



Universidad Autónoma de Baja California

Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería

## TESIS

*“Incorporación de un Residuo Industrial a una Matriz Vitrocerámica”*

Que para obtener el Título de:

**QUÍMICO INDUSTRIAL**

Presenta:

*Armando Orozco Moreno*

Tijuana, Baja California

Junio de 2007

# Universidad Autónoma de Baja California

## FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

FOLIO No. **237**

Tijuana, B.C.

C. ARMANDO OROZCO MORENO

08 DE JUNIO DE 2007

Pasante de QUÍMICO INDUSTRIAL

Presente

El tema de trabajo y/o tesis para su examen profesional, en la

Opción TESIS

es propuesto, por el C. DR. GERARDO CÉSAR DÍAZ TRUJILLO Y M.C. MARÍA DEL PILAR HARO VÁZQUEZ

quien será el responsable de la calidad de trabajo que usted presente, referido al tema

"Incorporación de un Residuo Industrial a una Matriz Vitrocerámica"


el cual deberá usted desarrollar, de acuerdo con el siguiente orden:

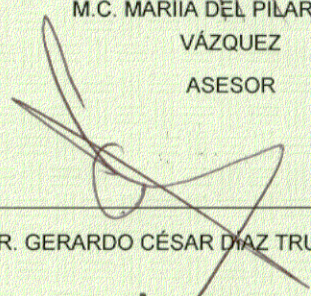
- I.- INTRODUCCIÓN
- II.- OBJETIVOS Y METAS
- III.- ANTECEDENTES
- IV.- MATERIALES
- V.- MÉTODOS
- VI.- RESULTADOS Y DISCUSIONES
- VII.- CONCLUSIÓN
- VIII.- REFERENCIAS

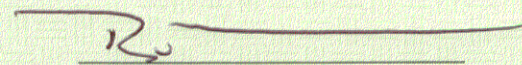
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE BAJA CALIFORNIA



FACULTAD DE CIENCIAS  
QUÍMICAS E INGENIERÍA

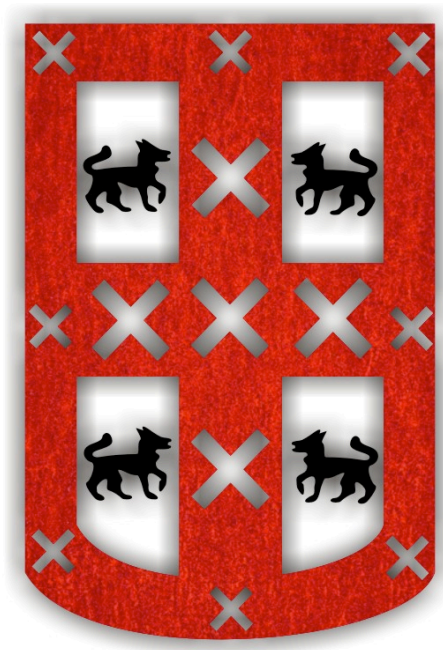
  
M.C. MARÍA DEL PILAR HARO  
VÁZQUEZ  
ASESOR

  
DR. GERARDO CÉSAR DÍAZ TRUJILLO  
Asesor

  
M.C. RUBÉN GUILLERMO SEPÚLVEDA  
MARQUÉS  
Sub-Director Secretario

  
MC. MARÍA EUGENIA PÉREZ MORALES

Directora



Some men see the things as they are, and say:

Why?

I dream the things that never were, and say:

Why not?

Leonardo DaVinci



*Para ti...*

*Nunca he sido el mejor ejemplo, de hecho nunca he sido un ejemplo a seguir.*

*Pero espero que esto te ayude o te aliente algún día a seguir adelante,  
a no rendirte, que te ayude a ver que pese a los obstáculos,  
las caídas y todo lo que te pueda pasar en tú vida,  
se puede seguir en pie como lo hemos hecho tú madre y yo.*

*Esto no es un ejemplo, es un recordatorio de que puedes ser y hacer lo que tú quieras.*

*Tarde tres años en presentar esta tesis, pero solo  
unos días en hacerla. Tú tardaras algunos en leer esto  
y otros más en entender que esto es por ti...*

*...y para ti.*

*DIOS te bendiga, como lo hizo conmigo al permitir  
que entraras en mi VIDA.*

*A. Orozco*



# Agradecimientos



Es curioso pensar que tenía páginas de agradecimientos y palabras que decir, en ellas expresaba todo mi amor y admiración hacia mis padres, que pese a todo el pasado, siempre me han apoyado y han estado ahí cada vez que los necesito. Mis hermanos, que siempre me han sabido aconsejar por experiencias propias sobre mis decisiones.

Nombraba a Amigos y Maestros, sin olvidar a nadie para no quedar mal con ellos ni conmigo mismo. Hablaba de su apoyo y mencionaba mi agradecimiento, personas que me ayudaron con este trabajo, también a aquellas que no lo hicieron; a personas que nunca confiaron en mí, ahora podía decir: “Lo Logre”. Mencionaba infinidad de nombres, algunos que ni siquiera conocía, solo por burocracia y mera formalidad.

Pero no... mejor no decir nombres, ni palabras vacías, no poner en duda el criterio de los demás ni dar pie al morbo o las habladurías, sin conflictos, sin mejores ni peores personas, sin títulos, sin rangos o status quo, nada de eso.

Solo...

...Gracias!!! ...a quienes se lo merecen.

“Estoy en deuda con ustedes”



# 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, específicamente en **9na. Convocatoria** de UABC.; **“Aprovechamiento de lodos de planta tratadora de agua en formulación de materiales cerámicos”** por lo cual se desea expresar agradecimiento.

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 de materiales aplicando diversas técnicas de análisis.
- A la fecha, se cuenta con una **colaboración interinstitucional e internacional** donde participan; Argentina, Bolivia, Brasil, Cuba y España dentro de un **ante-proyecto de Red** a presentarse en futuro mediato a programa de CYTED, den-

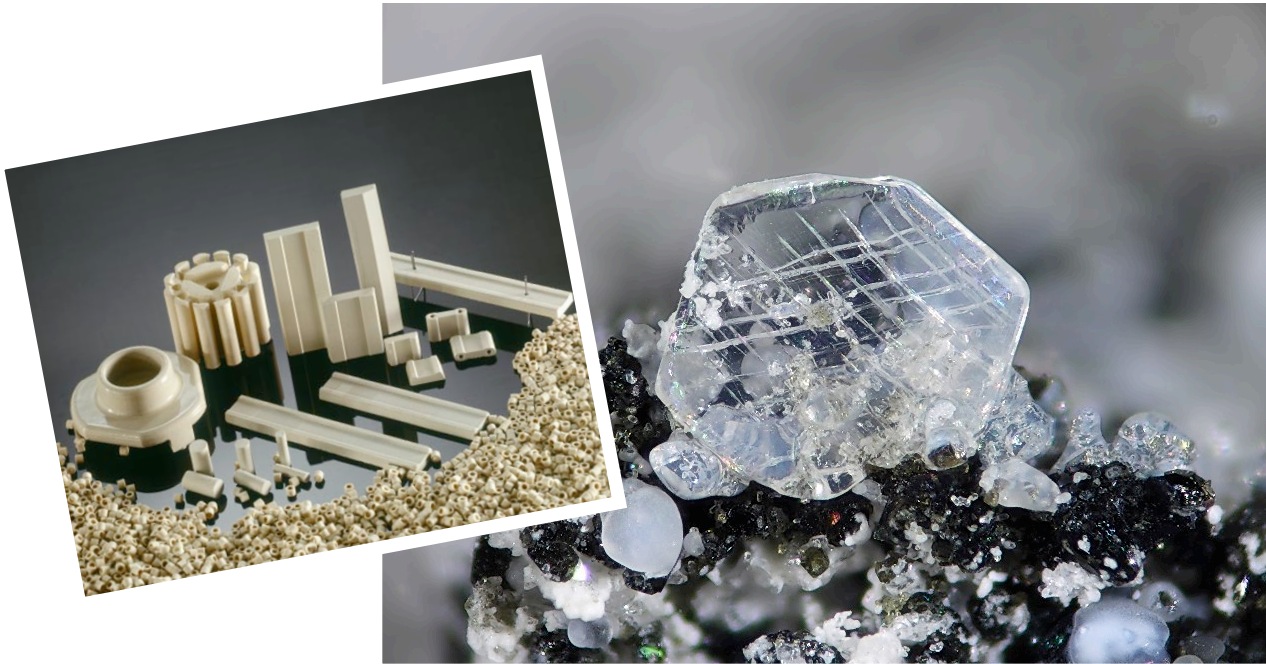
tro de las acciones del Cuerpo Académico de Química Aplicada, lo que viene a ratificar la continua colaboración existente, llevando su integración a un anteproyecto de Red Nacional con miembros del ***Consortio de Universidades Mexicanas***.

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: ***“Incorporación de un residuo industrial a una matriz vitrocerámica”*** que permite ofrecer el presente trabajo de investigación dentro de la ***labor experimental*** que se está realizando en la Universidad Autónoma de Baja California en colaboración con el ***Centro de Investigaciones en Materiales Avanzados (CIMA)***, nuestro agradecimiento al ***Dr. Ezequiel Cruz*** por el apoyo durante el proceso de caracterización aplicando Difracción de Rayos X.

# TABLA DE CONTENIDO

<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	<b>I</b>
<b>2. OBJETIVOS Y METAS</b>	<b>3</b>
2.1 Objetivo Principal	
2.2 Objetivos Específicos	
2.3 Metas	
<b>3. ANTECEDENTES</b>	<b>5</b>
3.1 Breve historia “El Vidrio y El Tiempo”	5
3.2 Desvitrificación o cristalización del vidrio	11
3.3 Nucleación	12
Homogénea	
Heterogénea	
Crecimiento de los cristales	
3.4 Métodos industriales de fabricación	14
Métodos de fabricación	
Proceso cerámico aplicado al reciclado de residuos industriales	
Residuos generados en la industria cerámica	
Concepto de inertización	
Encapsulación o ceramización	
Inertización y reciclado	
Transferencia de calor por el interior de las masa cerámicas	
ECOBRICK®. Ladrillo fabricado con lodo de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR)	
Propiedades de la microestructura cerámica	
Propiedades mecánicas	
Conductividad hidráulica	
Resistencia a agentes químicos	
Retención de metales pesados	
Reciclado de residuos vía vitrificación	
<b>4. MATERIALES</b>	<b>28</b>
4.1 Composición del vidrio precursor	28

Feldespatos	
Anortita	
4.2 Materias primas	31
Composición mineralógica	
Composición química	
4.3 Formulación del vidrio precursor	33
4.4 Elaboración de materiales	34
<b>5. <i>MÉTODOS</i></b>	<b>36</b>
5.1 Caracterización microestructural	36
Microscopía Electrónica de Barrido	
5.2 Análisis mineralógico	38
Difracción de Rayos X	
<b>6. <i>RESULTADOS Y DISCUSIONES</i></b>	<b>40</b>
6.1 Caracterización del residuo	40
6.2 Materiales obtenidos	41
Características mineralógicas	
Características micro estructurales	
<b>7. <i>CONCLUSIÓN</i></b>	<b>45</b>
<b>8. <i>REFERENCIAS</i></b>	<b>48</b>



# Introducción | I

La ciencia y tecnología de materiales crea y aplica conocimientos que permiten relacionar la composición, estructura y el procesamiento de los materiales con aquellas propiedades que los hacen aptos para cada una de las aplicaciones. Se trata de un área de crecimiento de carácter eminentemente vertical que agrega conocimientos de diversas ciencias y tecnologías que van desde la física y la química hasta tecnologías de mecanizado y producción.

Los avances que los nuevos materiales han permitido en ámbitos tan diversos como transporte, comunicación o medicina ponen de manifiesto el papel crítico que el desarrollo de la ciencia y la tecnología de materiales juega tanto en los sectores industriales como de servicios, en los que la tecnología y la competitividad son factores clave para el éxito.

En línea con el carácter vertical mencionado para la ciencia y tecnología de materiales, se agrupan las actividades que afectan al proceso de elaboración como de utilización; obtención y elaboración de las materias primas, transformación de dichas materias primas en materiales de prestaciones nuevas o mejoradas, su fabricación en el producto final y su posible destrucción, reciclado o reutilización al fin de la vida útil del producto en cuestión. Sin olvidar tampoco las tareas de caracterización de los materiales incluyendo, entre otros aspectos, el análisis de la composición, impurezas, estructura cristalina, defectos y la determinación de sus propiedades.

Por esto, en los últimos años y debido al crecimiento industrial observado a nivel mundial, se ha optado por una nueva gama de materiales, realizando un análisis de los caminos seguidos para el tratamiento de residuos peligrosos ya sea reciclado, rehúso o confinamiento, los dos primeros son los mas adecuados ya que son una forma de disminuir el grado de producción de los mismos y de esta forma evitar un desequilibrio ecológico al generar zonas o áreas de confinamiento que al transcurrir el tiempo promueven contaminación tanto del suelo, agua y aire a pesar del estricto control en dichas áreas en lo concerniente a seguridad.

En el presente trabajo, se ofrece una propuesta para el aprovechamiento de residuo generado en la industrial, proveniente de una planta comercial dedicada a la obtención de Alumina (materia prima para producción de Aluminio), como agente de carga en sistema vítreos en donde se promueve un proceso de cristalización para generar material Vitro cerámico. Se considera que con los resultados obtenidos, se ofrecerá una alternativa para que en estos tiempo de auge industrial, sea posible disminuir el incremento de contaminación ambiental en lo que respecta a nivel de volumen en confinamiento de sólidos, incorporación en menor o mayor grado de material particulado a la atmósfera durante el trato que se le da a estos residuos sólidos y lo más relevante el que se vea disminuido el contacto del individuo en el centro de trabajo con este tipo de residuo dados los resultados no favorables que se presentan en la salud.



# Objetivos y Metas | 2

## OBJETIVO PRINCIPAL

El presente trabajo de investigación pretende poner a punto la formulación de materiales vítreos del sistemas Vitro cerámicos tradicionales:  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ , con fases cristalinas: Anortita y Cristobalita predominantemente y aquellas principales que se involucren dentro de su red. Con la variante de utilizar como fuente de materia prima, residuos conformados de hierro, aluminio, calcio y silicio principalmente. Así, se pretende el buscar una alternativa en materia prima para la elaboración de materiales que puedan ser aplicados ya sea como materiales Vitro cerámicos con alta resistencia térmica y/o mecánica para su uso en recubrimiento de cerámicas, 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.

## OBJETIVOS ESPECIFICOS

- a) Llevar a cabo la identificación y caracterización cualitativa de elementos presentes en residuos industriales en donde predominan elementos metálicos.

- b) Investigar y diseñar formulaciones de los sistemas  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ .
- c) Preparación de materiales muestra utilizando como fuente de materia prima de grado reactivo ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ) y el residuo generado en la industria.
- d) Identificar la zona de formación que presenta desvitrificación.
- e) Caracterización de los materiales obtenidos a nivel mineralógico y microestructural de las zonas generadas.
- f) Elaborar materiales Vitro cerámicos que contengan las fases cristalinas afines a los componentes presentes en los residuos para de esta forma incluirlos dentro de la red cristalina. Considerar que la presencia de “impurezas” puede apoyar el efecto de cristalización o fusión.
- g) Analizar y evaluar el efecto originado por la incorporación de residuos desde el punto de vista de crecimiento o abundancia de cristales.
- h) Proponer la posible aplicación tecnológica de los materiales obtenidos.
- i) 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.
- j) 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.
- k) Presentar alternativas para su industrialización ya sea en materia prima o el proyecto en sí, de tipo tecnológico.

## **METAS**

- a) Obtener una variedad de productos Vitro cerámicos del sistema  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$  utilizando como materia prima residuos sólidos de origen industrial.
- b) Seguir difundiendo la investigación a nivel nacional e internacional con publicaciones y participaciones en congresos.
- c) Formación de recursos humanos que permitan promover la investigación en el área de materiales Vitro cerámicos.



# Antecedentes | 3

## 3.1 “EL VIDRIO Y EL TIEMPO”

En una ocasión que visitaba a mis padres en un fin de semana, me llamo la atención un comentario hecho por mi madre a cerca del piso de la casa; limpiaba este con tal fervor mientras renegaba de lo sucio que estaba. El piso de aquella casa en su inicio estaba recubierto de una loseta de 1 ft<sup>2</sup> color arena, cuya apariencia durante el paso de los años no había mejorado. Mi madre hablaba de lo fácil que seria de limpiar si aquel piso fuese o tuviese plástico adherido, cosa que me hizo mucha gracia.

¡En parte tienes razón!, atine a decir; ¿Pero piensa que pasaría si este fuese de plástico en lugar de vitrocerámico?;

¿Pensé que eras químico?;

¡Lo soy!, bueno estoy estudiando para serlo, pero no creo que el colocar plástico en el piso sea la solución, ya que el plástico es menos resistente que la loseta, no resistiría

los químicos provenientes de los detergentes y sobre todo se desgasta más rápidamente con la fricción que el vidrio;

Pues si, pero seria mas fácil de limpiar, ¿no?;

En parte, solo si lo haces diario, pero el plástico sufriría de corrosión, por lo que terminaría cambiando de color;

Tal vez, pero la loseta es mucho mas cara que el plástico ¿o no?;

Si, pero es de mejor calidad, ¿no crees que valga la pena?;

¿Veo que no te voy a convencer con mis comentarios?;

No se trata de convencernos mutuamente, se trata de poner en claro los aspectos entre estos dos materiales, la mayoría de las personas piensa que al llegar la era de los plásticos, todo a mejorado, pero no es así, con el paso del tiempo se han logrado mejorar pero el nivel de contaminación generado es muy grande, durante miles de años uno de los materiales mas utilizados por el hombre a sido el vidrio, para vasijas, para conservar alimentos, o como simple adorno.

Los primeros objetos de vidrio que se fabricaron fueron cuentas de collar o abalorios, pero las vasijas huecas no aparecieron hasta el 1500 a.C. Es probable que fueran artesanos asiáticos los que establecieron la manufactura del vidrio en Egipto, de donde proceden las primeras vasijas producidas durante el reinado de Tutmosis III (1504-1450 a.C.). La fabricación del vidrio floreció en Egipto y Mesopotamia hasta el 1200 a.C. y posteriormente cesó casi por completo durante varios siglos. Egipto produjo un vidrio claro, que contenía sílice pura; lo coloreaban de azul y verde. Además de vasos hacían figurillas, amuletos y cuentas, así como piezas vítreas para incrustaciones en muebles. En el siglo IX a.C. Siria y Mesopotamia fueron centros productores de vidrio, y la industria se difundió por toda la región del Mediterráneo. Durante la época helenística Egipto se convirtió, gracias al vidrio manufacturado en Alejandría, en el principal proveedor de objetos de vidrio de las cortes reales. Sin embargo, fue en las costas fenicias donde se desarrolló el importante descubrimiento del vidrio soplado en el siglo I a.C. Durante la época romana la manufactura del vidrio se extendió por el Imperio, desde Roma hasta Alemania.

El método del soplado de vidrio, más rápido y más barato, se extendió desde Siria a Italia y a otras zonas del Imperio romano, reemplazó poco a poco a las antiguas técnicas y trajo consigo nuevos estilos. Mientras los primeros procesos de manufactura habían hecho hincapié en el color y el diseño, con la introducción del soplado fue la fragilidad y transparencia del material lo que adquirió importancia, y hacia finales del siglo I d.C. el vidrio incoloro suplantó al vidrio coloreado en la elaboración de los objetos más preciados. La técnica del soplado hizo posible la producción a gran escala y cambió la categoría del vidrio convirtiéndolo en un material de uso frecuente, tanto para cristalerías como para vasos, copas y todo tipo de recipientes.

Es evidente que la estructura del Imperio fomentó el extraordinario desarrollo de la industria del vidrio durante este periodo. La mayor parte de las técnicas decorativas conocidas fueron inventadas por los artesanos romanos. Los objetos de vidrio soplado se realizaban mediante moldes parciales o totales, que permitían formas tan novedosas como los frascos con forma de cabezas, que se producían en grandes cantidades. Una jarra de delicado diseño (siglo I d.C.) que se encuentra en el Museo del Vidrio de Corning (Nueva York) es un ejemplo perteneciente a un extraordinario grupo de objetos de vidrio soplado realizados con molde que llevan el nombre de sus fabricantes. Hay ejemplos de cristal romano con una elaborada decoración de hilos de vidrio y tallado. Los temas decorativos, pintados o sobreimpresos con pan de oro entre dos láminas de cristal blanco, recreaban escenas religiosas o históricas. Los antiguos artesanos vidrieros adaptaron las técnicas de corte, tallado o grabado en piedra al vidrio logrando piezas de considerable belleza. La técnica del cristal de camafeo consiste en unir dos estratos de vidrio de diferente color, tallando después la capa externa para que queden al descubierto partes de la capa interior y establecer una decoración en relieve que resalta por el contraste cromático. El vaso de cristal de camafeo más famoso es el jarrón Portland (siglo I d.C., Museo Británico, Londres), decorado con las figuras mitológicas de Peleo y Tetis. Delicados efectos se lograron en los *diatrete*, copas en las que se han extraído grandes porciones de la capa externa dejando un entramado decorativo que parece estar apenas sujeto a la capa interior que conforma el recipiente. La famosa

copa de Licurgo (siglo IV d.C., Museo Británico) constituye uno de los máximos exponentes de esta técnica.

En Occidente la fabricación de vidrio para uso doméstico se redujo mucho después de la caída del Imperio romano. Bajo la influencia de los francos, los vidrieros del norte de Europa y Gran Bretaña continuaron produciendo objetos utilitarios, algunos con formas nuevas y contundentes. La decoración se limitaba a los diseños simples mediante moldes, filigranas y adornos de gotas de vidrio aplicados a la superficie. Presentaban en general una coloración verdosa, resultado de la composición del vidrio hecho con carbonato sódico de plantas marinas traídas del Mediterráneo, como era costumbre desde la época de los romanos. Sin embargo, a finales de la edad media ya no se conseguía carbonato sódico, y los vidrieros del norte recurrieron a la ceniza de la madera de sus propios hornos, que utilizaron como fundente para obtener un vidrio de contenido potásico-cálcico. Dado que las industrias del vidrio estaban situadas en zonas de bosque, de donde obtenían el combustible y la ceniza, a este nuevo tipo de vidrio se le llamó *Waldglas* (del alemán, 'vidrio de bosque'). El vidrio común del tipo *Waldglas* continuó fabricándose en Europa hasta la era moderna.

Sin embargo, la protección de la Iglesia habría de impulsar la producción más importante en este material durante la edad media: los mosaicos de vidrio en la Europa mediterránea y las vidrieras en la zona del norte. Los mosaicos se hacían con cubitos de vidrio, o teselas, incrustados en cemento. Las teselas, que se cortaban de bloques sólidos de vidrio, podían ser muy elaboradas y presentar incrustaciones en plomo dorado y plateado. Sobre la producción de mosaicos de vidrio anterior al siglo XIV apenas existen datos.

Ya en documentos del siglo VI se hace referencia a la existencia de vidrieras en las iglesias, aunque los primeros ejemplos conservados datan del siglo XI. Las más apreciadas son las que se realizaron durante los siglos XIII y XIV, principalmente en Francia e Inglaterra. Se cree que las industrias del vidrio de Lorena y Normandía fueron las que produjeron la mayor parte de las vidrieras de las catedrales medievales. El vidrio se coloreaba o se laminaba con color y después se cortaba según las formas que requiriera el diseño. Los detalles se pintaban sobre el cristal con un esmalte parduzco. Las piezas se

encajaban en varillas de plomo y se colocaban en una estructura de hierro. El arte de la fabricación de vidrieras decayó a finales del renacimiento pero volvió a recuperarse en el siglo XIX.

Inspirados por el resurgimiento de los métodos antiguos de trabajo del vidrio y estimulados por los logros de la nueva tecnología química, los artesanos vidrieros comenzaron a crear hacia 1880 nuevos estilos artesanales que se denominaron vidrio artístico. Solían ser piezas nuevas con fines decorativos, producto de la reacción contra los objetos producidos en serie. Los estilos de moda entre 1890 y 1910 reflejaban la influencia del movimiento Art Nouveau a nivel internacional, y sus principales exponentes fueron Louis Comfort Tiffany en los Estados Unidos y Émile Gallé y la empresa Daum Frères (fundada en 1889) en Francia. Todos ellos producían cristales con formas naturalistas, líneas sinuosas, colores exóticos y superficies de inusitados efectos, como el cristal iridiscente *favrile* inventado por Tiffany.

Después de la 1ra Guerra Mundial surgieron nuevos intereses en las texturas y formas decorativas, como queda reflejado en los diseños de René Lalique y Maurice Marinot. En la década de 1930 comenzaron a adquirir prestigio los cristales de plomo incoloros y de exquisita transparencia, por lo general con dibujos grabados, producidos por fábricas escandinavas y estadounidenses.

Con la década de 1960 se inició una nueva época en la elaboración del vidrio liderada por los estadounidenses Harvey Littleton y Dominick Labino. Los artesanos empezaron a experimentar con el vidrio como medio artístico en pequeños hornos instalados en sus estudios, y en la actualidad se desarrollan técnicas decorativas y formas de escultura innovadoras en talleres de artistas de todo el mundo.

De acuerdo con la definición de Morey, "El vidrio es una sustancia inorgánica que se halla en un estado asimilable al líquido, del que es prolongación, pero que, como resultado de un cambio reversible experimentado durante el enfriamiento alcanza un grado tan alto de viscosidad que puede considerarse salido a todos los efectos." Es decir, a temperatura ambiente tienen apariencia de un sólido. La cohesión y rigidez mecánica deriva del extraordinario aumento de viscosidad de la masa fundida. Aun que desde el

punto de vista mecánico los vidrios se comportan como sólidos, no deben considerarse como tales, ya que poseen una estructura amorfa y, por tanto, carecen de la estructura cristalina que caracteriza y define al estado sólido.

*“En resumen, el vidrio puede definirse como un producto inorgánico fundido que se ha enfriado hasta un estado rígido”.*

El vidrio se formó naturalmente a partir de elementos comunes presentes en la corteza terrestre mucho antes de que nadie pensara siquiera experimentar con su composición, darle forma o apelar a las innumerables aplicaciones que tiene en la actualidad. La obsidiana, por ejemplo, es una combinación natural de óxidos fundidos por el intenso calor volcánico, y vitrificados (convertidos en vidrio) por enfriamiento rápido en contacto con el aire. Su color negro y opaco se debe al contenido relativamente elevado de óxido de hierro. Su resistencia química y su dureza se compara favorablemente con las de muchos vidrios comerciales.

La tecnología del vidrio a evolucionado a lo largo de 6,000 años y algunos principios modernos son de origen muy remoto. La fabricación de los primeros vidrios sintéticos se pierden en la antigüedad y en la leyenda. La *loza* la inventaron los egipcios, que moldeaban figurillas de arena ( $\text{SiO}_2$ ), el más conocido de los óxidos vitrificantes. Se cubría con natrón, el residuo formado por las inundaciones del Nilo, compuesto principalmente por carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), carbonato sódico ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), sal común ( $\text{NaCl}$ ) y óxido de cobre (II) ( $\text{CuO}$ ) que, calentando por debajo de  $1,000\text{ }^\circ\text{C}$ , forma una película vitrificada por difusión de los fundentes  $\text{CaO}$  y  $\text{Na}_2\text{O}$  y la reacción en estado sólido con la arena. El óxido de cobre daba a la pieza un atractivo color azul.

Hoy en día el vidrio se fabrica en todo el mundo. Muchos productos de vidrio se producen en líneas totalmente automatizadas. Aunque el vidrio es uno de los materiales mas antiguos, sus propiedades son únicas y todavía no han llegado a conocerse en su totalidad.

La actual industria del vidrio abarca varios e importantes segmentos del mercado, tales como vidrio plano, varilla doméstica y envases, vidrio óptico o de materiales de vidrio para uso científico. Los mercados del vidrio óptico y científico suelen estar muy regulados y en la mayoría de los países se hallan dominados por uno o dos proveedores. Todos ellos se han desarrollado durante años, gracias a innovaciones en la tecnología específica del vidrio o a avances en la fabricación.

La dificultad para encuadrar adecuadamente los cuerpos vítreos dentro de los tres estados de agregación de la materia dio lugar a que se pensara independizar a los vidrios integrándolos en un cuarto estado de agregación: *el estado vítreo*. Esta sugerencia nunca llegó sin embargo a encontrar una aceptación generalizada.

En la opinión de Morey (G. W. Morey), si se parte de un concepto de cuerpo sólido que prescindiera de la cristalinidad y se base exclusivamente en determinadas propiedades físicas, con límites previamente establecidos para cada estado, podría aplicarse a los vidrios el nombre de *sólidos amorfos*, con tal de que esta denominación se reserve para bajas temperaturas. La mayor objeción contra ella sugería si se intentara aplicarla también a las temperaturas en las que ellos se vuelven plásticos. Se ha comprobado que los vidrios presentan mayor grado de ordenación estructural (orden de corto enlace) que los cuerpos amorfos. Esta ordenación se limita a un pequeño entorno alrededor de cada uno de los iones que forman el retículo, a diferencia de la periodicidad de largo alcance que guarda la estructura de los sólidos cristalinos. Por eso, para establecer esta diferencia, se emplea también para los vidrios, con mayor adecuación que el anterior, el nombre de *sólidos no cristalinos*.

### **3.2 DESVITRIFICACION O CRISTALIZACION DEL VIDRIO**

La cristalización puede definirse, como el proceso en virtud del cual, a partir de una fase estructuralmente desordenada, se forma una fase sólida estable, con una ordenación geométrica regular.

Este proceso se produce como consecuencia de una disminución de la energía del sistema cuando un fundido se enfría por debajo de su temperatura de *liquidus*. Como las sustancias vítreas se encuentran congeladas en un estado de subenfriamiento con un contenido energético mayor que el que corresponde a su equilibrio termodinámico, pueden evolucionar, bajo condiciones favorables, hacia la formación de especies cristalinas estables. En tales casos la cristalización recibe el nombre particular de *desvitrificación*, ya que constituye un fenómeno que se opone a la propia naturaleza del vidrio.

Existen dos mecanismos principales que gobiernan el proceso de desvitrificación: la *nucleación* o formación de gérmenes cristalinos estables de la nueva fase en equilibrio con el fundido, y el *crecimiento de los cristales* o deposición ulterior de material sobre los núcleos primarios formados.

### **3.3 NUCLEACIÓN**

La nucleación puede ser de dos tipos diferentes:

#### **3.3.1 Nucleación homogénea**

La formación de gérmenes en un fundido por debajo de su temperatura de *liquidus* requiere la producción de una acumulación local de componentes y que se unan de acuerdo a un determinado agrupamiento cristalino. Estas condiciones pueden darse si, por efecto de fluctuaciones de composición y de temperatura coinciden, el suficiente número de moléculas, en un momento dado y en un cierto elemento de volumen. Al formarse la fase cristalina tiene lugar una variación de la energía libre del sistema, que viene dada por dos términos, uno negativo que corresponde a la energía de cristalización liberada por unidad de volumen al producirse la cristalización y otro de signo contrario, que representa el trabajo necesario para la creación de una nueva superficie.

Aunque al formarse una fase cristalina se produce una disminución de la energía libre que favorezca la estabilidad del germen, si el radio de éste es muy pequeño y, por lo tanto, su superficie muy grande con respecto a su volumen, predominará el término cor-

respondiente a la energía superficial. Entonces como el balance resulta positivo, la energía libre total del sistema aumenta y el núcleo no será estable.

Las condiciones de supervivencia sólo se dan cuando estadísticamente se produzca un agrupamiento molecular al azar suficientemente grande que permita la formación de un germen cuyo radio sea igual o superior al valor crítico que exige su estabilidad. A los gérmenes estables que llegan a ese tamaño se les denomina núcleos de cristalización.

### **3.3.2 Nucleación heterogénea**

Cuando en la fase fundida existen partículas extrañas a la fase nucleante, el trabajo de formación de núcleos experimenta una modificación apreciable. La existencia de superficies debidas a la presencia de impurezas, burbujas, o a las paredes del recinto en que se halle contenido el fundido, reducen la energía interfacial y, por lo tanto, el valor de la variación de energía libre con respecto al de un proceso de nucleación homogénea.

### **3.3.3 CRECIMIENTO DE LOS CRISTALES**

Los núcleos de tamaño crítico, formados en el vidrio, pueden continuar creciendo por sucesiva deposición de material sobre ellos hasta formar cristales propiamente dichos.

Este proceso de crecimiento depende,

en mucha mayor medida que la nucleación, de las posibilidades de transporte de los constituyentes químicos hasta el cristal de desarrollo.

La velocidad de crecimiento de los cristales presenta, lo mismo que la de la nucleación, un máximo en su variación en función de la temperatura.

A temperaturas elevadas el crecimiento es pequeño, como consecuencia de la dificultad para disipar del sistema el calor de cristalización liberado, y a temperaturas bajas, que favorecerían esta liberación, su crecimiento se ve frenado por el continuo y rápido aumento de la viscosidad del vidrio que dificulta la difusión de los elementos constituyentes del cristal.

*Esquema del programa térmico para la obtención de materiales Vitro cristalinos*



### **3.4 MÉTODOS INDUSTRIALES DE FABRICACIÓN**

#### **3.4.1 MÉTODOS DE FABRICACIÓN**

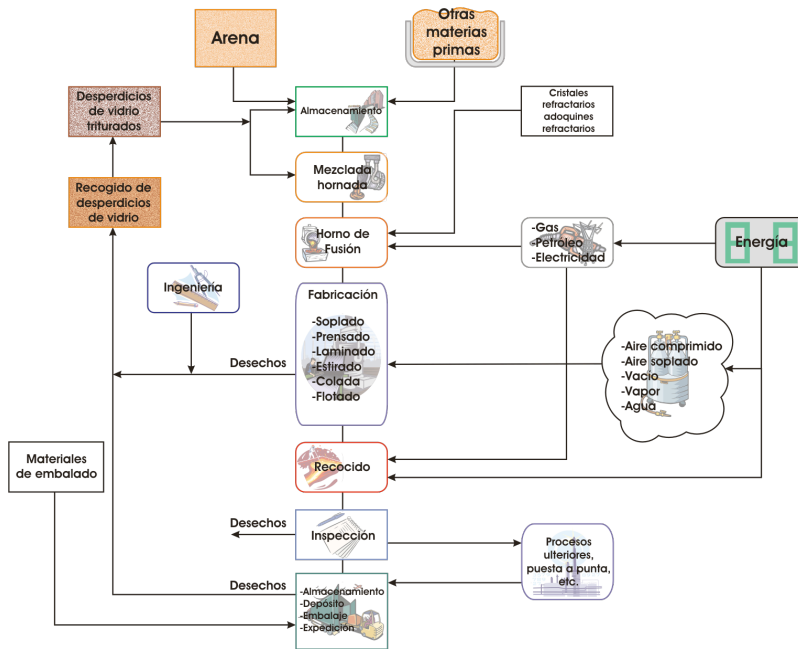
El vidrio es un producto inorgánico de fusión, enfriado hasta que alcanza un estado sólido no cristalino. Las características del vidrio son dureza, fragilidad y fractura concoidea. Se fabrica vidrio coloreado, translúcido u opaco variando los materiales disueltos amorfos o cristalinos que lo forman.

Cuando el vidrio se enfría desde el estado de fusión, la viscosidad incrementa gradualmente sin cristalizar en amplio intervalo de temperatura hasta que adopta su característica dureza y su forma frágil. El enfriamiento se controla para evitar la cristalización o deformación elástica. Aunque cualquier compuesto que presente estas propiedades físicas es teóricamente un vidrio, la mayoría de los vidrios comerciales se dividen en tres tipos principales y presentan una amplia diversidad de composiciones químicas.

- 1. Vidrios de silice-cal-sosa;** son los mas importantes en términos de cantidad producida y variedad de uso, pues comprenden casi todos los vidrios planos, envases, vajilla económica producida en masa y bombillas eléctricas.
- 2. Vidrios de silice-potasa-plomo;** contiene una proporción variable, pero normalmente alta, de óxido de plomo. En el material óptico se valora su elevado índice de refracción, la cristalería decorativa y doméstica soplada a boca, su facilidad de corte y pulido: en las aplicaciones eléctricas y electrónicas, su elevada resistividad eléctrica y la protección frente a las radiaciones.
- 3. Vidrios de borosilicato;** su baja dilatación térmica los hace resistentes al choque térmico y por ello son ideales para hornos domésticos, material de vidrio de laboratorio y producción de fibra de vidrio para reforzar plásticos.

Una mezcla vitrificable comercial se compone de diversos ingredientes. Sin embargo, la mayor parte la conforman de 4 a 6 ingredientes, escogidos entre caliza, arena, dolomita, carbonato sódico, bórax, ácido bórico, feldespatos y compuestos de bario y plomo. El resto de la mezcla se compone de aditivos elegidos entre un grupo de 15 a 20 materiales comúnmente denominados ingredientes menores. Estos últimos se añaden durante

el proceso de preparación del vidrio para aportar alguna función o cualidad específica, como el color.



Procesos y materiales que intervienen en la fabricación de vidrio.

### 3.4.2 PROCESO CERÁMICO APLICADO AL RECICLADO DE RESIDUOS INDUSTRIALES.

De un tiempo a la fecha, la conservación del medio ambiente es un problema que ha venido interesando a nuevas generaciones de científicos, por lo que se han multiplicado de forma considerable las investigaciones sobre el desarrollo de nuevas tecnologías que resuelvan este problema. No sólo buscando alternativas para disminuir la producción de residuos, que sean menos contaminantes y que permitan su reciclado o reutilización.

Durante el proceso de fabricación de la cerámica se generan, en las diversas etapas, una serie de residuos de diversa índole. Esta sería la vertiente negativa de la industria cerámica. No obstante, esta industria se halla especialmente dotada para absorber sus propios residuos. Además, la industria cerámica es un excelente medio para valorizar los residuos procedentes de otras muchas industrias.

En ingeniería civil se definen una serie de materiales que se destinan a las grandes obras civiles. Las rocas, y las arcillas entre ellas, son los suelos primarios y conviene

conocer la caracterización de los óxidos que integran los diversos silicatos de los que están compuestas las rocas. Numerosos estudios sobre composiciones químicas de rocas ígneas y sedimentarias han concluido que los resultados de los análisis promedios de unas y otras no difieren mucho.

Esto era de esperar puesto que las rocas sedimentarias proceden de aquellas que después de largos procesos de erosión, transporte y deposición han originado las rocas sedimentarias. A grandes rasgos en el proceso de transformación han tenido lugar dos fenómenos relevantes. Los óxidos alcalinos, solubles, son menores en las rocas sedimentarias. El otro fenómeno tiene relación más directa con el medio ambiente puesto que guarda relación con la proporción de elementos, la mayor parte de ellos metales pesados, que el mecanismo de transformación ha ido adicionando a la composición de las rocas.

### **3.4.3 RESIDUOS GENERADOS EN LA INDUSTRIA CERÁMICA**

La caracterización de los residuos procedentes de la industria cerámica depende tanto de las materias primas usadas como de la tecnología de fabricación empleada.

Siguiendo la terminología utilizada en la industria cerámica, la clasificación genérica de los residuos puede establecerse de acuerdo con:

*RESIDUOS CRUDOS:* Son todos aquellos que se generan en las etapas previas a la cocción. La caracterización de estos residuos es la misma que las materias primas.

Los residuos más conflictivos son los procedentes de la depuración de las aguas de lavado de las cadenas de esmaltado. Estos residuos están constituidos por restos de esmaltes de composición química similar a un esmalte. Considerando una media de 1 kg. de esmalte seco por m<sup>2</sup> de pavimento y evaluando unas pérdidas de un 11% se comprende que la cantidad es importante. Con ciertas restricciones se puede incorporar a la pasta.

**RESIDUOS COCIDOS:** Se trata de los materiales ya cocidos desechados por no pasar los controles de calidad o por simples roturas. Estos materiales son, en su inmensa mayoría, inertes y no presentan ningún problema para su tratamiento.

La propia naturaleza de material inerte lo convierte en un buen candidato para su uso en la propia cerámica, como desgrasante.

Las ventajas de esta tecnología frente a las típicas encapsulaciones se pueden resumir en:

- La fracción orgánica presente en los lodos se transforma en gas que, a su vez, se convierte en poros cerrados que da lugar a una cerámica más ligera y con propiedades de aislante térmico.
- La parte inorgánica, en especial la componente mas tóxica: los metales pesados, se integra en la fase amorfa de la matriz cerámica donde no tendrá ninguna posibilidad de lixiviar.
- La interacción química del metal pesado con la matriz cerámica es mas segura, potente y conocida que la interacción con la matriz de cemento. Por lo que hace referencia a la cerámica sólo hay que pensar en la larga experiencia en emplear pigmentos y colorantes para teñir pastas cerámicas o colorear esmaltes.
- Se lleva a cabo una reutilización total de los residuos, siguiendo así las pautas marcadas por la autoridad ambiental sobre gestión de residuos. Y de paso, se abaratan los costos de gestión de los residuos.
- El inertizado cerámico de los metales tóxicos en el interior de las matrices cerámicas es siempre seguro. Además el ladrillo suele introducirse en las construcciones con barreras de cemento que preservan el material de posibles lixiviaciones.

La inertización de un residuo en el seno de una matriz cerámica se llama valorización. Desde la óptica legislativa lo define como reciclaje. En este sentido la industria cerámica puede actuar como gestor de residuos en diferentes ámbitos industriales. Por lo que hace referencia a los propios residuos, las posibilidades son:

- Reutilización de lodos de depuración de aguas en la pasta atomizada.
- Las aguas depuradas se reciclan. Se añaden al agua de los molinos. Esta agua tiene boro y, por su procedencia floclantes. Por tanto deberán adicionarse con medida y teniendo en cuenta que precisarán una cantidad mayor de defloculante.

#### **3.4.4 CONCEPTO DE INERTIZACIÓN**

Con frecuencia la palabra inertización se usa como sinónimo de paso previo que debe efectuarse sobre los residuos para depositarlos en un vertedero. Es obvio que aquí no es este el significado sino más bien el contrario. Inertización sería la acción llevada a cabo por el propio proceso cerámico sobre la toxicidad de los residuos, en el sentido de que elimina o reduce la carga contaminante hasta valores compatibles con su uso convencional en forma de material de construcción.

La palabra inertización se usa en sentido amplio para designar aquellos procesos que permiten depositar los residuos peligrosos producidos en la industria cerámica, básicamente los lodos procedentes de la depuradora de aguas residuales (lavado de líneas de esmalte), de manera segura.

En muchos vertederos no se aceptan residuos con una humedad superior al 65%. Sucede que, incluso con humedades inferiores, estos lodos proporcionan inestabilidad mecánica al vertedero.

Para proporcionar un estado semi/sólido al lodo se emplean las técnicas de solidificación/estabilización (SE). La estabilización es el proceso que utiliza aditivos para reducir la naturaleza peligrosa de un residuo, transformando el residuo y sus constituyentes peligrosos en un bloque, sus objetivos son minimizar la velocidad de migración de los contaminantes al medio ambiente y reducir el nivel de toxicidad. La estabilización se realiza, como ya se ha comentado, a través de la adición de reactivos que mejoran la manipulación y las características físicas del residuo, disminuyen la superficie específica del residuo a través de la cual puede tener lugar la transferencia o liberación de contaminantes, limitan la solubilidad de cualquier contaminante presente en el residuo y

por último reduce la toxicidad de los contaminantes. El término solidificación no es sinónimo de estabilización aunque sus objetivos son los mismos que se han mencionado anteriormente, la solidificación se describe como el proceso en el que se añade una cantidad suficiente de material solidificante, incluidos sólidos, a los residuos peligrosos para obtener una masa solidificada.

Sin embargo hay que ser conscientes que la mejor solución, para una verdadera inertización, nace de la propia industria cerámica, en cuanto a que el confinamiento de este tipo de residuos en el seno de una matriz cerámica cumple todos los requisitos exigidos por la legislación más rigurosa.

La solidificación también se llama litosíntesis, esta rama de la geología estudia la transformación de una masa uniforme en un sólido, que confinado en barreras geológicas adecuadas, evita el retorno de los componentes tóxicos a la biosfera.

En un sentido más amplio la litosíntesis consiste en la adición de un residuo a una pasta cerámica para inertizar su carga contaminante, para que los elementos tóxicos queden químicamente inmovilizados y no puedan volver al medio al interaccionar el residuo sobretodo con el agua ya sea de lluvia o de cauces naturales.

En la terminología ambiental a este tipo de tratamientos se los denominan físico/químicos. Existen muchísimas técnicas de solidificación de residuos, pero las más usuales son:

- *Técnicas basadas en el cemento:* El residuo se mezcla con cemento portland y/o cenizas volantes procedentes de centrales termoeléctricas. La estabilización con cemento se adapta mejor a residuos inorgánicos especialmente los que contienen metales pesados. Como resultado del elevado pH del cemento (>11), los metales son retenidos como hidróxidos o carbonatos en la estructura solidificada.

La estabilización con cemento muestra un futuro prometedor y una importante utilización en la fijación de residuos inorgánicos ya que la tecnología del cemento es bien conocida incluyendo su manipulación, mezcla, fraguado y endurecimiento. Por otro

lado, la eliminación excesiva de agua de los lodos no es necesaria, ya que se necesita agua para la hidratación del cemento. El principal inconveniente se debe a que algunas arcillas, sales o metales alteran el fraguado y pueden dar al traste con la inertización.

- *Técnicas basadas en la cal:* Los residuos se mezclan con cal (óxido, o más frecuentemente hidróxido de cal) y, a veces sustancias a base de silicio. Con el tiempo, gracias al CO<sub>2</sub> atmosférico, la cal se carbonata y rigidiza. La cal también puede añadirse para subir el pH de lodos ácidos. La estabilización con cal está indicada para contaminantes inorgánicos y se utiliza ampliamente para lodos metálicos.

Estos dos sistemas, o bien una mezcla de ambos, son los que regularmente se usan en las llamadas plantas de tratamiento físico-químico para la estabilización y solidificación de los residuos antes de su vertido.

- *Técnicas basadas en las puzolanas:* Las puzolanas son un material que reacciona con la cal en presencia de agua para producir un material de cementación. Entre los materiales puzolánicos se encuentran las cenizas volantes, las escorias de incineración y polvo de los hornos de cemento. La puzolana que se utiliza más comúnmente tiene una composición característica de 45% SiO<sub>2</sub>, 25% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 15% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 10% CaO, 1% MgO, 1% K<sub>2</sub>O, 1% Na<sub>2</sub>O y 1% SO<sub>3</sub>.
- *Técnicas basadas en mezclas bituminosas (termoplásticos):* Los residuos se mezclan con materiales termoplásticos. Entre los materiales más utilizados se encuentran el asfalto, parafina, betún, polietileno, polipropileno y azufre. El tratamiento debe hacerse a temperatura superior a 100 °C, lo cual puede provocar la emisión de algún residuo. Esta técnica se ha empleado mayoritariamente para el tratamiento de residuos radiactivos de baja y media actividad debido a su costo.

- *Técnicas de polimerización:* Los residuos peligrosos pueden estabilizarse mediante un proceso de polimerización que implica la mezcla de un monómero, generalmente urea formaldehído, con el residuo para formar el material polimérico.
- *Técnicas de encapsulación:* El sistema más usado es la mezcla del residuo con polibutadieno seguido de una fina capa de polietileno.

Estas tres últimas técnicas no parece que tengan futuro para el tratamiento de los residuos cerámicos.

### **3.4.5 ENCAPSULACIÓN O CERAMIZACIÓN**

Todas las reacciones en estado sólido, como las cerámicas, presentan una cinética de reacción extremadamente lenta. El factor capaz de acelerar el proceso es el tamaño de grano. Cuando más fino sea el grano mayor superficie específica y mayor facilidad de reacción. Esto es lo que sucede con los lodos procedentes de la industria cerámica. Si además estos lodos contienen fritas, las posibilidades de éxito son mayores. Por el contrario un grano de tamaño suficientemente grande queda sin reaccionar.

Cuando el objetivo perseguido es inertizar un residuo por causa de su toxicidad es preciso someterlo a una trituración fina. En este caso el residuo funde parcialmente y se integra en la matriz cerámica. Si el tamaño de grano es grosero, la partícula de residuo no interacciona con la matriz cerámica y queda, simplemente, encapsulado.

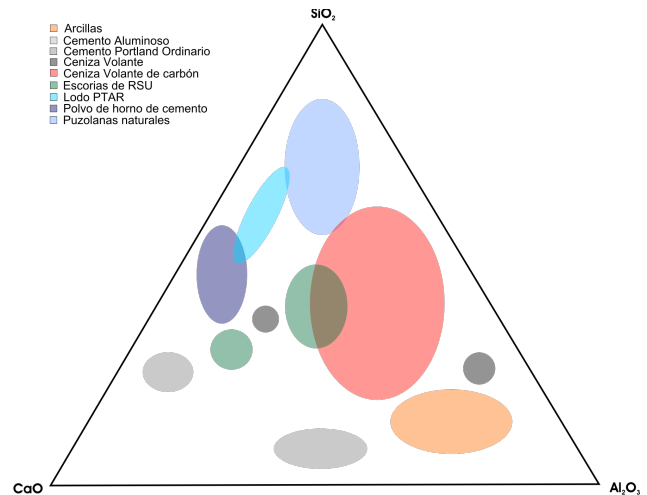
En esta tesitura si sufre un impacto mecánico fuerte o es atacado por un agente químico potente, se rompe el velo de protección y la carga contaminante es liberada al exterior.

Establecer la frontera donde el residuo se incorpora en la cerámica o queda encapsulado depende de otros factores, además de la distribución granulométrica, como, por ejemplo la facilidad de reacción de la arcilla y el propio residuo. Una frontera prudente sería un tamaño de 500  $\mu\text{m}$  (0,5 mm.). Por encima de este tamaño el residuo queda encapsulado y por debajo se integra en la matriz cerámica.

### 3.4.6 INERTIZACIÓN Y RECICLADO

Teniendo en cuenta que el proceso cerámico es, ante todo, una concatenación de reacciones de carácter físico y químico que engloba a todos los componentes en una matriz de manera sólida, es obvio que se use esta técnica para inertizar residuos a la vez que se valorizan.

El diagrama triangular de la figura reproduce la caracterización de una serie de residuos de naturaleza inorgánica en la simbología



usada por la industria cerámica, en el mismo se destacan: los óxidos formadores de vidrio (SiO<sub>2</sub>), los óxidos fundentes (alcalinos y alcalinotérreos) y los óxidos co-formadores de retículo (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

### 3.4.7 TRANSFERENCIA DE CALOR POR EL INTERIOR DE LAS MASAS CERÁMICAS

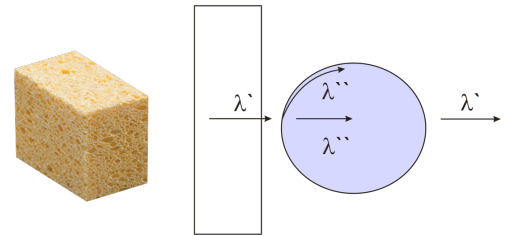
El calor se presenta como una transferencia de energía entre materiales, como consecuencia de una diferencia de temperaturas. Si no existiera ningún impedimento a este flujo al cabo de un cierto tiempo los materiales igualarían su temperatura y cesaría así el flujo de energía.

El aislamiento térmico en la construcción persigue dificultar esta transferencia de energía entre el exterior y el interior de un habitáculo. De esta forma se pretende independizar en lo posible la temperatura interior de la exterior. La transmisión de calor se desglosa, a efectos de análisis, en tres componentes:

- **Conducción:** Es el método de transmisión de calor por excelencia sobre un soporte sólido. El calor se manifiesta como energía de rotación y vibración de las moléculas. Esta excitación se propaga molécula a molécula a través de la fase sólida.
- **Convección:** A diferencia de los sólidos, en los fluidos las moléculas no están fuertemente unidas entre sí. La excitación se traduce en un incremento de la cantidad de movimiento de las mismas.

- **Radiación:** Toda materia a temperatura diferente al cero absoluto emite y absorbe energía en forma de ondas electromagnéticas. Es el único mecanismo que permite propagar la energía a través del vacío.

Los materiales aislantes obtenidos a partir de la ceramización de residuos son obviamente sólidos. Ello podría inducir a pensar que la conducción es el único mecanismo por el que se transmite el calor a través de ellos. Debido a la naturaleza de los materiales esto no es exactamente así, si no que también actúan los otros dos mecanismos.



La porosidad cerrada es la causa de un aumento en la capacidad de aislamiento térmico de los materiales.

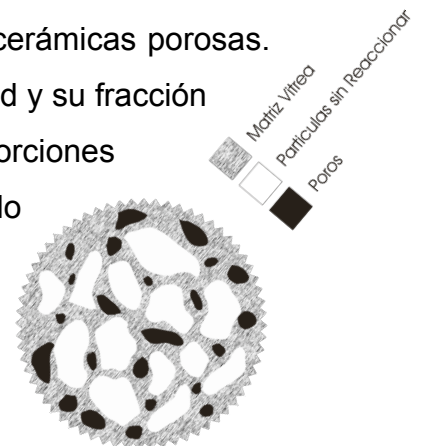
Como indica la figura el calor se transmite por conducción  $\lambda'$  pero cuando llega al borde del poro el flujo se interrumpe. Ahora debe calentar un gas ocluido en el poro. Cuando este se caliente comenzará una convección natural  $\lambda''$  que transferirá el calor hasta el otro extremo del poro. Esta modalidad es menos eficaz que la anterior forma de transmisión de calor. De hecho, a temperatura ambiente, cuanto mayor sea el diámetro del poro, tanto peor será la transmisión de calor, o lo que es lo mismo: tanto más aislante será.

### 3.4.8 ECOBRICK®. LADRILLO AISLANTE FABRICADO CON LODO DE PTAR

El lodo de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) urbanas es uno de los mejores ejemplos de aplicación para la fabricación de matrices cerámicas porosas.

El lodo de PTAR contiene por término medio un 70 % de humedad y su fracción seca esta compuesta por materia orgánica e inorgánica en proporciones que dependen del proceso de tratamiento a que haya sido sometido.

Si el tratamiento de las aguas urbanas se realiza simultáneamente con industriales, práctica muy común en las zonas muy industrializadas, los lodos contienen también metales pesados.



El uso directo del lodo en la industria cerámica presenta ciertos problemas técnicos, por eso el Ecobrick® (proceso protegido por una patente internacional) mezcla el lodo con residuo forestal este absorbe parte de la humedad y hace posible que la mezcla sea menos plástica de manera que la amalgama se puede mezclar directamente con la arcilla.

Durante la cocción los compuestos orgánicos del lodo: celulosa, lignina, grasas, microorganismos patógenos, etc. se destruyen y en su lugar se crean unos poros cerrados que darán lugar a sus propiedades térmicas. Los componentes inorgánicos: arcillas, tierras, metales pesados, etc., quedan insertados en la matriz vítrea del cuerpo cerámico y, por tanto, inertizados.

El proceso también se puede llevar a cabo a partir de lodo deshidratado como el que resulta de la instalación de un secado térmico. Como es obvio esta tecnología es extensible a todo un sinfín de residuos de características similares. Si su composición es mayoritariamente orgánica dará lugar a materiales porosos. Si el lodo es inorgánico el resultado será un material de propiedades similares a la propia arcilla.

Este tipo de valorizaciones, al menos en cantidades importantes, es aconsejable encaminarlas hacia la industria ladrillera.

### **3.4.9 PROPIEDADES DE LA MICROESTRUCTURA CERÁMICA**

Las propiedades fisicoquímicas de un material cerámico están determinadas, básicamente, por su composición mineralógica. Esto es la naturaleza de los cristales formados y los remanentes, su desarrollo y confinamiento en la fase amorfa o los puentes de unión entre ellos. Pero también de la calidad de la fase amorfa y, obviamente, de la cantidad, tamaño y distribución de la porosidad. En definitiva de la microestructura.

#### *Propiedades mecánicas:*

Las características mecánicas de un material cerámico dependen de:

- Caracterización de las materias primas
- Distribución granulométrica de los componentes que integran la mezcla.

- Superficie específica.
- Condiciones de conformado.
- Curva y temperatura máxima de cocción.

*Conductividad hidráulica:*

La conductividad hidráulica, a veces llamada permeabilidad, es la capacidad de un material para conducir o descargar agua en respuesta a un gradiente hidráulico aplicado. Esta propiedad sirve para indicar la facilidad con la que el agua atraviesa el material. La conductividad hidráulica se utiliza para obtener información sobre la velocidad a la que los contaminantes químicos presentes en el material migran al medio.

Algunos de los factores que afectan a la conductividad hidráulica de un material son la densidad, el grado de saturación, la temperatura, el tipo de fluido presente y la granulometría.

*Resistencia a los agentes químicos:*

Los materiales cerámicos son altamente resistentes a la agresión de los agentes atmosféricos como la lluvia ácida y la contaminación atmosférica. La única excepción la constituye el ácido fluorhídrico.

La resistencia a los agentes químicos se debe esencialmente a que la difusión de los átomos (agresores) a temperatura ambiente es extremadamente lenta. La durabilidad de los materiales cerámicos es muy elevada, del orden de siglos como lo demuestra nuestro patrimonio artístico-histórico.

*Retención de metales pesados:*

La capacidad de retención, por incorporación a la matriz cerámica, de los metales pesados es una función de:

- La naturaleza de la fase vítrea formada en la cocción cerámica.
- La temperatura de volatilización de los metales y sus óxidos.

En circunstancias normales y debido a la gran presencia de aire y temperatura que reinan en el interior de los hornos cerámicos, la mayor parte de los metales pesados aportados por los residuos se encuentran en forma de óxido, lo que favorece su incorporación a la matriz cerámica. El ejemplo más representativo es la hematita (óxido de hierro) presente en la mayoría de arcillas que una vez cocida, entra a formar parte de la fase amorfa y tiñe la cerámica del color rojo característico de los materiales estructurales.

De hecho durante la destrucción del retículo cristalino de los minerales de arcilla, estos se tornan muy reactivos y, en parte, funden y se inicia la producción de fase líquida. Los enlaces de las macromoléculas se rompen y los metales, u óxidos, pueden ser insertados fácilmente. Otro parámetro a tener en cuenta es el tamaño de grano del mineral de arcilla. Cuanto mayor sea la superficie específica del material tanto mayor será la formación de fase líquida y más rápidamente se atraparán los metales.

### **3.4.10 RECICLADO DE RESIDUOS VÍA VITRIFICACIÓN**

En los últimos años se ha destacado a la vitrificación como la tecnología más segura para la inertización de residuos tóxicos y peligrosos. Curiosamente el camino del acceso de la vitrificación al campo de los residuos no ha sido la cerámica sino la industria aeronáutica. Esta ha tenido que desarrollar sofisticados sistemas de aplicación de metales refractarios por plasma y ha creído que la técnica es extrapolable al campo del tratamiento de residuos. A ello ha ayudado mucho la legislación sobre residuos peligrosos de determinados países que obligan a la vitrificación.

Como bien conoce el ceramista la inserción de un conjunto de metales pesados en una matriz vítrea no es mas que el fundamento de la vitrificación. La técnica en los últimos tiempos se aplica al tratamiento de residuos radiactivos y a la inertización de determinados residuos altamente tóxicos.

Ambientalmente la vitrificación aplicada al tratamiento de residuos tiene dos grandes apartados: la vitrificación para inertización, como sería el caso de la vitrificación "in situ" de terrenos contaminados y la vitrificación para inertizar y reciclar.

En su gran mayoría las sustancias en general, y los residuos en particular, tienen una estructura cristalina. En ésta las celdillas elementales se disponen con una ordenación geométrica en el espacio formando una red perfectamente definida. En el proceso de fusión, primera etapa para la obtención de un vidrio, a medida que la temperatura va en aumento, el calor distorsiona la red hasta transformarla en una estructura reticulada al azar (estructura amorfa).

La posibilidad de incorporar residuos inorgánicos altamente tóxicos a su red convierte a esta tecnología en la más segura para el tratamiento de ciertos residuos.



# Material es | 4

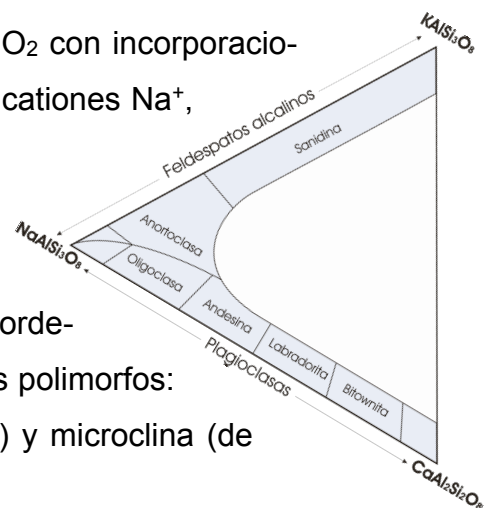
## 4.1 COMPOSICION DEL VIDRIO PRECURSOR

### 4.1.1 FELDESPATOS

Se clasifican en función de los tres términos extremos: feldespato potasico ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ), albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) y anortita ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ).

Están formados por una red tetraédrica de grupos  $\text{SiO}_2$  con incorporaciones de Al y presencia, en los huecos disponibles, de cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  o  $\text{Ca}^{2+}$  de manera a neutralizar las cargas.

Generalmente los feldespatos se originan a alta temperatura con estructuras mas desordenadas pasando por enfriamiento, a un estado de mas ordenamiento de menor temperatura. Tal es el caso de los polimorfos: sanidina (de alta temperatura), ortoclasa (intermedia) y microclina (de baja temperatura).

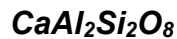


Los feldespatos suelen presentar una buena exfoliación en dos direcciones formando ángulos de 90°. La dureza de los minerales de este grupo es aproximadamente 6 y su peso específico varia entre 2.55 y 2.76 con excepción de los feldespatos de bario, mas pesados.

Los minerales de este grupo responden a la formula general  $XZ_4O_8$ , donde **X** puede ser: Ba, Ca, K, Na, NH<sub>4</sub> o Sr; y **Z**: Al, B o Si.

#### 4.1.1.a ANORTITA

- *Fórmula química:*



- *Clase:*

Silicatos

- *Subclase:*

Tectosilicatos

- *Grupo:*

Feldespatos

- *Subgrupo:*

Plagioclasas

- *Etimología:*

Deriva de la palabra griega "anortos" que quiere decir oblicuo, aludiendo al ángulo oblicuo entre los planos de exfoliación.

#### CRISTALOGRAFIA:

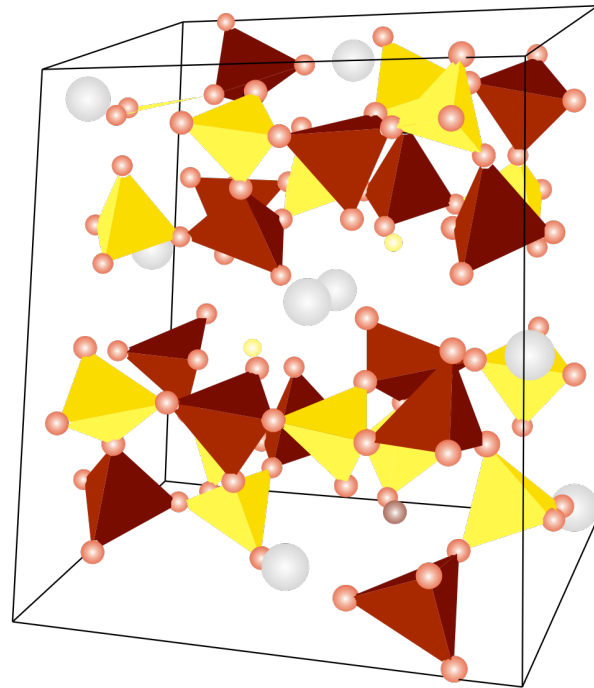
- *Sistema y clase:*

Triclínico I.

- *Grupo espacial:*

I o P1

a = 8.18 Å, b = 12.88 Å, c = 14.17 Å;



$$\alpha = 93^{\circ}10', \beta = 115^{\circ}51', \gamma = 91^{\circ}13', Z = 8.$$

- *Líneas de DRX(intensidades) d's:*

$$4.03(7) - 3.74(5) - 3.61(6) - 3.20(10) - 3.16(7).$$

- *Radio:*

$$a : b : c = 0.635 : 1 : 1.1$$

### **PROPIEDADES FISICAS:**

- *Color:*

Incoloro, blanco, gris, más raramente verdoso, amarillento y rojo carne.

- *Raya:*

Incolora.

- *Brillo:*

Reluciente.

- *Dureza:*

6 a 6.5

- *Densidad:*

2.76 g/cm<sup>3</sup>

- *Óptica:*

La diferenciación óptica de los términos de la serie albita - anortita es complicada óptimamente. Índices de refracción bajos, birrefringencia media, ángulo de los ejes ópticos grande.

- *Birrefringencia:*

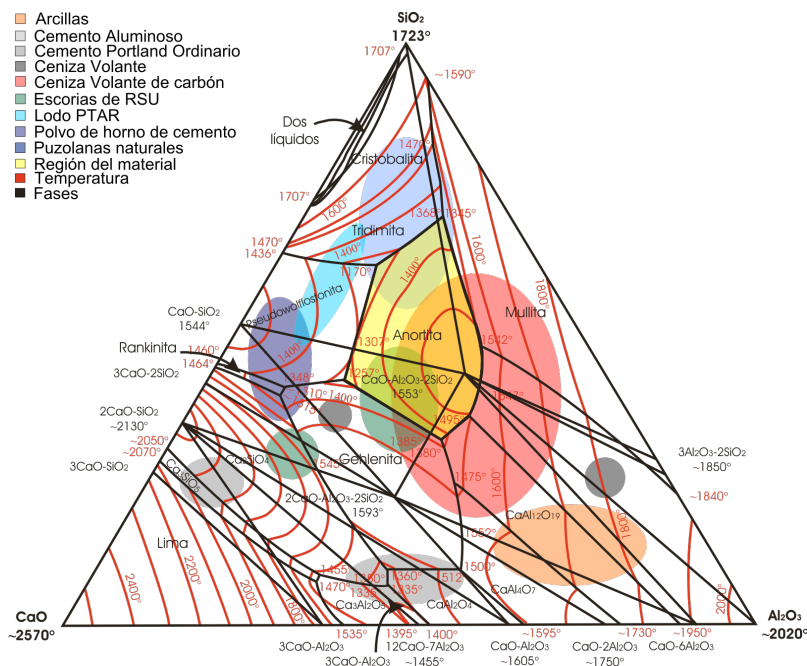
$$\delta=0.011-0.012$$



LA CARTA DEMUESTRA LA GAMA DEL COLOR DE LA BIRREFRINGENCIA Y NO CONSIDERA LA COLORACIÓN MINERAL

- *Química:*

Según los contenidos de Ca y Na se define una serie albita - oligoclasa - andesita - labradorita - bytownita - anortita, de más sódico a más cálcico, cuyo término genérico es el de plagioclasas. Es frecuente la mezcla entre albita y anortita llamada pertitización.



## 4.2 MATERIAS PRIMAS

### 4.2.1 COMPOSICION MINERALOGICA

Los lodos rojos constituyen un residuo muy abundante procedentes de la fabricación de la alúmina ( $Al_2O_3$ ) materia prima básica para la obtención del aluminio. El proceso genera del orden de 0,7 Kg. de lodo por Kg. de bauxita.

El método Bayer parte de las bauxitas hasta conseguir el hidróxido de aluminio, que por calcinación se obtendrá la alúmina y de ésta el aluminio. Pese a ser uno de los procesos industriales que más afectan al medio, puesto que además de los lodos rojos se generan una gran cantidad de residuos, no se ha desarrollado un proceso alternativo.

La producción de lodos rojos es tan importante que, con frecuencia, se organizan congresos internacionales para debatir dicho problema. El análisis químico de los lodos rojos indica que presentan una composición próxima a las arcillas, si bien las cantidades

de óxidos de hierro y aluminio son muy altas, ello indica que se trata de una sustancia refractaria. En términos de aplicación de la tecnología cerámica a la inertización de residuos, la presencia de una sustancia refractaria suele ser un problema. Los materiales refractarios contienen poca fase amorfa y esto conlleva que, a esta temperatura, se genere poco líquido capaz de integrar a los residuos.

Por otra parte el término refractario es sinónimo de mayor temperatura. En efecto, una arcilla vulgar se distingue de una refractaria en que su temperatura de proceso, o de ceramización, se sitúa algunos centenares de grados por encima. Cuando el material a inertizar contiene, por ejemplo metales pesados, estos pueden volatilizar parcialmente ya que a las temperaturas de volatilización la formación de líquido en el seno de la cerámica refractaria es, todavía, incipiente.

Un análisis típico de los lodos rojos sería:

SiO <sub>2</sub>	17 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33 %
CaO	2 %
Na <sub>2</sub> O	6 %
TiO <sub>2</sub>	8 %
P.F	8 %

Se han llevado a cabo numerosas pruebas industriales de fabricación de materiales a partir de lodos rojos, casi todos ellos con notable éxito.

#### **4.2.2 COMPOSICION QUIMICA**

La composición en porcentaje en peso previa de nuestro lodo rojo fue:

SiO <sub>2</sub>	7.79 %	MgO	0.57 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.04 %	Na <sub>2</sub> O	3.17 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	47.34 %	K <sub>2</sub> O	0.07 %

CaO	11.64 %	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.23 %
TiO <sub>2</sub>	5.12 %	P.F	9.77 %

Estos resultados muestran que la cantidad de óxido de aluminio disminuye (tomando en cuenta la composición típica de los lodos rojos) en un 8.96%, de igual forma, el óxido de silicio desciende en 9.21%, la cual favorece una estructura cristalina rica en hierro (del tipo Espinela). De la misma manera en nuestra muestra de lodo rojo existe una cantidad mayoritaria de óxido formador de red (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) que en condiciones apropiadas pueden también adoptar estructuras tetraédricas. Esta situación dificulta la inserción del catión aluminio en la red debido a la mayor proporción de hierro y menor diversificación en los óxidos que lo acompañan.

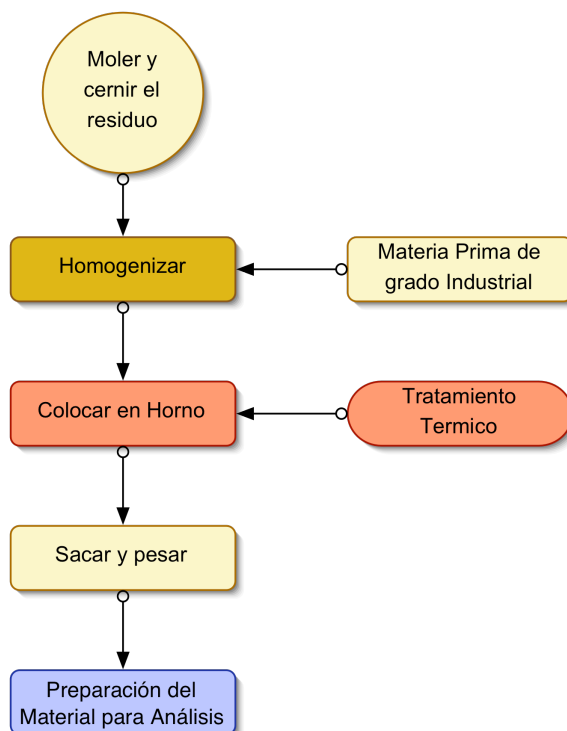
#### **4.3 FORMULACION DEL VIDRIO PRECURSOR**

Basándonos en el diagrama de fases del sistema CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> se tomaron tres formulaciones para la síntesis de la Anortita; la primera de ellas lleva el nombre de AVC-1, compuesta de un 18.12% en peso de óxido de calcio, 33.02% en peso de óxido de aluminio y 38.84% en peso de óxido de silicio. En esta formulación existirán dos distintas fases cristalinas predominantes: 1) Anortita (CaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) pretendiendo tenga un rendimiento de 63.53% en peso. 2) Hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) con un 32.82% en peso, esto, basándonos en un calculo de rendimiento teórico para ambas, a una temperatura optima de tratamiento térmico de 1400 °C.

La composición que se plantea para nuestro segundo material a sintetizar nombrado AVC-2 es de un 16.11% en peso de óxido de calcio, 29.35% en peso de óxido de aluminio y un 34.53% en peso de óxido de silicio. Si se realiza el calculo de rendimiento teórico para estas dos fases cristalinas, tenemos en primer lugar Anortita con un rendimiento teórico de 50.82%, y Hematita un 29.17%, el resto es fase amorfa cuya composición no es definida.

Por ultimo la composición que se planteo para el material AVC-3 es de un 10.07% en peso de óxido de calcio, 18.34% en peso de óxido de aluminio y un 21.58% en peso de óxido de silicio. Al igual que los anteriores se presentaran dos fases cristalinas: 1) Anortita con un rendimiento teórico de 31.76%; el 18.23% de la fase cristalina será de Hematita y el resto una fase amorfa de composición no definida.

#### 4.4 ELABORACION DE MATERIALES



A continuación se describe el proceso de elaboración de la serie de materiales a sintetizar mediante el siguiente diagrama:

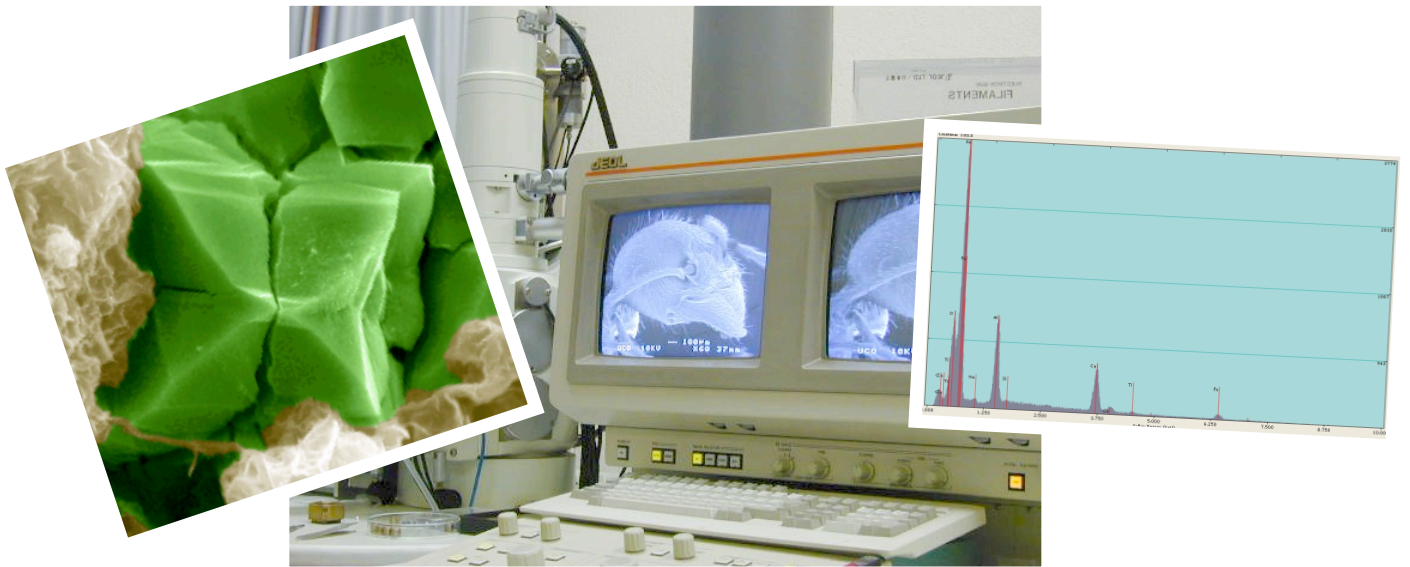
Para la elaboración de nuestros materiales de estudio, primero se realizó una molienda de las materias primas en un mortero, para dar así un grano homogéneo, ya que basándonos en la química del estado sólido el tamaño de partícula de cada componente de la fórmula es un parámetro importante, esto es debido a que el contacto entre ellos favorece que se lleven a cabo las reacciones químicas de difusión de los electrones (paso determinante para la reacción) mediante la generación de defectos en las estructuras químicas de las redes cristalinas existentes.

Conforme a las formulaciones seleccionadas se pesan las cantidades calculadas; se le adiciona un 4% de agua para cada una de las formulaciones basándose en el peso total de cada mezcla, se realiza el calculo de acuerdo a los parámetros de la bibliografía de síntesis de vidrios que nos indica que entre un 4 a 10% del peso total de la mezcla corresponde a la adición de agua para realizar la síntesis de vidrios precursores a cristalizar.

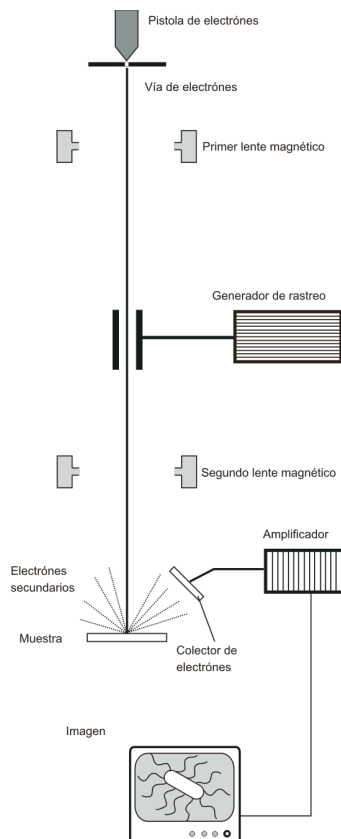
Es preciso mencionar que la adición de agua debe ser lenta y en constante movimiento para evitar la formación de aglomeraciones que podrían interferir a la hora de la fusión, por lo cual se hace en pequeños volúmenes y homogenizando perfectamente, posteriormente la mezcla se coloca en crisoles de alúmina para su fusión en un horno Thermolyne 46100 High Temperatura Furnace trabajando con una temperatura de 1400 °C por un periodo de 45 a 90 minutos, sometiéndolo a tratamiento térmico adecuado para su cristalización.

La preparación del material para el análisis, consta simplemente de romper el crisol y tomar una pequeña porción del material (una piedra pequeña). Una vez seleccionada la piedra, para ser analizada por microscopia electrónica de barrido; se pule con lija para remover puntas o pequeños picos en la superficie del material, procurando dejar una superficie lisa; enseguida es pulida utilizando tres diferentes suspensiones de diamante de seis, tres y un micrón en base agua. Se pule con una emulsión acuosa de alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), se lavan perfectamente con agua y por ultimo con alcohol isopropílico o metanol para eliminar cualquier residuo del proceso de pulido.

Las muestras para ser analizadas por difracción de rayos x deben ser secadas y pulverizadas perfectamente sobre un mortero de ágata o diamante.



# Métodos | 5



## 5.1 CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL

### 5.1.1 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

El microscopio electrónico de barrido (MEB) sirve para examinar la superficie de los objetos. Produce imágenes de gran aumento (más de cien mil veces) y muestra la forma real de los objetos, permite obtener imágenes de gran resolución en materiales pétreos, metálicos y orgánicos. Además de mostrar increíbles figuras, el microscopio electrónico muestra detalles que pueden ser de vital importancia para científicos en muchas áreas. Trabaja examinando la superficie de un objeto, a diferencia del Microscopio Óptico, la luz se sustituye por un haz de electrones, las lentes por electroimanes y las muestras se hacen conductoras metalizando su superficie,

esto a base de electro deposición utilizando un metal pesado (el mas utilizado es el Oro) de alto grado de pureza por lo general 99.9999%. Los electrones primarios provenientes del cañón inciden sobre la superficie del metal liberando electrones, los electrones secundarios se asocian a una señal de TV dando como resultado una imagen en tercera dimensión de la superficie de la muestra.

## **CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS**

### *Microscopio Electrónico de Barrido*

- Imágenes digitales hasta 2048 x 2048 píxeles.
- Resolución de 25 nm a 1 kV y de 3,5 nm a 30 kV.
- Lentes magnéticas y bomba turbo molecular refrigeradas por agua.
- Detector de centelleo para electrones secundarios, de Si para electrones dispersados y de Si(Li) para rayos X.

## **APLICACIONES**

### *Hormigones y Áridos*

- Mineralogía de cementos: clínker, alitas.
- Mineralogía de áridos: granito, calizas.
- Crecimientos cristalinos, texturas, fisuraciones, porosidades, fragilidad.

Fases reactivas, productos expansivos.

- Interferencia árido pasta, índice de huecos.
- Composición microquímica, alteraciones.
- Cuantificación de parámetros de caracterización.

### *Metales y Orgánicos*

- Análisis morfológico y fractográfico.
- Análisis de inclusiones.
- Corrosión de superficies y oxidaciones.
- Estudio, análisis y evaluación de fases.
- Cartografía de elementos químicos.

- Ataques superficiales por alteración.
- Espesores y distribución de capas.

## **5.2 ANALISIS MINERALOGICO**

### **5.2.1 DIFRACCIÓN DE RAYOS X**

Cualquier especie cristalina tiene un diagrama de rayos x (Difractograma) característico. Estos Difractogramas se obtienen mediante la técnica del polvo cristalino, llamada así porque utilizan muestras molidas y tamizadas a tamaños inferiores de 53  $\mu$ m. La información obtenida se refiere a la estructura de la fase y no a su composición química. Por ejemplo cada polimorfo de SiO<sub>2</sub> tiene su propio Difractograma, aunque su composición es la misma, porque tienen estructuras diferentes. Si la muestra esta constituida por varios minerales su difractograma será la suma de los Difractogramas correspondientes a las fases cristalinas que componen la muestra.

Los diagramas constan de una serie de picos que corresponden a valores espaciados reticulares y que están recogidos como ángulos  $2\theta$  en el eje horizontal del diagrama. La altura del pico esta en relación con la intensidad de radiación difractada que depende de la sensibilidad empleada.

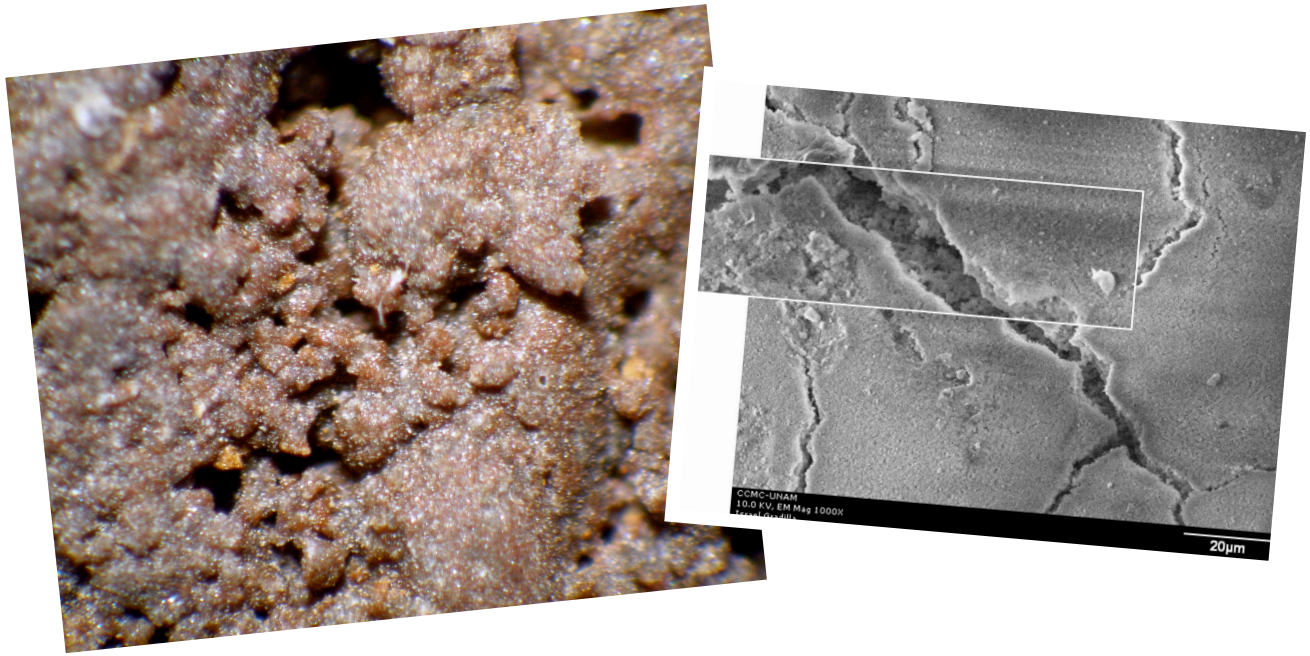
De una forma muy simple, la difracción de Rayos X por un cristal y la reflexión de luz por un espejo son parecidas, ya que en ambos fenómenos el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. Difieren, al menos, en 3 aspectos:

- El haz difractado por un cristal está constituido por rayos dispersados por todos los átomos del cristal que están en el camino del haz incidente. La reflexión de luz visible tiene lugar en una capa fina de la superficie solamente.
- La difracción de Rayos X monocromáticos (con una única longitud de onda) tiene lugar sólo para algunos ángulos de incidencia que satisfacen la Ley de Bragg. La reflexión de luz visible tiene lugar para cualquier ángulo de incidencia.
- La reflexión de luz visible en un buen espejo tiene casi un 100% de eficiencia. La intensidad de un haz difractado de Rayos X es extremadamente pequeña com-

parada con la del haz incidente (incluso cuando el cristal es de una extraordinaria calidad).

Las direcciones de difracción están determinadas por la ley de Bragg ( $n\lambda = 2d \sin\theta$ ) y por tanto sólo dependen del aspecto (estructura cristalina) y el tamaño de la celda unidad del cristal, por lo que midiendo las direcciones de los haces difractados por un cristal, sólo podemos conocer el aspecto y tamaño de la celda unidad.

Las intensidades de los haces difractados están determinadas por las posiciones de los átomos dentro de la celda unidad, por lo que debemos medir las intensidades si queremos obtener cualquier información sobre las posiciones atómicas.



# Resultados y Discusiones | 6

## **6.1 CARACTERIZACIÓN DEL RESIDUO**

Se llevó a cabo la identificación cualitativa de los elementos del residuo utilizado mediante un análisis elemental para la formulación de los materiales. En base a los resultados obtenidos, es posible proponer una serie de formulaciones que permitan incluir al residuo como catalizador para su inclusión a la red cristalina. Los demás componentes identificados como Magnesio y Calcio actúan como elementos fundentes, tratando que este último además forme parte de la estructura cristalina, se adiciona un 29%-36% en forma de  $\text{CaCO}_3$ .

## 6.2 MATERIALES OBTENIDOS

La aplicación de tratamientos térmicos al material vítreo da lugar a materiales Vitro cerámicos con diferente aspecto y arreglo, las temperaturas elegidas fueron en función de la información bibliográfica obtenida, aplicándose con el propósito de elegir el tratamiento ideal para generar una desvitrificación total del material.

### 6.2.1 CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS

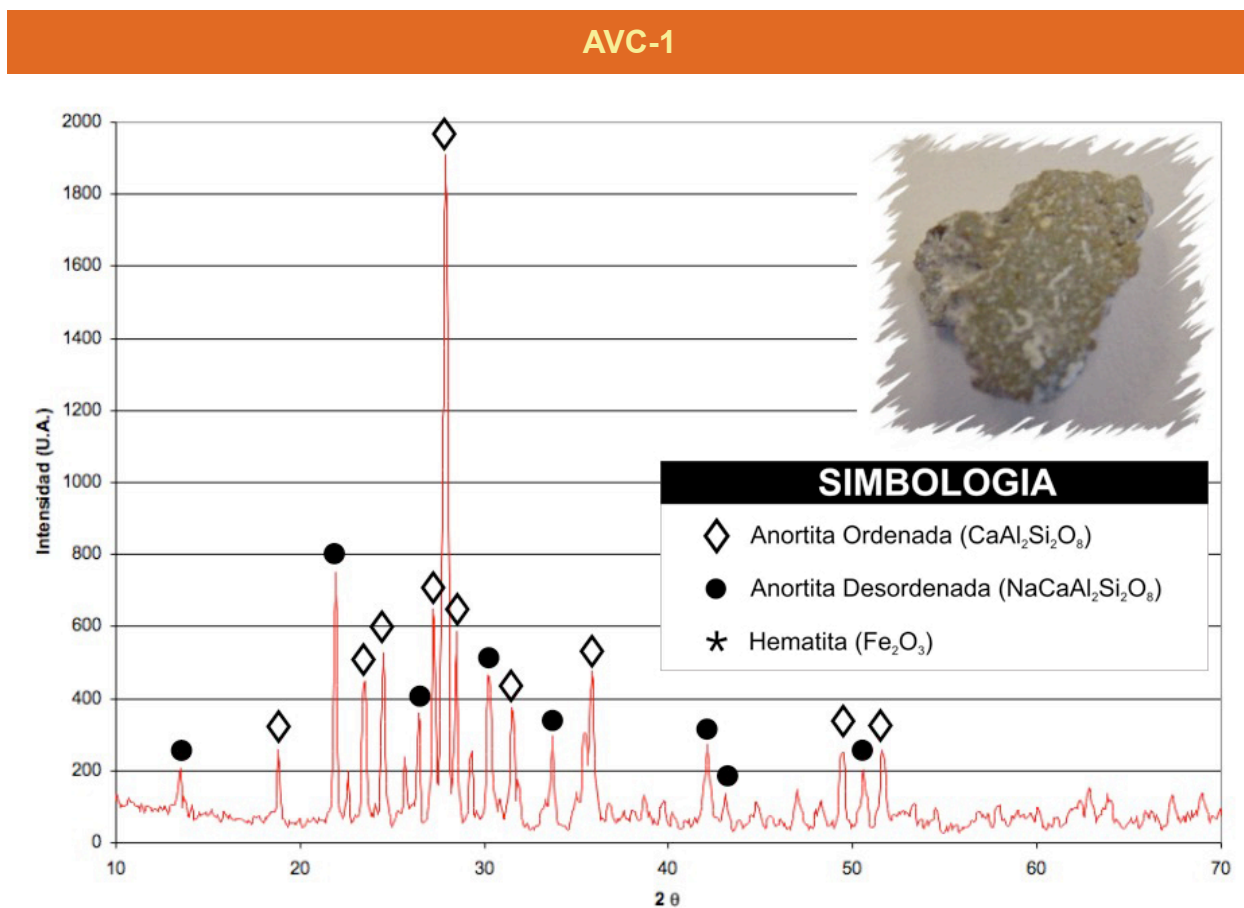
Una vez llevada a cabo la fusión de los materiales a 1400 °C se conservo esta temperatura por un periodo de 240 minutos como tratamiento térmico, se logro obtener en los tres casos fusión completa del material.

La tabla siguiente resume las características físicas mas relevantes de los materiales obtenidos:

MATERIALES		CARACTERÍSTICAS				
		Apariencia	Color	Brillo	Raya	Dureza
AVC-1		Grumosa, presenta porosidad	Cafe	No presenta	Incolora	Baja
AVC-2		Solida, presenta poros debido al oxígeno atrapado durante la fusión	Gris con algunas regiones rojas	No presenta	Incolora	Baja-media
AVC-3		Compacta	Negro	Presenta	Incolora	Media

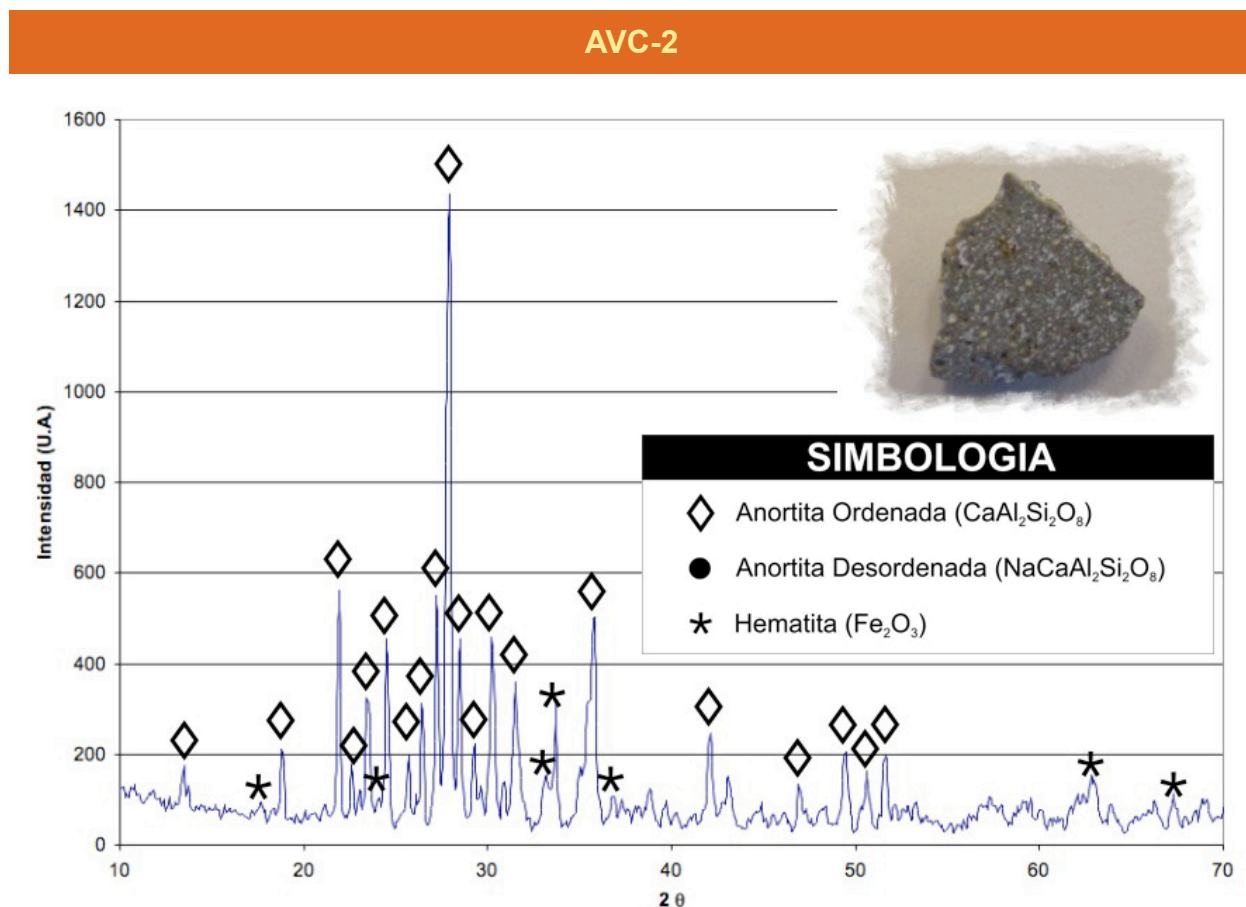
En base a estas observaciones nos percatamos de que los materiales que se obtuvieron en las formulaciones AVC-1, AVC-2 y AVC-3 conforme a su diseño teórico en el diagrama triangular del sistema  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ : presentaran una fase vítrea (transparente) y una cristalizada (opaca) de manera definida, en donde el área vítrea interconecta a las zonas cristalizadas. Por ello los materiales fueron sometidos a tratamiento térmico al mismo tiempo que la fusión, se espera que se generen los primeros núcleos de cristalización con lo cual la intensidad del color del material disminuye tornándose opaca la fase cristalina, no apreciándose muchas áreas transparentes lo que permite estimar una menor cantidad de fase vítrea en caso de existir.

Con el apoyo de la Difracción de Rayos X, se llevó a cabo la identificación de las fases generadas en los materiales obtenidos.

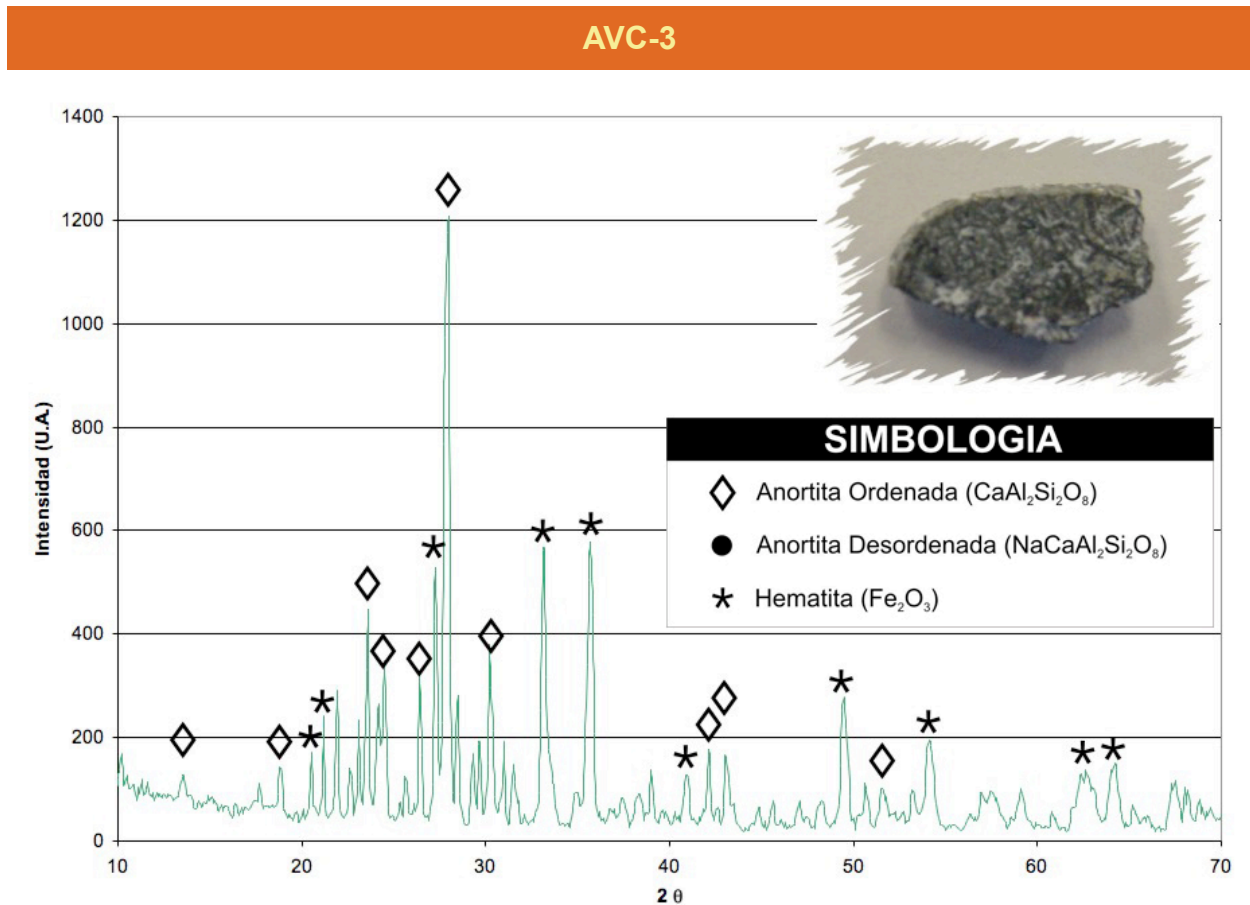


Dentro del análisis cristalográfico, se puede apreciar en el material AVC-1 que la fase vítrea esta ausente casi en su totalidad, por el contrario de la fase cristalina que esta

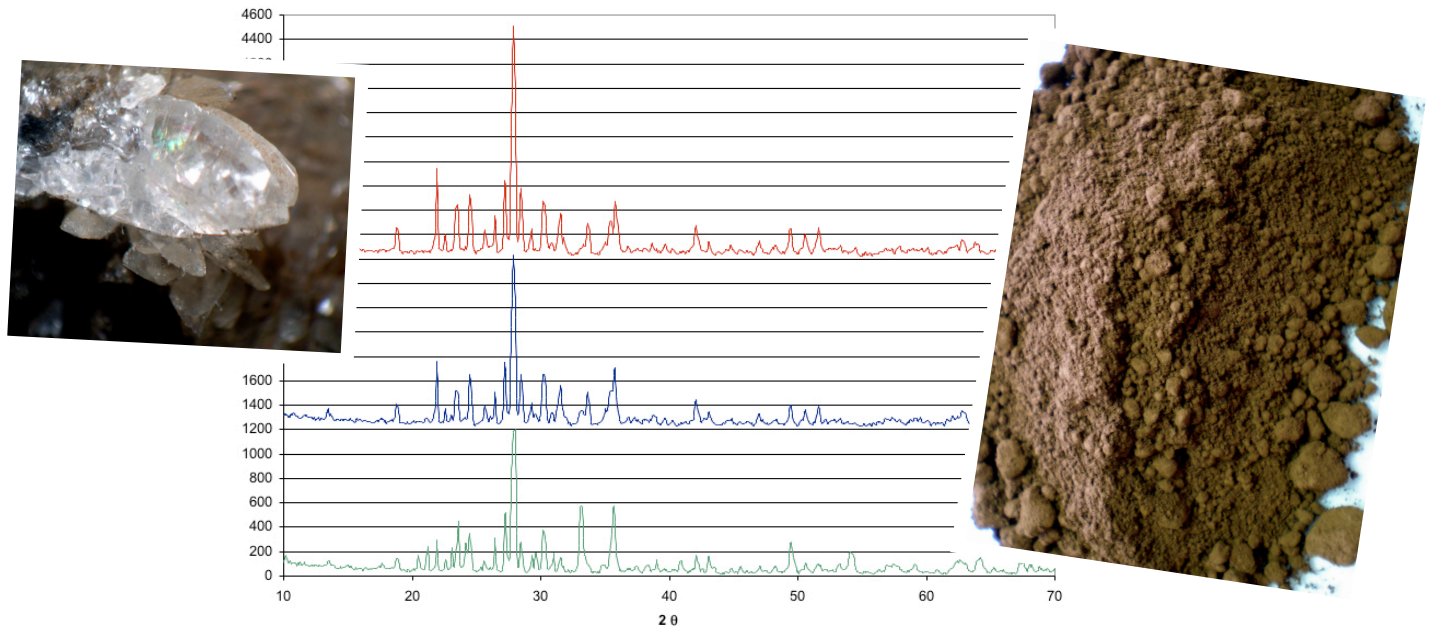
muy bien definida, lo cual permite estimar una mejor identificación de los picos presentes en el difractograma y reconocer la fase o fases cristalinas presentes. En el difractograma se ve que las formulaciones utilizadas conducen a un material con claras tendencias a formar cristales, utilizando como variante la introducción de un residual como materia prima alterna, conteniendo hierro y agentes que actúan como nucleantes, se mantienen las fases; Anortita Ordenada ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) y Anortita Desordenada ( $\text{NaCaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ).



El análisis cristalográfico del material AVC-2 nos indica la existencia de las fases; Anortita Ordenada ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ), Anortita Desordenada ( $\text{NaCaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) e incorpora una nueva de Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) atribuida al exceso de Hierro que contiene la muestra. En base a la banda ancha del fondo del Difractograma, se aprecia la presencia de fase vítrea residual; se puede considerar un tiempo mas prolongado de tratamiento térmico o aumentar la temperatura de cristalización.



En el difractograma del material AVC-3 nos indica la existencia de las fases; Anortita Ordenada ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ), Anortita Desordenada ( $\text{NaCaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) y se incorpora una nueva (al igual que AVC-2) de Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) que se atribuye al exceso de Hierro que contiene la muestra. Es importante resaltar que los materiales AVC-2 y AVC-3 contienen en mayor grado material residual (en escala ascendente) conforme a las formulaciones. Por ello se indica con mayor énfasis las fases Anortita Ordenada y Hematita en el difractograma. Se puede apreciar de igual forma la presencia de fase vítrea residual ya que persiste en menor grado la banda ancha del fondo; Al igual que en material anterior, se puede considerar un tiempo mas prolongado de tratamiento térmico o aumentar la temperatura de cristalización.



# Conclusión | 7

Una vez presentados los resultados de esta investigación en donde se involucra una formulación de material vitrocerámicos del sistema  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ , se observa que es posible obtener materiales vitrocerámicos de composiciones definidas, se puede llegar a estimar el uso de este residuo como carga dentro del proceso de elaboración de materiales en donde la fase cristalina predominante sea Anortita ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ).

Conforme a los resultados mencionados, se observa que los materiales presentan colores café, gris, rojo y negro entre otros, característica principal de un material que contiene hierro. Los materiales AVC-1 y AVC-3 a simple vista presentaron homogeneidad, a diferencia del AVC-2 que muestra claramente la separación de fases representadas por coloraciones diversas.

Se cuenta con porcentaje predominante de 47.34%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y 17.04%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , lo cual permite el estimar la presencia de una fase alterna a base de hierro [Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )]. La presencia de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{CaO}$  forman parte de la estructura cristalina de la Anortita. El  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$  y  $\text{V}_2\text{O}_5$ , actúan como agentes nucleantes, siendo una ventaja el uso de dicho residuo. Los demás elementos en bajos porcentajes, permiten en su gran mayoría el actuar como agentes fundentes.

Por medio de Difracción de Rayos es posible identificar claramente las fases cristalinas predominantes; Anortita Ordenada ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ), y Anortita Desordenada ( $\text{NaCaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ). Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), la primera propia de la formulación estimada, la segunda predominante, propiciada por la presencia de elemento alcalino del residuo, la última; generada por la presencia excesiva de hierro debido al residuo industrial. La existencia de fase vítrea es casi imperceptible debido a la existencia de una banda muy marcada que aparece en el fondo del difractograma.

Se puede hacer notar el que la presencia de fase de Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), se ve mas pronunciada en los materiales AVC-2 y AVC-3, siendo este ultimo el de mayor contenido, debido a la mayor cantidad de residuo agregado en relación al  $\text{SiO}_2$  ya que tiende a mantener en estado soluble al hierro. El cálculo teórico indica una mayor cantidad de fase de Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ); la presencia de sílice tiende a disminuir su presencia en forma de fase cristalina para incluirla en su estructura vítrea.

Tomando en cuenta que la mayoría de los objetivos y metas planteados para este trabajo fueron cumplidos, se puede concluir que el presente método representa una aplicación viable para reciclaje de un residuo o la incorporación del mismo a una matriz vítrea, para su utilización en tecnología de materiales.

No obstante, es preciso mencionar la existencia de un contaminante en altas concentraciones, que lamentablemente modificó los resultados, obteniendo así una fase distinta a la estipulada, pero un material alterno que podría ser utilizado para otros fines.

Debido a esto y basándonos en los porcentajes del residuo, se podría reformular el material para obtener uno con base Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), procurando con ello obtener un derivado con la estructura de la Espinela Inversa de Hierro, la cual soporta altas temperaturas y puede obtenerse a temperaturas inferiores de los 1400 °C. Esto podría llevar a una nueva forma de aprovechamiento del residuo.



# Referencias | 8

- Enciclopedia didáctica Kirt-Otmer.
- Perry: Manual del ingeniero químico.
- Fernandez Navarro , J. M<sup>a</sup>.: El Vidrio, Ed. Consejo Superior De Investigaciones Cientificas, (2<sup>a</sup> edición), Madrid.
- Mc, Millan, P. W.: Glass-ceramics. Ed. Academic Press, (2<sup>a</sup> edición), (1979). New York, London.
- Stookey, S. D.: History of the de development of Pyroceram. Resarch Manag., (1958) 1, 155-163.
- Strnad, Z: Glass-Ceramics Materials. Ed. Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York-Tokio, (1986) 167-174.
- Tamman, G. Y Hesse, W.: Die abhängigigkeit der viskosität vonder temperatur bei unterkühlten flüssigkeiten. Z . anorg. allog. chem., (1958) 1, 155-163.
- Garcia Verduch, A.: Materiales obtenidos a partir de rocas y escorias fundidas. Jornadas científicas sobre Cerámica y Vidrio. Ed. Sección de Ciencia Básica de la Soc. Esp. Ceram. Vidr. y Universidad de Oviedo. (1980), Oviedo.
- Wastaff, F. E.: crystallization and kinetics of cristobalite. J. Amer. Cer. Soc., (1969) 52, 650-654.
- Jacodine, R. I.: Study of devitrification of lithium glass. J. Amer. Cer. Soc., (1961) 44, 472-475.
- Chick, L. A.; Lokken, R. O. Y Thomas, L. E.: Basalt glass-ceramic for the immobilization of transuranic nuclear waste. Cer. Bull, (1983) 62,4, 505-516.
- Rincon, J Ma.: Glasses and glass-ceramic for nuclear waste management. Ed. SECV, 2<sup>a</sup> edición, (1991).
- Strachan, D. M.: Effect of flow rate on the leaching of nuclear waste glass. En advances in Ceramics, vo. 8: Nuclear waste Management. Ed. Am. Ceram. Soc., (1984), pp 312-317. Columbus, Ohio.

- Clark, D. E.; Christensen, H. & Werme, L.: Effects of flow on corrosion and surface film formation on an alkali borosilicate glass. *Advances in Ceramics*, vol. 8: Nuclear waste Management. Ed. Am. Cer. Soc., (1984), pp 19-29. Columbus, Ohio.
- Hayward, P. J. Y Cecchetto, E. V.: Development of sphene-bases Glass-ceramics tailored for Canadian Waste Disposal Conditions. *Scientific Basics for nuclear Waste Management*. Ed. S. V. Topp, Elsevir, (1981), 91-98. New York.
- L. Barbieri, I. Lancelloni, T. Manfredini, I. Queralt, J. Ma. Rincon, M. Romero, Desing, obtainment and properties of glasses and glass-ceramic from coal fly ash, *Fuel-Elsevier* 78, (1999), 271-276.
- L. Barbieri, T. Manfredini, I. Queralt, J. Ma. Rincon, M. Romero, Vitrification of fly ash from thermal power stations, *Glass. Technol.*, (1997), 38 [5], 165-70.
- Mc, Millan, P. W.: *Glass-ceramics*. Ed. Academic Press, (2<sup>a</sup> edition), (1979). New York, London.
- Strnad, Z: *Glass-Ceramics Materiasl*. Ed. Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York-Tokio, (1986) 167-174.
- J.M. Rincon, M. Romero, C.Diaz, V. Balek and Z. Malek, Thermal Behaviour of silica waste from a geothermal power plant and derived silica ceramics, *J. Thermal Analysis and Calorimetry*, 56 (1999), Bulgaria, 1261-1269.
- <http://www.mindat.org/>
- <http://museovidrio.vto.com/ihv.htm>
- <http://www.uned.es/cristamine/fichas/anortita/anortita.htm>
- <http://www.cnpml.org/html/archivos/Ponencias/Ponencias-ID56.pdf>