [9]

2.7 Materias primas

En general, los materiales cerámicos usados para aplicaciones en ingeniería pueden clasificarse en dos grupos: materiales cerámicos tradicionales y materiales cerámicos de uso específico en ingeniería. Normalmente los materiales cerámicos tradicionales están constituidos por tres componentes básicos: arcilla, sílice (pedernal) y feldespato. Ejemplos de cerámicos tradicionales son los ladrillos y tejas utilizados en las industrias de la construcción y las porcelanas eléctricas de uso en la industria eléctrica. Las cerámicas ingenieriles, por el contrario, están constituidas, típicamente, por compuestos puros o casi puros tales como óxido de aluminio (Al_2O_3), carburo de silicio (SiC), y nitruro de silicio (Si_3N_4). Ejemplos de aplicación de las cerámicas ingenieriles en tecnología punta son el carburo de silicio en las áreas de alta temperatura de la turbina del motor de gas, y el óxido de aluminio en la base del soporte para los circuitos integrados de los chips en un módulo de conducción térmica. [10]



Arcilla



Sílice



Feldespato

En la preparación de una pasta cerámica existen tres ingredientes principales: los elementos plásticos, los magros o desengrasantes y los fundentes. La proporción y calidad de estos tres ingredientes determinará el producto cerámico.

Elementos plásticos: Son las arcillas y caolines (arcilla blanca muy pura) que forman la base de las pastas cerámicas debido a su plasticidad.

Elementos magros o desengrasantes: Son la sílice, la arena, trozos molidos de terracota (chamota) y las arcillas silíceas. Son para reducir su excesiva plasticidad, para aumentar la porosidad así como facilitar el secado del objeto.

Elementos fundentes: son los feldespatos, las micas, la cal, los fosfatos, las fritas molidas, los vidrios pulverizados y las arcillas fundentes, ferrosas y calcáreas

2.7.1 Arcilla

La arcilla está constituida por agregados de silicatos de aluminios hidratados, procedentes de la descomposición de minerales de aluminio. Presenta diversas coloraciones según las impurezas que contiene, siendo blanca cuando es pura. Surge de la descomposición de rocas que contienen feldespato, originada en un proceso natural que dura decenas de miles de años.



(Arcilla del período cuaternario (400.000 años), Estonia)

Físicamente se considera un coloide, de partículas extremadamente pequeñas y superficie lisa. El diámetro de las partículas de la arcilla es inferior a 0,002 mm. En la fracción textural arcilla puede haber partículas no minerales, los fitolitos. Químicamente es un silicato hidratado de alúmina. [11]

Las arcillas pueden clasificarse de distintas maneras según el aspecto que se tenga en cuenta: color, plasticidad, fusibilidad, según se encuentren en la naturaleza..., factores todos ellos a tener en cuenta a la hora de elaborar una pieza puesto que son de vital importancia en el desarrollo y acabado de la misma. [12]

Según existen en la naturaleza, se puede hablar de dos tipos de arcillas: las primarias y las secundarias.

Arcillas primarias o residuales: Son las formadas en el lugar de sus rocas madres y no han sido por tanto transportadas por el agua, el viento o el glaciar. Estas tienden a ser de grano grueso y relativamente no plásticas. Cuando han sido limpiadas de fragmentos de roca, son relativamente puras, blancas y libres de contaminación con materiales arcillosos. La mayoría de los caolines son arcillas primarias.

Arcillas secundarias: Son las que han sido desplazadas del lugar de las rocas madres originales. Aunque el agua es el agente más corriente de transporte, el viento y los glaciares pueden también transportar arcilla. Éstas son mucho más corrientes que las anteriores y tienen una constitución más compleja debido a que están compuestas por material procedente de distintas fuentes: hierro, cuarzo, mica, materias carbonosas y otras impurezas.

Según la plasticidad, se puede hablar teniendo en cuenta una de las propiedades de la arcilla como es la plasticidad de dos tipos: las arcillas plásticas y las antiplásticas.

Arcillas plásticas: "hacen" pasta con el agua y se convierten en modelables y las Arcillas antiplásticas: que confieren a la pasta una determinada estructura, que pueden ser químicamente inertes en la masa ó crear una vitrificación en altas temperaturas (fundentes). Según el color y la porosidad, se pueden clasificar conforme a la Tabla 2.

Tabla 2. Criterio de clasificación de materiales cerámicos

<i>Pastas porosas coloreadas</i>	<i>Pastas porosas blancas</i>
Tejares y alfares en bruto, barnizadas, estanníferas Arcillas fusibles 850-1.100°C	Mayólicas finas Sanitarias y productos refractarios Arcillas refractarias 1.000- 1.550° C
Pastas impermeables coloreadas	Pastas impermeables blancas
Gres finos, comunes, clinkers Arcillas vitrificables 1.100-1.350°C	Porcelanas duras, tiernas, china vidriada Caolines 1.250- 1.460°C

Según su fusibilidad o grado de cocción, podríamos hablar de dos tipos de arcilla: Arcillas refractarias: Arcillas y caolines cuyo punto de fusión está comprendido entre 1.600 y 1.750°C. Por lo general son blancas, grises y poco coloreadas después de su cocción. Arcillas fusibles ó arcillas de alfarería: Arcilla cuyo punto de fusión se alcanza por encima de los 1.100°C. Son de color castaño, ocre, amarillo o marfil tras su cocción y se suelen encontrar cerca de la superficie del suelo. Suelen contener ilita acompañado de una proporción de caliza, óxido de hierro y otras impurezas.

El Caolín o arcilla China, este tipo de arcilla se encuentra más corrientemente en China que en cualquier otra parte, de ahí su nombre. Son arcillas primarias (aunque también existen caolín secundario) que se han formado por la meteorización in situ del feldespato. Sus partículas son de gran tamaño y por ello resulta menos plástico en comparación con otras arcillas. Están corrientemente mezclado con fragmentos de roca de feldespato y cuarzo por ello se hace necesario utilizar algún método para su purificación. Su composición química se aproxima a la fórmula del mineral

caolinita. Se trata de una arcilla altamente refractaria, con un punto de fusión por encima de los 1.800°C.

En la práctica, raramente se utiliza el caolín en sí mismo dado su alto grado de refractariedad y su poca plasticidad, por ello se añaden a él otros materiales aunque se debe decir que no todos los caolines son iguales en color, plasticidad... En general su grado de contracción es baja debido al grosor de sus granos y tiene poca resistencia en seco.

2.7.2 Oxido de silicio (Sílice)

El dióxido de silicio (SiO_2) es un compuesto de silicio y oxígeno, llamado comúnmente sílice. Es uno de los componentes de la arena. Una de las formas en que aparece naturalmente es el cuarzo. Este compuesto ordenado espacialmente en una red tridimensional (cristalizado) forma el cuarzo y todas sus variedades. Si se encuentra en estado de amorfo constituye el ópalo y suele incluir un porcentaje elevado de agua.

El dióxido de silicio se usa, entre otras cosas, para hacer vidrio, cerámicas y cemento, asimismo es un desecante, esto significa que quita la humedad del lugar en que se encuentra. Se encuentra muy particularmente en paquetes nuevos de zapatos, zapatillas etc.

2.7.3 Feldespato

Grupo extenso de minerales compuesto por aluminosilicatos de potasio, sodio, calcio o, a veces, bario. Se encuentran como cristales aislados o en masas y son un

constituyente importante de muchas rocas ígneas y metamórficas, incluyendo el granito, el gneis, el basalto y otras rocas cristalinas.

Los feldespatos son los minerales más abundantes y ocupan casi la mitad del volumen de la corteza terrestre. Aunque pueden pertenecer a los sistemas monoclinicos o triclinicos, todos los feldespatos tienen los mismos hábitos cristalinos y métodos de unión, así como planos de exfoliación inclinados los unos sobre los otros con ángulos cercanos a 90° . Tienen una dureza entre 6 y 6,5 y un peso específico entre 2,5 y 2,8. Su lustre es vítreo y su color puede variar desde blanco o incoloro hasta distintos tonos de rosa, amarillo, verde o rojo. Todos los feldespatos se descomponen con facilidad para formar un tipo de arcilla llamada caolín.

La ortosa, feldespato monoclinico con fórmula KAlSi_3O_8 , es uno de los minerales más comunes. Suele ser de color blanco, gris o rojo tenue, aunque es a veces incolora. Se usa en la fabricación de porcelana y vidrio. La adularia es una variedad incolora entre translúcida y transparente.

La microclina, que cristaliza en el sistema triclinico, es idéntica a la ortosa en composición química y casi igual en sus propiedades físicas. Puede encontrarse en forma de enormes monocristales. Sus usos industriales son similares a los de la ortosa. La amazonita, variedad verde, si está muy pulida, es apreciada como gema.

Las plagioclasas feldespatos son series isomorfas (tienen la misma estructura cristalina) de minerales triclinicos, desde el aluminosilicato de sodio puro hasta el aluminosilicato de calcio puro. El primero se llama albita, y la oligoclasa, la andesita, la labradorita, la bytownita y la anortita tienen concentraciones crecientes de calcio. La anortita es aluminosilicato de calcio puro con formula $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$.

Las plagioclasas feldespatos tienen menos importancia comercial que la ortosa y la microclina. A veces muestran un juego de colores atractivo y se pulen como piedras semipreciosas. La albita opalescente y la labradorita iridiscente se llaman piedras lunares. Las oligoclasas que contienen impurezas y provocan un efecto centelleante se llaman piedras solares. [13]

2.8 PROCESAMIENTO DE CERÁMICAS

Los productos cerámicos mas tradicionales y técnicos son manufacturados compactando polvos o partículas en matrices que son posteriormente calentados a enormes temperaturas para enlazar las partículas entre si.

Las etapas básicas para el proceso de cerámica de aglomeración de partículas son: (1) preparación de material; (2) moldeado o fundido; (3) tratamiento térmico por secado y horneado por calentamiento de la pieza de cerámica a temperaturas suficientemente altas para mantener las partículas enlazadas.

Preparación de materiales: La mayoría de los productos están fabricados por aglomeración de partículas. Las materias primas para estos productos varían, dependiendo de las propiedades requeridas por la pieza de cerámica terminada. Las partículas y otros constituyentes tales como aglutinantes y lubricantes pueden ser mezclados en seco o húmedo. Para productos cerámicos que no necesitan tener propiedades muy «críticas» tales como ladrillos comunes, tuberías para alcantarillado y otros productos arcillosos, la mezcla de los ingredientes con agua es una práctica común. Para otros materiales cerámicos, las materias primas son tierras secas con aglutinantes y otros aditivos.

Técnicas de conformado: Los productos cerámicos fabricados por aglomeración de partículas pueden ser conformados mediante varios métodos en condiciones secas,

plásticas o líquidas. Los procesos de conformado en frío son predominantes en la industria cerámica, pero los procesos de modelado en caliente también se usan con frecuencia. Prensado, moldeo en barbotina y extrusión son los métodos de modelado de cerámica que se utilizan comúnmente.

Prensado. La materia prima puede ser prensada en estado seco, plástico o húmedo, dentro de un troquel para formar productos elaborados.

Prensado en seco: este método se usa frecuentemente para productos refractarios (materiales de alta resistencia térmica) y componentes cerámicos electrónicos. El prensado en seco se puede definir como la compactación uniaxial simultánea y la conformación de los polvos granulados con pequeñas cantidades de agua y/o pegamentos orgánicos en un troquel. Después del estampado en frío, las partículas son normalmente calentadas (sinterizadas) a fin de que se consigan la fuerza y las propiedades microestructurales deseadas. El prensado en seco se utiliza mucho porque permite fabricar una gran variedad de piezas rápidamente con una uniformidad y tolerancia pequeñas.

Compactación isostática: en este proceso el polvo cerámico se carga en un recipiente flexible (generalmente de caucho) hermético (llamado cartucho) que está dentro de una cámara de fluido hidráulico a la que se aplica presión. La fuerza de la presión aplicada compacta el polvo uniformemente en todas las direcciones, tomando el producto la forma del contenedor flexible. Después de presionar la pieza isostáticamente en frío se ha de pasar por el fuego (sinterización) para obtener las propiedades microestructurales requeridas.

Productos cerámicos de este tipo son refractarios, ladrillos, aislantes de bujías, cúpulas, crisoles, herramientas de carbono y cojinetes. Compresión en caliente. En

este proceso se consiguen piezas de alta densidad y propiedades mecánicas optimizadas combinando la presión unidireccional como la isostática.

Extrusión. Las secciones transversales sencillas y las formas huecas de los materiales cerámicos en estado plástico a través de un troquel de embutir. Este proceso es de aplicación común en la producción.

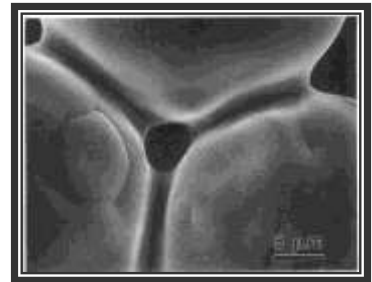
Tratamientos térmicos; El tratamiento térmico es un paso esencial en la fabricación de la mayoría de los productos cerámicos. En esta subdivisión consideramos los siguientes tratamientos térmicos: secado, sinterizado, verificación. Secado y eliminación de aglutinantes. El propósito del secado de cerámicas es eliminar el agua del cuerpo cerámico plástico antes de ser sometida a altas temperaturas. Generalmente, la eliminación de agua se lleva a cabo a menos de 100°C y puede tardar tanto como 24 hs. para un trozo de cerámica grande. La mayoría de los aglutinantes orgánicos pueden ser eliminados de piezas cerámicas por calentamiento en el rango de 200 a 300°C, aunque algunos residuos hidrocarbonados pueden requerir un calentamiento a temperaturas mas elevadas.

Sinterización; El proceso por el cual se consigue que pequeñas partículas de un material se mantengan unidas por difusión al estado sólido se llama sinterización. En la fabricación de cerámicas este tratamiento térmico se basa en la transformación de un producto poroso en otro compacto y coherente. La sinterización se utiliza de modo generalizado para producir formas cerámicas de, por ejemplo, alúmina, berilia, ferrita y titanatos. En el proceso de sinterizado las partículas coalescen por difusión al estado sólido a muy altas temperaturas pero por debajo del punto de fusión del compuesto que se desea sinterizar. En la sinterización, la difusión atómica tiene lugar entre las superficies de contacto de las partículas a fin de que resulten químicamente unidas.

Algunos productos cerámicos tales como porcelana, productos arcillosos estructurales y algunos componentes electrónicos contienen una fase vítrea. Esta fase vítrea sirve como medio de reacción para que la difusión pueda tener lugar a menor temperatura que en el resto de los materiales sólidos cerámicos. Durante el tratamiento a elevadas temperaturas de este tipo de materiales sólidos cerámicos, tiene lugar un proceso llamado verificación por medio del cual la fase vítrea se licua y rellena los poros del material. Esta fase vítrea líquida puede también reaccionar con algunos de los restantes sólidos de material refractario. Bajo enfriamiento, la fase líquida solidifica para formar una matriz vítrea que une las partículas que no han fundido.

2.8.1 Sinterización

Una definición general para el proceso de sinterización dada por Randall German es: "sinterizado es un tratamiento térmico para enlazar partículas en una estructura coherente predominante sólida, a través de



fenómenos de transporte de masa que casi siempre ocurren en escala atómica. La unión conduce a mejorar la resistencia y disminuir la energía del sistema. [14,15]

Existen varios procesos de sinterización, siendo los principales: a) sinterización en estado sólido, el fenómeno de sinterización está gobernado por procesos de difusión, pero no hay reacción de estado sólido -excepto cuando hay varios componentes presentes- ni cambio de composición o de estado. Generalmente, inicia a la temperatura de Tammann, que es aproximadamente a 0.55 o .060 del punto de fisión del componente, b) sinterización con fase líquida. En este proceso una pequeña cantidad de líquido favorece el reordenamiento de los granos y produce la densificación a través de un empaquetamiento más eficiente, c) sinterización por

flujo viscoso. Se produce en la densificación de vidrio o materiales amorfos, donde el transporte de materia, se realiza por un mecanismo de flujo viscoso.

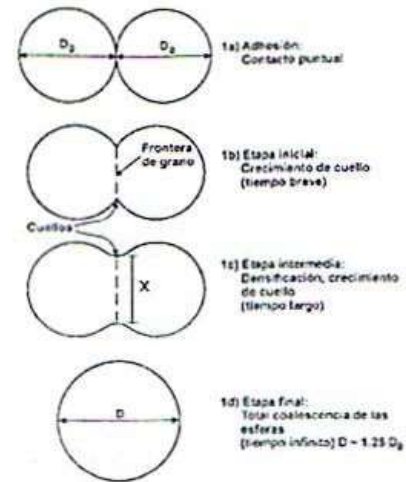
El proceso de sinterización es un proceso irreversible en el que participan muchos factores.

Los tres fenómenos básicos que ocurren durante el proceso de sinterización son: la formación de cuellos, la concentración de poros y el crecimiento de grano; los cuales se originan debido a la disminución de la energía libre en las superficies, en las fronteras de grano y en las fases.

Las teorías de sinterización en estado sólido utilizan un modelo de dos esferas para representar las etapas.

Primera etapa, de adhesión: cuando las partículas entran en contacto puntual, algunos autores reconocen esta etapa como previa a la inicial.

Etapa inicial del sinterizado: consiste de un crecimiento rápido de cuellos entre las partículas y un aumento en las resistencias del cuerpo verde, durante el calentamiento. Existe una densificación, pues la distancia entre los centros de las partículas disminuye y la concentración se presenta, por la difusión de átomos en el seno de la partícula (o en el volumen) desde las fronteras de grano hasta la superficie del poro.



Modelo de dos esferas que muestra el desarrollo de un cuello de sinterización entre las dos partículas que finalmente coalescen formando una partícula mayor.

Etapa final: este es un proceso lento. Esta caracterizado por el crecimiento de grano, el sellado, redondeo, aislamiento y disminución del número de poros, en esta etapa la densificación depende de la velocidad de contracción del poro, por lo que una mayor difusividad de la frontera de grano resulta muy favorable. La mayoría de los materiales se sinterizan a densidad aproximadamente al 92% de la teórica. (9). En la figura 1, se presenta una secuencia de cambio morfológico durante el proceso.

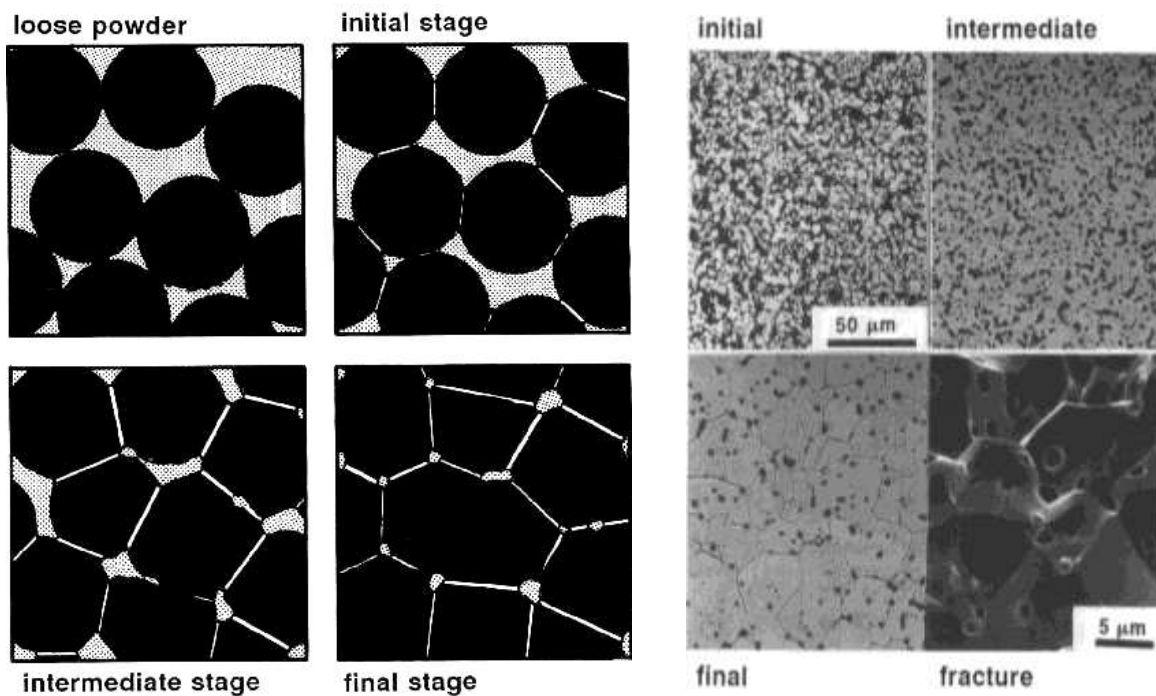


Figura 1. Representación morfológica de reacción de sinterización

El proceso de sinterización en estado sólido, SES, tiene lugar en tres etapas simultáneas bien defendidas: la formación de cuellos, la contracción de poros y el crecimiento de grano. En la superficie de una partícula pueden existir contactos con distintos grados de sinterización. Cada etapa se distingue por un lapso y/o densidad, en la cual presenta una microestructura específica.

El proceso de sinterización en fase líquida, SFL, se produce una fusión parcial durante el ciclo de calentamiento, dando como resultado una mezcla de fases sólido-líquido. El proceso de sinterización en fase líquida es un proceso primordial en las industrias masivas debido a la reducción de costos, alrededor de un 70% de los productos sinterizados se fabrican con este método: imanes permanentes, varistores (ZnO), cerámicas refractarias ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}/\text{SiO}_2$) porcelanas (arcillas/feldespatos/ pedernal), etc.

En la SFL la presencia del líquido acelera la velocidad de transferencia de masa, la densificación y el engrosamiento microestructural. Una desventaja del proceso SFL, es que las cerámicas densificadas son susceptibles de distorsionar su forma y por lo tanto, se dificulta controlar ciertos parámetros como la dependencia de la temperatura en la disolución y la cristalización.

La SFL se puede efectuar de dos formas. Primero, cuando la fase líquida permanece a través del ciclo de sinterizado a temperaturas altas (fase líquida que se encuentra a temperaturas mayores de solubilidad) o induciendo una fusión en una mezcla de polvos cerámicos. Segundo, con el sinterizado con fase líquida con el sinterizado con fase líquida transitoria, el líquido desaparece durante el ciclo de sinterización, debido a la disolución en el sólido (esto es, se forma una solución sólida) o por la formación de una nueva fase (proceso conocido como una sinterización de fase líquida reactiva) y se emplea en la generación de compuestos de alta temperatura. [6]

En los materiales cerámicos sinterizados por este proceso, la consolidación entre las partículas ocurre por reacción química y no por los mecanismos de crecimiento de cuellos de sinterización. Las diferencias en los potenciales químicos son las fuerzas conductoras que predominan en este proceso. El compuesto cerámico se

forma básicamente durante la sinterización por reacción entre los sólidos, entre el sólido o líquido o entre los reactantes gaseosos. Las reacciones químicas involucradas en este proceso son: la deposición o infiltración por vapor químico, las reacciones de intercambio, los procesos de oxidación y nutrición directa, las reacciones de enlace de nitruro de silicio y de carburo de silicio y la síntesis auto propagada a alta temperatura, SHS.

Algunos productos cerámicos tales como porcelana, productos arcillosos estructurales y algunos componentes electrónicos contienen una fase vítrea. Esta fase vítrea sirve como medio de reacción para que la difusión pueda tener lugar a menor temperatura que en el resto de los materiales sólidos cerámicos. Durante el tratamiento a elevadas temperaturas de este tipo de materiales sólidos cerámicos, tiene lugar un proceso llamado verificación por medio del cual la fase vítrea se licúa y rellena los poros del material. Esta fase vítrea líquida puede también reaccionar con algunos de los restantes sólidos de material refractario. Bajo enfriamiento, la fase líquida solidifica para formar una matriz vítrea que une las partículas que no han fundido.

2.9 Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales Tijuana - San Diego (PITAR)

Desde mediados de los años 30's, un creciente volumen de aguas residuales crudas han entrado desde México a Estados Unidos; Dado las condiciones topográficas naturales existentes, éstas han representado una seria amenaza para la salud pública y para el medio ambiente tanto para México como para las comunidades de San Diego, particularmente la zona sur del mismo Condado. Dicho problema se había agravado gradualmente con el paso de los años por razón natural del

crecimiento considerable de la población de Tijuana y en especial el sector industrial [16].

Con la finalidad de lograr el control y saneamiento de los derrames de aguas residuales de la población mexicana, se concertaron acuerdos entre los gobiernos de México y los Estados Unidos en el seno de la Comisión Internacional de Límites y Aguas, que establecieron las bases de cooperación entre los dos países. Caso particular fueron las Actas No. 270 (firmada el 30 de abril de 1985) y la No. 283 (firmada el 2 de julio de 1990) de la CILA con las que se acordaron las obras tanto domésticas como internacionales para la solución de este añejo problema fronterizo de saneamiento.



Conforme a los acuerdos anteriormente citados, la "PITAR" dio inicio a sus operaciones desde el 9 de abril del año de 1997 con un módulo de tratamiento denominado "Primario Avanzado" y una capacidad para tratar un gasto promedio diario de 1,100 lps de aguas residuales generadas por la Ciudad de Tijuana, B.C. Esta acción, ha jugado un papel clave en la restauración de la calidad del medio ambiente del Valle del Río Tijuana y en salvaguardar la salud de los residentes de ambos lados de la frontera.

La Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales (PITAR) se encuentra localizada en un sitio de aproximadamente 18 hectáreas (35 acres) al Oeste de la comunidad de San Ysidro, California, próxima a la intersección de las avenidas Dairy Mart Road y Monument Road.

Los flujos de aguas residuales tratadas que provienen de dicha planta, son conducidos a través de una línea de tubería subterránea hasta el Océano Pacífico, en donde son descargadas a través de un emisor submarino de aproximadamente a 5.6 Km. de longitud (3.5 millas) a partir de la costa y a una profundidad promedio de 29 m. (95 pies) bajo el nivel del mar. A la porción terrestre que sirve para conducir el efluente de la PITAR hasta la zona costera, es conocida como Emisor Terrestre y está conformado por una tubería con una longitud de 3.7 Km. (2.3 millas).

Volúmenes tratados en la Planta Binacional (PITAR)

Conforme a los acuerdos pactados mediante el Acta No. 296 de la CILA., firmada el 16 de abril de 1997, México cumple con su contribución por la construcción de la PITAR, conforme le hubiera costado construir una planta de tratamiento en territorio mexicano. México cubre \$16.78 millones de dólares en 10 anualidades fijas de \$1.67 millones de dólares que se pagan en partes iguales entre el gobierno del Estado de Baja California, por conducto de la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tijuana (CESPT) y Gobierno Federal por conducto de la Comisión Nacional del Agua (CNA). De igual manera, la CESPT cubre trimestralmente a la CILA el costo por concepto de Operación y Mantenimiento a razón de \$0.034 dls/m³ de aguas tratadas en la PITAR. [17]

3. OBJETIVOS Y METAS

3.1. Objetivo Principal

El presente trabajo de investigación pretende poner a punto la formulación de materiales vítreos de los sistemas tradicionales de SiO_2 -Arcilla-Feldespatos, con la variante de utilizar como fuente de materia prima, cenizas de lodos de planta tratadora de agua como sustituto de sílice. Así, se pretende el buscar una alternativa en materia prima para la elaboración de materiales que puedan ser aplicados ya sea en la industria de la construcción para pavimento y/o revestimiento o en si de un material sólido que tienda a ser un medio de encapsular residuos inorgánicos sin aplicación alguna a la fecha.

3.2. Objetivos específicos.

3.2.1. En orden inmediato:

- a) Llevar a cabo la identificación y caracterización cualitativa de elementos presentes en cenizas de lodos generados en planta de tratamiento de agua.
- b) Investigar y diseñar formulaciones de los sistemas SiO_2 -Arcilla-Feldespatos.
- c) Preparación de materiales muestra utilizando como fuente de materia prima de grado industrial Feldespato y la ceniza como materia prima alterna de SiO_2 y Arcilla.
- d) Caracterización de los materiales obtenidos a nivel mineralógico de las zonas generadas.

- e) Proponer la posible aplicación tecnológica de los materiales obtenidos.
- f) Presentar una alternativa de residuos sólidos como fuente de materia prima ya sea de manera directa para generar un material cristalino que permita incluirlo como opción para encapsular metales pesados.
- g) Estimar la propuesta en el paquete tecnológico a la industria generadora de residuo con características similares, para que de esta forma ofrecer alternativa de tratamiento in situ y evitar la proliferación de zonas de confinamiento.

3.2.2. En orden mediato:

- a) Procediendo con los objetivos mediatos, se tiene el de presentar alternativas para su industrialización ya sea en materia prima o el proyecto en sí, de tipo tecnológico.

3.3 Metas

- a) Obtener una variedad de productos cerámicos de tipo Losetas rojas, utilizando como materia prima residuos sólidos de origen industrial.
- b) Continuar la investigación realizada a partir de 1999 que se inició en la Universidad Autónoma de Baja California en el laboratorio de desarrollo de materiales en la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, ahora incluido dentro del Cuerpo Académico de Química Aplicada.
- c) Posteriormente, se fortalece la investigación realizada hasta hoy, promoviendo la investigación como una opción de formación terminal de estudiantes de licenciatura.
- d) Seguir difundiendo la investigación a nivel nacional e internacional con publicaciones y participaciones en congresos.
- e) Formación de recursos humanos que permitan promover la investigación dentro de las acciones del Cuerpo Académico de Química Aplicada mediante la colaboración estrecha de sus integrantes.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Materiales.

Conforme a la identificación cualitativa, se procede a realizar la investigación bibliográfica sobre las posibles formulaciones de materiales cerámicos del tipo "rojos"; SiO_2 -Arcilla-Feldespato, de tal forma que fuera posible obtener una o varios materiales que se puedan utilizar dentro de la construcción tales como; losetas, ladrillos, etc.

Se han seleccionado dos formulaciones basados en composiciones de materiales vitrocerámicos comerciales a base de Ceniza de biosólido - Arcilla, en donde se utiliza la ceniza de lodo como fuente de SiO_2 . En la Figura 2 se presenta fotografía que permite apreciar el aspecto de residuo de planta de tratamiento de agua cuando se deposita en zona de confinamiento.



Figura 2. Residuo de ceniza de lodo de planta de tratamiento de agua

Se partió de cuatro mezclas Arcilla Roja/Ceniza de biosólido, y a su vez, se utilizan tres tipos de cenizas generadas por los biosólidos provenientes de; planta de tratamiento de agua de la ciudad de Tijuana, planta binacional de tratamiento (PITAR)

y una mezcla de ambas que se encuentra en zona de confinamiento, de tal forma que de cada composición se generan tres materiales, a fin de analizar la variante en cuanto a morfología y mineralogía que se presenta al utilizar cada uno de los lodos.. La arcilla roja (barro) utilizada para elaborar ladrillos, tejas, losetas y macetas, es de origen regional, se ha pulverizado y homogeneizado en tamaño. En la Tabla 3, se ofrecen las respectivas composiciones base de partida.

Tabla 3. Composición de materiales cerámicos elaborados (% p/p)

Material	L-1	L-2	L-3	L-4
Ceniza	40	50	90	100
Arcilla	60	50	10	0

Se inicia la elaboración aplicando inicialmente mezclado de materias primas, homogeneizado, prensado a 2 Ton./cm² en piezas cerámicas de dimensiones de 2.5 cm X 2.5 cm. Posteriormente se lleva a liberación de humedad a 110 °C y finalmente a tratamiento térmico de 1000 °C/120 min. a una velocidad de calentamiento y enfriamiento de 5 °C/min. en un Horno Termoline de alta temperatura (1700 °C) equipado con un controlador automático.

4.2. Métodos

La determinación de las propiedades Químicas, Físicas y Tecnológicas de los materiales tanto cerámicos como vítreos, resulta esencial para interpretar el comportamiento y delimitar las aplicaciones de dichos materiales. El disponer de una caracterización microestructural completa requiere de múltiples y variados aspectos, como son: el tipo de elementos de que está constituido el material, el estado de oxidación, la naturaleza y la intensidad de su enlace, su índice de coordinación, el grado de orientación reticular, la posible existencia de heterogeneidades y su

composición, el nivel de homogeneidades químicas y la distribución de los distintos componentes, el estado de la superficie y sus posibles alteraciones, el tamaño de grano, temperaturas de fusión y/o de sinterización lo más exacto posible, etc.

Dado que no existe un método específico para estudiar los materiales del tipo cerámico que pueda aportar esta serie de datos simultáneamente, es necesario recurrir a un conjunto de técnicas instrumentales que permitan obtener resultados para hacer un análisis y posterior evaluación del material elaborado. En este caso el campo de investigación es amplio y variado, para una caracterización más completa de los materiales obtenidos para evaluar la calidad y aplicaciones de estos materiales se han determinado:

- a) Caracterización Mineralógica ,
- b) Caracterización Microestructural.

4.2.1 Caracterización Mineralógica.

4.2.1.1. Difracción de Rayos-X [18]

Los rayos-X son radiaciones en el espectro electromagnético de longitud de onda corta producida por la desaceleración de electrones de elevada energía o por transiciones electrónicas que implican electrones de los orbitales internos de los átomos. El intervalo de longitudes de onda de la espectroscopía de rayos-X convencional abarca la región de aproximadamente $0,1 \text{ \AA}$ a $25 \text{ \AA}$. Los rayos-X para usos en experimentos de difracción se obtienen de varias maneras, la fuente más usual de rayos-X es el tubo de rayos-X (algunas veces llamado tubo de Coolidge) Figura 3, en donde se produce una colisión de un haz de electrones con un blanco metálico (cobre), y cuando el voltaje alcanza un determinado valor (potencial

crítico, que depende del elemento del ánodo), al haz de electrones en los orbitales internos de los átomos.

Las fuentes de rayos-X, producen un espectro continuo y otro discontinuo (líneas de rayos característicos). La radiación continua se llama también radiación blanca o frecuentemente "Bremsstrahlung", que proviene del alemán *strahlung* (que significa radiación), y *brems* (que significa frenar, es decir, desacelerar), la cual según el nombre se interpreta como: radiación que proviene de la desaceleración de partículas. La radiación continua es el resultado de las colisiones entre los electrones del haz incidente y los átomos del material del blanco. En cada colisión, el electrón se desacelera y la energía que pierde el electrón aparece en forma de radiación como un fotón de energía de rayos-X siendo muchos de los fotones discretos cuyas longitudes de onda varían desde $\lambda_{\min}$ hasta λ_{∞} correspondiendo a las diferentes pérdidas de energía en los choques individuales.

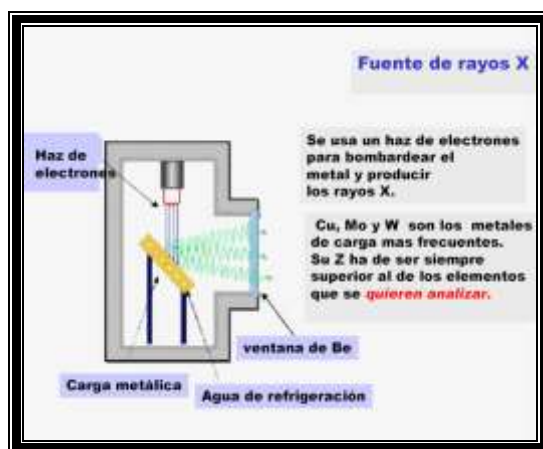


Figura 3. Esquema de un tubo de Rayos-X.

La energía del fotón será igual a la diferencia entre la energía cinética del electrón antes y después de la colisión. Esto se calcula mediante la siguiente expresión:

$$h\nu = K - K' = eV$$

En donde:

K = energía cinética inicial del electrón

K' = energía cinética final del electrón

también se puede escribir como :

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda_0} = eV$$

y la longitud de onda para el fotón es:

$$\lambda_0 = \frac{hc}{eV}$$

En donde:

h : cte. de Planck = 6.62×10^{-27} erg/seg

c : velocidad de la luz = 3×10^{10} cm/seg

e : carga del electrón = 1.6029×10^{-29} Coulomb

V : potencial de aceleración

Sustituyendo los valores numéricos, la ecuación queda:

$$\lambda_0 = 12398 / V$$

La interacción entre el vector eléctrico de la radiación-X y los electrones de la materia por la que pasa da lugar a una dispersión. Cuando los rayos-X son dispersados por el entorno ordenado de un cristal, tienen lugar interferencias (tanto constructivas como destructivas) entre los rayos dispersados ya que las

distancias entre los centros de dispersión son del mismo orden de magnitud que la longitud de onda de la radiación. El resultado es la difracción.

El método usado en este estudio se conoce con el nombre de difracción de rayos-X de polvo cristalino, el cual es el único método analítico que es capaz de suministrar información cualitativa y cuantitativa sobre los compuestos presentes en una muestra sólida.

En este método, la muestra cristalina se tritura hasta obtener un polvo fino homogéneo. Esto trae consigo, que el enorme número de pequeños cristales presenten orientaciones en todas las direcciones posibles; y por consecuencia, cuando un haz de rayos-X atraviesa el material, se esperaría que un número significativo de partículas esté orientado de tal manera que cumpla la condición de Bragg para la reflexión para todos los espaciados interplanares posibles.

En 1912, W.L. Bragg estudió la difracción de rayos-X mediante el uso de cristales, mostrando que cada uno de los planos atómicos (capas) compuestos en los cristales, reflejan la radiación en la misma forma como la luz es reflejada por un espejo. De esta forma cuando un rayo-X alcanza la superficie de un cristal a cualquier ángulo θ , una fracción es dispersada por la capa de átomos de la superficie. La fracción no dispersada penetra en la segunda capa de átomos donde otra vez una parte es dispersada y la que queda pasa a la tercera capa, (Figura 4).

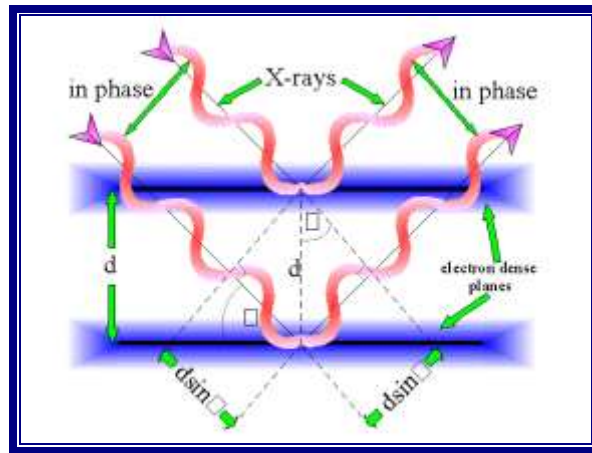


Figura 4. Difracción de rayos X por un cristal.

Si la distancia:

$$AP + PC = n\lambda$$

En donde:

n = número entero

$$AP = PC = d \text{ Sen } \theta$$

Y el valor de :

Entonces:

$$d \text{ Sen } \theta + d \text{ Sen } \theta = n\lambda$$

Y tendremos:

⇓

$$2d \text{ Sen } \theta = n\lambda$$

Ecuación de Bragg

$$\text{Sen } \theta = \frac{n\lambda}{2d}$$

Hay que señalar que los rayos-X parecen ser reflejados por el cristal sólo si el ángulo de incidencia corresponden con los ángulos de Bragg, para que el haz reflejado esté en fase y nos dirija a una interferencia constructiva, se debe satisfacer la ley de Bragg. Las condiciones para la difracción de rayos-X consiste en 2 puntos: que la distancia entre capas de átomos sea aproximadamente igual a la longitud de onda de la radiación y que los centros de dispersión estén distribuidos en el espacio de forma muy ordenada (Figura 5).

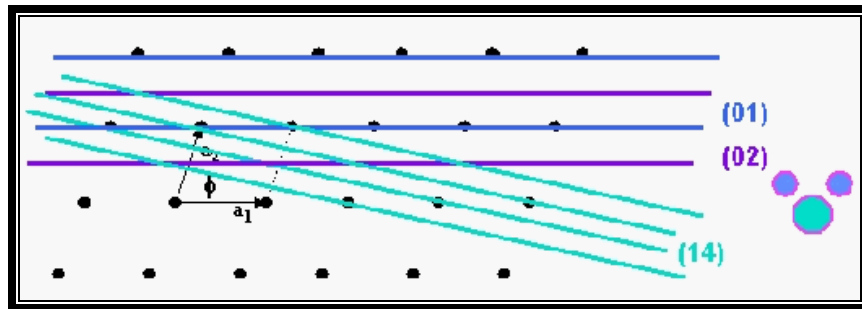


Figura 5. Difracción de rayos-X por un cristal.

La muestra cristalina se tritura en un mortero de ágata hasta obtener un polvo fino homogéneo, procediendo a extender la muestra en una placa plana (porta muestra) con un área de 1.5 cm y un espesor de 0.5 mm.

5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1. Caracterización de ceniza de residuo de planta de tratamiento de agua.

Por principio se llevó a cabo la identificación semicuantitativa por medio de Fluorescencia de Rayos del material arcilloso de los elementos presentes sobre una muestra de lodo que se generó en planta de tratamiento de agua, se seca, calcina y pulveriza. En la Tabla 4 se presenta la relación de compuestos determinados y en la Tabla 5, la relación de elementos trazas. Como se puede apreciar, se tiene de manera marcada una composición de SiO_2 y Fe_2O_3 y el S.

Tabla 4. Composición Química por FRX (% p/p)

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	K_2O	As_2O_3	SO_3	Sb_2O_5	PC	Suma
49.70	0.658	14.50	0.283	0.458	0.060	0.967	20.10	0151	13	99.88

Tabla 5. Elementos traza por FRX (ppm)

Rb	Sr	Ba	Y	Zr	Nb	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Th	Pb
5	15	10	1	2	< 0.7	9	41	< 0.3	1	51	< 0.5	9	41

Por medio de Difracción de Rayos X, se lleva a cabo la identificación de las fases predominantes en dos cenizas analizadas en donde predominan la fase $\text{Si}(\text{P}_2\text{O}_7)$, $\text{Ca}_{0.72}\text{Na}_{0.28}(\text{Al}_{1.72}\text{Si}_{2.28}\text{O}_8)$ [Bitownita] en la ceniza que corresponde al residuo generado en la planta binacional y $\text{Na}_{0.25}\text{Ca}_{0.71}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$ [Anortita] en la ceniza que

proviene de la zona de mezcla de ambos residuos; provenientes de Planta binacional y generados en la propia planta de Punta Bandera.

5.2. Materiales obtenidos

Se obtuvieron doce materiales de color rojo, todos ellos presentaron una relativa homogeneidad, se apreció que a medida que aumenta la cantidad de ceniza, se presentan partículas blancas que se atribuyen a material conformado por mayor presencia de arena [SiO_2] en la Figura 6 se presenta una fotografía que permite apreciar los respectivos materiales en proporciones de 10/90, 40/60, 50/50, 100/0 de ceniza de biosólido/arcilla roja. Se elabora un material a base de ceniza de biosólido, se obtiene un material homogéneo en cuanto a presentación de color pero con la existencia de partículas claras que se atribuyen a material arenoso que no ha llegado a reaccionar y/o fundir y que bien, da una apariencia diferente al material, un aspecto mas rústico que desde el punto de vista estético es aceptable.

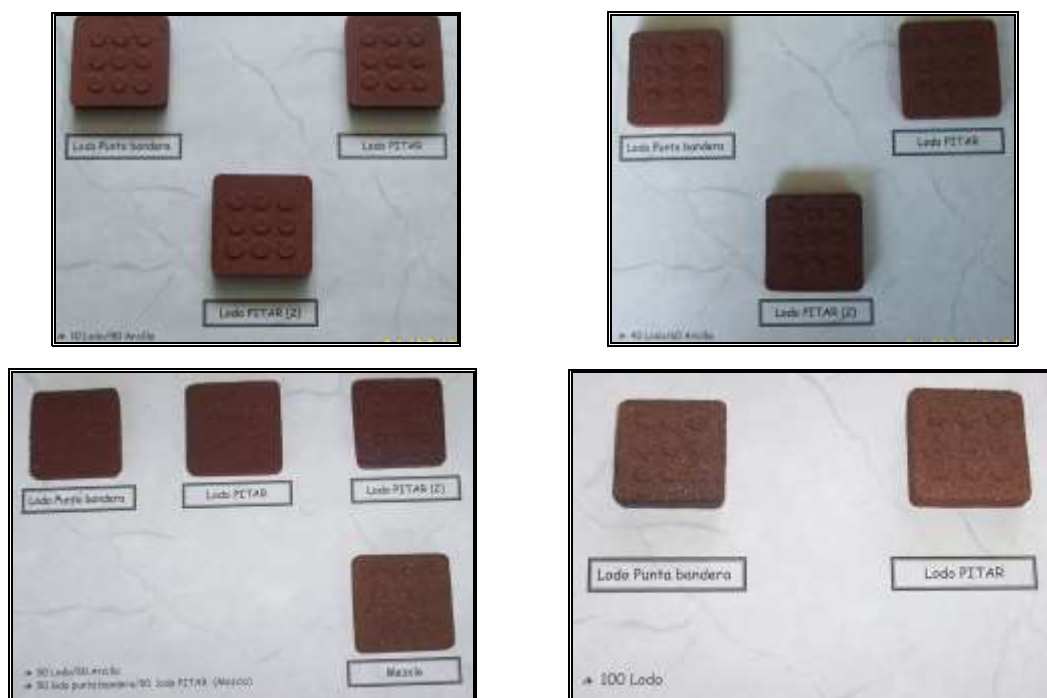


Figura 6. Materiales cerámicos (Losetas) obtenidos.

5.2.1. Determinación de Propiedades Físicas

Las principales propiedades físicas determinadas en los materiales fueron aquellas que definen su aplicación desde el punto de vista tecnológico como son; Capacidad de Absorción de Agua, Compresión, Pérdida de peso y Densidad. En la Tabla 5, se ofrecen una relación de los valores obtenidos.

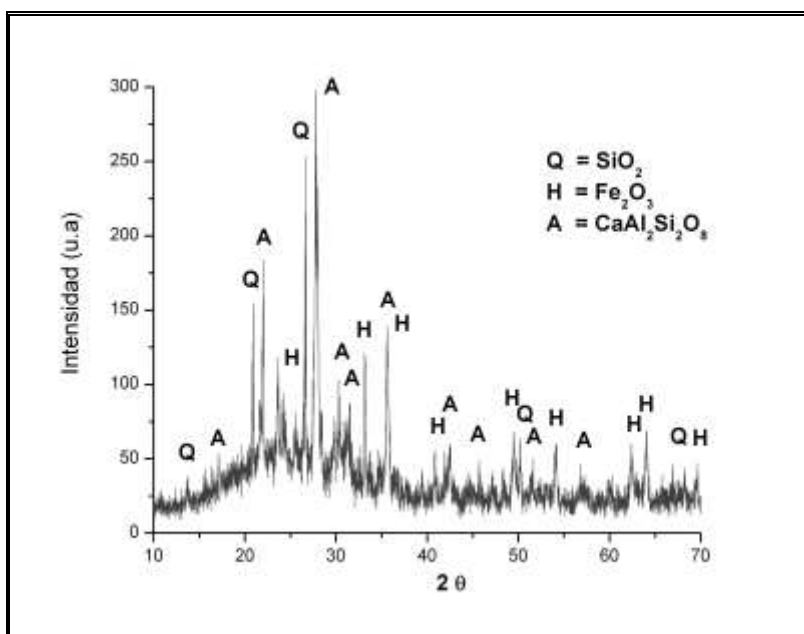
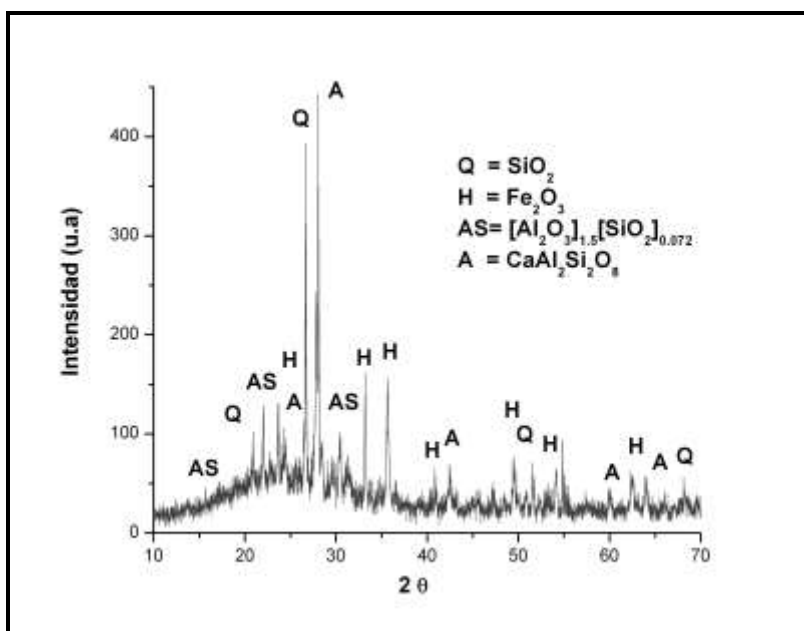
Tabla 5. Propiedades físicas de materiales cerámicos elaborados.

Proporción de mezcla		L-4 90:10	L-3 60:40	L-2 50:50	L-1 100%
Capacidad de Absorción	Lodo 1	237.31	183.26	198.22	70.02
	Lodo 2	317.55	125.33	222.95	264.88
	Lodo 3	114.30	180.34	118.72	----
Compresión (%)	Lodo 1	0.90	0.90	5.55	33.10
	Lodo 2	3.99	1.03	8.42	15.72
	Lodo 3	2.79	10.42	16.38	---
Pérdida de peso (%)	Lodo 1	9.85	9.84	18.82	4.98
	Lodo 2	11.55	18.19	7.60	4.50
	Lodo 3	10.62	8.47	7.79	----
Densidad (g/mL)	Lodo 1	1.69	1.51	1.64	2.04
	Lodo 2	1.70	1.58	1.73	2.01
	Lodo 3	1.71	1.64	1.87	2.0
# máximo	Origen { Lodo 1: Punta Bandera Lodo 2: PITAR secos Lodo 3: PITAR húmedos				
# mínimo					

5.2.1. Caracterización mineralógica

La composición mineralógica de los materiales obtenidos, se determina por medio de Difracción de Rayos X sobre, dado el volumen de materiales obtenidos (12 piezas) se lleva una selección de una muestra por sistema ceniza-arcilla, de tal forma que se logra obtener una serie de fases que se puede considerar representativas de cada sistema.

En todos los sistemas se obtiene la como fase predominante $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ [Anortita] y que corresponde a la fase esperada, conforme a la composición de las respectivas materias primas; arcilla y ceniza de biosólido. La presencia de $\text{Ca}_{0.88}\text{Al}_{1.77}\text{Si}_{2.23}\text{O}_8$ [Silicato de Calcio y Aluminio], se atribuye a fase alterna que tiende a formarse ya sea por solubilidad de Anortita o cristalización secundaria, la SiO_2 [Cuarzo] y Fe_2O_3 [Hematita], se estima su presencia debido a que es compuesto tiene las condiciones de cristalizar de manera aislada o que se encuentra en alta concentración que se traduce en fase vítrea [SiO_2] y finalmente el $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1.5}(\text{SiO}_2)_{0.072}$ [Silicato de Aluminio] se considera un compuesto intermedio antes de llegar a cristalizar la Anortita. En todos los sistemas, se aprecia la existencia de una fase vítrea dada la presencia de un fondo en el difractograma entre 15° y 40° y que a medida que aumenta la cantidad de ceniza el fondo tiende disminuir hasta llegar a la relación 50/50 que es cuando menor cantidad de fase vítrea se aprecia, estimándose el que existe una proporción de componentes que conforman la fase cristalina de Anortita. En la Figura 7, se presentan tres difractogramas de cada uno de las formulaciones seleccionadas.



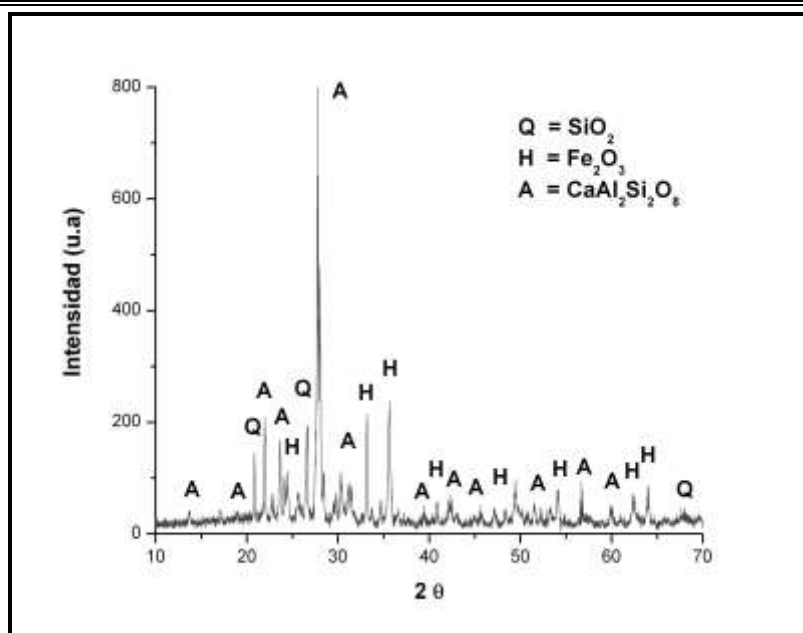


Figura 7. Difractogramas de RX de materiales cerámicos elaborados.

El material conformado un 100 % a base de ceniza, es quien presenta mayor diversidad de fases; $\text{Ca}_{0.88} 0.12\text{Al}_{1.77}\text{Si}_{2.23}\text{O}_8$ [Silicato de Calcio y Aluminio], SiO_2 [Cuarzo], Fe_2O_3 [Hematita], $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1.5}(\text{SiO}_2)_{0.072}$ [Silicato de Aluminio]. $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ [Anortita].

En la Tabla 6 se presenta una relación de las fases cristalina identificadas en los diferentes materiales caracterizados y en las mismas cenizas de biosólidos.

Tabla 6. Relación de Material/Fase cristalina identificada

Material C/A	Fases cristalinas
Ceniza 1	$\text{Si}(\text{P}_2\text{O}_7)$, $\text{Ca}_{0.72}\text{Na}_{0.28}(\text{Al}_{1.72}\text{Si}_{2.28}\text{O}_8)$ [Bitownita]
Ceniza 2	$\text{Na}_{0.25}\text{Ca}_{0.71}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$ [Anortita]
L-1	$\text{Ca}_{0.88} 0.12\text{Al}_{1.77}\text{Si}_{2.23}\text{O}_8$ [Silicato de Calcio y Aluminio], SiO_2 [Cuarzo], Fe_2O_3 [Hematita], $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1.5}(\text{SiO}_2)_{0.072}$ [Silicato de Aluminio]. $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ [Anortita]
L-2	SiO_2 [Cuarzo], Fe_2O_3 [Hematita], [Silicato de Aluminio]. $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ [Anortita]
L-3	SiO_2 [Cuarzo], Fe_2O_3 [Hematita], [Silicato de Aluminio]. $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ [Anortita]
L-4	$\text{Ca}_{0.68}\text{Na}_{0.30}(\text{Al}_{1.66}\text{Si}_{2.34}\text{O}_8)$ [Labradorita], $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ [Albita]

6. CONCLUSIONES

Es pertinente mencionar que el presente trabajo de investigación es el inicio de la línea de investigación que permite el uso de residuos generados en planta de tratamiento de agua, los resultados obtenidos muestran que los materiales elaborados a base de Ceniza y arcilla roja, en presentación en forma de loseta, ofrecen materiales que en su momento, pueden ser utilizados en la industria de construcción.

Las propiedades físicas determinadas, permiten ubicar a los materiales dentro de los intervalos en materiales de este tipo que actualmente son comercializados, por lo cual se pueden considerar que este tipo de biosólido, puede ser un buen sustituto de materia prima de origen natural (sílice).

En lo que respecta a evaluación mineralógica, se puede apreciar que se obtienen las fases cristalinas propias de este tipo de materiales, considerando que se utiliza únicamente ceniza y arcilla, abre la oportunidad de promover la adición de agentes secundarios (feldespato, tierras a base de CaO y MgO , etc) para la investigación y desarrollo de nuevos materiales, que bien se pueden ubicar como Ecomateriales.

Conforme a los resultados favorables obtenidos, se pretende dar continuidad al proceso de caracterización de estos materiales a fin de poder promover el aprovechamiento de estos biosólidos y considerar el presentar una propuesta a la Comisión Estatal de Servicios Públicos de la región.

7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El presente proyecto de investigación es producto de una continuidad a la línea que se ha llevado a partir de 1989 en la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería y que ha permitido el poder incrementar el grado de introducción de estudiantes de licenciatura y posgrado a proceso de investigación, ahora incluido dentro de los Objetivos Específicos de Cuerpo Académico de reciente creación: Química Aplicada, con la mejor intención de que se de continuidad a la Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento, de tal forma que pueda tener una introducción para promover un desarrollo de nuevas alternativas de disminución de residuos de origen industrial y de esta forma mejorar el medio ambiente.

Conforme a los resultados obtenidos, básicamente en lo que se refiere a material cerámico en forma de loseta y utilizando como fuente de materia prima una ceniza proveniente de biosólidos, permite el poder considerar el dar continuidad a la investigación, se ha logrado obtener materiales estables, con propiedades físicas y mineralógicas que invitan incrementar la caracterización y conocer mas sobre su morfología, comportamiento mecánico y térmico, fundamental en el proceso tecnológico, y que dan la pauta para ser aprovechados a nivel industrial.

De igual forma, el que se considere el ampliar el abanico de aplicaciones de dichas cenizas en sistemas vitrocerámicos, en pigmentos para cerámicos, sin descartarlo como agregado en concreto.

8. Bibliografía

1. <http://es.wikipedia.org/wiki/Ceramica>
2. www.sofiaoriginals.com/ene627culturacicladica
3. www.heskethps.co.uk/raku/index.html
4. <http://tareasonline.com.ve/contenido.asp?ArticleId=38683>
5. <http://www.mailxmail.com/curso/excelencia/cienciamateriales/capitulo11.htm>
6. http://es.wikipedia.org/wiki/Redes_de_Bravais
7. <http://www.profisica.cl/comofuncionan/como.php?id=36>
8. http://www.fq.uh.cu/dpto/qi/q_inor_2_web/Grupo_11/grupo_11.htm
9. http://es.wikipedia.org/wiki/Cer%C3%A1mica_t%C3%A9cnica
10. http://sifunpro.tripod.com/piezas_ceramicas.htm
11. <http://es.wikipedia.org/wiki/Arcilla>
12. http://es.encyclopedia.msn.com/encyclopedia_761564627/Feldespatos.html
13. José Luis Villegas Chávez, Incorporación de residuos de ingenio azucarero en materiales cerámicos, Tesis maestría, UABC, 2014
14. Cárdenas Sánchez M., Material arcilloso con plata como fuente de SiO_2 de sistema $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-R}$ ($\text{R}=\text{BaO}$, CdO), Tesis Licenciatura, UABC, 2008.
15. Alcántar Vázquez B.C., Obtención de material vitrocerámico a partir de residuos de planta tratadora de agua, Tesis Licenciatura, UABC, 2006.
16. <http://www.sre.gob.mx/cila/pitartij.htm>
17. Rodríguez Ruiz M. A., Incorporación de material particulado proveniente de residuos industriales de composición inorgánica en sistema vitrocerámico, Tesis Licenciatura, UABC, 2002.
18. Reynoso Soto. E.A., Elaboración de Espínela Inversa de Hierro a partir de un residuo industrial, Tesis Licenciatura, UABC, 2004.