

**ESTUDIO PRELIMINAR DEL PROCESO DE VITRIFICACIÓN DE RESIDUOS
PELIGROSOS POR VÍA TÉRMICA.**

FREDY ALEXANDER SAENZ FORERO



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL
FACULTA DE INGENIERIA
BOGOTA D.C., 2.006**

**ESTUDIO PRELIMINAR DEL PROCESO DE VITRIFICACIÓN DE RESIDUOS
PELIGROSOS POR VÍA TÉRMICA.**

FREDY ALEXANDER SAENZ FORERO

**Tesis de grado para optar el título de
Magíster en Ingeniería Civil**

**Director:
MANUEL SALVADOR RODRIGUZ SUSA
Ingeniero Químico, PhD.**



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL
FACULTA DE INGENIERIA
BOGOTA D.C., 2.006**

A Dios y a mi familia por su amor y apoyo incondicional, por brindarme los medios para el desarrollo de este nuevo paso hacia la excelencia.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus más sinceros agradecimientos a:

Manuel Rodríguez, por su gran orientación, apoyo y confianza.

Héctor Mora, por su asesoría y compromiso.

Al personal técnico y administrativo del laboratorio del Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA) por su colaboración.

A las empresas Colcerámica S.A. y Consorcio Metalúrgico Nacional S.A.

1. INTRODUCCION.

Los Residuos Peligrosos constituyen una categoría específica de desechos que debido a su cantidad, concentración o características físicas, químicas o biológicas (infecciosas) pueden ser clasificados como: Corrosivos, Reactivos, Explosivos, Inflamables, Radiactivos, Tóxicos., Combustibles o biológico-infecciosos, generando un riesgo sustancial o potencial a la salud humana y al medio ambiente cuando son tratados, almacenados, transportados y eliminados en forma inadecuada (RAS 2000).

Los Residuos Peligrosos generados por la actividad industrial y de servicios, constituyen un tema ambiental de especial importancia, como consecuencia del proceso de desarrollo económico y el cambio en los hábitos de consumo, entre otros, así como por la mayor preocupación social derivada de los efectos evidenciados sobre la salud y el medio ambiente, resultantes de un manejo y disposición inadecuados para este tipo de materiales.

El marcado interés que el tema despierta tanto a nivel nacional como mundial está acompañado de una gran incertidumbre respecto a los verdaderos efectos que la manipulación inadecuada de los Residuos Peligrosos genera sobre el ser humano y su entorno ambiental.

El problema tiende a ser especialmente grave en los países en desarrollo, de los cuales Colombia hace parte y donde el sector industrial se expande a una velocidad mayor de lo que lo hace el manejo adecuado y responsable de los residuos generados.

En la actualidad existen tecnologías de tratamiento de residuos peligrosos que pueden ser utilizadas antes de la disposición de estos residuos. Su propósito es el de

modificar las propiedades físicas o químicas de los residuos, además de reducir el volumen, inmovilizar componentes tóxicos o detoxificar estos compuestos.

Los tratamientos de los residuos peligrosos mas importantes se pueden clasificar como:

- Tratamientos Físicos
- Tratamientos Químicos
- Tratamientos Térmicos
- Tratamientos Biológicos
- Estabilización / Solidificación

La Estabilización/Solidificación es una tecnología donde un material residual es mezclado con materiales que tienden a fijarse a un sólido, capturando o fijando el residuo dentro de la estructura del sólido.

Aunque los términos solidificación y estabilización son, usualmente, usados indistintamente, ellos representan conceptos distintos para el control de materiales residuales.

Solidificación se refiere a la producción de un sólido, de masa monolítica con suficiente estructura integrada, para ser transportado en piezas de tamaños convenientes sin requerir algún envase secundario, y Estabilización Química se refiere a la inmovilización de sustancias tóxicas mediante reactivos químicos para formar compuestos insolubles en un enrejado cristalino estable. (Elias Xavier, 2000)

El objetivo primordial de estos procesos, es convertir las corrientes de residuos tóxicos a un inerte, masas físicamente estables, teniendo muy baja lixiviabilidad y con suficiente fuerza mecánica para permitir la recuperación de la tierra o la disposición final en rellenos sanitarios.

El desarrollo de esta investigación comprende la evaluación de la eficiencia de la técnica de vitrificación en laboratorio, la cual hace parte de la tecnología Estabilización/Solidificación mencionada. Esta técnica se desarrolla a partir de un proceso térmico (con temperaturas que varía entre los 940 °C a los 1600 °C), en el cual los residuos tóxicos se mezclan con aditivos que contengan altas concentraciones de sílice (SiO_2) tales como arcillas, caolines, vidrio reciclado; de tal manera que en el proceso se forme una estructura microcristalina amorfa estable y resistente a la lixiviación.

2. OBJETIVOS.

2.1. OBJETIVO GENERAL.

Realizar un estudio técnico preliminar de la vitrificación como alternativa tecnológica para el tratamiento de residuos peligrosos en Colombia.

2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.

- Determinar el proceso a desarrollar para la evaluación de la técnica de vitrificación de residuos peligrosos por vía térmica.
- Determinar el comportamiento de los metales pesados después de someterlos a proceso térmico con temperaturas mayores a los 940 °C.
- Determinar las propiedades físicas y químicas de los lodos con contenido de metales pesados pre y pos al proceso de vitrificación.
- Determinación de cuáles metales pesados pueden ser inmovilizados mediante el proceso de vitrificación.
- Establecer en el piloto a qué temperaturas se puede realizar el proceso de vitrificación.
- Determinar cuáles son las rampas de temperaturas optimas del proceso de vitrificación.

- Establecer cuál de los aditivos se debe utilizar para la producción de una matriz vítrea.
- Determinar cuál es la dosis óptima entre Aditivos Vs Residuo Peligroso.
- Comprobar si el producto resultante del proceso es resistente a la lixiviación.
- Comprobar si el producto resultante del proceso es toxico y/o corrosivo de acuerdo a la normatividad ambiental.
- Evaluar la eficiencia del proceso de vitrificación de residuos tóxicos.

3. MARCO TEORICO.

El desarrollo industrial en las últimas décadas ha generado grandes cantidades de residuos tóxicos y peligrosos, tales como cenizas volantes de las centrales eléctricas, termoeléctricas, escorias metalúrgicas, y lodos de diversos orígenes; es por eso necesario, desarrollar nuevas tecnologías para el tratamiento de este tipo de residuos.

El tratamiento de los lodos generados por las plantas de tratamiento de las industrias es particularmente difícil, debido a la composición compleja y al alto contenido de metales pesados. La vitrificación de residuos peligrosos se ha establecido como un proceso ambientalmente compatible de estabilización, debido a la alta resistencia química del producto vítreo resultado del proceso. Los cristales demuestran alta resistencia en la mayoría de los medios químicos porque los componentes peligrosos, metales generalmente pesados, se enlazan en la red cristalina amorfa.

La técnica de vitrificación de residuos peligrosos se realiza por medio de un proceso térmico, en el cual los residuos son mezclados con un aditivo rico en silicato, alcanzando temperaturas máximas que varían entre 940 °C y 1600 °C, por medio de tasas de calentamiento de aproximadamente 10 °C/min, tiempos de residencia en la temperatura máxima en un marco de 0 a 5 horas y un proceso de enfriamiento a temperatura ambiente o inducido.

Las ventajas principales que ofrece el proceso vitrificación son (Colombo P., et al., 2003):

- Los cristales inorgánicos pueden incorporar grandes cantidades de iones del metal pesado, por procesos químicos que los enlazan dentro de su red amorfa inorgánica.

- Los cristales obtenidos son inertes hacia la mayoría de los agentes químicos o biológicos, así que pueden ser dispuestos en rellenos sanitarios sin problemas o ser utilizados para los caminos, los pavimentos, los terraplenes, etc.
- El proceso de vitrificación puede aceptar pérdidas de composición y forma diferentes, tal como líquidos, lodos, sólidos o sus mezclas. Por lo tanto, un modelo bien diseñado de vitrificación puede ser bastante flexible y robusto para el tratamiento de diferentes tipos de residuos peligrosos con o sin un tratamiento previo.
- La vitrificación es una tecnología estudiada mundialmente y que ha reportado buenos resultados en la inmovilización de residuos tóxicos.
- La vitrificación da lugar a una reducción en el volumen de los residuos.

La finalidad principal de la vitrificación es producir un cristal amorfo que posea una alta durabilidad química y que de acuerdo a las pruebas realizadas se pueda predecir el comportamiento a largo plazo del material bajo condiciones complejas que prevalecen en un ambiente del depósito o en una reutilización real del cristal amorfo. Debido a la importancia de este aspecto, algunos estudios recientes han intentado entender y predecir la correlación entre el comportamiento de la lixiviación y la composición de los cristales amorfos, mientras que otros autores se centran en determinar el riesgo producido por los lixiviados que venían de los cristales amorfos obtenidos por el proceso, probando el planteamiento de un riesgo eco-toxicológico mínimo, para de esta manera abrir la posibilidad de reutilizar el cristal amorfo en el desarrollo de nuevos productos comerciales (Colombo P., et al., 2003).

Adicionalmente los estudios recientes también han demostraron que el proceso de vitrificación permite la inmovilización de metales peligrosos y destruye los agentes

contaminantes orgánicos, con la ventaja simultánea de alcanzar una reducción significativa en el volumen de los residuos (80-90%) (Spence R.D., et al., 1999).

Con respecto a la metodología utilizada en desarrollo de la técnica de vitrificación, (Guilio A, et al., 2002), realizaron este proceso con los lodos producidos en la laguna de Venecia como se indica a continuación: secaron la muestra a 105 °C durante 48 horas, a continuación calentaron a una tasa de 10 °C/min hasta llegar a 935 °C, en esta temperatura permaneció la muestra 5 horas, y luego se enfrió a condiciones ambientales. De igual manera estos mismos autores utilizaron para el proceso de vitrificación de residuos industriales el siguiente procedimiento: realizaron un secado de la muestra a 105 °C durante 48 horas, luego realizaron una mezcla en proporciones de 70% y 60% de lodo con 30% o 40% de materiales con alto contenido en sílice, y por último calentaron a una tasa que puede variar entre 1-10 °C/min hasta llegar como mínimo a 940 °C, variaron el sostenimiento en la temperatura pico entre 2 y 5 horas dependiendo de la temperatura máxima, y luego realizaron un enfriamiento a temperatura ambiente.

Dentro del estudio realizado sobre la incidencia del fosfato en el proceso de vitrificación (Bingham P.A y R.J. Hand, 2005), desarrollaron el siguiente procedimiento: secaron la muestra a 120 °C durante 18 horas, después mezclaron 60% de lodo con 40% de materiales con alto contenido en sílice y fosfato, el calentamiento lo realizaron a una tasa de 4 °C/min hasta llegar como mínimo a 1000 °C, y por último realizaron enfriamiento inducido. En este estudio se analizaron residuos con altos contenidos en Zinc y fosfatos, obteniendo como resultado una inmovilización de los componentes tóxicos, pero con mejores resultados para el residuo que tenía alto contenido en fosfato.

Kavouras P., y colaboradores, 2002, determinaron en su estudio de vitrificación de residuos industriales con alto contenido en plomo las siguientes condiciones para el proceso: realizar un secado previo pero sin especificar la temperatura, se mezcla un

60% de lodo con 40% de materiales con alto contenido en sílice y Na_2CO_3 , el calentamiento se realizó a una tasa de 14 °C/min hasta llegar como mínimo a 1000 °C, y manteniéndose en la temperatura pico durante 3 horas; no se especifica la tasa de enfriamiento, se supone que es a la temperatura ambiente. De este estudio los autores concluyeron que se evidenció una reducción de volumen entre el 50% y 60% y además una retención de metales importante en la matriz vítrea.

De acuerdo con la información científica analizada, esta investigación tiene como objetivo primordial determinar la eficiencia técnica preliminar del proceso de vitrificación de residuos tóxicos, mediante la realización de un montaje físico a escala, de una mufla acondicionada para suministrar una temperatura máxima de 1200 °C con tasa de incremento fija y decrecimiento de temperatura fija.

3.1. PRODUCTO VITREO.

El vidrio se puede definir como un “líquido subenfriado de viscosidad infinita”, esto significa que a temperatura ambiente tiene una apariencia de sólido la cual es proporcionada por su rigidez mecánica dado el aumento de la viscosidad en la masa fundida, pero no debe considerarse de esta forma puesto que el vidrio está compuesto por una matriz amorfa, careciendo de esta manera de una estructura cristalina que defina el estado de sólido. (Elias Xavier, 2001)

En el proceso de fusión el cual es la primera etapa para la conformación del vidrio, a medida que se aumenta la temperatura, el calor distorsiona la red hasta que esta se transforma en una estructura amorfa, en este momento algunos enlaces se rompen y se establece una condición apropiada para la incorporación de metales pesados dentro de la estructura vítrea.

3.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS QUE SE PUEDEN VITRIFICAR.

Dentro de las investigaciones realizadas (Colombo P., et al., 2003) la técnica de vitrificación ha alcanzado con éxito para varios tipos de residuos peligrosos, con el fin de hacer inerte el producto y de reutilizarlo. La finalidad principal de la vitrificación es producir un cristal homogéneo que posea una alta durabilidad química, y que de acuerdo a las pruebas realizadas se pueda predecir el comportamiento a largo plazo del material bajo condiciones complejas que prevalecen en un ambiente del depósito o en una reutilización real del cristal. Debido a la importancia de este aspecto, algunos estudios recientes han intentado entender y predecir la correlación entre el comportamiento de la lixiviación y la composición de los cristales, mientras que otros autores se centran en determinar el riesgo producido por los lixiviados obtenidos en el proceso, para de esta manera probar el planteamiento de un riesgo ecotoxicológico mínimo, con el fin de abrir la posibilidad de reutilizar el este producto vítreo en el desarrollo de nuevos productos comerciales.

Los desechos radioactivos bajos y de nivel intermediario son vitrificados recientemente con éxito. Las cenizas volantes, derivadas de varios procesos industriales, son un ejemplo típico de los residuos vitrificados con éxito en años recientes. Estos residuos contienen la fracción más fina de la ceniza separada por los filtros del gas, y representan un problema ambiental serio porque contienen una gran cantidad de componentes orgánicos e inorgánicos peligrosos, tales como dioxinas, furanos y de metales pesados (principalmente Cd, Cr, Cu, Pb). Los estudios recientes demostraron que el proceso de vitrificación aplicado a las cenizas volantes permitió la inmovilización de metales peligrosos y destruyó los agentes contaminadores orgánicos, con la ventaja simultánea de alcanzar una reducción significativa en el volumen de los residuos (80-90%). (Guilio B., et al., 2002)

Otro tipo de residuos peligrosos consiste en los residuos de industrias metalúrgicas ferrosas y no ferrosas. Éstos se producen en volúmenes grandes y son caracterizados por un alto contenido de sílice y óxidos (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO). El primer ejemplo del uso de tales residuos para la producción de un producto cristalizado fue en los años 60. (P. Piscicella., et al., 2000)

Los lodos que producen las industrias son caracterizados por una variación grande en su composición (especialmente si viene de operaciones de dragado), y por la presencia de una cantidad excesiva de agua y de materia orgánica, el cual requiere con frecuencia el secado antes de realizar el proceso de vitrificación, para asegurar de esta forma la producción de un cristal con durabilidad química dentro de los límites permisibles. La reducción del volumen de este tipo de residuos puede ser tan alta como 40-60%. (Pelino M., et al., 2002)

Dentro de los residuos a los cuales se ha aplicado la técnica de vitrificación con éxito, están los que tiene altos contenidos de asbesto, los cuales tienen una importancia particular debido a los efectos negativos causados a la salud. En contraste con los residuos descritos anteriormente, no contiene metal pesado y la ventaja de la vitrificación se deriva en la destrucción completa de la estructura fibrosa cuando está agregada a una mezcla de silicato, gracias al tratamiento térmico que conduce al derretimiento, permitiendo una disposición totalmente segura (o la reutilización) del material de vidrio producido. (Catherin N., et al., 2001)

Finalmente, otro tipo importante de residuos a considerar es el vidrio reciclado, este se deriva de programas de reciclaje y en la actualidad se recoge en grandes cantidades. Los esfuerzos por clasificarlos por colores y quitar de la impureza se han realizado pero sin mucho efectividad, de tal manera que este residuos termina como vidrio pulverizado con un grado bajo de pureza, lo cual no es conveniente para la reutilización de esta materia prima en nuevos productos.

4. METODOLOGIA.

En este capítulo se describirán en detalle los materiales, equipos y métodos utilizados en desarrollo del montaje experimental del proceso de vitrificación de residuos tóxicos.

El análisis experimental fue desarrollado en la empresa CAOLINES LA PIRAMIDE LTDA, en coordinación con el Ingeniero Héctor Mora, en donde se realizaron los ensayos correspondientes al proceso de vitrificación.

Los ensayos de laboratorio se realizaron en el Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico (CITEC) de la Universidad de los Andes, utilizando los laboratorios del Centro de Investigación de Ingeniería Ambiental (CIIA) y en el Departamento de Química de la Universidad de los Andes.

4.1. MATERIALES.

4.1.1. Caracterización de los Lodos.

Para el desarrollo de este proyecto fue necesaria la recolección de 50 Kg de cada uno de los dos tipos de lodos, el primero producido por la planta de tratamiento de la empresa COLCERAMICA S.A. ubicada en el Municipio de Funza (Cundinamarca) en la cual se realizan procesos galvanoplastia, y el segundo producido por la planta de tratamiento de la empresa TUBOS COLMENA S.A. ubicada en la Autopista Sur de Bogotá, en la cual se realizan procesos de producción de tuberías y otros materiales en acero, en ambas industrias utilizan metales pesados como parte de las materias primas, los cuales al finalizar los procesos no logran ser recuperados y son transferidos directamente a las aguas residuales en donde estos metales permanecen retenidos en los lodos, los cuales son finalmente tratados por las

industrias como residuos peligrosos, debido a sus características físicas, químicas y a su composición tóxica o corrosiva.

Para el desarrollo del proceso de vitrificación se utilizó como aditivo un caolín cerámico, el cual es utilizado dentro de los procesos de la industria cerámica y que además brinda en la mezcla con el lodo, un aglomeramiento importante de las partículas que permite que el resultado final sea una masa monolítica y que adicionalmente tiene como propiedad un punto de fusión bajo con el fin de poder vitrificar los lodos a temperaturas cercanas a los 1200 °C.

4.1.1.1. Lodo Empresa COLCERAMICA S.A.

Los lodos producidos por la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la empresa COLCERAMICA S.A. son producto del proceso de fabricación de insumos para gritería, los cuales tienen un alto contenido en cromo debido a los procesos realizados en esta empresa. (Ver Figura No. 4-1)



FIGURA 4-1. FOTO LODO COLCERAMICA S.A.

4.1.1.2. Lodo Empresa TUBOS COLMENA S.A.

Los lodos producidos por la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Consorcio Metalúrgico Nacional S.A. COLMENA, son producto de la fabricación de

todo tipo de tuberías de acero, los cuales tienen contenidos altos en zinc y hierro debido a los procesos realizados en esta empresa. (Ver Figura No. 4-2).



FIGURA 4-2. FOTO LODO TUBOS COLMENA S.A.

4.1.2. Caracterización de los Residuos Tóxicos.

Previo a la realización del proceso de vitrificación, se determinaron las características de los lodos. El lodo producido por la empresa Colcerámica S.A. se denominará Lodo 1, del cual se analizará el cromo (Cr) dadas las elevadas concentraciones de este metal; mientras que para el lodo producido por la empresa Tubos Colmena S.A. al cual se denominará Lodo 2, se le analizará el hierro (Fe).

4.1.3. Caracterización de los Aditivos.

En general las arcillas cerámicas, son arcillas compuestas por dos o más minerales de la arcilla, generalmente illita y esmectita, con importantes cantidades de otros minerales que no son filosilicatos (carbonatos, cuarzo, etc) (García E, 2002). El caolín cerámico tiene una capacidad de intercambio catiónico (CIC) aproximada de 5 meq/g, la cual es una propiedad fundamental de las arcillas, que consiste en la capacidad de intercambiar fácilmente los iones fijados en la superficie exterior de sus

cristales, en los espacios interlaminares, o en otros espacios interiores de las estructuras, por otros existentes en las soluciones acuosas envolventes.

Dentro de los usos del caolín se encuentra en la fabricación de materiales cerámicos (porcelana, gres, loza sanitaria o de mesa, electrocerámica) y de refractarios (aislantes térmicos y cementos).

Para esta investigación se utilizó un caolín cerámico como aditivo dentro de este proceso de vitrificación dada la importancia que tienen los procesos destinados a modificar las propiedades de superficie del mineral mediante tratamientos térmicos o ácidos los cuales producen la destrucción del mineral por disolución de la capa octaédrica, generando sílice amorfa procedente de la capa tetraédrica lo cual hace que se presente un considerable incremento de la superficie específica. De acuerdo con lo anterior se aumenta la capacidad de intercambio iónico y la actividad catalítica, procesos fundamentales en la formación luego del proceso de vitrificación, de un cristal amorfo que posea una alta durabilidad química, y que de acuerdo a las pruebas de laboratorio que se realicen se pueda predecir el comportamiento a largo plazo del material bajo condiciones complejas (Elias Xavier, 2001).

4.1.3.1. Caolín cerámico.

Este aditivo “CAOLIN CERAMICO” es proporcionado por la empresa CAOLINES LA PIRAMIDE, el cual es utilizado en la mayoría de los procesos cerámicos de esta empresa. A continuación en la Tabla 4-1 se describen las características de este aditivo. Las cuales fueron determinadas por la empresa CAOLINES LA PIRAMIDE LTDA. (Ver Figura 4-3).

PROPIEDADES FISICAS	
Color:	Habano

Estudio preliminar del proceso de Vitrificación de residuos peligrosos por vía térmica.

Humedad (%):	8
Densidad (gr/cm ³):	2,73
Retención Tamiz:	200
Perdidas por calcinación:	5,45
COMPOSICION QUIMICA (PORCENTAJES)	
SiO ₂ (Dióxido de Silicio)	59,85
Al ₂ O ₃ (Oxido de Aluminio)	19,36
Fe ₂ O ₃ (Oxido Ferroso)	0,93
CaO (Oxido de Calcio)	0,02
Na ₂ O (Oxido de Sodio)	0,74
K ₂ O (Oxido de Potasio)	3,07
Cu (Cobre)	0,00
Mn (Manganeso)	0,00
PLASTICIDAD Y COMPORTAMIENTO TERMICO	
Agua de moldeo (% en peso)	28,6
contracción a 105 °C	4,2
Color	Beige
Contracción	4,5
Compactación	Buena
Agrietamiento	Grietas Finas
Torsión	Torsión

TABLA 4-1 PROPIEDADES DEL CAOLÍN.



FIGURA 4-3. FOTO ADITIVO CAOLÍN (IZQ.) – ARCILLA (DER.)

4.2. EQUIPOS.

Con el fin de obtener una sistema que garantizara el calentamiento de las muestras a una temperatura máxima de 1200 °C, fue necesario recurrir a una empresa externa, quienes facilitaron la adecuación del montaje físico a escala en una mufla industrial utilizada en la elaboración de piezas cerámicas.

A continuación se describen las características de cada uno de los equipos utilizados en el montaje experimental para el desarrollo del proyecto.

4.2.1. Mufla.

La mufla es un horno industrial de propiedad de la empresa CAOLINES LA PIRAMIDE LTDA, la cual alcanza una temperatura máxima de 1200 ° C, posee una tasa de calentamiento de 6 °C/min. en la primera rampa de temperatura la cual es entre 0 y 650 °C. (Ver Figura 4-4)



FIGURA 4-4. FOTO MUFLA.

El objetivo principal de la mufla es proporcionar la temperatura necesaria para realizar los ensayos, las especificaciones detalladas de la mufla se ilustran en la Tabla 4.3.

TIPO	HORNO INDUSTRIAL - MUFLA
MARCA	EVENHTAAT
RANGO DE TEMPERATURA	20 - 1300 °C
VOLTAJE	220
CONSUMO (W att)	2200
RESISTENCIAS	32 Omnios
DIMENSIONES	80 cm. Alto - 60 cm. Diámetro
FORMA	OCTOGONAL
CAPACIDAD	0,1 m3

TABLA 4-3. ESPECIFICACIONES DE LA MUFLA.

4.2.2. Control de Temperatura.

A continuación se ilustran los equipos utilizados para llevar el control y registro de la temperatura a lo largo del tiempo en los ensayos realizados.

4.2.2.1. Termocupla.

La termocupla es un dispositivo para medir temperatura, capaz de censar un rango de temperatura desde -78°C hasta 1800 ° C, tiene una longitud de 10 pulgadas con una conexión de rosca NPT de 1/8". La termocupla utilizada es tipo K. (Ver Figura 4-5)



FIGURA 4-5. FOTO TERMOCUPLA Y DATALOGGER.

4.2.2.2. Datalogger.

El Datalogger es un dispositivo para censar la temperatura en tiempo real, el cual se conectado al computador con un cable, se denomina Sistema Recorder Dual Channel para termocupla tipo K, los intervalos de programación son de dos segundos Interfase CARI S232, puerto serial, con una fuente de alimentación de 110 Voltios.

4.2.2.3. Software.

El Software es un programa denominado Barnstead 2.0, el cual funciona para Windows 98 o superior, este programa esta diseñado para almacenar las lecturas que registra la termocupla en tiempo de dos segundos y además grafica temperaturas versus tiempo momentáneamente y puede exportar a Excel todos los datos.

4.2.2.4. Pirómetro.

El pirómetro marca Omega tipo HH 12 permite lecturas en °C/°F cambiables. Este equipo es capaz de medir temperaturas a partir de la -50 a 1300°C (-58 a 2000°F),

utiliza termocupla tipo K. Este equipo es utilizado para realizar un seguimiento adicional a las temperaturas registradas por el software Barnstead 2.0. (Ver Figura 4-6).



FIGURA 4-6. FOTO PIRÓMETRO OMEGA TIPO HH 12^a

4.2.3. Montaje Experimental.

A continuación se ilustra el montaje experimental en el cual se detallan los equipos anteriormente descritos. (Figura No. 4-7)

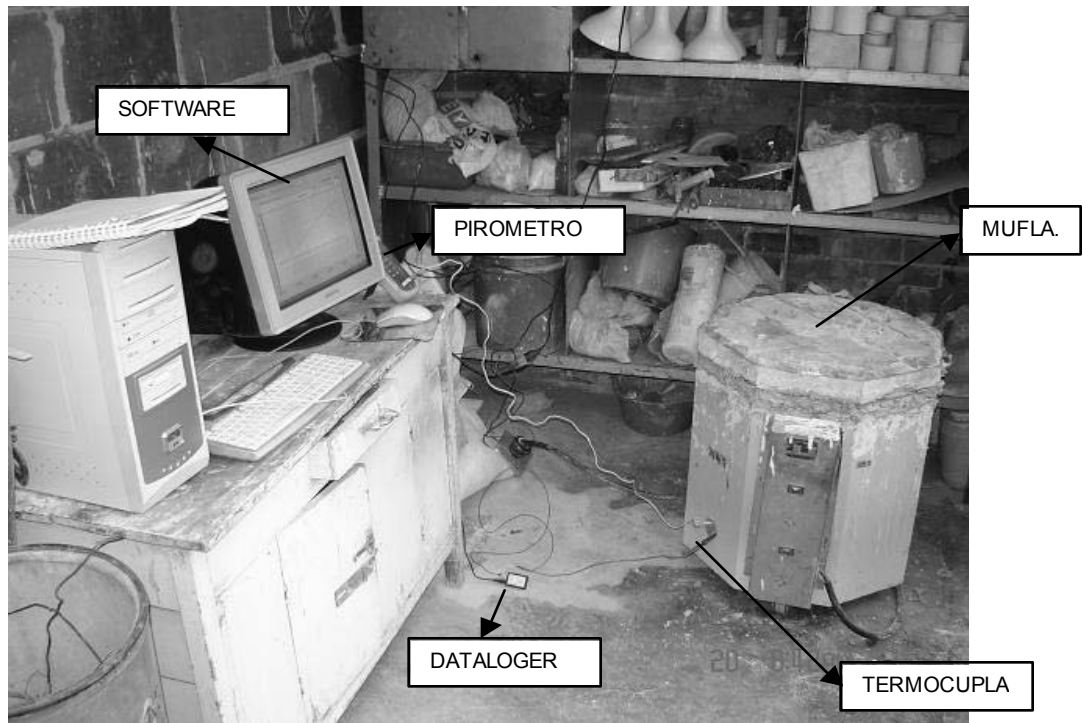


FIGURA 4-7. FOTO MONTAJE EXPERIMENTAL.

Debido a los altos costos asociados que conlleva la implementación de un montaje físico a escala que suministrara la versatilidad y robustez para el desarrollo de esta investigación, en el que se pudieran cambiar variables como las tasas de incremento de temperatura, tasas de sostenimiento en la temperatura pico, tasas de enfriamiento, recuperación de gases y temperaturas mayores a 1200°C, se desarrolló este estudio preliminar con una mufla inmodificable en la cual no se pudo desarrollar ninguno movimiento de las variables mencionadas anteriormente.

4.3. METODOS.

Para este proyecto se desarrollaron dos ensayos tipo, el primero consistió en realizar un ensayo base a 1200 °C con cada uno de los materiales por separado, con el fin de determinar las propiedades, características y comportamiento de cada uno de los lodos y aditivos, con el fin de realizar los ajustes necesarios a la matriz experimental, con respecto a los porcentajes de mezcla y a los tiempos de residencia en la temperatura pico. (Ver Figuras 4-8, 4-9, 4-10 y 4-11)

Teniendo en cuenta la presencia de óxidos fundentes en los lodos y las restricciones de este montaje físico a escala, se decidió únicamente realizar variaciones en las temperaturas máximas (1200°C, 1150°C y 1100°C) y en los porcentajes de mezcla (75/25 y 50/25).

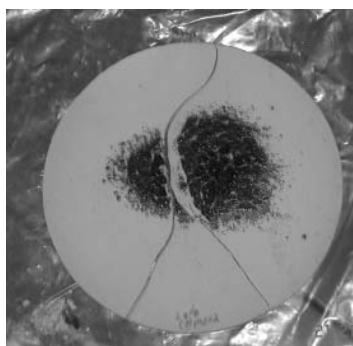


FIGURA 4-8. FOTO LODO COLMENA.

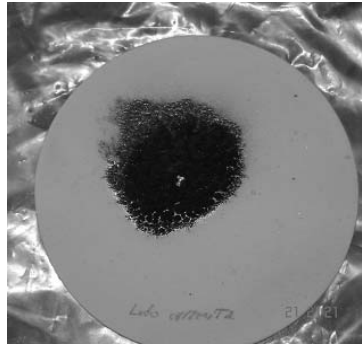


FIGURA 4-9. FOTO LODO COLCERAMICA.

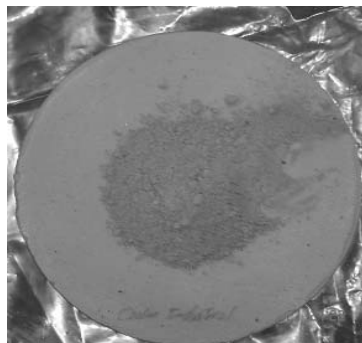


FIGURA 4-10. FOTO CAOLÍN INDUSTRIAL.



FIGURA 4-11. FOTO CAOLÍN CERÁMICO.

4.3.1. Homogenización de los Lodos.

Antes de realizar el ensayo base y de acuerdo a las características altas de humedad del lodo de la empresa TUBOS COLMENA, fue necesario realizar un batido, debido a

la separación de las fases que se produjo por la sedimentación presentada en los galones de presentación. (Ver Figura 4-12)



FIGURA 4-12. FOTO HOMOGENIZACIÓN LODO COLMENA.

En el laboratorio del CIMOC se solicitó la herramienta menor necesaria para realizar esta actividad, empezando por secar el lodo de la empresa COLCERAMICA a 120°C durante 24 horas, y el lodo de la empresa TUBOS COLMENA a 120°C durante 48 horas (Figura No. 4-13); siendo este último el de mayor contenido de humedad debido a que en la planta de tratamiento no cuentan con filtro prensa mientras que la empresa COLCERAMICA si cuenta con este sistema.



FIGURA 4-13. FOTO SECADO LODO COLMENA.

Después de este tiempo se realizó un triturado del material por medio de una varilla y se paso el lodo pulverizado por el tamiz # 16 de diámetro: 1.18 mm para obtener la muestra con la cual se realizo el ensayo de TCLP inicial. (Ver Figura 4-14)



FIGURA 4-14. FOTO LODO COLCERÁMICA – COLMENA (TAMIZADO).

4.3.2. Protocolo ensayo tipo.

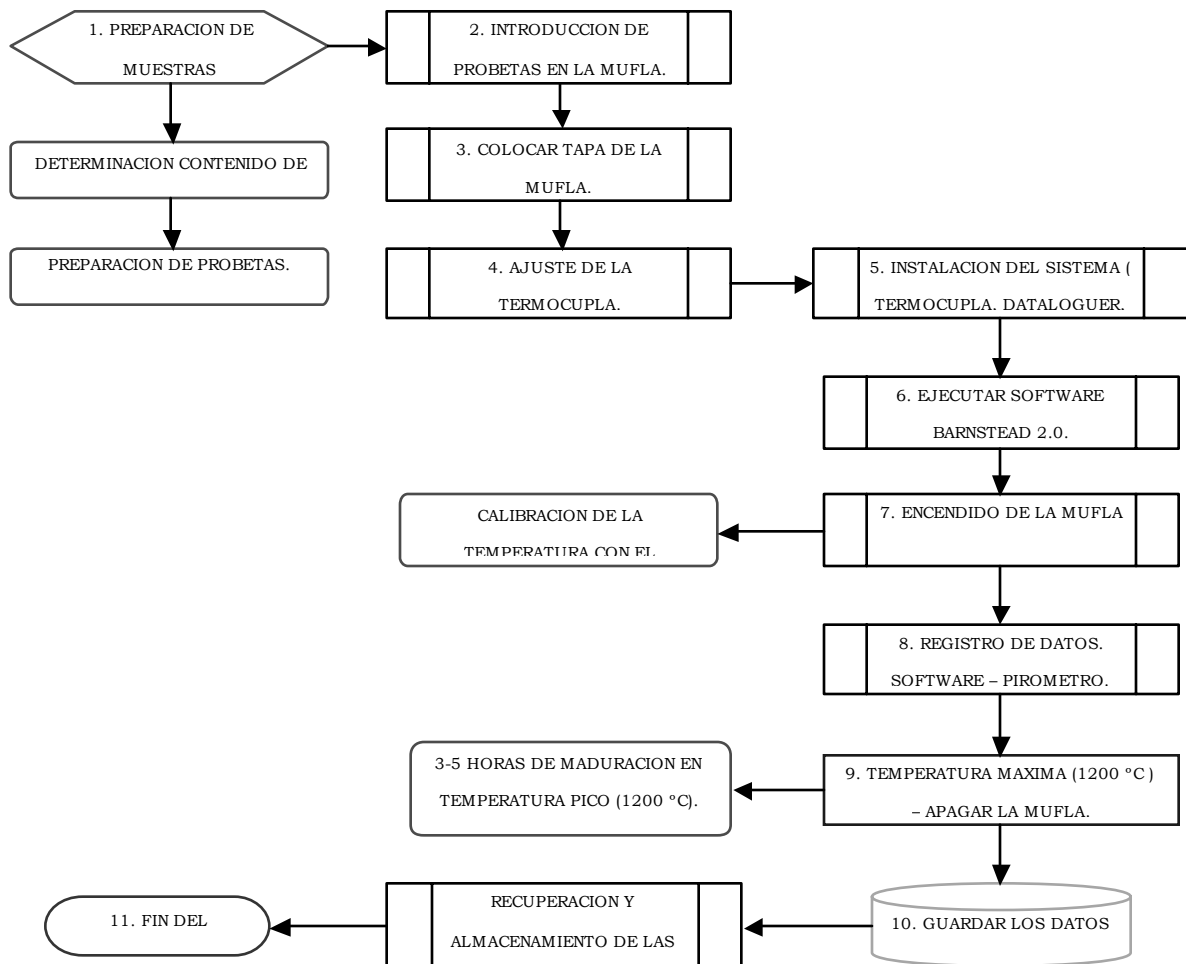
El ensayo tipo es un modelo que aplica para todos los experimentos que se proyectan realizar, la descripción de este modelo se explica a continuación:

1. Preparación de la Muestra.
 - a. Determinación del contenido de humedad del lodo. Secado de la muestra. (105°C durante 24 Horas). $W = \frac{\text{Peso húmedo} - \text{Peso Seco}}{\text{Peso húmedo}}$.
 - b. Preparación de probetas de acuerdo con los porcentajes de mezcla establecidos. (Ver Diagrama de flujo preparación de probetas)
2. Se introducen las probetas dentro de la mufla.
3. Se coloca la tapa de la mufla.

4. Se ajusta la termocupla a la mufla.
5. Se instala el sistema de cable que interactúa con la termocupla, el Dataloger, el cual se inserta a un puerto serial del computador.
6. Se arranca el programa Barnstead 2.0, para que el software empiece a registrar las lecturas de la termocupla.
7. Se enciende la Mufla y con el pirómetro se calibra a la temperatura deseada para el ensayo. (Para este caso se arranca las mediciones desde la temperatura ambiente).
8. Se toman lecturas de temperaturas registradas por el pirómetro, con el fin de hacer una comparación entre la temperatura de la mufla y la temperatura de la termocupla.
 - a. Se observan continuamente las lecturas que va registrando el programa cada 2 segundos.
9. Una vez la temperatura llegue a la máxima deseada del ensayo (1200 °C), de acuerdo al tipo de ensayo o se apaga la mufla o se debe dejar en esa temperatura pico por un tiempo aproximado de 4 horas según la matriz experimental.
10. Cuando la temperatura del reactor disminuya a los niveles deseados por ejemplo 40° C se graban los datos en el programa asignándole el nombre del ensayo, y se procede a abrir la mufla y recuperar la muestra.

11. Fin del ensayo experimental, las muestras son almacenadas en un lugar con condiciones ambientales estables. (Para ensayos posteriores repetir pasos del 1 al 10).

4.3.2.1. Diagrama de Flujo Ensayo Tipo.

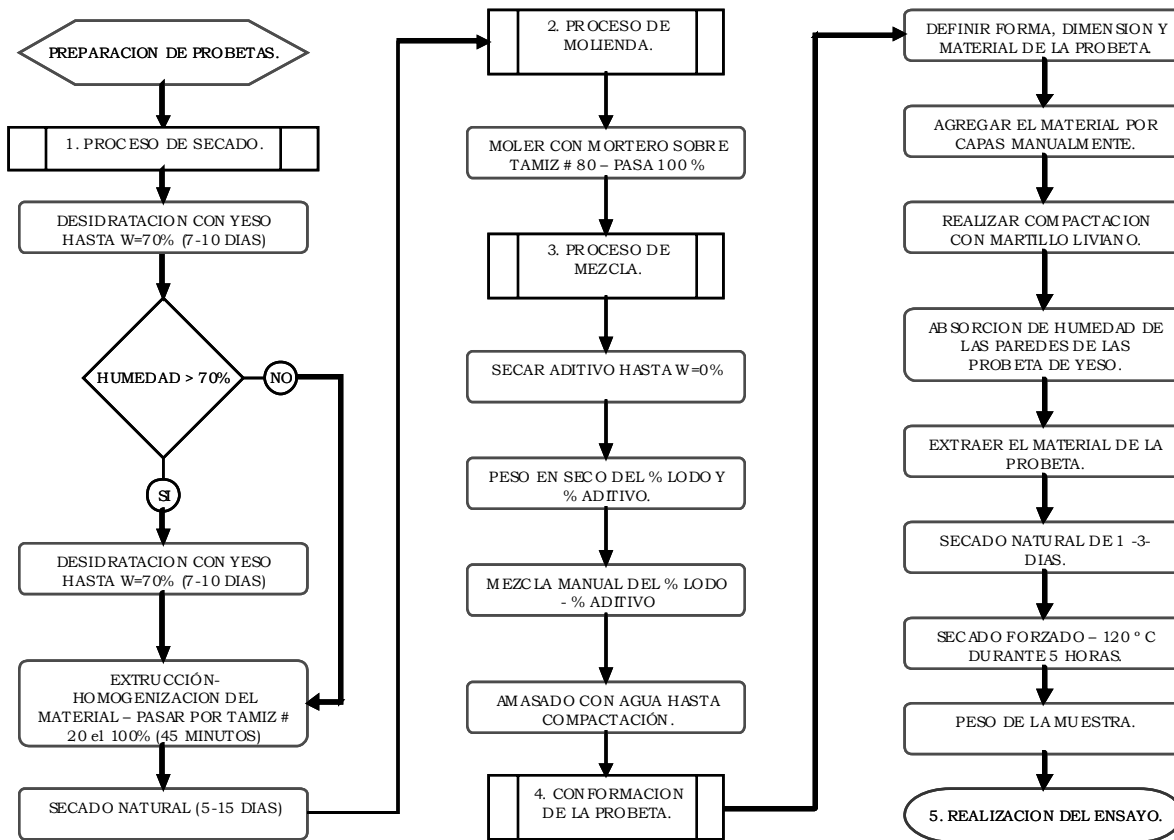


4.3.3. Protocolo de preparación de las probetas.

A continuación se describe el proceso por medio del cual se desarrolla la conformación de las probetas:

1. Proceso de secado, Se realiza una deshidratación con yeso del lodo hasta obtener una humedad aproximada del 70%, una vez obtenida esta humedad se desarrolla un proceso de extrucción - homogenización del material pasando el 100% por el tamiz # 20, y por ultimo se deja secar naturalmente.
2. Proceso de molienda, se muele el material y se pasa el 100 % por el tamiz # 80.
3. Proceso de mezcla, se seca el aditivo hasta alcanzar una humedad del 0 %, luego se miden los pesos secos del porcentaje de lodo (75 y 50%) de lodo y del porcentaje de aditivo (25 y 50%), acto seguido se realiza una mezcla manual del lodo con el aditivo, y para finalizar se hace una amasado con agua hasta obtener un material compacto.
4. Conformación de la probeta, se define la forma y dimensión de la probeta, se agrega la mezcla de material por capas manualmente, se realiza una compactación con un martillo liviano, se espera a que el contorno de la probeta de yeso realce una absorción de humedad de la muestra, se extrae el material de la probeta, se deja secar naturalmente, luego se hace un secado forzoso, y se pesa finalmente la muestra.
5. Realización del ensayo.

4.3.3.1. Diagrama de Flujo Preparación de probetas.



4.4. MATRIZ EXPERIMENTAL.

La matriz experimental se ajustó teniendo en cuenta las variables más determinantes dentro del proceso de vitrificación y de acuerdo a la infraestructura del montaje físico a escala. Dentro de las variables establecidas en la matriz experimental se encuentran los tipos de lodos, la temperatura máxima, el tipo de aditivo y el % de mezcla entre lodo y aditivo, las cuales fueron escogidas por ser las más representativas después de realizar la prueba base a 1200 °C de cada uno de los materiales por sí solo y además por las limitaciones del montaje físico a escala. De acuerdo con estos resultados se determinó trabajar con el caolín cerámico como aditivo por tener un punto de fusión bajo cercano a 1100 °C, además se programaron las pruebas de la siguiente manera: (1) realización de una prueba a 1200 °C en una

mezcla 75% de lodo y 25 % de aditivo; (2) realización de una prueba a 1100 °C en una mezcla igual; (3) realización de una prueba a 1150 °C en una mezcla igual; (4) realización de una prueba a 1150 °C de un 100% de cada material; (5) realización de una prueba a 1150 °C en una mezcla de 50% lodo y 50% aditivo (Tabla 4-4).

ENSAYO	RESIDUO TOXICO	TASA DE CALENTAMIENTO	TASA DE PERMANENCIA	TASA DE ENFRIAMIENTO	ADITIVO	MEZCLA
1	COLCERAMICA	3,5 °c / min	1200 °C	Ambiente	CAOLIN	75%-25%
2	COLMENA	3,5 °c / min	1200 °C	Ambiente	CAOLIN	75%-25%
3	COLCERAMICA	3,5 °c / min	1150 °C	Ambiente	CAOLIN	75%-25%
4	COLMENA	3,5 °c / min	1150 °C	Ambiente	CAOLIN	75%-25%
5	COLCERAMICA	3,5 °c / min	1100 °C	Ambiente	CAOLIN	75%-25%
6	COLMENA	3,5 °c / min	1100 °C	Ambiente	CAOLIN	75%-25%
7	COLCERAMICA	3,5 °c / min	1150 °C	Ambiente	CAOLIN	50%-50%
8	COLMENA	3,5 °c / min	1150 °C	Ambiente	CAOLIN	50%-50%

TABLA 4-4. COMPOSICIÓN DE LA MATRIZ EXPERIMENTAL.

4.5. ENSAYOS DE LABORATORIO.

Dentro de las técnicas para determinar si un residuo es peligroso la Environmental Protection Agency presenta diferentes técnicas para la adecuada identificación y caracterización de estos residuos. Para la aplicación de estas normas hay que tener en cuenta sus características (toxicidad, reactividad, corrosividad, inflamabilidad). Para el caso de esta investigación se centrará el análisis en la toxicidad y corrosividad de los lodos provenientes de las planta de tratamiento de aguas residuales con alto contenido de metales pesados.

La evaluación de la eficiencia del proceso de vitrificación bajo las condiciones establecidas, se realizó con base en los siguientes análisis de laboratorio: (1) prueba de TCLP que determina la movilidad de los residuos contaminantes al medio externo; (2) ensayo de tanque que determina la corrosividad de un residuos peligroso; (3) determinación del grado de toxicidad dependiendo de los valores de pH; (4) difracción de rayos X en la cual se indica la formación de nuevos compuestos que inmovilicen los metales pesados. Una vez analizadas estas pruebas y ensayos se

determinaron las reducciones de volumen de los productos y el comportamiento toxicológico y corrosivo enmarcado dentro de la normatividad ambiental vigente.

4.5.1.1. TCLP.

Dentro de las técnicas para determinar si un residuo es peligroso la EPA en su norma SW-846 presenta diferentes técnicas para la adecuada identificación y caracterización de estos residuos. Para la aplicación de estas normas hay que tener en cuenta sus características (toxicidad, reactividad, corrosividad, inflamabilidad). Para el caso de este estudio se centrara en el análisis de la toxicidad de acuerdo a los residuos seleccionados. (Ver Figura 4-15)



FIGURA 4-15. EQUIPO EXTRACTOR DE TCLP.

o Toxicidad:

- o Método 1311: Procedimiento de lixiviación para la Caracterización de Toxicidad (TCLP).

- o Metales (adsorción atómica tradicional – Generación de hidruros).

Método Standard: 3500-B (3111 B), Método Standard: 3114 B

(Ver Figura 4-16).

Los metales que se analizaran por medio de este ensayo son: Cromo (Cr) y Hierro (Fe).



FIGURA 4-16. ESPECTRÓMETRO DE ABSORCIÓN ATÓMICA.

4.5.1.2. Ensayo de Tanque (Ensayo de Difusión).

Después de realizar las pruebas de vitrificación establecidas de acuerdo a la matriz experimental, se realizó a los lodos los siguientes ensayos: (1) ensayo denominado: Proceso de lixiviación para materiales de desecho monolíticos “Ensayo de Tanque” (Ensayo de difusión) el cual tiene como propósito evaluar la característica de corrosividad de un monolito por pH. Adicionalmente se realizó un procedimiento aproximado al Ensayo Tanque, en el cual para valores de diferentes pH (2, 4, 6, 8) y para las siguientes muestras (lodo colcerámica puro, lodo colmena puro, lodo colcerámica en mezcla 75% - 25% a 1200 °C y lodo colmena en mezcla 75% - 25% a 1200 °C) se realizó la lectura de los metales Cr y Fe. No se realizó el Ensayo Tanque para las demás quemas realizadas debido a que no se evidencio ninguna muestra de cristal amorfo.

El método ensayo tanque es una traducción parcial de la norma EANEN 7375:2004 de la Agencia Ambiental del Reino Unido, basado en la traducción de la Norma Holandesa NEN 7375 (2004).

El propósito de este ensayo es determinar la lixiviación de componentes inorgánicos en estado monolítico bajo condiciones aerobias, para de esta manera determinar si el residuo tiene características corrosivas. (Ver Figura 4-17).



FIGURA 4-17. TANQUES UTILIZADOS EN EL ENSAYO DE DIFUSIÓN.

4.5.1.3. Cristalografía.

Se realizaron pruebas de cristalografía en un Difractor de rayos X de polvo, con el fin de determinar la relación entre la composición química, la disposición de los átomos y las fuerzas de enlace entre estos, determinando de esta forma la presencia de nuevos componentes en la formación cristalina. La mayoría de los minerales adoptan formas cristalinas cuando se forman en condiciones favorables. La cristalografía es el estudio del crecimiento, la forma y la geometría de los cristales.

La disposición de los átomos en un cristal puede conocerse por difracción de los rayos X. La química cristalográfica estudia la relación entre la composición química,

la disposición de los átomos y las fuerzas de enlace entre éstos. Esta relación determina las propiedades físicas y químicas de los minerales.

De acuerdo con lo anterior se realizara una prueba de cristalografía en un difractor de rayos X (XRD) de polvo, con el fin de determinar la presencia de componentes en la formación cristalina. (Ver Figura 4-18)



FIGURA 4-18. DIFRACTOR DE RAYOS X DE POLVO.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

A continuación se ilustran las 8 diferentes pruebas sin contar la prueba base, que se realizaron en desarrollo de esta investigación. En adelante se denominara Lodo 1 al lodo de la empresa COLCERÁMICA y lodo 2 al de la empresa COLMENA (Tabla 5-1).

No prueba	Material	Temperatura Maxima (°C)	Mezcla (%)
1	Lodo 1	1200	75 - 25
2	Lodo 2	1200	75 - 25
3	Lodo 1	1100	75 - 25
4	Lodo 2	1100	75 - 25
5	Lodo 1	1150	75 - 25
6	Lodo 2	1150	75 - 25
7	Lodo 1	1150	50 - 50
8	Lodo 2	1150	50 - 50

TABLA 5-1. CARACTERÍSTICAS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS.

5.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA.

Se determinaron algunas características físicas de los lodos y del aditivo utilizado, las cuales se ilustran en la tabla 5-2.

Características	Lodo 1	Lodo 2	Caolin Cerámico
Humedad Natural (%)	10,52	93,2	8
Densidad Máx seca (Ton/m ³)	0,88	1,07	2,73
Color	Verde	Café oscuro	Habano

TABLA 5-2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS LODOS Y ADITIVOS.

5.2. RESULTADOS TCLP.

Una vez determinados los valores de humedad y densidad seca de cada uno de los lodos y de los dos aditivos iniciales (caolín cerámico, caolín industrial), se realizó la prueba de TCLP a cada una de las muestras sin tratar en base seca, con el fin de obtener la concentración en mg/kg y en mg/L de Cr y Fe en el lixiviado obtenido. (Tabla 5-3)

Metales	Lodo 1	
	Concentración Total (mg/Kg)	TCLP (mg/L)
Cr	103183,5	<0,01
Fe	783.7	0.28

TABLA 5-3. COMPOSICIÓN QUÍMICA OBTENIDA POR MEDIO DEL ENSAYO DE TCLP Y DETERMINACIÓN DE METALES TOTALES REALIZADOS AL LODO 1 PREVIO AL TRATAMIENTO.

Metales	Lodo 2	
	Concentración Total (mg/Kg)	TCLP (mg/L)
Cr	64,2	<0,01
Fe	216666	0.63

TABLA 5-4. COMPOSICIÓN QUÍMICA OBTENIDA POR MEDIO DEL ENSAYO DE TCLP Y DETERMINACIÓN DE METALES TOTALES REALIZADOS AL LODO 2 PREVIO AL TRATAMIENTO.

En las tablas 5-3 y 5-4 se observa que las concentraciones reportadas por medio del ensayo de TCLP son muy bajas, razón por la cual se realizó una lectura de metales con el fin de comprobar la existencia de Cr y Fe en los lodos. Una vez realizada esta prueba se comprobó que los lodos tienen unos contenidos importantes de Cr y Fe debido a los procesos que se desarrollan en cada una de esas industrias.

Metales	Caolin Industrial	
	TCLP (mg/L)	TCLP (mg/L)
Cr	0,02	0.80
Fe	0.84	0.09

TABLA 5-5. COMPOSICIÓN QUÍMICA OBTENIDA POR MEDIO DEL ENSAYO DE TCLP A LOS ADITIVOS.

En la tabla 5-5 se ilustran los resultados de las concentraciones reportadas por medio del ensayo de TCLP para los aditivos, esto se realizó con el fin de determinar si existe algún aporte importante del aditivo respecto a las concentraciones de Cr y Fe que se prevén existen en los lodos. Como era de esperarse la concentración de Cr y Fe en los aditivos son muy bajas.

5.2.1. Normatividad TCLP.

En el caso de los metales pesados, la normativa internacional aplicable define los límites de toxicidad medidos en los lixiviados del TCLP (Tabla 5-6. EPA 40CFR 261.24., EPA 1997). De acuerdo a esta tabla los residuos que tengan concentraciones de metales en los lixiviados extraídos en el TCLP, mayores a las ilustradas en esa tabla son considerados como residuos peligrosos.

Metales	TCLP Limite de concentración (mg/L)
Cr	5.0
Fe	30.0*

TABLA 5-6. LIMITES DE CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EXTRAÍDOS DEL TCLP (EPA).
U.S EPA 40CFR 261.24.
*U.S EPA (1997)

Teniendo en cuenta que las concentraciones reportadas en los TCLP iniciales ilustradas en las tablas 5-4 y 5-5, se podría indicar que estos se encuentran por debajo del límite máximo permisible según la EPA, por lo tanto no estarían dentro del rango de los residuos considerados como peligrosos; sin embargo, debido a la procedencia y características de las industrias que producen este tipo de residuos, se continúa con el desarrollo de las pruebas, con miras a comprobar la eficiencia de la tecnología de vitrificación aplicada a este tipo de residuos.

5.3. PÉRDIDAS POR CALCINACIÓN.

Luego de realizar las pruebas bases en cuanto a la determinación de la concentración de metales pesados (Cr, Fe) se realizaron unas pruebas preliminares de pérdidas por calcinación las cuales se efectuaron a una temperatura de 1000°C. y se realizaron a cada una de las muestras por separado (Tabla 5-7).

Prueba	Vol. Inicial (cm3)	Vol. Final (cm3)	Perdidas por calcinación (%)
1	145,44	44,63	69,32
2	145,44	50,81	65,06
3	146,69	86,79	40,84
4	146,69	86,64	40,94
5	142,00	101,82	28,30
6	142,00	113,83	19,84
7	148,77	112,96	24,08
8	148,77	117,56	20,98

TABLA 5-7. PÉRDIDAS POR CALCINACIÓN.

De acuerdo a los resultados obtenidos e ilustrados en la tabla 5-7, se puede inducir que el material que obtuvo una mayor reducción de volumen es el lodo 1 a 1200°C, debido a la gran cantidad de óxidos que se volatilizan en el proceso térmico. Desafortunadamente no se pudo realizar una recuperación de estos gases para realizar un análisis de las concentraciones de NOx y SOx debido a que el montaje físico a escala no permitía modificaciones.

Adicionalmente de los resultados ilustrados en la tabla 5-7 se puede apreciar que hay una gran reducción de volumen a mayor temperatura de ensayo y a menor porcentaje de mezcla como lo demuestran las pruebas 5 y 6 con respecto a la 7 y 8.

5.4. TASAS DE TEMPERATURA.

Con respecto al funcionamiento del montaje experimental, por medio del Software Barnstead 2.0 el cual reporta los datos obtenidos en cada una de las pruebas realizadas, se determinó el comportamiento del montaje referente a la información teórica del proceso de vitrificación. A continuación se ilustra el comportamiento de la temperatura a lo largo del tiempo, en las pruebas realizadas a temperaturas de 1100 °C, 1150 °C y 1200 °C (Figura 5-1).

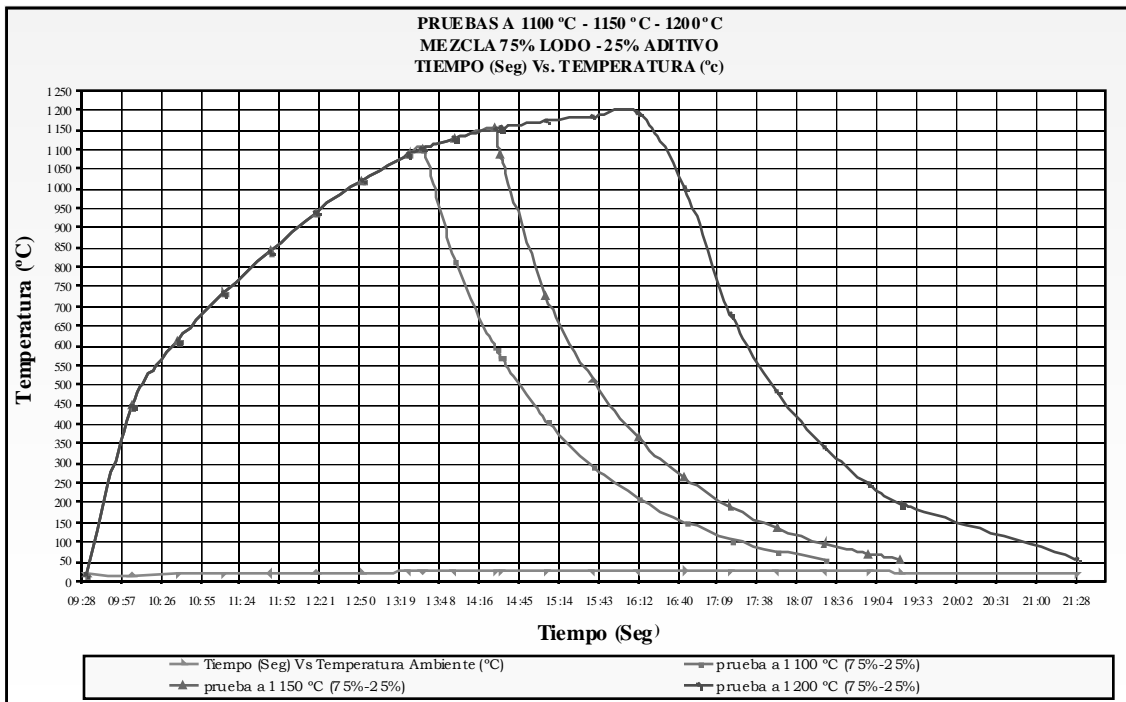


FIGURA 5-1. GRÁFICA TIEMPO (SEG) VS TEMPERATURA (°C) PRUEBAS A 110°C, 1150°C Y 1200°C

De la gráfica anterior se puede extraer que el comportamiento del sistema es muy semejante en todas las corridas y adicionalmente que independiente de la temperatura máxima de llegada, la tasa de incremento temperatura es constante, calculada aproximadamente en 3,5 °C/min para todas las pruebas. La gráfica que más se extiende a la derecha es la de la prueba de 1200 °C la intermedia la de 1150 °C y la de la izquierda la de 1000 °C.

Con respecto al comportamiento de las tasas de temperatura cabe resaltar que entre 0°C y 300 °C aproximadamente se efectúa una etapa de volatilización y pérdida de agua, entre 300°C y 1000°C aproximadamente se efectúa una etapa de oxidación de la materia orgánica y de carbonatos y se empiezan a formar SOx y entre 1000°C y 1600°C se desarrolla la formación de escoria, NOx y volatilización de metales; esto nos permite indicar que de acuerdo a las temperaturas a las cuales se realizaron las pruebas, en todos los casos se desarrollo la pérdida de agua, la oxidación de materia orgánica y carbonatos y los comienzos de formación de SOx. (Elias Xavier, 2002)

5.5. COMPOSICIÓN VITREA.

Una vez realizadas las pruebas se observó, que solamente en el caso de las pruebas 1 y 2 se produjo una vitrificación de acuerdo a la estructura de la muestra, la cual cuenta con una resistencia apreciable y además con un brillo típico de este tipo de procesos (Figura 5-2 y 5-3).

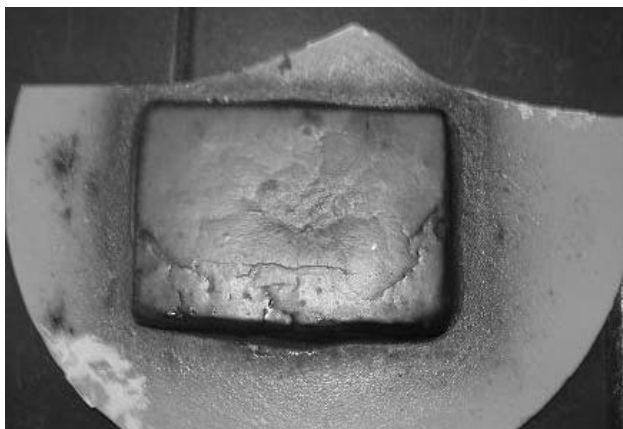


FIGURA 5-2. FOTO LODO COLCERÁMICA VITRIFICADO A 1200°C – PRUEBA NO 1.



FIGURA 5-3. FOTO LODO COLMENA VITRIFICADO A 1200°C – PRUEBA No 2.

Como se puede observar en las figuras 5-2 y 5-3, el lodo de colmena perdió su forma, lo cual indica que el punto de fusión para este lodo en esa mezcla 75-25 es menor a 1200 °C, mientras que el lodo de colcerámica conservó su forma, indicando que su punto de fusión para esa mezcla está muy cercano a los 1200 °C.

De todas las pruebas realizadas las únicas que por inspección visual llegaron al punto de vitrificación son las realizadas a 1200 °C, las pruebas restantes si bien reflejaron un material sólido, este es poco resistente, en el cual no se observa ninguna formación vitrificada (Figura 5-4 a 5-9).

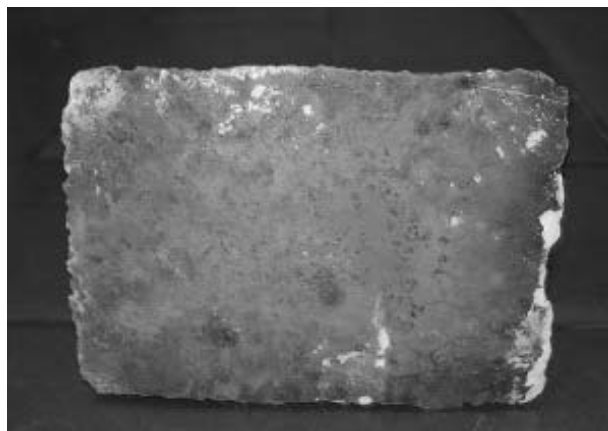


FIGURA 5-4. FOTO LODO COLCERAMICA A 1150°C – PRUEBA No 3.

Estudio preliminar del proceso de Vitrificación de residuos peligrosos por vía térmica.

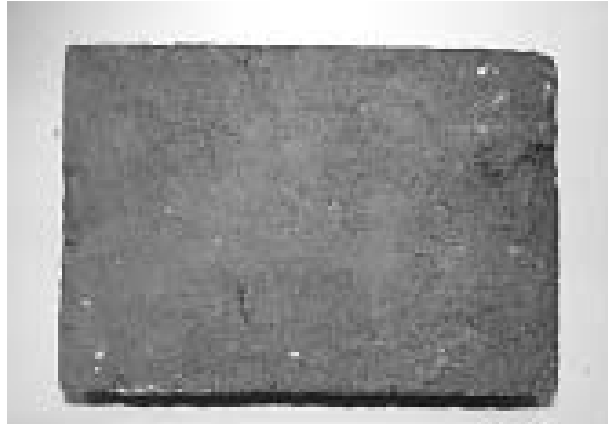


FIGURA 5-5. FOTO LODO COLMENA A 1150°C – PRUEBA NO 4.

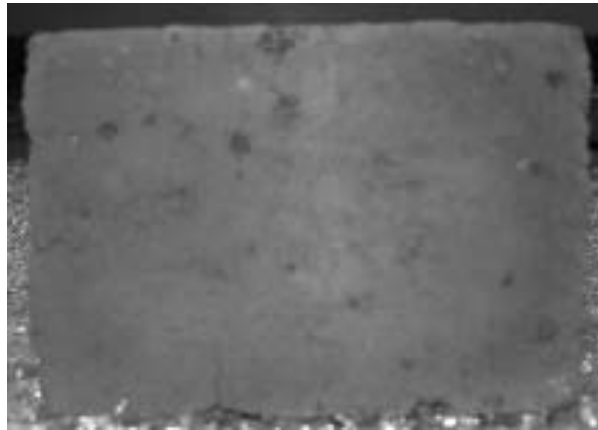


FIGURA 5-6. FOTO LODO COLCERAMICA A 1100°C – PRUEBA NO 5.



FIGURA 5-7. FOTO LODO COLMENA A 1100°C – PRUEBA NO 6.

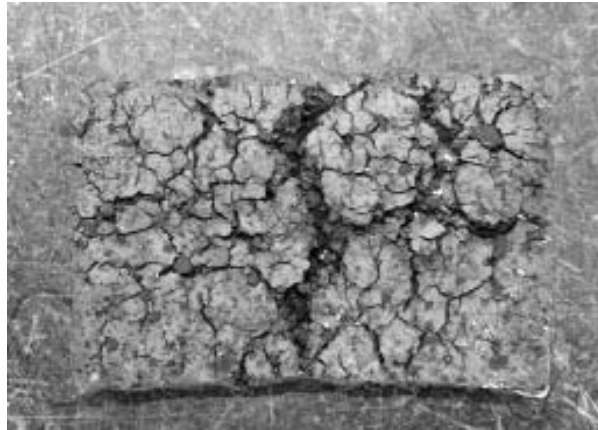


FIGURA 5-8. FOTO LODO COLCERAMICA A 1150°C – PRUEBA NO 7.



FIGURA 5-9. FOTO LODO COLMENA A 1100°C – PRUEBA NO 8.

5.6. ENSAYOS DE LIXIVIACION Y ANALISIS QUIMICO.

Teniendo en cuenta que los ensayos de TCLP simulan condiciones de un relleno sanitario, en el cual el residuos está sometido al contacto con ácidos grasos, se decidió cambiar esta prueba por la realización aproximada de un Ensayo de Tanque en el cual se simulan condiciones de rellenos sanitario sino de intemperie (lluvia ácida), por lo cual se determinó para diferentes valores de pH la concentración en mg/L del metal analizado según fuese la muestras tratada, todo esto con el fin de

determinar el comportamiento del contaminante con respecto al pH y adicionalmente su potencial característica de corrosividad.

De acuerdo con lo anterior se realizó una aproximación al método Tanque, basado en la norma Holandesa NEN7345, en el cual para los siguientes valores de pH(2,4, 6, 8) de las muestras bases de lodos y las vitrificadas a 1200 °C se realizó la lectura de metales Cr y Fe, reportando los siguientes resultados (Tabla 5-8 y 5-9).

pH	Concentración (Cr)	Concentración (Cr)
	Lodo 1 sin tratar (mg/L)	Lodo 1 tratado (mg/L)
2	0,971	0,216
4	0,133	0,09
6	0,017	<0,01
8	1,889	<0,01

TABLA 5-8. CONCENTRACIONES DE CR PARA DIFERENTES VALORES DE PH EN LAS MUESTRAS BASES Y VITRIFICADAS.

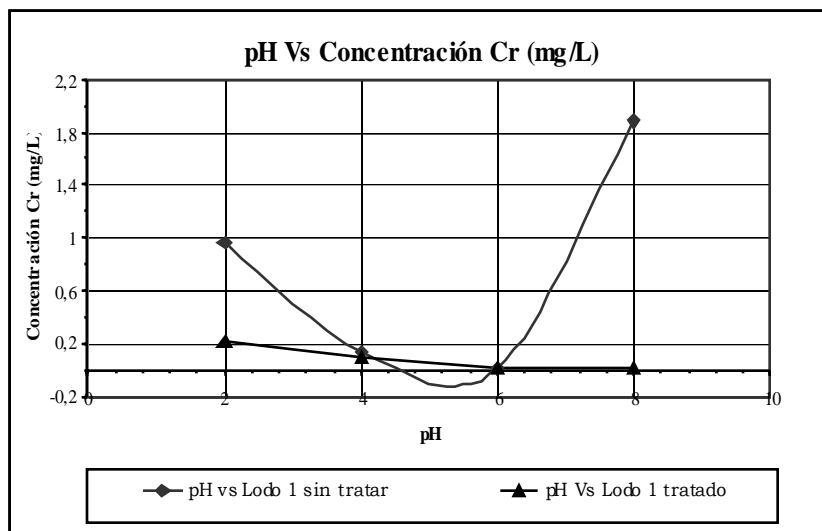


FIGURA 5-10. GRAFICA PH VS CONCENTRACIÓN CR (MG/L)

Estudio preliminar del proceso de Vitrificación de residuos peligrosos por vía térmica.

pH	Concentración (Fe)	
	Lodo 2 sin tratar (mg/L)	Lodo 2 tratado (mg/L)
2	0,42	29,52
4	0,74	1,14
6	0,22	0,42
8	0,22	0,13

TABLA 5-9. CONCENTRACIONES DE FE PARA DIFERENTES VALORES DE PH EN LAS MUESTRAS BASES Y VITRIFICADAS.

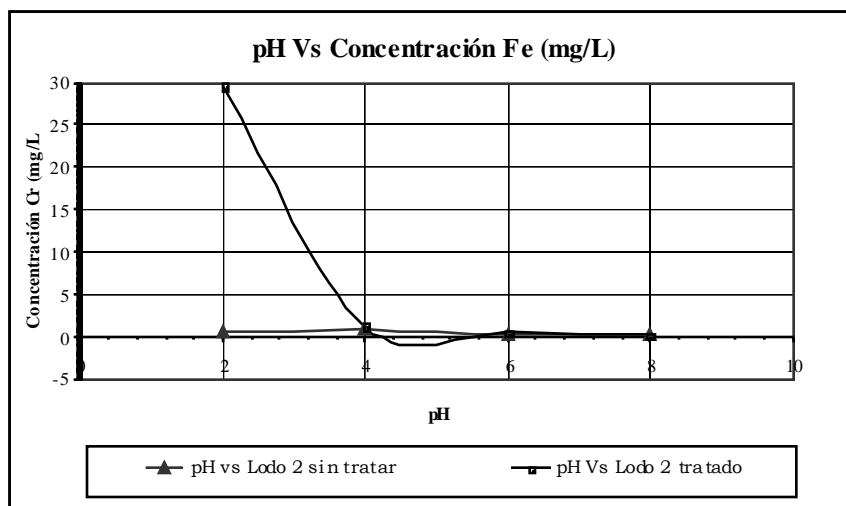


FIGURA 5-11. GRAFICA PH VS CONCENTRACIÓN FE (MG/L)

Con respecto a la figura 5-10 se puede observar que para el caso de las muestras vitrificadas, que las concentraciones de Cr bajan en la medida en que el pH aumenta, mientras que para la muestras de lodo sin tratar no tienen un tendencia clara. En la figura 5-11 se observa un comportamiento muy diferente, debido a que las concentraciones de hierro de la muestra vitrificada son mayores que la de la muestra base, sin embargo muestran la misma tendencia de disminuir la concentración a mayor pH.

5.7. ENSAYO DIFUSION.

Por otra parte se realizó el proceso de lixiviación para materiales de desecho monolítico (Ensayo Tanque – Ensayo de Difusión). Dentro de los propósitos de este ensayo están principalmente determinar la lixiviación de componentes inorgánicos de materiales moldeados y monolíticos bajo condiciones aerobias, y evaluar la característica de corrosividad por pH de estos residuos.

La realización de este ensayo es de 64 días, pero se acató la sugerencia del método de realizar una evaluación corta a 4 días, la cual indica resultados aceptables (Tabla 5-10).

			Prueba 1150 °C 75-25		Prueba 1200 °C 75-25		T
			Lodo 1	Lodo 2	Lodo 1	Lodo 2	
Periodo (n)	Tiempo (días)	Tiempo (Hr)	pH	pH	pH	pH	°C
0	0	0	4,77	5,1	5,02	4,55	19
1	0,25	6	5,35	5,97	5,18	4,62	19
2	1	24	5,78	6,39	6,12	5,77	20
3	2,25	54	5,96	7,14	6,99	6,52	19
4	4	96	6,37	8,63	8,21	8,04	20

TABLA 5-10. VALORES DE PH PARA DIFERENTES TIEMPOS.

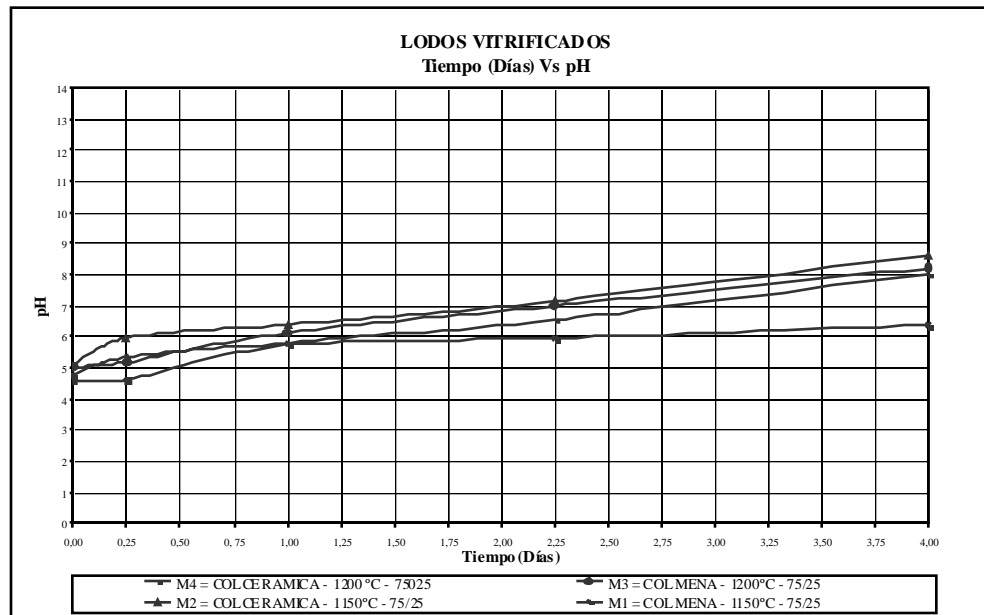


FIGURA 5-12. GRAFICA TIEMPO (DÍAS) VS PH.

De los datos registrados en la tabla 5-10 y en la figura 5-12 se puede concluir que las muestras vitrificadas a las que se les realizó esta prueba se encuentran en rangos de pH de 4,55 hasta 8,63 por lo cual se puede concluir que estos residuos no son corrosivos al ser tratados como monolitos y se pueden disponer en un relleno sanitario sin ningún problema, ya que de acuerdo a la EPA, un residuo es corrosivo si es acuoso y presenta un pH menor a 2 o mayor igual 12,52.

5.8. DIFRACCION DE RAYOS X.

Para finalizar se realizaron unas difracciones de rayos X, con el fin de terminar de determinar los nuevos componentes formados en la matriz amorfa de las muestras. Como se mencionó anteriormente las únicas muestras que lograron un proceso mediano de vitrificación, fueron en las que se realizó la prueba a 1200 °C con una mezcla 75-25, a estas muestras se les realizó la lectura por medio del difractor de polvo el cual reportó los datos que se observan en las figuras 5-13, 5-15 se observan las graficas reportadas por el software de difracción de rayos X y en las figuras 5-14

Estudio preliminar del proceso de Vitrificación de residuos peligrosos por vía térmica.

y 5-16 los graficados mediante los datos importados a Excel de los lodos vitrificados a 1200°C de colcerámica y corona respectivamente.

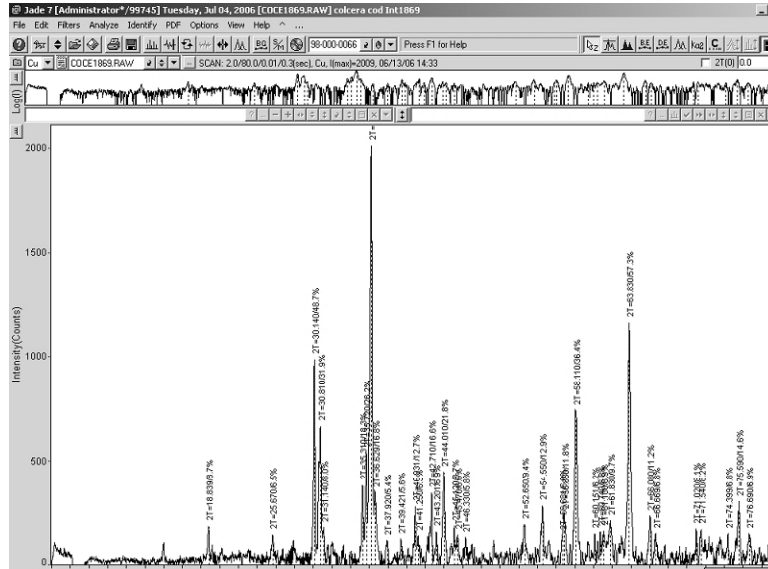


FIGURA 5-13. DIAFRCTOGRAMA – COLCERÁMICA

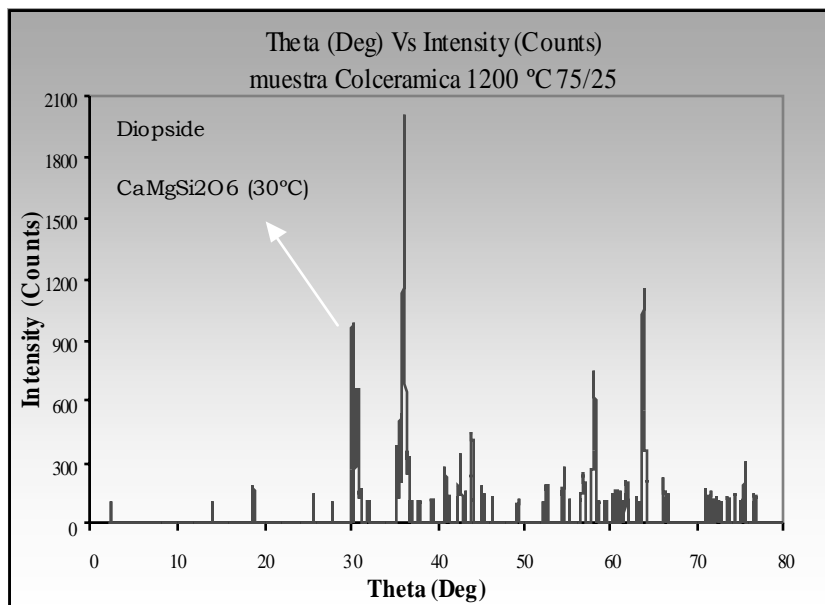


FIGURA 5-14. DIAFRCTOGRAMA – MUESTRA DE COLCERÁMICA A 1200 °C

Estudio preliminar del proceso de Vitrificación de residuos peligrosos por vía térmica.

La figura 5-16 solo revela la presencia de Hematita Fe_2O_3 pero en muy bajas proporciones, con una mayor presencia sobre los 35°C. El resultado también muestra unas presencias muy pequeñas de Diopsita $CaMgSi_2O_6$ y de anidrita $CaSO_4$, las cuales no se tienen en cuenta y se ilustran en la gráfica 5-14.

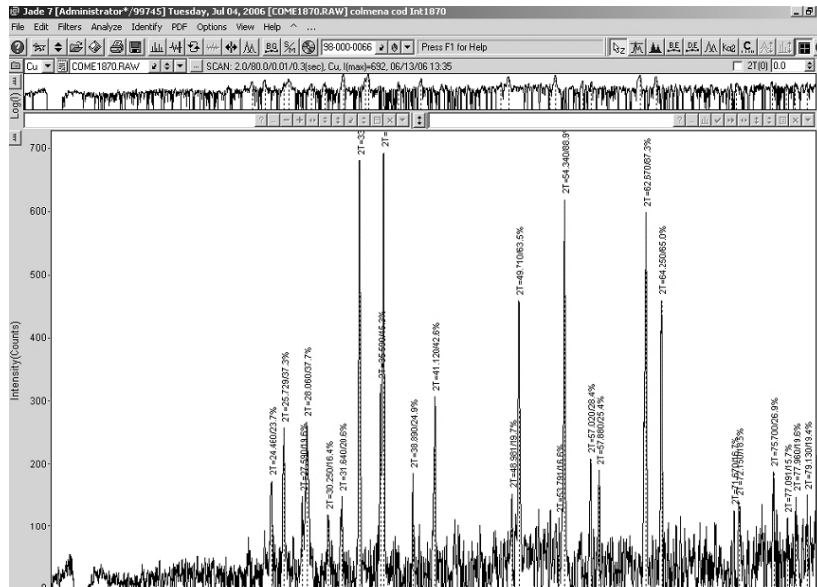


FIGURA 5-15. DIAFRACTOGRAMA – COLMENA.

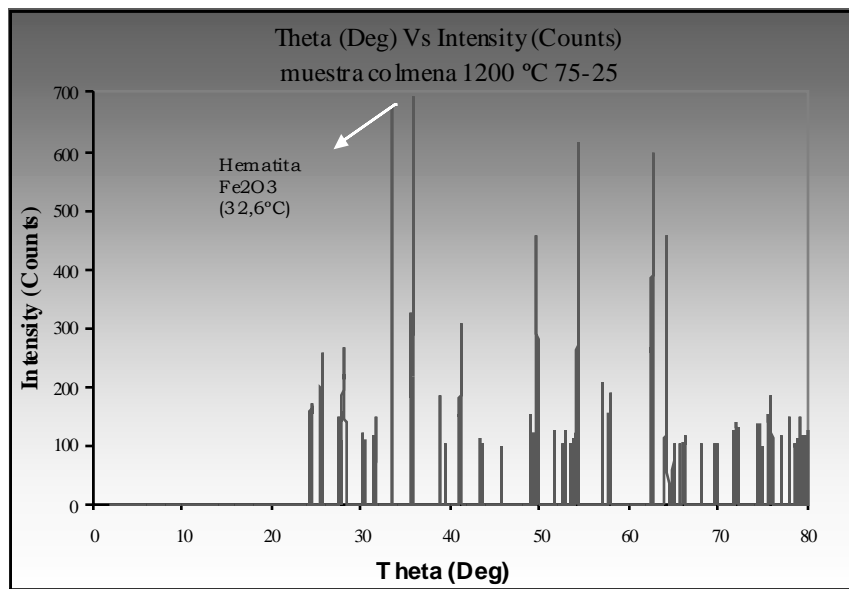


FIGURA 5-16. DIAFRACTOGRAMA – MUESTRA DE COLMENA A 1200°C

Con respecto a las Figuras 5-13 y 5-14 las cuales corresponden a la muestra vitrificada de colcerámica, el Difractor de Rayos X, no identifica ninguna presencia estable de alguna composición y simplemente reporta algunas señales producto de ruido o de otros factores externos.

5.9. USO POTENCIAL DE LOS PRODUCTOS VITRIFICADOS.

Con el fin de determinar usos potenciales del material vitificado y una vez definida la no toxicidad no corrosividad de estos productos, se desarrollo una prueba con las muestra vitrificadas de colmena y colcerámica a 1200°C , la cual consistió en realizar un triturado del producto obtenido y mezclar con un esmalte cerámico comercial en proporción 15% esmalte y 85% material vitificado, del cual se obtuvo unas texturas atractivas para la industria cerámica, así como colores verdosos definidos por los contenidos de cromo y cafés definido por la presencia de hierro los cuales se observan en la figura 5-17, 5-18, 5-19 y 5-20.

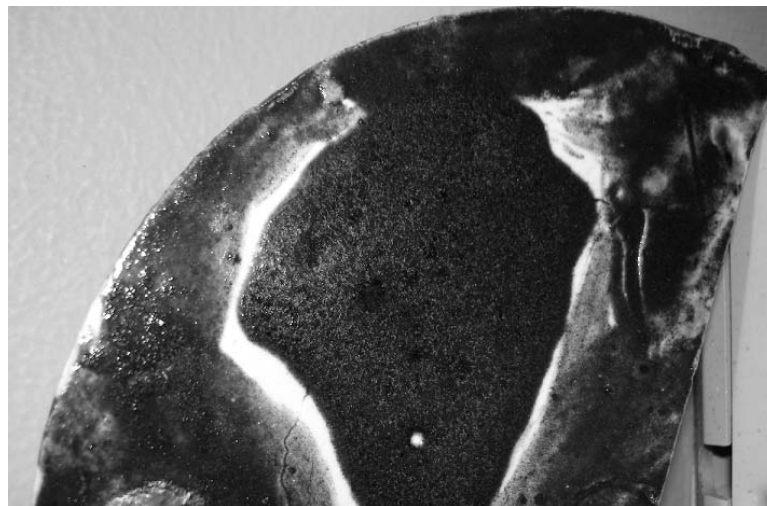


FIGURA 5-17. ESMALTE CERÁMICO LODO VITRIFICADO COLMENA.



FIGURA 5-18. ESMALTE APLICADO A CERÁMICA DEL LODO VITRIFICADO COLMENA A 1200°C.

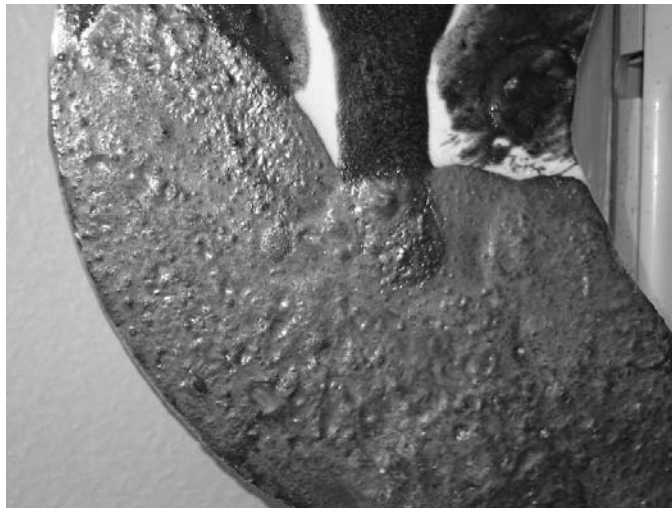


FIGURA 5-19. ESMALTE CERÁMICO LODO VITRIFICADO COLCERÁMICA.



FIGURA 5-20. ESMALTE APLICADO A CERAMICA DEL LODO VITRIFICADO COLMENA A 1200°C.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

- Los datos obtenidos por el ensayo de TCLP realizado a las muestras de lodos sin tratar, no refleja la realidad de las concentraciones de estos tipos de lodos, ya que es evidente que en estas industrias, se utilizan altas concentraciones de estos metales como materia prima dentro de la elaboración de sus procesos.
- El montaje experimental permitió desarrollar un proceso de vitrificación aproximado al registrado bibliográficamente por varios autores, sin embargo no se evidenció variaciones importantes de variables que pueden determinar diferencias en las muestras vitrificadas.
- El proceso de vitrificación evidentemente desarrolla una reducción de volumen importante, directamente proporcional a la temperatura, alcanzando valores hasta del 60%.
- Solo se alcanzó a evidenciar una matriz vitrificada en las muestras que alcanzaron temperaturas de 1200 °C y con una mezcla de 75/25. El resto de muestras solo experimentaron un proceso de aglomeración pero no alcanzaron el punto de vitrificación, debido a que los óxidos presentes en los lodos presentan puntos de fusión cercanos a los 1200°C.
- Para las muestras vitrificadas a 1200 °C, no se justificó realizar un sostenimiento en la temperatura pico, debido a que las muestras una vez llegan al punto de fusión establecen unas características definidas.
- El caolín cerámico desarrolló un papel importante como material aglomerante y como aportante de sílice dentro de la matriz vítrea obtenida para la prueba realizada a 1200 °C.

- Se realizó una prueba preliminar en la determinación de las concentraciones de Cr y Fe realizada mediante el proceso de lixiviación para materiales de desecho monolítico (Ensayo Tanque – Ensayo de Difusión), por medio del cual se demostró que para los lodos vitrificados a 1150°C y 1200°C no son corrosivos de acuerdo a la clasificación realizada por la EPA, dado a que se encuentran dentro del rango de pH establecido de 2 a 12,5.
- El Ensayo Tanque – Ensayo Difusión realizado con el fin de determinar mediante el pH la corrosividad en los productos vítreos obtenidos en el proceso, estableció resultados representativos, ya que en simulaciones de este ensayo en tiempos mayores a 4 días, el pH de las muestras tiende a aumentar en menores proporciones.
- De acuerdo con el ensayo tanque basado en la norma Holandesa NEN7345, se puede concluir que en la medida en que aumente el pH o en ambientes alcalinos, la concentración de metales pesados como el Cr y Fe, tiende a disminuir.
- Con respecto a la difracción de rayos X, solo la muestra correspondiente al lodo de Colmena reportó la presencia de un material cristalino “Hematita”, mientras que la muestra correspondiente al lodo de colcerámica no reportó ninguna formación cristalina.
- El estudio de difracción de rayos X no determinó propiedades o enlaces químicos fuertes dentro de la matriz vítrea analizada, por lo cual solo se puede definir el proceso de vitrificación mediante el comportamiento de la muestras a las diferentes temperaturas analizadas.

- En una prueba realizada con el resultado de las muestras vitrificadas a 1200°C mezcladas con esmalte cerámico comercial, se determinó que un uso potencial de estos residuos estabilizados es la producción de este tipo de productos.
- Se realizaron pruebas preliminares con los materiales analizados, con el fin de definir nuevos usos, tales como la fabricación de esmaltes utilizados en los procesos cerámicos, para lo cual se obtuvo un excelente comportamiento.
- Este estudio ofrece datos preliminares para próximas investigaciones, en las cuales se desarrolle a fondo el estudio de las diferentes variables que no se analizaron en esta investigación, debido a la limitación con respecto al montaje físico a escala.
- Es importante resaltar que en Colombia existe una problemática ambiental referida a la producción de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales con contenido de metales pesados, por lo que se hace imperioso el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan desactivar este tipo de residuos.
- Se deben evaluar los costos asociados a este tipo de tratamiento con el fin de determinar la viabilidad económica a escala industrial de la tecnología de vitrificación de residuos peligrosos.

7. BIBLIOGRAFIA.

Buelt J.L., Molten Glass Processes. Pacific Northwest Laboratory Richland, Washington. Section 8.9, pp. 8.118-8.129.

Bingham P.A, R.J. Hand, Vitrified metal finishing wastes I. Composition, density and chemical durability. Journal of Hazardous Materials B119 (2005) 125-133, 28 December 2004.

Catherine N. Mullinan., Raymond N.. Yong, Bernard F. Gibbs., Evaluation of technologies for the heavy metal remediation of dredged sediments, Journal of Hazardous Materials 85 (2001) 145-163.

Colombo P., G Brusatin., E. Bernardo, G. Scarinci., Inertization and reuse of waste materials by vitrification and fabrication of glass-based products. Current Opinion in Solid State and Materials Science (2003) 225-239, 11 August 2003.

Elías Xavier., Optimización de procesos industriales cerámicos, Universidad pontificia Bolivariana, Medellín, Marzo de 2001.

EPA. 2001. National Biennial RCRA Hazardous Waste Report: Based on 2001 Data.

EPA.1999. Stabilization/Stabilization Resource Guide. EPA/542-B-99-002.

EPA.1996. Method 1311 of SW-846.

EPA. 1997. Technology alternatives for the remediation of soils contaminated with As, Cd, Cr, Hg, and Pb. *Engineering Bulletin* .EPA/540/S-97/500.

EPA. 1992. Silicate technology corporations solidification/stabilization technology for organic and inorganic contaminants in soils. Applications Analysis Report. No. EPA/540/AR-92/010

EPA. 1989 Stabilization/Solidification of CERCLA and RCRA Wastes. Physical Tests, Chemical Testing Procedures, Technology Screening, and Field Activities. EPA/625/6-89/022. 79

García Romero Emilia, Las arcillas propiedades y usos, Universidad complutense, Madrid, Pág. 1-25 2002.

Guilio Bernstein Alberto., Enrico Bonsembiante., Giovanna Brusatin., Giacomo Calzolari., Paolo Colombo., Roberto Dall'igna., Sandro Hreglich., Giovanni Scarinci., Inertization of hazardous dredging spoils, Waste Management 22 (2002) 865-869, 13 June 2002.

Hee-Chul Yang., Joon-Hyung Kim., Characteristics of dioxins and metals emission from radwaste plasma arc melter system. Chemosphere 57 (2004) 421-428, 25 May 2004.

Jorge M Magalhaes., Joao E Silva., Fernando P Castro., Joao A Labrincha., Physical and chemical characterisation of metal finishing industrial wastes. Journal of Environmental Management 75 (2005) 157-166, 26 September 2004.

Kavouras P., G. Kaimakamis., TH.A. Loannidis., TH. Kehagias., PH. Komnioun., Vitrification of lead-rich solid ashes from incineration of hazardous industrial wastes. Waste Management 23 (2003) 361-371, 16 July 2002.

La Grega & Buckingham. E.1996, Gestión de Residuos Tóxicos. McGraw Hill. 1996.

Moustakas K., D Fatta., S Malamis., K. Haralambous., M Loizodou., Demonstration plasma gasification/vitrification system for effective hazardous waste treatment. Journal of Hazardous Materials B123 (2005) 120-126, 5 May 2005.

NEN 7375 (2004) Institut Standarazitation – Leaching characteristics, determination of the leaching of inorganic componentes from moulded or monolithic materials with the diffusion test, solid earthy and stony materials.

P. Piscicella., S. Crisucci., A. Karamanov., M. Pelino., Chemical durability of glasses obtained by vitrification of industrial wastes. Waste Management 21 (2001) 1-9. 16 de July 2000.

Pelino M., Karamanov A., P. Piscicella., S. Crissucci., D.Zonetti., Vitrification of electric arc furnace dusts, June 2002.

Spence R.D., T.M. Giliam., C.H. Mattus., A.J. Mattus., Laboratory stabilization/solidification of surrogate and actual mixed-waste sludge in glass and groud, Waste Management 19 (1999) 453-465, 21 July 1999.

Yi-Ming Kuo., Ta-Chang Lin., Perng-Jy Tsai., Metal behavior during vitrification of incinerator ash in a coke bed furnace. Journal of Hazardous Materials B109 (2004) 79-84, 27 february 2004.

TABLA DE CONTENIDO.

1. INTRODUCCION.....	1
2. OBJETIVOS.	4
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	4
2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	4
3. MARCO TEORICO.....	6
3.1. PRODUCTO VITREO.....	9
3.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS QUE SE PUEDEN VITRIFICAR.....	10
4. METODOLOGIA.....	12
4.1. MATERIALES.....	12
4.1.1. <i>Caracterización de los Lodos.....</i>	<i>12</i>
4.1.1.1. Lodo Empresa COLCERA MICA S.A.....	13
4.1.1.2. Lodo Empresa TUBOS COLMENA S.A.....	13
4.1.2. <i>Caracterización de los Residuos Tóxicos.....</i>	<i>14</i>
4.1.3. <i>Caracterización de los Aditivos.....</i>	<i>14</i>
4.1.3.1. Caolín cerámico.....	15
4.2. EQUIPOS.....	17
4.2.1. <i>Mufla.....</i>	<i>17</i>
4.2.2. <i>Control de Temperatura.....</i>	<i>18</i>
4.2.2.1. Termocupla.....	18
4.2.2.2. Dataloger.....	19
4.2.2.3. Software.....	19
4.2.2.4. Pirómetro.....	19
4.2.3. <i>Montaje Experimental.....</i>	<i>20</i>
4.3. METODOS.....	21
4.3.1. <i>Homogenización de los Lodos.....</i>	<i>22</i>
4.3.2. <i>Protocolo ensayo tipo.....</i>	<i>24</i>
4.3.2.1. Diagrama de Flujo Ensayo Tipo.....	26
4.3.3. <i>Protocolo de preparación de las probetas.....</i>	<i>26</i>
4.3.3.1. Diagrama de Flujo Preparación de probetas.....	28
4.4. MATRIZ EXPERIMENTAL.....	28
4.5. ENSAYOS DE LABORATORIO.....	29
4.5.1.1. TCLP.....	30
4.5.1.2. Ensayo de Tanque (Ensayo de Difusión).....	31
4.5.1.3. Cristalografía.....	32
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	34
5.1. CARACTERIZACIÓN FISICA.....	34
5.2. RESULTADOS TCLP.....	35
5.2.1. <i>Normatividad TCLP.....</i>	<i>36</i>
5.3. PÉRDIDAS POR CALCINACIÓN.....	37

5.4.	TASAS DE TEMPERATURA.	38
5.5.	COMPOSICIÓN VITREA.....	39
5.6.	ENSAYOS DE LIXIVIACION Y ANALISIS QUIMICO.....	42
5.7.	ENSAYO DIFUSION.	45
5.8.	DIFRACCION DE RAYOS X.....	46
5.9.	USO POTENCIAL DE LOS PRODUCTOS VITRIFICADOS.....	49
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	52
7.	BIBLIOGRAFIA.....	55

LISTA DE FIGURAS.

FIGURA 4-1. FOTO LODO COLCERAMICA S.A.	13
FIGURA 4-2. FOTO LODO TUBOS COLMENA S.A.	14
FIGURA 4-3. FOTO ADITIVO CAOLÍN (IZQ.) – ARCILLA (DER.).....	16
FIGURA 4-4. FOTO MUFLA.....	17
FIGURA 4-5. FOTO TERMOCUPLA Y DATALOGER.....	19
FIGURA 4-6. FOTO PIRÓMETRO OMEGA TIPO HH 12 ^a	20
FIGURA 4-7. FOTO MONTAJE EXPERIMENTAL.	20
FIGURA 4-8. FOTO LODO COLMENA.....	21
FIGURA 4-9. FOTO LODO COLCERAMICA.	22
FIGURA 4-10. FOTO CAOLÍN INDUSTRIAL.....	22
FIGURA 4-11. FOTO CAOLÍN CERÁMICO.....	22
FIGURA 4-12. FOTO HOMOGENIZACIÓN LODO COLMENA.	23
FIGURA 4-13. FOTO SECADO LODO COLMENA.	23
FIGURA 4-14. FOTO LODO COLCERÁMICA – COLMENA (TAMIZADO).....	24
FIGURA 4-15. EQUIPO EXTRACTOR DE TCLP.	30
FIGURA 4-16. ESPECTRÓMETRO DE ABSORCIÓN ATÓMICA.....	31
FIGURA 4-17. TANQUES UTILIZADOS EN EL ENSAYO DE DIFUSIÓN.....	32
FIGURA 4-18. DIFRACTOR DE RAYOS X DE POLVO.....	33
FIGURA 5-1. GRÁFICA TIEMPO (SEG) VS TEMPERATURA (°C) PRUEBAS A 110°C, 1150°C Y 1200°C.....	38
FIGURA 5-2. FOTO LODO COLCERÁMICA VITRIFICADO A 1200°C – PRUEBA NO 1.....	39
FIGURA 5-3. FOTO LODO COLMENA VITRIFICADO A 1200°C – PRUEBA NO 2.....	40
FIGURA 5-4. FOTO LODO COLCERAMICA A 1150°C – PRUEBA NO 3.	40
FIGURA 5-5. FOTO LODO COLMENA A 1150°C – PRUEBA NO 4.....	41
FIGURA 5-6. FOTO LODO COLCERAMICA A 1100°C – PRUEBA NO 5.	41
FIGURA 5-7. FOTO LODO COLMENA A 1100°C – PRUEBA NO 6.....	41
FIGURA 5-8. FOTO LODO COLCERAMICA A 1150°C – PRUEBA NO 7.	42
FIGURA 5-9. FOTO LODO COLMENA A 1100°C – PRUEBA NO 8.....	42
FIGURA 5-10. GRAFICA PH VS CONCENTRACIÓN CR (MG/L).....	43
FIGURA 5-11. GRAFICA PH VS CONCENTRACIÓN FE (MG/L).....	44
FIGURA 5-12. GRAFICA TIEMPO (DÍAS) VS PH.....	46

FIGURA 5-13. DIAFRACTOGRAMA – COLCERÁMICA..... 47

FIGURA 5-14. DIAFRACTOGRAMA – MUESTRA DE COLCERÁMICA A 1200 °C..... 47

FIGURA 5-15. DIAFRACTOGRAMA – COLMENA. 48

FIGURA 5-16. DIAFRACTOGRAMA – MUESTRA DE COLMENA A 1200°C..... 48

FIGURA 5-17. ESMALTE CERÁMICO LODO VITRIFICADO COLMENA..... 49

FIGURA 5-18. ESMALTE APLICADO A CERAMICA DEL LODO VITRIFICADO COLMENA A 1200°C..... 50

FIGURA 5-19. ESMALTE CERÁMICO LODO VITRIFICADO COLCERÁMICA..... 50

FIGURA 5-20. ESMALTE APLICADO A CERAMICA DEL LODO VITRIFICADO COLMENA A 1200°C..... 51

LISTA DE TABLAS.

TABLA 4-1 PROPIEDADES DEL CAOLÍN.....	16
TABLA 4-3. ESPECIFICACIONES DE LA MUFLA.....	18
TABLA 4-4. COMPOSICIÓN DE LA MATRIZ EXPERIMENTAL.....	29
TABLA 5-1. CARACTERÍSTICAS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS.....	34
TABLA 5-2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS LODOS Y ADITIVOS.....	34
TABLA 5-3. COMPOSICIÓN QUÍMICA OBTENIDA POR MEDIO DEL ENSAYO DE TCLP Y DETERMINACIÓN DE METALES TOTALES REALIZADOS AL LODO 1 PREVIO AL TRATAMIENTO....	35
TABLA 5-4. COMPOSICIÓN QUÍMICA OBTENIDA POR MEDIO DEL ENSAYO DE TCLP Y DETERMINACIÓN DE METALES TOTALES REALIZADOS AL LODO 2 PREVIO AL TRATAMIENTO....	35
TABLA 5-5. COMPOSICIÓN QUÍMICA OBTENIDA POR MEDIO DEL ENSAYO DE TCLP A LOS ADITIVOS.	35
TABLA 5-6. LÍMITES DE CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EXTRAÍDOS DEL TCLP (EPA). ...	36
TABLA 5-7. PÉRDIDAS POR CALCINACIÓN.....	37
TABLA 5-8. CONCENTRACIONES DE CR PARA DIFERENTES VALORES DE PH EN LAS MUESTRAS BASES Y VITRIFICADAS.....	43
TABLA 5-9. CONCENTRACIONES DE FE PARA DIFERENTES VALORES DE PH EN LAS MUESTRAS BASES Y	44
VITRIFICADAS.....	44
TABLA 5-10. VALORES DE PH PARA DIFERENTES TIEMPOS.....	45