



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“INMOVILIZACIÓN DE SUSTANCIAS PELIGROSAS A TRAVÉS DE SOLIDIFICACIONES
MONOLÍTICAS CON DIFERENTES MATERIALES”**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA AMBIENTAL – RESIDUOS PELIGROSOS

P R E S E N T A:

ING. ALFREDO GONZÁLEZ MEDINA

TUTOR:

Dra. Georgina Fernández Villagómez.

Ciudad Universitaria D.F., mayo de 2012





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Jurado asignado:

Presidente: M. I. Martínez Palacios José Luis
Secretario: Dra. Georgina Fernández Villagómez
Vocal: M. en I. Becerril Albarrán Josefina P.
1er. Suplente: M. I. Menéndez Martínez Carlos Manuel
2do. Suplente: M. Adm. Ind. Ramírez Burgos Landy Irene

Directora de Tesis:

Dra. Georgina Fernández Villagómez

Lugar de realización: Facultad de Ingeniería, UNAM.

México D.F. 2011-2012

Doy gracias a dios por darme un alma la cual cultivar y la fuerza para enfrentarme a cada obstáculo en mi vida, a la universidad y a todos los profesores que me motivaron a crecer cada día, a la vida por enseñarme las maravillas que existen en ella, a mi hermana por estar conmigo y hacerme compañía en los momentos difíciles, a los amigos por ayudarme a aprender y a disfrutar la vida en su compañía, pero principalmente le doy las gracias a mi madre por darme la vida, por enseñarme a ser un hombre honorable, honesto, trabajador y amoroso de mis seres queridos, porque ese es el reflejo y aprendizaje que en ella encontré y la herencia más valiosa que en mi vida tendré.... ¡**Gracias madre!**!

En el transcurso de mis estudios muchas han sido las personas e instituciones que me han ayudado y a quienes quiero expresar mi gratitud por el apoyo, confianza y disposición que mostraron en todo momento por ello quiero dar un agradecimiento especial:

A Dra. Georgina Fernández Villagómez.

Gracias por todos los grandes momentos donde siempre estuvo para mí, por escucharme y apoyarme, por instruirme en los muchos momentos en los que no sabía qué hacer, por la paciencia cuando dudé, por darme su confianza y dejarme formar parte de un nuevo mundo, por motivarme e impulsarme a superar cada día, por ello y todo lo que me ha dado, muchas gracias, siempre la tendré en un lugar muy especial en mi vida.

A mis tutores.

Que sin su apoyo y consejos jamás habría logrado llegar hasta este día, que durante esta larga lucha por mi formación me instruyeron, guiaron y en muchas ocasiones me levantaron. Gracias por su tiempo, paciencia y principalmente por sus buenas intenciones de querer que me supere.

A mi sobrina Adriana Elizabeth.

Gracias princesa, por haber llegado a mi vida, por cambiar mi forma de pensar, mi forma de ser y mi forma de actuar, porque me has enseñado que en el mundo las personas y las cosas más pequeñas pueden ser las que más te marquen y te definan... gracias de todo corazón.

A Cecilia Téllez Quintanar.

Gracias por estar a mi lado desde un principio, por ser mi apoyo y mi fuente de inspiración, por pelear a mi lado cada día, por apoyarme y aguantarme a pesar de todos los problemas que hemos enfrentados, por no darte por vencida y principalmente por ser honesta y sincera conmigo gracias desde el fondo de mi corazón.

Al consejo nacional de ciencia y tecnología, (CONACYT).

Por dar el apoyo brindado para la realización de este proyecto, sin el cual no se hubiera logrado concretar, así como las gracias al personal que nos guio durante todo el proceso de la obtención y seguimiento de la beca.

A la facultad de ingeniería, UNAM

En especial al laboratorio de mecánica de materiales por su apoyo técnico en las pruebas de esfuerzos mecánicos y el uso de de sus instalaciones.

Al centro nacional de investigación y capacitación ambiental (CENICA).

Por el apoyo brindado para las pruebas de extracción y determinación de metales, así mismo por su apoyo técnico. En especial al ingeniero Guillermo Encarnación y Fabiola Altuzar por su tiempo y consejos para concluir este proyecto

Al centro de ciencias de la Atmosfera

En especial al DR. Enrique bravo, Dr. Rodolfo Sosa, Ana Luisa Alarcón y a todo el personal que me brindo su apoyo para realizar las pruebas e intemperismo acelerado así como por su apoyo personal y su amistad. Gracias.

Finalmente y no menos valioso su apoyo a todo el personal de facultad de ingeniería, instituto de materiales, instituto de geología, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología a mis compañeros y a todos aquellos que me brindaron su apoyo para llevar a buen término este proyecto, no tendría suficientes paginas para decirles a todos y cada uno ¡Gracias!

Índice

	Página.
Lista de figuras	
Lista de tablas	
Resumen	- 0 -
Capítulo 1	- 1 -
1. Introducción.	- 2 -
1.1 Objetivo general.	- 2 -
1.2 Objetivos particulares.	- 2 -
1.3 Hipótesis.	- 3 -
1.4 Alcances.	- 3 -
1.5 Metas del trabajo.	- 3 -
1.6 Limitantes.	- 3 -
Capítulo 2	- 5 -
2. Antecedentes	- 6 -
Residuos peligrosos.	- 6 -
Métodos de disposición.	- 7 -
Procesos basados en la cementación.	- 9 -
Ensayos de extracción y lixiviación.	- 11 -
2.1 Estudios previos.	- 14 -
2.1.1 Estructura y propiedades de clinkers de cemento Pórtland obtenidos con combustibles residuales.....	- 14 -
2.1.2 Desarrollo de la tecnología de inmovilización, estabilización solidificación de residuos peligrosos.....	- 17 -
2.1.3 La zeolita en la mitigación ambiental.	- 19 -
2.1.4 Tratamiento de residuos de arsénico provenientes del tratamiento del agua.	- 20 -
2.1.5 Comportamiento ambiental de lodos de fundición estabilizados/solidificados.	- 26 -
2.1.6 Bloques de jales en mina la Zacatecana.	- 29 -
2.2 Problemática.	- 30 -
Capítulo 3	- 35 -
3. Marco jurídico.	- 36 -
3.1 Ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente (LGEEPA)	- 37 -
3.2 Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos (LGPGIR)	- 38 -
3.3 Reglamento de la ley general para la prevención y gestión integral de los residuos (RLGPGIR)	- 39 -
3.4 Convenios internacionales.	- 39 -

3.5	Normas oficiales mexicanas.	- 40 -
Capítulo 4.....		- 42 -
4.	Características generales de los residuos a estabilizar.	- 43 -
4.1	Jales de la producción minera.	- 43 -
4.2	Lodos de refinería.....	- 45 -
4.3	Caracterización de la zeolita.....	- 49 -
4.4	Trabajo previo de laboratorio.....	- 50 -
Capítulo 5.....		- 53 -
5.	Metodología.....	- 54 -
5.1	Diseño de experimento.....	- 57 -
5.1.1	Definición de la unidad experimental.....	- 58 -
5.1.2	Definición de la variable de respuesta.....	- 58 -
5.1.3	Definición de factores y niveles.....	- 58 -
5.1.4	Diseño experimental.....	- 59 -
5.1.5	Propuesta constructiva y de ensayo.....	- 60 -
5.1.6	Selección de parámetros.	- 61 -
Capítulo 6.....		- 62 -
6.	Resultados de laboratorio.....	- 63 -
6.1	Elaboración de bloques.....	- 63 -
6.2	Compresión simple.....	- 66 -
6.3	Pruebas hídras.	- 68 -
6.4	Prueba PECT.	- 77 -
6.5	Pruebas de intemperismo.	- 79 -
6.6	Erosión y decaimiento de la resistencia.	- 85 -
6.7	Análisis de costos.	- 87 -
Capítulo 7.....		- 89 -
7.	Análisis de Resultados.....	- 90 -
7.1	Elaboración de bloques.....	- 90 -
7.2	Resistencias mecánicas.	- 90 -
7.3	Pruebas hídras.	- 90 -
7.4	Prueba PECT.	- 91 -
7.5	Prueba de intemperismo.	- 91 -

7.6 Erosión y decaimiento de la resistencia.	- 92 -
7.7 Análisis de costos.	- 92 -
CAPITULO 8	- 94 -
8. Conclusiones.	- 95 -
Referencias	- 97 -

Lista de Figuras

Figura 2.1 Gráfica de cambio de temperatura respecto al tiempo, (Treza y Scian, 2009).	- 16 -
Figura 2.2 Gráfica Módulo de resistencia a rotura a 28 días contra porcentaje de cenizas de aceite usado en automotores, (Treza y Scian, 2009).	- 16 -
Figura 2.3 Metodología del trabajo fuente: Sandoval y Jáuregui, 2002.	- 21 -
Figura 2.4 Solidificación con cemento Pórtland, Fuente: Sandoval y Jáuregui, 2002.....	- 21 -
Figura 2.5 Presa de Jales colima fuente: Mota, 2011.....	- 32 -
Figura 2.6 Presas de jales Fuente: Ramírez, 2008.....	- 33 -
Figura 3.1 Jerarquía jurídica en México.	- 37 -
Figura 4.1 Jales mineros.	- 43 -
Figura 4.2 Lodos de refinería o lodos aceitosos.	- 45 -
Figura 4.3 Digestión ácida de lodos de refinería.	- 46 -
Figura 4.4 Presencia de hongos a las 72 h de saturación de la muestra inalterada.	- 48 -
Figura 4.5 Hongos vistos en Microscopio estereoscópico Olympus SZ-PT 10X.	- 48 -
Figura 4.6 Hifas de hongos microscópicos vistos en Microscopio BH2 100X.....	- 48 -
Figura 4.7 Imágenes obtenidas por microscopía electrónica de barrido, zeolita pura y de las zeolitas con PbS obtenidas a 40°C y 50°C, fuente Acosta, (2006).....	- 49 -
Figura 4.8 Secado de las muestras para determinación de contenido de humedad.....	- 50 -
Figura 4.9 Muestra saturada de jal.	- 50 -
Figura 4.10 Muestra saturada de lodo.	- 51 -
Figura 5.1 Zeolita de granulometría homogénea contenida en la malla 30.	- 54 -
Figura 5.2 Diagrama de flujo de la metodología pre-experimental.	- 56 -
Figura 5.3 Metodología experimental para la elección del bloque final para reúso.	- 57 -
Figura 5.4 Diseño experimental para cada prueba.	- 57 -
Figura 6.1 Reacción lodos con zeolita.	- 64 -
Figura 6.2 Reacción de jales con zeolita.....	- 64 -
Figura 6.3 Cuarto de curado Facultad de ingeniería, UNAM.	- 64 -
Figura 6.4 Máquina de corte de precisión.	- 65 -
Figura 6.5 Lijado de muestras para uniformizar.	- 65 -
Figura 6.6 Cortes o lajas para ensayos.	- 65 -
Figura 6.7 Ensayo de bloques a carga axial.....	- 66 -
Figura 6.8 Lectura de resistencia.....	- 66 -
Figura 6.9 Comparación contra resistencias máximas.....	- 67 -

FACULTAD DE INGENIERÍA

Figura 6.10 Resistencia promedio en kg/cm ² de lodos.	- 68 -
Figura 6.11 Resistencia promedio en kg/cm ² de jales.	- 68 -
Figura 6.12 Sección capilar de Jales.	- 70 -
Figura 6.13 Succión capilar de lodos.	- 70 -
Figura 6.14 Absorción libre de agua por inmersión total de los bloques con jales.	- 71 -
Figura 6.15 Absorción libre de agua por inmersión total de los bloques con lodos.	- 72 -
Figura 6.16 Cambios volumétricos en dirección X, Y Jales.	- 73 -
Figura 6.17 Expansiones y compresiones en el bloque de jales en dirección X y Y.	- 74 -
Figura 6.18 Cambios volumétricos en dirección X, Y lodos.	- 74 -
Figura 6.19 Expansiones y compresiones en el bloque de lodos en dirección X y Y.	- 75 -
Figura 6.20 Expansiones y compresiones en el bloque de jales en dirección Z.	- 76 -
Figura 6.21 Expansiones y compresiones en el bloque de lodos en dirección Z.	- 76 -
Figura 6.22 Equipo de extracción.	- 77 -
Figura 6.23 Cámara de extracción.	- 77 -
Figura 6.24 Preservación de las muestras de extracto PECT.	- 78 -
Figura 6.25 Determinación de metales en extracto.	- 78 -
Figura 6.26 Cámara de intemperismo.	- 79 -
Figura 6.27 Irrigado de muestras por lluvia ácida.	- 80 -
Figura 6.28 Interior de cámara de intemperismo con humedad controlada.	- 80 -
Figura 6.29 Irrigado independiente de muestra.	- 81 -
Figura 6.30 Toma de la muestra.	- 81 -
Figura 6.31 Preservación de la muestra.	- 82 -
Figura 6.32 Fractura de bloques por exposición a lluvia ácida.	- 83 -
Figura 6.33 Erosión después de 10 años.	- 83 -
6.34 Determinación de metales presentes en la lixiviación de jales.	- 84 -
6.35 Determinación de metales presentes en la lixiviación de lodos.	- 84 -
6.36 Determinación de metales presentes en la lixiviación de blancos.	- 85 -
6.37 Erosión de los bloques.	- 85 -
6.38 Comparativa de erosión.	- 86 -
6.39 Reducción de la resistencia producto de la lluvia ácida.	- 86 -

Lista de Tablas

Tabla 2.1 Lixiviación de cromo en los diferentes clinkers (ppm = mgCr (VI)/kg clinker), (Trezza y Scian, 2009).	- 15 -
Tabla 2.2 Concentración de metales de interés presentes en el lixiviado del lodo sin tratar y los valores de la norma nacional de Costa Rica (Romero et al, 2007).	- 18 -
Tabla 2.3 Concentración de níquel en el lixiviado y pH en el poro de la muestra solidificada de lodo con diferentes tipos de cemento (Romero et al, 2007).	- 18 -
Tabla 2.4 Resistencia mecánica para el lodo inmovilizado utilizando varios tipos de cemento (Romero et al, 2007).	- 19 -

Tabla 2.5 Cantidad de material utilizado para la elaboración de tabiques (palas), Fuente: Sandoval y Jáuregui, 2002	- 22 -
Tabla 2.6 Volumen de lluvia por tabique, Fuente: Sandoval y Jáuregui, 2002.	- 23 -
Tabla 2.7 Factores y niveles del diseño de experimento, Fuente: Sandoval, 2002.	- 23 -
Tabla 2.8 Cantidad teórica de arsénico en los tabiques, Fuente: Sandoval y Jáuregui, 2002.....	- 24 -
Tabla 2.9 Resultados de compresión simple de los tabiques (kg/cm ²) Fuente: Sandoval y Jáuregui, 2002.....	- 25 -
Tabla 2.10 Ventajas e inconvenientes de los diferentes procesos E/S, (Fuente: Coz, 2001).....	- 26 -
Tabla 2.11 Tratamientos más comunes para E/S (Fuente: Coz, 2001).	- 27 -
Tabla 2.12 Tipos de residuos susceptibles de E/S, (Coz, 2001).	- 28 -
Tabla 2.13 Efecto de los compuestos orgánicos en la E/S, Fuente: Freeman y Harris, 1995.....	- 28 -
Tabla 2.14 Eficacia de los procesos E/S en función del tipo de compuesto (Andrés y Viguri, 1999)...	- 29 -
Tabla 3.1 Normas aplicables de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.	- 40 -
Tabla 3.2 Normas aplicables de la Secretaría Medio Ambiente y Recursos Naturales y la Secretaría de Salud.....	- 41 -
Tabla 4.1 Concentración de metales totales en muestras de jal.	- 44 -
Tabla 4.2 Contenido de humedad y absorción de agua.....	- 45 -
Tabla 4.3 Contaminantes de lodos de refinería, Mijaylova (2011).	- 46 -
Tabla 4.4 Contenido de humedad y absorción de agua.....	- 46 -
Tabla 4.5 Concentración de metales pesados en lodos de refinería.	- 47 -
Tabla 5.4 Agua retenida por el residuo.....	- 51 -
Tabla 5.5 Resistencias de la pre experimentación.	- 52 -
Tabla 5.1 Factor y niveles del experimento.	- 58 -
Tabla 5.2 Estructura del experimento Parcela X0.	- 59 -
Tabla 5.3 Asignación de las unidades experimentales a los diversos tratamientos.	- 59 -
Tabla 6.1 Cantidades usadas para la elaboración los bloques con jales.....	- 63 -
Tabla 6.2 Cantidades usadas para la elaboración bloques con lodos.....	- 63 -
Tabla 6.3 Resistencias obtenidas en cada parcela.	- 67 -
Tabla 6.4 Pruebas hídricas.....	- 69 -
Tabla 6.5 Porcentaje de agua retenida.	- 72 -
Tabla 6.6 Resumen de deformaciones máximas y promedios eje x y.	- 75 -
Tabla 6.7 Resumen de deformaciones máximas y promedios.....	- 76 -
Tabla 6.8 Aniones y cationes para lluvia ácida en meq. (fuente: Alarcón, 2011).	- 79 -
Tabla 6.9 Resumen de pH y conductancia eléctrica.....	- 82 -
Tabla 6.10 Costo del material requerido.....	- 88 -
Tabla 6.11 Costo directo del block.	- 88 -
Tabla 6.12 Precio final del block.	- 88 -

Resumen

El crecimiento de la población y la generación de residuos peligrosos es cada día más alarmante; al día de hoy existen más de 7 millones de materiales peligrosos y se crean unos 1200 nuevos cada año, de los cuales no se conoce bien su respuesta y/o toxicidad al ser humano o a la naturaleza, mucho menos se saben las consecuencias que generan al mezclarse con otro material ni la sinergia que esto produce.

Estos materiales después de su cadena productiva terminan convirtiéndose en residuos, mismos, que en el mejor de los casos llegan a un sitio controlado para este fin, produciendo un daño en la zona en la que se disponen, provocando altos costos por su disposición. En la mayoría de los casos son llevados a basureros a cielo abierto generando un pasivo ambiental, o incluso rellenos sanitarios, producto de la deficiencia técnica, económica y la corrupción en el país.

La posibilidad de darles un tratamiento, estabilizarlos y lo más importante, darles un valor para su reúso podrían generar interés en un tercero, volviéndolos materiales valorizables y comerciables. Esta acción generará fuentes de empleo, desarrollo tecnológico y social, así como la disminución de los posibles sitios contaminados (pasivos ambientales) y los probables daños que estos puedan provocar a la salud pública.

Por otra parte, uno de los materiales que se estudia con mucho interés hoy en día para el tratamiento de contaminantes, es la zeolita, misma que tiene un amplio campo de aplicación, desde la engorda de animales hasta la estabilización de materiales radiactivos. Esto es posible ya que la estructura molecular interna del mineral lo vuelve un medio de soporte para los contaminantes fijándolos a estructura y formando una matriz muy resistente e impidiendo su posterior liberación.

La zeolita ha demostrado en otras experimentaciones tener también una resistencia mecánica muy superior a la convencional comparada con otros materiales de la construcción. Y muy resistente a la erosión así como a la lixiviación ácida. Debido a ello este nuevo material cumpliría fácilmente las necesidades que el material requiere para la construcción. Por esto se propone, un tratamiento con zeolita, para conseguir reusar los residuos seleccionados en la construcción.

El otro gran tema de importancia para este proyecto es la selección del residuo a estabilizar, por ello se buscaron materiales que fueran de alta generación y de alta relevancia en México, y se seleccionaron las dos ramas económicas principales que también tienden a ser fuertes generadores de pasivos ambientales, siendo por un lado la contaminación de hidrocarburos con lodos aceitosos y, por el otro, la industria minera con la generación de los jales.

Se establece una metodología para la elaboración de los bloques que será utilizada para posteriores ensayos y pruebas de repetición.

Durante la experimentación se encontró que el material elaborado mantiene características estéticas, comercializables y rentables, así mismo, las resistencias obtenidas son superiores a las que cualquier otro material de las mismas características podría brindar.

También se analizó la capacidad de lixiviación del material y sus contaminantes encontrando que la lixiviación instantánea, total y la expuesta a condiciones de lluvia ácida durante una simulación de 10 años es prácticamente nula, siendo un tratamiento altamente factible y tecnológicamente viable.

Se concluye que este material puede introducirse en construcciones, con suelos arenosos hasta arcillosos, debido a que no causará ningún problema a la sociedad o al medio ambiente, esto es posible por la baja lixiviación, además que es resistente, estético y rentable.

Abstract

The population growth and the generation of hazardous waste is becoming increasingly alarming, to date there are over 7 million hazardous materials and create about 1200 new ones every year, which is not well understood your answer and / or toxicity to humans or nature, let alone know the consequences they generate when mixed with other material or the synergy that it creates.

These materials after its chain end up becoming waste thereof, which in the best case reach a controlled site for this purpose, causing damage in the area in which are arranged, causing high costs of disposal. In most cases are taken to open dumps creating an environmental liability, or landfills, the product of technical failure, economic and corruption in the country.

The ability to treat them, stabilize them and most importantly, give a value for reuse could generate interest in a third, making them valuable materials and marketable. This action will generate sources of employment, technological and social development and the reduction of potential contaminated sites (environmental liabilities) and the likely damage they can cause public health.

Moreover, one of the materials being studied with great interest today for the treatment of contaminants, the zeolite, which has a very wide field of application, from the fattening of animals to the stabilization of radioactive materials. This is possible because the internal molecular structure renders the mineral support means for fixing them to contaminants structure and forming a very resistant matrix and preventing their subsequent release.

The zeolite has been shown in other experiments have also a much higher mechanical strength compared with other conventional materials of construction. And very resistant to erosion as well as acid leaching. As a result this new material easily meet the needs of the material required for construction. Therefore it is proposed a zeolite treatment, to achieve the selected waste reuse in construction.

The other major issue for this project is the selection of the residue to stabilize, so we searched high materials that are highly relevant generation in Mexico, and selected the two major economic sectors also tend to be strong generators environmental liabilities, being on one side of hydrocarbons contamination with oily sludge and on the other, the mining industry with the generation of the tailings.

Establishing a methodology for the preparation of the blocks to be used for further testing and repeat testing.

During experimentation it was found that the material produced maintains aesthetic, marketable and profitable, also, the resistance obtained are higher than any other material could provide the same features.

We also analyzed the leaching capacity of the material and found that the leaching pollutants instant, total and exposed to acid rain conditions during a simulation of 10 years is negligible, being a highly feasible treatment and technologically feasible.

We conclude that this material can enter buildings, with sandy soils to clay, because it does not cause any problem to society or the environment, this is possible by low leaching, which is also resistant, attractive and profitable.

Capítulo 1

Introducción

1. Introducción.

Los residuos peligrosos en México son provenientes en su mayoría de los desperdicios municipales, aunque la industria no produce el mismo número de estos, si genera los desperdicios más nocivos y crea otros nuevos (Menéndez, 2007).

La industria es el único ente capaz de tratar sus desperdicios y de almacenarlos, actualmente este proceso es muy costoso y sólo las industrias que tienen una gran capacidad económica pueden realizar el proceso de tratamiento (Rodríguez e Irabien, 1999).

Algunos investigadores han logrado encontrar diferentes procesos para tratar los residuos peligrosos, sin embargo, implican elevados precios en el proceso y no se logra reutilizar el producto generado, por lo que al final éste regresa a disposición controlada, lo que lo hace de éste un proceso poco práctico (González, 1998).

En el presente trabajo se buscó la manera de proveerle a los residuos peligrosos seleccionados (jales mineros y lodos de refinería), un reúso con el cual se puedan reintegrar a la cadena de producción y no dañe a la población o al medio ambiente. Para esto se optó por el uso de un mineral que lograra estabilizar, contener y dar un medio de soporte que brindara una alta resistencia mecánica, encontrando a la zeolita útil para este fin.

Se analizaron y caracterizaron los residuos con el fin de conocer cuántos metales los hacían peligrosos, y así proponer tanto su tratamiento como las pruebas que garantizarían que los residuos quedaron estabilizados.

Se propusieron pruebas de resistencia mecánicas, encontrando resistencias superiores a las de la norma, en las pruebas hídras donde se encontró que el material tiene una porosidad abierta baja y una absorción lenta de agua. También se determinó la cantidad de metales que podrían llegar a lixiviar, encontrando que estos son muy bajos, por último, se determinó la capacidad de soportar la erosión en el tiempo y la lixiviación por lluvia ácida, estos parámetros se determinaron en una cámara de intemperismo acelerado, donde se simuló el envejecimiento de 10 años, observando una relación directa entre la erosión y la resistencia mecánica que se alcanzaba.

1.1 Objetivo general.

Evaluar la inmovilización y reúso de sustancias peligrosas a través de solidificaciones monolíticas con zeolita y diferentes materiales, mediante pruebas en laboratorio.

1.2 Objetivos particulares.

- Buscar las mejores características de los bloques elaborados.
- Realizar pruebas de compresión mecánica mediante un equipo de compresión axial, para el conocimiento de sus resistencias.
- Efectuar pruebas hídras con base en técnicas UNE-EN, NORMAL y RILEM, para el mejor entendido de su comportamiento físico.
- Generar pruebas de lixiviación apegado a la NOM 053 SEMARNAT 1993, para análisis de contaminantes.
- Llevar a cabo pruebas de intemperismo acelerado con una cámara de meteorización, con el fin de saber el comportamiento durante el tiempo.

- Realizar un estudio de costos con base en información de algún proyecto de características similares para extrapolarlo y saber su viabilidad.
- Buscar posibles aplicaciones para los bloques finales en busca de un mejor rendimiento y viabilidad.

1.3 Hipótesis.

La experimentación con lodos de refinería y jales mineros permitirá la evaluación de la lixiviación y mejorará de los procesos de estabilización de los contaminantes y solidificación de residuos peligrosos con un tratamiento de zeolita.

1.4 Alcances.

- Los bloques construidos fueron de volumen máximo de 0.5 litros, debido a que son a escala laboratorio.
- Se ensayaron solo muestras de jales mineros y lodos de una refinería.
- Se analizaron los bloques elaborados con cemento y zeolita en tres concentraciones diferentes, para evaluar la relación de residuo contra el tratamiento propuesto.
- Se realizaron pruebas de ensayo a compresión, erosión, lixiviación y de intemperización acelerada, para conocer si se posible su reuso del residuo tras este tratamiento.

1.5 Metas del trabajo.

- Los residuos se trataron para estudiar su capacidad para solidificarse, reutilizarse y disponerse, buscando el reuso en construcción.
- Los elementos que se buscó inmovilizar son los metales que principalmente contengan los residuos.
- Se analizó el comportamiento real ante la lluvia ácida y la resistencia mecánica, ante efectos como erosión, humedad e infiltración en suelos, esto solo se analizó a escala laboratorio.

1.6 Limitantes.

Solo se analizaron las muestras provenientes de los residuos obtenidos en el separador primario del API de una refinería y los jales de una empresa minera en el estado de México.

1.7 Justificación.

Es un hecho que los materiales peligrosos forman parte de la vida diaria de todas las personas, cada día están expuestas a una gran cantidad de contaminantes y toxinas que la sociedad ha elaborado en el paso de los años con el fin de tener una vida mejor y mayores comodidades.

Durante su producción algunos materiales se convierten en residuos, mismos que llegan a ser altamente peligrosos para la sociedad y el medio ambiente. Este el caso de los jales

mineros y los lodos de refinería. Ambos residuos son derivados de la cadena de producción de un material.

En México estos materiales son altamente generados por lo que hay que tener mucha atención en la manera de mitigar los posibles efectos o daños que estos produzcan.

Debido a esto, el presente trabajo tiene la finalidad de buscar la manera de reintegrar a la cadena productiva estos residuos, teniendo en el peor de los casos la posibilidad de eliminar o mitigar parte o la totalidad de los contaminantes presentes en estos residuos.

Capítulo 2

Antecedentes

2. Antecedentes.

Dentro de los antecedentes que se encontraron, para dar sustento al presente trabajo, se realizó una búsqueda de información en diferentes medios electrónicos e impresos los cuales dan el soporte a la experimentación que se llevó a cabo. Los estudios que se presentan en la sección 2.1 tienen la característica de contar con apoyo y bases para la estabilización de los bloques, la lixiviación, erosión, resistencia y su posible reutilización, así como los procesos y metodologías que se emplearon para su correcto planteamiento.

Para comprender el tema y adentrarse un poco en la temática, se presentan algunos conceptos que dan un panorama somero sobre este proyecto, antes de continuar con los artículos que explican de mejor manera las actividades que se realizaron en este proyecto, para finalmente terminar el capítulo con el planteamiento actual de la problemática que impulso la realización de este trabajo.

Residuos peligrosos.

La LGEEPA define a los residuos peligroso como: “...todos aquellos residuos en cualquier estado físico, que por sus características corrosivas, tóxicas, venenosas, reactivas, explosivas, inflamables, biológicas-infecciosas o irritantes, representen un peligro potencial en todas las etapas de su ciclo, durante su generación, recolección y transporte, almacenamiento o en los lugares de recepción final.”

Una de las metas del gobierno mexicano en el ámbito del sistema de gestión de residuos peligrosos o RP es el de lograr disponerlos de manera que no implique un riesgo para el suelo, optando preferentemente por la minimización y el reciclaje en el proceso productivo y, en segunda instancia, dar un tratamiento para reducir así la toxicidad o el volumen. Para esto existen varias tecnologías disponibles según el tipo de generador (Herrera, 1999).

Dentro de esta clasificación se pueden encontrar los residuos industriales que son todos aquellos residuos tóxicos y peligrosos de materiales sólidos, pastosos, líquidos, así como los gaseosos contenidos en recipientes que siendo el resultado de un proceso de producción, transformación, utilización o consumo, sus productos son destinados al abandono los cuales contienen en su composición alguna de las sustancias o materiales que la normativa (NOM 052 SEMARNAT) considera pueden ser un peligro por sus características físicas, químicas o infecciosas, que son un peligro para la salud humana o el medio ambiente cuando se tratan almacenan o transportan así como cualquier manejo que se les dé. Quedando excluidos los residuos radiactivos.

Clasificación de los residuos peligroso para su tratamiento:

Existen diferentes sistemas de clasificación relacionados directamente con los requerimientos del proceso de tratamiento (Kiang, 1982).

A. De acuerdo al estado físico

Esta clasificación es necesaria para la selección y diseño del sistema de tratamiento del residuo, el sistema de alimentación y la elección del equipo de proceso.

Con base en las características físicas, los materiales residuales se clasifican como: Gases, líquidos, sólidos y suspensiones.

B. De acuerdo con el estado químico

Es necesario para hacer la elección de los parámetros apropiados de diseño la selección de materiales de construcción, el diseño y la posibilidad de recuperación de productos o subproductos, los requerimientos energéticos o consumibles y los sistemas de tratamiento para sus efluentes.

De acuerdo a sus características químicas se clasifican como (Herman, 2008):

- Residuos limpios: dentro de este grupo están los hidrocarburos que contengan únicamente carbono, oxígeno e hidrógeno. Los productos de la oxidación de estos se consideran limpios y pueden descargarse a la atmósfera en una incineración sin mayores problemas.
- Residuos que generen gases contaminantes: los productos que en su oxidación produzcan gases nocivos o durante el proceso de estabilización generen algún gas tóxico.
- Residuos que contienen metales pesados: Los productos de oxidación de metales se encuentran normalmente en estado sólido; estos tienen la característica de ser tratados de una mejor manera con estabilización solidificación.
- Residuos que contienen metales alcalinos: dependiendo del tipo de material pueden contener sustancias que afecten el tratamiento aportando sales o cambiando el pH para la realización del proceso de fraguado donde el agente aglutinante es algún calcáreo que requiera un pH ácido.

C. De acuerdo con su estado capacidad calorífica.

- Residuos combustibles: son aquellos que tienen la capacidad mayor de ignición que los convencionales y pueden ser tratados más fácilmente con termo plásticos, incineración o pirólisis.
- Residuos no combustibles: estos últimos son todos aquellos que requieren una mayor energía para su tratamiento por incineración, por lo que la estabilización o encapsulamiento es una mejor opción.

Métodos de disposición.

Las medidas adoptadas para reducir los contaminantes generados en la industria son (Alfaro, 2000):

- Modificación de los procesos
- Sustitución de productos tóxicos por otros de menor toxicidad
- Recuperación y reciclaje
- Segregación de la fuente

Siendo los dos primeros, las mejores opciones para reducir estos contaminantes (Alfaro, 2000).

Los métodos de disposición utilizados comúnmente, una vez que los residuos al menos han tenido un pre tratamiento son:

- a) Pozos profundos
- b) Rellenos controlados

- c) Encapsulación y solidificación
- d) Dilución dispersión (bajo ciertas consideraciones)
- e) Recuperación
- f) Pirólisis
- g) Incineración por plasma (no tan común)

Uno de los procesos más económicos y fáciles es la estabilización /solidificación (E/S) que consta del integrar a los residuos peligrosos, aditivos para la reducción de la movilidad de los contaminantes y agregando algún agente aglutinante que forme una estructura sólida e impida la liberación de estos contaminantes por algún mecanismo de transporte, haciendo así al residuo aceptable a los requerimientos actuales para la disposición en el suelo (Wiles, 1989).

La E/S son procesos de tratamiento designados para mejorar el manejo de residuos y las características físicas, disminuir las áreas superficiales a través de la cual los contaminantes se pueden transferir o filtrar, limitar la solubilidad o desintoxicar los constituyentes peligrosos (Wiles, 1989).

Refiriéndose a las técnicas que inmovilizan, la solidificación hace que la masa solidificada pueda ser el residuo original o el residuo previamente estabilizado. La adición de reactivos facilita la solidificación de dicha masa con una mayor resistencia, menor compresibilidad y menor permeabilidad del residuo (Romero et al, 2007).

Solidificación.

Esta tecnología se emplea para destoxificar, inmovilizar, insolubilizar o en otras palabras hacer al residuo menos peligroso para el ambiente, en un proceso en el cual, agentes floculantes se adicionan al residuo para generar un sólido, que puede o no presentar enlaces químicos entre el contaminante tóxico y el aditivo (González, 1998).

El uso de la fijación química ofrece varias ventajas, tales como mejorar las características de manejo, produciendo un material sólido lo suficientemente fuerte para su disposición. Idealmente, modificar la estructura del residuo permite reducir los lixiviados de contaminantes tóxicos, y si las concentraciones son menores a las estipuladas por la normativa, entonces los residuos pueden considerarse no peligrosos.

Casi todos los procesos de fijación química involucran reacciones entre el residuo y aditivos que promueven la precipitación de los metales como hidróxidos. Estos aditivos pueden aumentar la reacción de solidificación y disminuir el espacio entre el residuo y los agentes solidificantes. Así, las características del producto sólido obtenido dependerán de (Sandoval, 2002):

- a) Las características del residuo.
- b) Tipos de aditivos y reactivos de solidificación empleados.
- c) Condiciones de secado.
- d) Tiempo de reacción.

Una desventaja de este tipo de solidificación es que se incrementa el peso y volumen del residuo a disponer incrementando los costos de transportación y disposición. Otro problema, es que algunos residuos deben ser pretratados antes de su solidificación con cemento (Sandoval, 20).

En la solidificación, estos residuos se obtienen primordialmente por la producción de un bloque monolítico de residuos tratado con una integridad estructural muy alta. La estabilización describe procesos que limitan la solubilidad o desintoxican el contaminante; las características físicas pueden o no mejorarse o modificarse. El término fijación se usa para proponer estabilización o solidificación. La encapsulación superficial se define como la técnica para separar un residuo con una chaqueta o membrana de material impermeable que se coloca entre el residuo y el ambiente (Malone y Jones, 1982).

Por otro lado la estabilización, se refiere a un proceso por el que un residuo se convierte a una forma químicamente más estable. El término comprende la solidificación y el uso de una reacción química para transformar el componente tóxico y el aditivo (González, 1998).

Así al conseguir esto el residuo quedará inmovilizado para causar daños o ser transportado por el ambiente (en agua como lixiviado, aire como polvos o pequeñas arenas contaminadas).

Los sistemas de E/S pueden agruparse en las siguientes clases de procesos:

- Solidificación por medio de adición de cemento
- Solidificación por medio de adición de cal u otros materiales puzolánicos
- Fijación de residuos en materiales termo plásticos como betún, parafinas o polietileno.
- Micro- encapsulación y macro- encapsulación

Los primeros dos métodos son ocupados comúnmente para una gran mayoría de residuos inorgánicos, pero los demás están reservados para residuos radiactivos o aquellos de un alto contenido orgánico.

Procesos basados en la cementación.

Las técnicas basadas en la cementación generalmente utilizan Cemento Pórtland (CP) con aditivos para mejorar las características físicas y reducir el lixiviado proveniente del residuo solidificado resultante. Los residuos se mezclan en una suspensión con agua y polvo de cemento anhídrido. Que va creciendo y forma la matriz de cemento compuesta de fibras de silicato entrelazado y productos de hidratación.

Algunos compuestos pueden interferir en procesos de solidificación propios de los materiales aglutinantes y de los materiales que constituyen el residuo peligroso (USEPA, 1981). Como las sales solubles de manganeso, estaño, cobre y plomo, pueden incrementar los tiempos de fraguado y reducir de forma considerable los procesos de fijación y estabilización. Así mismo la materia orgánica, sedimento y algunas arcillas pueden afectar el tiempo de fraguado y alterar así los mecanismos del aglutinante, principalmente el de la resistencia. Esto hace que al alterar el proceso pueda afectar negativamente a las propiedades del bloque monolítico, sin embargo también puede beneficiarlo, pues en un correcto proceso y una adecuada cantidad de agua, la hidratación le permitirá al agente aglutinante proporcionar una consistencia ideal para la correcta adición entre las partículas del residuo y el medio que lo envuelve (González, 1998).

Un problema frecuente es encontrar residuos ácidos, sin embargo el cemento es un material alcalino que nos permitirá limpiar la acidez libre antes de cambiar el pH a 11, por consiguiente, la adición espesa sus residuos e incrementa su pH a 7 o superior. Se requiere generalmente un mínimo aproximado de 10% de cemento sobre peso/peso para producir la fuerza mecánica necesaria (González, 1998).

Los minerales arcillosos, como la bentonita con su capacidad de intercambio iónico y gran superficie específica, reacciona con compuestos orgánicos; por esta razón se ha utilizado para aumentar la extensión de los residuos para la fijación de residuos orgánicos que contiene más del 5% de compuestos orgánicos (Suarez, 2008).

El agente de sedimentado, generalmente el CP reforzará la acción de gelatinizado de la arcilla produciendo así material físicamente estable que tiene la habilidad de atrapar y unir los residuos contenidos. El material residual se transforma entonces en un sólido físico químicamente estable simulando un suelo que pretende ser substancialmente insoluble en agua (González, 1998).

Recientemente investigaciones del Instituto de ingeniería de la UNAM han usado como agente puzolánicos o aditivo la Zeolita que tiene la capacidad de fijar a los contaminantes a su cuerpo y no dejarlos escapar bajo condiciones comunes o de alta humedad (El Universal, 2008).

Las solidificaciones basadas en cal y los materiales puzolánicos, en combinación producen sustancias cementosas que atrapan al residuo física y químicamente.

Las puzolanas se definen como materiales que no producen cementación por sí mismas, contienen constituyentes que en combinación con cal y temperatura normal y en presencia de agua forman compuestos insolubles estables. Pueden utilizarse materiales naturales, incluyendo el polvo y cenizas, las puzolanas artificiales como las arcillas quemadas, la utita, mortero quemado y las cenizas finas. Los materiales puzolánicos más empleados en los procesos de fijación química son las cenizas finas y el polvo del horno de cemento (Pojasck, 1979).

Caracterización de las tecnologías de E/S.

Las tecnologías de E/S pueden caracterizarse por el aglutinante empleado, por el mecanismo de aglutinamiento o por el tipo de proceso (Wiles, 1989).

Los Aglutinantes, son generalmente materiales inorgánicos y orgánicos, la mayoría de los materiales inorgánicos que se emplean para unir partículas dispersas en un racimo de partículas condensadas, en su uso tienen varias combinaciones de cementos, cal, puzolanas, sulfato de calcio y silicatos los aglutinantes orgánicos más usuales son epóxicos, poliéster, asfalto, poliolefinas (polietilenos) y urea formaldehído. Se ha utilizado algunas combinaciones de materiales orgánicos e inorgánicos como tierras de diatomáceas con cemento y poliestireno, cemento con geles poliméricos con silicatos y cemento de cal (Talles y Lobowitz, 1984).

El mecanismo de aglutinamiento de los contaminantes, este mecanismo donde el residuo conglomerado está siendo modificado, está principalmente afectado por la sorción; Este sistema involucra la adición de un sólido para separar un líquido de un residuo. Como pueden ser el carbón activado, silicato de sodio anhídrido, sulfato de calcio, arcilla y materiales similares. La mayoría de estos procesos remueven solamente el líquido sobre la superficie del sólido y no reduce al residuo para satisfacer los requerimientos de no líquidos en un relleno sanitario. (Cullinane y Jones, 1986).

En las reacciones puzolánicas, se utiliza una ceniza de sílica muy fina, no cristalina y el calcio en cal para producir una cementación de baja resistencia. El principal mecanismo de contención en la trampa física del contaminante en la unión de la matriz de concreto, donde el agua se remueve del concreto por la cal y el aumento de temperatura, este tipo de proceso tiene las características principales que se requiere que, el residuo se mezcle con otra ceniza muy fina reactiva u otro

material puzolánico, hasta tener la consistencia pastosa que permitirá dar forma del bloque deseado, aunque también requiere agua libre para efectuar el proceso de las reacciones internas (CNPMS, 2002).

La cal se adiciona a la mezcla con el residuo y la ceniza. Generalmente se requiere de 20 a 30% de cal para obtener la resistencia aceptable, pero ésta tendría un solo tipo de ceniza utilizada. La unión depende de la formación de silicato de calcio y de los hidratos de aluminio. (Oviedo, 2010).

Una interpretación de las reacciones químicas puzolánicas principales se debe a la formación de nuevos compuestos hidratados, llamados silicatos tricálcicos hidratados como en la hidratación del cemento (Oviedo, 2010).

El sistema es totalmente alcalino, por lo que con ciertos residuos pueden provocar la generación de gas o lixiviados.

Materiales como el borato de sodio, carbohidratados y dicromato de potasio pueden interferir químicamente con las reacciones de enlace. Los aceites y las grasas pueden interferir físicamente para reducir el contenido del contaminante (Oviedo, 2010).

Son aditivos especiales o pretratamiento de residuos peligrosos tratados con la mezcla cal- ceniza probablemente se clasifiquen nuevamente como peligrosos de acuerdo al procedimiento para caracterizar a un lixiviado por su toxicidad (TCLP) de la USEPA o en México la NOM 053 SEMARNAT 1993.

La evaluación de la eficacia de la estabilización necesita valorar las propiedades físicas, técnicas y químicas del material estabilizado, para ello se utilizan una gran cantidad de ensayos de laboratorio entre los que se citan:

Ensayos de extracción y lixiviación.

Estos procesos son donde los contaminantes son transferidos de una matriz sólida o estabilizada al lixiviante. El fluido al cual son lixiviados los contaminantes se denomina lixiviante, luego de que éste se haya contaminado se denomina lixiviado. La capacidad de un material estabilizado para lixiviar contaminantes se denomina lixivabilidad.

Al circular el lixiviante, los contaminantes de la muestra pasan de la masa estabilizada al lixiviante pudiendo disolverse en él, al ser lavados de la superficie del material estabilizado o difundirse desde la masa estabilizada al lixiviante, dependerá de las propiedades físicas y químicas, tanto del material estabilizado como del lixiviante. Los principales factores que afectan este fenómeno son la alcalinidad del producto estabilizado, la relación superficie-volumen del residuo y la tortuosidad, la medida de la longitud del camino para la difusión (Botasso, 2006).

El método de ensayo afecta a la lixivabilidad de la muestra a través de las siguientes variables:

- Relación lixiviante residuo
- Superficie del residuo (por ejemplo triturar la masa estabilizada a pequeñas partículas)
- Tipo de lixiviante (por ejemplo agua destilada, ácido acético, lluvia ácida simulada)
- pH del lixiviante
- Tiempo de contacto
- Tiempo de agitación
- Número de reposiciones con lixiviante nuevo
- Recipiente de extracción

- Temperatura

Ensayo de toxicidad, procedimiento de extracción (EP).

Se utiliza para generar un extracto líquido a partir de residuos sólidos. Un residuo se considera EP tóxico si su extracto presenta alguno de los ocho metales legislados y seis plaguicidas en concentraciones superiores al nivel umbral especificado en la normativa federal.

Aquí el bloque monolítico solidificado se tritura para que atraviese un tamiz de 9,5 mm. Se utiliza una solución de lixiviación de ácido acético 0,004M (pH=5) en una relación líquido-sólido de 16:1. La extracción se realiza durante 24hrs con agitación, luego se realizan análisis químicos del extracto filtrado para determinar la concentración de los constituyentes orgánicos e inorgánicos contaminantes. Este ensayo se utiliza para clasificar los materiales como peligrosos o no peligrosos, no como un ensayo de diseño (Botasso, 2006).

Características de toxicidad, procedimiento de lixiviación (PECT).

Se debe triturar el material estabilizado hasta obtener partículas menores a 9,5 mm, y luego se le debe mezclar con el líquido de extracción de ácido acético débil, con una relación en peso líquido-sólido de 20:1, y se agita en extractor rotativo durante 18hs a 30 rpm y 22 °C. Después de ello se filtra la muestra través de un filtro de fibra de vidrio de 0,6-0,8 micras y se denomina al filtrado como extracto PECT NOM 053 SEMARNAT 1993, el que se analiza en busca de una amplia variedad de constituyentes de residuos peligrosos, entre ellos compuestos orgánicos volátiles y semi volátiles, metales y plaguicidas (Botasso, 2006).

Hay que tener en cuenta que con los ensayos EP y TCLP se obtienen concentraciones para componentes específicos, estos datos se comparan a veces con 100 veces los estándares del agua potable para determinar si la muestra supera o suspende el TCLP. El factor 100 es para considerar la dilución en el medio (Botasso, 2006).

Ensayos químicos:

El tipo de análisis y el procedimiento analítico a menudo se especifican en el procedimiento de lixiviación citando los Métodos Estándar (APHA, 1992) o los protocolos de la EPA. Estos ensayos se reducen al análisis del fluido extractado o a la identificación de los contaminantes en el residuo.

Los distintos métodos de ensayos químicos son:

- a) Análisis de residuo total
- b) Metales por espectrometría de plasma acoplado inductivamente o absorción atómica
- c) Compuestos orgánicos por cromatografía de gases (CG) y espectrometría de masas (MS)
- d) Carbono orgánico total
- e) Pérdida al fuego
- f) pH
- g) Transformación de Fourier del espectro de infrarrojos (FTIR)
- h) Calorimetría de exploración diferencial y análisis gravimétrico térmico

Las propiedades físicas que se deben de considerar, siempre y cuando se puedan realizar son (APHA, 2010):

a) Contenido en humedad: determina la cantidad de agua o líquido presente en una cantidad dada de material. Se determina el peso húmedo de una muestra pequeña, de pocos gramos, se deja secar por 24hs a 105 °C y se pesa nuevamente. Luego se obtiene el contenido de humedad en porcentaje dividiendo el peso de agua por el peso de la masa seca.

b) Densidad másica seca y húmeda (peso unitario): el peso unitario másico se determina midiendo y pesando las muestras estabilizadas. Se calcula como el peso de sólidos más el fluido de los poros por unidad de volumen de material. El peso unitario seco se determina a partir del peso de sólidos tras secado en horno por unidad de volumen, las unidades son: g/cm^3 .

c) Peso específico: mide la relación masa-volumen del componente sólido individual del material de tres fases, y es la densidad de sólidos dividida por la densidad del agua. El método para determinarlo es de difícil ejecución y generalmente no puede aplicarse a un material solidificado que contenga distintos materiales, cada uno de ellos con un peso específico distinto.

d) Límites de Atterberg: miden el índice de plasticidad de los suelos.

e) Granulometría: es importante para el diseño de alternativas de estabilización. Se utilizan tamices para la fracción gruesa. Para la fracción fina (partículas entre 0,0074mm a micras) se usan métodos gravitacionales que emplean hidrómetros (las partículas mayores se depositan más rápido en el agua y el hidrómetro permite medir las diferencias de tamaño). No se aplica al material estabilizado pues éste generalmente es un monolito.

f) Índice de cono en laboratorio: se realiza sobre el material estabilizado inmediatamente después de la mezcla de los reactivos y antes del fraguado. Habla sobre la resistencia de los materiales en la mezcla e interviene en la toma de decisiones acerca del manejo de los materiales y la capacidad para resistir el tráfico rodado durante la construcción. Se deja caer un cono desde una altura (ambos estandarizados) sobre el material y se mide la distancia de penetración.

g) Penetrómetro de campo: permite valorar las propiedades de la mezcla del lodo estabilizado antes de su curación. Es un cilindro estandarizado que se empuja sobre el material para medir su resistencia a la penetración, obteniendo la resistencia a la compresión libre en kg/cm^2 . Se puede realizar en campo.

h) Examen de microestructura: mediante: difracción de rayos x y microscopía: óptica electrónica y dispersiva. Se utiliza para conocer mejor la naturaleza de los procesos de estabilización.

i) Formación de sobrenadante durante curación y velocidad de fraguado: caracterizan el comportamiento de los residuos tratados en las primeras horas tras la mezcla. Se utilizan preferentemente para materiales tipo hormigón y no se adaptan a materiales tipo suelo. Informan sobre la aceptabilidad de la mezcla. Se coloca una muestra recién mezclada en un vaso graduado de un litro de capacidad, y al sedimentar los sólidos y el sobrenadante queda flotando, se pueden medir las cantidades de cada uno de ellos. El tiempo de fraguado puede medirse con una aguja Vicat: midiendo la penetración a diferentes tiempos.

De propiedades técnicas (APHA, 2010):

a) Ensayo de resistencia a compresión libre: determina la resistencia de los materiales cohesivos, los comprendidos entre las arcillas ligeras y el hormigón. Un cilindro de 7,1 cm de diámetro por 14,2cm de altura se carga axialmente, midiendo esta carga y su deformación, pudiendo calcularse así la tensión aplicada y la deformación resultante.

b) Consolidación: evalúa el asentamiento del residuo estabilizado. Se aplica una carga axial y se impide la deformación lateral, midiendo los tiempos de deformación para cada carga aplicada. Se realiza el diagrama de consolidación.

c) Conductividad hidráulica: a veces se la denomina permeabilidad. Se utiliza para obtener información sobre la velocidad a la que los compuestos químicos presentes en el residuo tratado migran al medio. Se utiliza el ensayo de permeabilidad triaxial, la muestra se encapsula en una membrana flexible que permite que la muestra se contraiga o expanda bajo las tensiones aplicadas en confinamiento.

d) De propiedades de durabilidad: Estos ensayos evalúan el rendimiento de la masa estabilizada a largo plazo, para resistir ciclos repetitivos de erosión. a) Durabilidad Húmedo-seco (ASTM D4843): son doce ciclos de humectación-deseccación, de cinco horas bajo el agua y 42 hs en horno bajo condiciones de secado a baja temperatura (71°C), cada uno. Evaluando luego la variación de volumen, contenido de humedad y pérdida de peso. Después de los doce ciclos se determina la pérdida total de peso de la muestra, o bien se determina el número de ciclos que provocan la disgregación si la muestra no permanece intacta al completarse los doce ciclos.

e) Durabilidad Hielo-deshielo (ASTM D4842): condiciones de erosión de congelación y deshielo. Las muestras se someten a doce ciclos, cada uno consta de un período de congelación de 24 hs a – 20°C y otro de deshielo de 24hrs en agua. El rendimiento se evalúa igual que en el ensayo anterior.

Durante esta búsqueda de información no se encontró información sobre estudios donde se solidifiquen o reusen jales mineros así como lodos de refinería.

Por lo anterior, y debido a que durante la experimentación se realizaran algunos ensayos y análisis para la comprensión de los procesos de solidificación, se citan algunos artículos de ensayos previos de pruebas semejantes a la experimentación que se desarrolló durante este estudio.

2.1 Estudios previos.

Parte del sustento y debido a que no se encontró información sobre estudios similares, se resumen artículos encontrados que fundamentan alguna parte del trabajo y que aportan alguna experiencia ante posibles contingencias durante la experimentación, dichos artículos son los siguientes:

2.1.1 Estructura y propiedades de clinkers de cemento Pórtland obtenidos con combustibles residuales.

Trezza y Scian (2009), comentan que los residuos combustibles, provenientes de diferentes procesos industriales, son comúnmente usados en la producción de cemento Pórtland con intención de aprovechar su energía residual, reducir costos de producción y/o estabilizar sustancias tóxicas y metales pesados.

Las modificaciones estructurales, ocasionadas por la presencia de residuos en la estructura de los silicatos, determinaron consecuencias en la velocidad de hidratación, resistencia mecánica y distribución porosimétrica.

Se estudia, además, la lixiviación de los diferentes clinkers a fin de establecer la capacidad de la matriz de cemento para la solidificación/estabilización de residuos peligrosos.

En el caso del clinker sintetizado en presencia de virutas contaminadas con cromo (VI), dada la peligrosidad del cromo y el alto contenido que estas poseen (2% Cr_2O_3), se realizaron ensayos de lixiviación a fin de verificar la S/E del contaminante. El ensayo realizado implica la extracción durante 18 hrs. en solución de pH= 5. El cromo lixiviado fue oxidado a Cr(VI) y cuantificado colorimétricamente. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2.1

Tabla 2.1 Lixiviación de cromo en los diferentes clinkers (ppm = mgCr (VI)/kg clinker), (Trezza y Scian, 2009).

Muestra	ppm cromo incorporado al clinker	ppm cromo lixiviado	% cromo lixiviado	% cromo retenido	mg Cr(VI)/L solución lixivante
V1	84,15	Nd	-	-	0,17
V2	126,31	41,42	32,79	67,21	0,824
V3	168,42	37,98	22,55	77,45	0,7597

Los resultados obtenidos señalan un alto porcentaje de cromo retenido al realizar las curvas calorimétricas de las primeras 48 hrs. de hidratación, ver figura 2.1, todos los clinkers mostraron diferencias con respecto a la referencia y en función del porcentaje incorporado. Con excepción de la mezcla combustible que determinó un atraso de la hidratación temprana, las restantes incorporaciones en general aceleraron el inicio y final del fraguado, dependiendo este efecto del porcentaje incorporado, aunque el efecto no siempre fue función directa del mismo. A modo de ejemplo se muestran, en la Figura 2.2, las curvas obtenidas en presencias de cenizas de neumáticos con diferentes porcentajes de incorporación.

Estos estudios indican que la velocidad de hidratación temprana se ve afectada por la incorporación de cenizas. Las impurezas incorporadas aceleran la velocidad de hidratación (principio y final del fraguado) con respecto a T0, y dentro de la serie se observa que la velocidad aumenta hasta T10 (10% de reemplazo), para luego volver a hacerse menos veloz a mayores porcentajes de reemplazo (T20 y T30).

La influencia de las cenizas de neumáticos sobre las características estructurales del clinker y su comportamiento durante la hidratación temprana es función del porcentaje incorporado, aunque parece existir una cantidad "límite", superada la misma, el efecto se invierte.

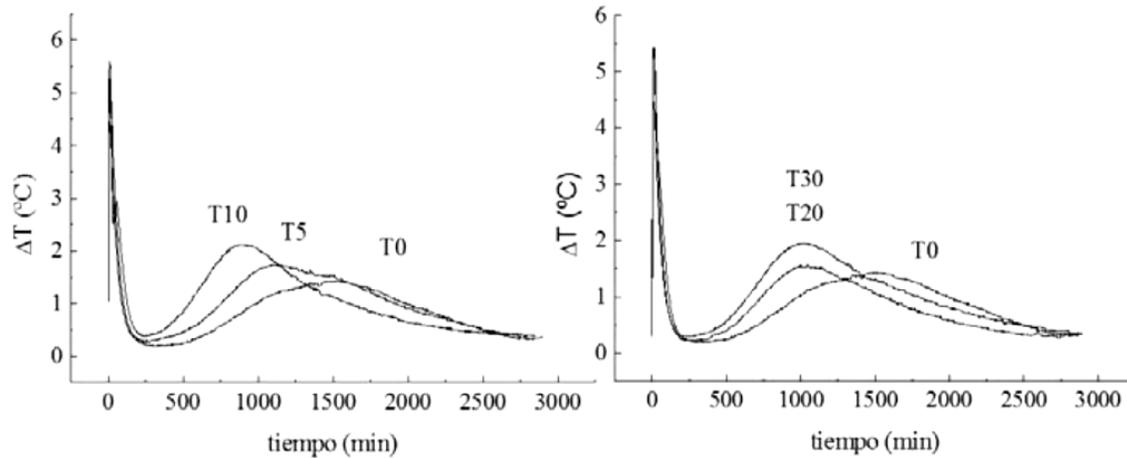


Figura 2.1 Gráfica de cambio de temperatura respecto al tiempo, (Treza y Scian, 2009).

Los resultados de resistencia a la compresión a la edad de 3, 7, 14 y 28 días se analizaron en todos los casos. En el caso de aceite usado de combustibles se obtuvieron valores de resistencia mecánica variables con el porcentaje de incorporación de cenizas. Los valores más altos y superiores de resistencia se dieron con incorporaciones mínimas de cenizas, como puede observarse en la Figura 2.2. El carbón residual determinó valores de resistencia mecánica menores a la referencia, de igual manera que los neumáticos.

En términos generales se puede decir que la incorporación de impurezas a través del uso de los combustibles alternativos utilizados en este trabajo modifican principalmente las temperaturas de formación y permanencia de la fase fundida formada durante la clinkerización (temperaturas de clinkerización y cristalización). Esto determina modificaciones en la microestructura del clinker obtenido, lo que se refleja en una mayor o menor energía requerida para la molienda –aunque no en todos los casos fue importante–, y en otras propiedades como: tiempo de fraguado, resistencia mecánica y distribución de diámetro de poros de los cementos hidratados

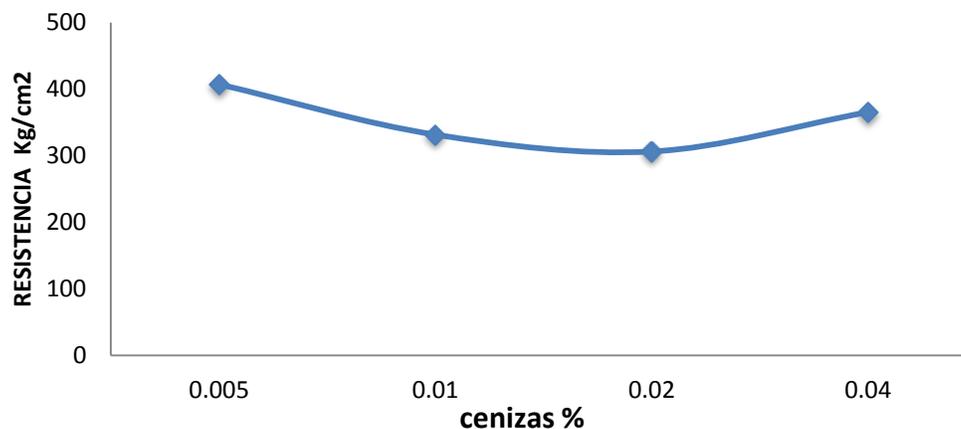


Figura 2.2 Gráfica Módulo de resistencia a rotura a 28 días contra porcentaje de cenizas de aceite usado en automotores, (Treza y Scian, 2009).

Específicamente se puede concluir que:

- La incorporación de virutas de curtiembre contaminadas con cromo, determinó modificaciones estructurales que se vincularon a la solidificación/estabilización de los contaminantes. Esta confinación se vio confirmada a través de los ensayos de lixiviación. Los demás parámetros medidos no mostraron diferencias significativas con la referencia.
- La utilización de neumáticos usados, que incorpora principalmente metales como Zn y Pb, determinó como los casos anteriores, modificaciones estructurales que resultaron en general en un mayor requerimiento de molienda.

2.1.2 Desarrollo de la tecnología de inmovilización, estabilización solidificación de residuos peligrosos.

Según Romero et al (2007), la tecnología de inmovilización de residuos peligrosos que evaluó, para conocer la efectividad de materiales cementantes, son una mezcla de cemento con agregados, en las proporciones siguientes:

Cemento Pórtland / carbonato de calcio (50/50 y 75/25).

Cemento Pórtland/puzolana (80/20).

El residuo utilizado para la inmovilización fue un lodo proveniente del tratamiento de agua residual, mismo que es parte del proceso de electrodeposición de cromo y níquel sobre cobre.

Se determinó que los niveles de lixiviación del níquel están por encima de la norma. Se encontró que todos los cementos logran la inmovilización satisfactoria del níquel, pero la mezcla cemento Pórtland/puzolana (80/20) presenta las mejores resistencias mecánicas para la disposición del material tratado en un relleno sanitario, por tanto es la más recomendable para el tratamiento.

Con el fin de estimar si el lodo se puede disponer en un relleno sanitario según Romero et al (2007), se determinó las características tóxicas de lixiviación del lodo mediante el método toxicity characteristic leaching procedure (TCLP), de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, EPA o NOM 053 SEMARNAT 1993 en México.

Posteriormente, se realizaron mezclas del lodo con diferentes materiales cementantes: cemento Pórtland/ carbonato de calcio (50/50 y 75/25); y cemento Pórtland/puzolana (80/20). Con estas mezclas se realizaron bloques que se dejaron fraguar por 28 días, al cabo de los cuales, se determinó su resistencia mecánica, todo lo anterior siguiendo las normas ASTM C-109, C-305 y C-230.

Se analizó solamente níquel porque es el único metal presente en el lodo que supera la norma para este tipo de ensayo. Tanto en el lodo, como en las mezclas lodo/cemento fue necesario determinar el pH con el fin de determinar cual disolución extractiva utilizar al aplicar el método TCLP.

Al realizar el ensayo de TLCP en el lodo una empresa privada determinó que superaba la norma nacional en cuanto a la concentración de níquel, tal como se puede observar en la tabla 2.2 Para el caso del cromo la concentración en el lixiviado está muy por debajo de la regulación nacional y el

cobre no está regulado. En vista de lo anterior al realizar el ensayo TCLP de los especímenes lodo/cemento una vez fraguados solamente se determinó la efectividad de la inmovilización mediante el análisis de níquel en el lixiviado. En la tabla 2.3 se observan los datos del metal de interés (níquel) en el lixiviado del lodo tratado con los diferentes tipos de cemento. Para todos los sistemas de cemento utilizado, se encontró una disminución en el contenido del metal en el lixiviado, incluso utilizando 6 partes de lodo por cada 4 partes de material cementante.

Tabla 2.2 Concentración de metales de interés presentes en el lixiviado del lodo sin tratar y los valores de la norma nacional de Costa Rica (Romero et al, 2007).

Metal	Concentración del metal (mg L ⁻¹)		
	Norma	Lodo	Desviación estándar ^(a)
Níquel	5,0	31	1
Cromo	5,0	0,15	0,01
Cobre	N.R. ^(a)	18,3	0,8

^(a)El cobre no se encuentra regulado; ^(b) Desviación estándar de cinco determinaciones.

En la tabla 2.3 se observa al pH en el poro de las mezclas ya solidificadas esta alrededor de 11 y 12 unidades. En este intervalo de pH, según se puede observar en la Figura 2.3, Estos valores de pH son del cemento Pórtland endurecido. Por ello el objetivo de utilizar mezclas de cemento Pórtland-carbonato y cemento Pórtland-puzolana, es obtener un pH de la solución en el poro inferiores a 12.5 y de esta forma alcanzar una disminución en la solubilidad. En este sentido los materiales puzolánicos son adecuados porque reaccionan con el hidróxido de calcio liberado durante el proceso de hidratación del cemento Pórtland, bajando el pH 3.5. Por su parte, el carbonato de calcio es apropiado porque disminuye el pH inicial del sistema y por tanto se da una disminución en la lixiviación de metales pesados.

Tabla 2.3 Concentración de níquel en el lixiviado y pH en el poro de la muestra solidificada de lodo con diferentes tipos de cemento (Romero et al, 2007).

Tipo de cemento		Cemento masonry		Cemento Pórtland + 25 % CaCO ₃		Cemento puzolánico		Cemento Pórtland tipo I	
Proporciones		Conc.	pH	Conc.	pH	Conc.	pH	Conc.	pH
Cemento	Lodo	Ni (mg L ⁻¹)	(±0,01)	Ni (mg L ⁻¹)	(±0,01)	Ni (mg L ⁻¹)	(±0,01)	Ni (mg L ⁻¹)	(±0,01)
10	0	ND	12,17	ND	12,04	ND	12,44	ND	12,19
7	3	ND	11,87	ND	12,01	< 0,60	12,20	ND	12,20
6	4	ND	11,84	ND	11,71	< 0,60	12,17	< 0,60	12,17
5	5	ND	11,33	ND	11,74	< 0,60	11,92	< 0,60	12,11
4	6	< 0,6	11,09	ND	11,27	ND	11,81	< 0,60	12,08

N.D. no detectable. Límite de cuantificación del níquel de 0,6 mg L⁻¹

El níquel fue efectivamente estabilizado o retenido, además de la capacidad de retener los contaminantes, debe cumplir con requisitos de resistencia mecánica a la compresión para disponerse adecuadamente en un relleno sanitario.

La norma de la USEPA recomienda un valor de 0.35MPa (3.51kg cm⁻²).

En la tabla 2.4 se observa las resistencias mecánicas. Es de esperar valores de resistencia mayores al usar cemento con adiciones puzolánicas porque este tipo de cemento presenta la formación de conglomerados con propiedades cementantes

Tabla 2.4 Resistencia mecánica para el lodo inmovilizado utilizando varios tipos de cemento (Romero et al, 2007).

Tipo de cemento		Resistencia mecánica, MPa (\pm desv. Est)			
Proporciones		Cemento Pórtland + 50 % CaCO ₃	Cemento Pórtland + 25 % CaCO ₃	Cemento Pórtland + 15 % puzolanas	Cemento Pórtland
Cemento	Lodo				
10	0	31,26 \pm 3,16	40,08 \pm 3,13	62,92 \pm 4,34	105,99 \pm 2,45
7	3	1,15 \pm 0,07	3,43 \pm 0,27	11,28 \pm 1,21	11,03 \pm 1,92
6	4	0,18 \pm 0,02	1,02 \pm 0,08	5,89 \pm 0,69	6,36 \pm 0,66
5	5	0,17 \pm 0,01	0,40 \pm 0,03	2,77 \pm 0,32	2,72 \pm 0,19
4	6	N.R.	0,13 \pm 0,01	0,54 \pm 0,02	0,36 \pm 0,06

N.R. no realizado. No hubo fragua.

Romero et al (2007), concluye que la tecnología de inmovilización fue aplicada efectivamente a un contenido de níquel, cromo y cobre. Presentando concentraciones de cromo y cobre por debajo de la normativa aplicable para el análisis de lixiviación (TCLP) a diferencia del níquel.

Para la inmovilización del níquel se utilizaron mezclas de cemento Pórtland y carbonato de calcio y cemento Pórtland y materiales puzolánicos. Ambas mezclas de materiales lograron reducir la lixiviación del níquel a valores por debajo de la norma nacional. Sin embargo, las mezclas con materiales puzolánicos presentaron una mayor resistencia mecánica.

El níquel se logró inmovilizar satisfactoriamente a valores por debajo de la norma nacional debido a la formación de hidróxido insoluble al pH del poro entre 11 y 12. Reacciones de adición y sustitución; posible formación de nuevos compuestos y la adsorción física en los silicatos cálcicos hidratados del cemento. En general al inmovilizar un material peligroso el material resultante debe cumplir con las normas en cuanto a lixiviación de los contaminantes y resistencia mecánica.

2.1.3 La zeolita en la mitigación ambiental.

Según Fáber et al (2006). La adición de zeolita a suelos contaminados con agroquímicos, crea una malla molecular capaz de retener iones en el suelo, haciendo que el sistema suelo-planta sea más eficiente en términos de mayor producción por unidad de área y de menor contaminación del recurso hídrico de los acuíferos.

Fáber resume que la zeolita es un aluminosilicato hidratado cristalino (arcilla) con estructuras tridimensionales, caracterizados por la habilidad de retener y liberar agua e intercambiar iones sin modificar su estructura atómica, intercambian cationes como Ca⁺, Mg⁺⁺, K⁺ y NH₄⁺, así como diversos compuestos de fosfatos, amonios y componentes de la materia orgánica. Posee una estructura tridimensional rígida (similar a un panal de abejas) conformado por una red de túneles interconectados creando un amplia área superficial para realizar el intercambio catiónico y la adsorción de humedad. Esta última puede entrar y salir del armazón tridimensional sin variar la estructura de la arcilla.

Existen cerca de 50 tipos de zeolitas, en cada una de ellas varían sus propiedades físicas y químicas originando diferentes densidades, selectividad catiónica y tamaño de los poros. Por ejemplo la Clinoptilolita, la cual es una de las zeolitas más comúnmente utilizadas, tiene un 16% más de volumen de poros que la Analcima. Estas características redundan en que no todos los objetivos de los tratamientos pretendidos con zeolitas resultan adecuados si no se conoce el tipo de material a utilizar para cada actividad en particular (CACT, 1999).

Investigaciones con zeolitas.

La adición de zeolitas a los suelos incrementa, tanto la capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) como el pH, en la mayoría de los casos en que es utilizada. Por ejemplo, medios ricos en zeolitas fueron adicionados a suelos ácidos (arenosos). La adición de 35 Mg ha⁻¹ de zeolita, esta incrementó la CIC en 5.1 cmol kg⁻¹. También se evidencia que la retención de agua por parte de la zeolita está ligada al transporte por la absorción radicular (Fáber et al, 2006).

La adición de zeolita en cantidad de 2.5 g por cada 250 g de suelo es suficiente para remover la contaminación causada con P, Cu y Zn hasta niveles inocuos para plantas y otros organismos. Existen trabajos dirigidos a investigar la eficiencia de la zeolita, ya no en el suelo, sino como filtro purificador de agua provenientes de sistemas de alto consumo de agroquímicos (Fáber et al, 2006).

Fáber et al (2006), concluyen que La zeolita tiene características y propiedades muy variadas y mismas que pueden ser utilizadas como por ejemplo para:

- La descontaminación de medios edáficos y acuáticos, entre otros. Por su alto poder adsorbente.
- Pudiendo ser utilizada para el tratamiento benéfico de suelos y aguas con presencia de metales pesados.
- El aumento en la retención de iones en el suelo posiblemente genere una disminución en los niveles de contaminación de lixiviados producto de las actividades agropecuarias, con ello una menor contaminación de aguas subsuperficiales.
- Modificar favorablemente propiedades químicas, como la capacidad de intercambio catiónico, sin alterar otras propiedades físicas de los suelos.

2.1.4 Tratamiento de residuos de arsénico provenientes del tratamiento del agua.

Sandoval y Jáuregui (2002), en la primera etapa de su experimentación establecieron una metodología de solidificación de lodos generados de los procesos de remoción de arsénico del agua por coagulación floculación, mediante la fabricación de tabiques para construcción.

En la elaboración de los tabiques se probaron tres cantidades de arenilla, gravilla y dos concentraciones diferentes de arsénico en el lodo. Los tabiques fueron sometidos a una lluvia de pH 5.1 y una lluvia ácida de pH 3.6 para conocer su posible lixiviación de arsénico del residuo. Además, los tabiques fueron sometidos a pruebas de compresión para determinar si el lodo y la lluvia debilitan la estructura del tabique.

El tabique constituido con mayor contenido de arenilla y menor gravilla no lixivió arsénico. Su resistencia a la compresión fue de 113 kg/cm^2 un valor dentro del intervalo de la norma (40 a 120 kg/cm^2) para este tipo de material (Sandoval y Jáuregui, 2002).

En la figura 2.3 se muestra la metodología que se siguió para obtener un compuesto de arsénico que se pueda emplear como materia prima en la formulación de un residuo solidificado, para que se pueda considerar como no peligroso y se pueda usar en la construcción o disponer como relleno sanitario (Sandoval y Jáuregui, 2002).

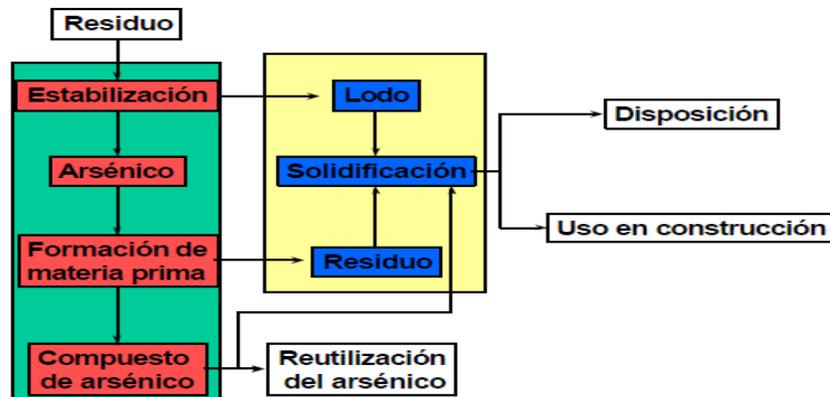


Figura 2.3 Metodología del trabajo fuente: Sandoval y Jáuregui, 2002.

Se estudió el tratamiento de coagulación floculación, para este método ya que es sencillo y barato, sirve para estabilizar cualquier tipo de residuo, emplea cemento Pórtland que forma hidróxidos o carbonatos con los metales.

Como se muestra en la figura 2.4, es necesario que se realicen pruebas de lixiviación de arsénico, considerando que el bloque sólido puede ser sometido a una lluvia ácida, la cual puede disolver o liberar el arsénico y sobrepasar la concentración recomendada de 1 mg/L (Benavides, 1997).

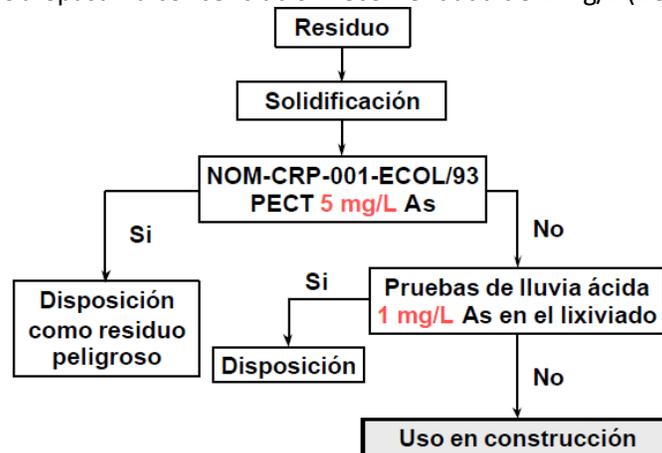


Figura 2.4 Solidificación con cemento Pórtland, Fuente: Sandoval y Jáuregui, 2002

Sandoval y Jáuregui (2002) realizaron pruebas de solidificación, encontrando que por su alto contenido de agua, los lodos de arsénico se pueden utilizar en la elaboración de tabiques para la construcción de casas habitación como una alternativa de disposición de estos residuos.

Elaboración de Tabiques.

Generalmente en la elaboración de tabiques de 10X12X28 cm la medida más común para el material es la pala, por lo que para fabricar 20 tabiques se emplean 12 palas de gravilla, tres de arena, 2.5 de cemento Pórtland y 14 litros de agua. En la tabla 2.5 se muestran las cantidades de material utilizado para la elaboración de los tabiques del experimento.

Tabla 2.5 Cantidad de material utilizado para la elaboración de tabiques (palas), Fuente: Sandoval y Jáuregui, 2002

Tabique	Gravilla	Arenilla	Cemento
Normal	3	0.75	0.4
Reforzado	2	1.5	0.4
Masaroca	2	1	10 Kg

La masaroca es un material tipo cemento que se emplea en la construcción para impermeabilizar, sellar o tapar grietas.

Generación de lluvia ácida.

Para conocer las condiciones de lluvia bajo las que el arsénico puede ser lixiviado de los tabiques, se simuló agua de lluvia natural y lluvia ácida.

Para generar la lluvia ácida, se tomó como referencia el pH promedio y el pH más bajo de las lluvias que afectan al Distrito Federal. Del reporte del año de 1999 del sistema de monitoreo ambiental del Distrito Federal, se obtuvo que el pH más ácido en la temporada de lluvias fue de 3.6.

Además, se tomó como referencia la precipitación pluvial promedio mensual de la Comisión Nacional de Agua, (CNA, 2000) para el Distrito Federal, para calcular el volumen de agua y la frecuencia de su aplicación a los tabiques (ver Tabla 2.6). Con estos datos se decidió que el agua de lluvia de un mes se aplicará en dos días a cada tabique, debido a la premura del tiempo para realizar el experimento. Entonces, con el área del tabique ($12 \times 28 = 336 \text{ cm}^2$) y la lámina se calculó el volumen de agua con el que debería ser rociado el mismo. Estos volúmenes de lluvia se muestran en la tabla 2.6

Tabla 2.6 Volumen de lluvia por tabique, Fuente: Sandoval y Jáuregui, 2002.

Mes	Lámina (mm)	vol. lluvia al día (ml)
Enero	0	0
Febrero	0.9	15.12
Marzo	105	176.4
Abril	11.5	193.2
Mayo	106	1790
Junio	131	3040.8
Julio	120	2024
Agosto	163	2745.12
Septiembre	99	1676.64
Octubre	72	12.6
Noviembre	10	168
Diciembre	0	0

Tomando como base la información anterior, en la tabla 2.7 se muestran los factores y niveles bajo los cuales se realizó el experimento de someter los tabiques a una lluvia.

Tabla 2.7 Factores y niveles del diseño de experimento, Fuente: Sandoval, 2002.

Material	Lluvia			
	pH 5.1		pH 3.6	
	Concentración de AS			
	Alta	Baja	Alta	Baja
Tabique normal (TN)	1	2	7	8
Tabique Reforzado (TR)	3	4	9	10
Tabique masaroca (TM)	5	6	11	12

Sandoval y Jáuregui (2002), realizaron la toma de muestras una vez fabricados los tabiques molieron uno de cada tipo de material y diferente concentración de lodo con arsénico, y se analizó para establecer la concentración inicial de éste en el experimento. Posteriormente, cuando se pudo recolectar el escurrimiento de agua que libera el tabique, se analizó su contenido de arsénico de forma semicuantitativa por medio del método de Merckoquant, que es colorimétrico. Esto con la finalidad de poder evaluar si existe desprendimiento de arsénico antes de que finalice el experimento.

Adicionalmente, Sandoval y Jáuregui (2002), hicieron pruebas a resistencia a la compresión simple. Se realizaron pruebas de compresión simple a los tabiques sometidos a la lluvia ácida, para poder

establecer si ésta no influyó en su estructura. Este método se aplica a especímenes moldeados de concreto de acuerdo a la norma ASTM C39 C67. La pieza que se prueba debe estar recubierta en sus caras extremas con azufre u otro material que permita asegurar que las caras en contacto con la máquina sean planas y paralelas. La resistencia a la compresión de un tabique es de 45 a 120 Kg/cm².

Como primer análisis para realizar el experimento fue necesario comprobar que los tabiques fabricados con residuo de arsénico no son peligrosos. Para tal efecto se empleó la Norma Oficial Mexicana NOM-052 SEMARNAT 2005 que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente, y que en la tabla 2.8 de características del lixiviado (PECT) que hacen peligroso a un residuo por su toxicidad al ambiente, se encuentra el arsénico con una concentración límite de 5 mg/L.

Se Apoyó en la NOM 053 SEMARNAT 2003, que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

Tomando en consideración que:

- Una prueba de 20 L con una concentración de arsénico de 1 mg/L, contiene 20 mg de arsénico.
- La remoción de arsénico fue del 70%.
- Se obtiene un volumen de 80 mL de lodo con 14 mg del metaloide.
- Para elaborar un tabique se requieren 0.712 litros de lodo.
- Un tabique con lodo sin espesar contiene 124.6 mg de arsénico.
- Un tabique con lodo espesado contiene 327.9 mg de arsénico.

Se determinó la cantidad teórica de arsénico que contienen 100 g de cada tipo de tabique y la concentración final que se puede obtener al realizar la extracción con 2 litros del reactivo. Estos resultados se muestran en la tabla 2.8

Tabla 2.8 Cantidad teórica de arsénico en los tabiques, Fuente: Sandoval y Jáuregui, 2002.

Tabique	Peso (kg)	mg As	mg As/100g	mg As/L reactivo de extracción
TN	4.3	124.6	2.9	1.45
TN-E	4.9	327.9	6.69	3.35
TR	5.35	124.6	2.33	1.16
TR-E	5.3	327.9	6.19	3.09
TM	5.4	124.6	2.31	1.15
TM-E	5.3	327.9	6.19	3.09

Nota: La "E" significa que fue elaborado con lodo espesado y cuando no se indica fue elaborado con lodo sin espesar.

De acuerdo con la NOM 052 SEMARNAT 2005, la concentración de As debe ser inferior a 5 mg/L. La Tabla 2.8 demuestra que las concentraciones son inferiores a las que indica la Norma, por lo que no se requieren realizar pruebas de extracción al material de los tabiques y estos no se consideran residuos peligrosos.

De los resultados para lluvia ácida (pH de 3.6) se determinó que ésta tiene un efecto en los tabiques normales y con masaroca que contienen alta concentración de arsénico ya que se detectó arsénico en el lixiviado al final del experimento. Se sospecha, además, de una disminución en la resistencia de estos tabiques. Sin embargo, los lixiviados de los tabiques reforzados no lixivian arsénico.

No se encontró arsénico en los lixiviados de los tabiques sometidos a agua de pH 5.1. Para determinar si las lluvias afectaron la estructura de los tabiques se realizaron pruebas de compresión, los resultados se muestran en la tabla 2.9

Tabla 2.9 Resultados de compresión simple de los tabiques (kg/cm²) Fuente: Sandoval y Jáuregui, 2002.

Material	Blanco	Lluvia			
		pH 5.1		pH 3.6	
		Concentración de AS			
		Alta	Baja	Alta	Baja
Tabique normal (TN)	65	40.5	35.5	38	34
Tabique Reforzado (TR)	130	119	103	125	107
Tabique masaroca (TM)	144	131	105	137	103

En general la lluvia afecta la estructura de los tabique en menor o mayor grado, sin importar como fueron elaborados, sin embargo los que presentan un mayor daño fueron los que se fabricaron con las cantidades usuales de material, ya que su capacidad de carga disminuyó en 43% y fue inferior a lo que marca la Norma (40 kg/cm²). Sin embargo, los que se reforzaron y los de masaroca cumplen la Norma satisfactoriamente. El pH del agua no parece tener efecto significativo en la estructura de los tabiques.

Sandoval y Jáuregui 2002, concluyen que para la construcción de tabiques y su posible utilización en la construcción, esta tecnología es viable para tratar residuos peligrosos de arsénico, con un tratamiento previo de precipitación de hidróxidos, con sulfuros y la solidificación. Adicionalmente.

- La elaboración de tabiques con lodos de arsénico es un proceso alternativo de tratamiento de residuos conteniendo este contaminante.
- La liberación del arsénico se ve favorecida si su concentración es alta en el tabique y el pH del agua de lluvia es bajo.
- La lluvia ácida disminuyó la capacidad de carga de los tabiques que fueron elaborados normalmente en un 43% en promedio, por lo que no cumplen con la normativa.
- La lluvia ácida no afectó la capacidad de carga de los tabiques, pero si favorece la lixiviación del arsénico.
- En comunidades o ciudades donde no existan problemas de contaminación atmosférica, el empleo de tabiques que contienen arsénico, como material de construcción, es muy factible.
- Es necesario que las paredes construidas con estos tabiques sean cubiertas con una capa de cemento para evitar desprendimientos de material que puedan contener arsénico.

2.1.5 Comportamiento ambiental de lodos de fundición estabilizados/solidificados.

Los procesos físicos y térmicos son mucho más costosos debido a la generación de calor o gran consumo de materiales poliméricos caros, por lo que no se han tenido en cuenta en este trabajo. En la tabla 2.10 se muestran las principales ventajas e inconvenientes de los procesos E/S.

Tabla 2.10 Ventajas e inconvenientes de los diferentes procesos E/S, (Fuente: Coz, 2001).

Procesos	Ventajas	Desventajas
Cemento	<ul style="list-style-type: none"> - Numerosos estudios y experiencia - Tolerantes a variaciones químicas del residuo - Relativo bajo costo 	<ul style="list-style-type: none"> - Vulnerable a lixiviados ácidos - Afectado por microorganismos - Aditivos, a veces, costosos - Aditivos para orgánicos - Aumento de volumen excesivo
Cal	<ul style="list-style-type: none"> - Costo bajo - Química conocida - Válido para orgánicos 	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento de volumen - Problemas de fraguado y curado - Muy exotérmico, peligro de incendio - Lixiviación de metales - Resistencias mecánicas pobres
Puzolanas	<ul style="list-style-type: none"> - Para orgánicos - Bajo costo 	<ul style="list-style-type: none"> - Poca información de sus mecanismos y reacciones
Fosfatos	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo costo - Bajo volumen - Fácil aplicación 	<ul style="list-style-type: none"> - No es válido para orgánicos
Termoplásticos	<ul style="list-style-type: none"> - Uso en radiactivos - Baja lixiviación - Bajo volumen - Totalmente inerte - Experiencia escasa 	<ul style="list-style-type: none"> - Costo elevado en energía, equipamiento y mano de obra - Alta volatilización - Existen residuos incompatibles
Polímeros Orgánicos	<ul style="list-style-type: none"> - Poca cantidad - Bajo volumen - Experiencia escasa 	<ul style="list-style-type: none"> - Costo alto - Peligro de incendio - Volatilidad alta - Algunos son biodegradables
Encapsulación	<ul style="list-style-type: none"> - Lixiviación baja - Muy estable 	<ul style="list-style-type: none"> - Costo elevado de energía y materiales - Algunos materiales son inflamables - Se requiere secado de residuos

Los residuos de la fundición requieren un tratamiento que por lo general es más caro que su confinamiento o estabilización, por ello la E/S es un método viable para este fin, en la tabla 2.11 se incluyen los diferentes tipos de tratamientos por solidificación a los que comúnmente se aplican a diversos tipos de residuos y su mejor tratamiento por E/S. Hay diferentes condiciones óptimas y mejores tratamientos para diferentes residuos, por ello se enlistan más adelante los mejores tratamientos y los más viables.

Tabla 2.11 Tratamientos más comunes para E/S (Fuente: Coz, 2001).

Proceso	Residuos
Basados en cemento	Metales pesados, residuos inorgánicos con bajo porcentaje de orgánicos, residuos ácidos, oxidantes, sólidos orgánicos (salvo volátiles), residuos radiactivos
Basados en cal	Metales pesados, FeCl ₃ , sulfatos, residuos inorgánicos con bajo porcentaje de orgánicos, residuos ácidos, oxidantes, sólidos orgánicos (salvo volátiles), aceites, residuos radiactivos
Basados en puzolanas	Metales pesados, residuos inorgánicos con bajo porcentaje de orgánicos, residuos ácidos, oxidantes, sólidos orgánicos (salvo volátiles), residuos radiactivos
Basados en fosfatos	Metales pesados, residuos oxidantes
Otros procesos fisicoquímicos	Metales pesados, sulfatos, residuos inorgánicos con bajo porcentaje de orgánicos, residuos ácidos, oxidantes, sólidos orgánicos (salvo volátiles), residuos radiactivos
Termoplásticos	Metales pesados, residuos inorgánicos con bajo porcentaje de orgánicos, sales solubles, sólidos orgánicos (salvo volátiles), aceites, disolventes, residuos radiactivos y residuos de alta toxicidad no tratables por otros procesos
Polímeros orgánicos	Sulfatos, haluros, algunas sales solubles, residuos ácidos, orgánicos no volátiles, residuos radiactivos
Encapsulación	Tóxicos muy solubles, sulfitos, sulfatos

Algunos residuos reaccionan con el tratamiento y comprometen la estructura del bloque solidificado, en el caso de los residuos de los hornos su principal característica es que el pH es muy ácido así como la presencia de metales pesados y silicatos que en forma de residuo se aglutinan, formando conglomerados más pesados o más contaminantes, En la tabla 2.13 se enuncian algunas condiciones que hacen desfavorable la interacción entre el residuo y el bloque. Por otro lado algunos residuos se ha visto que proveen características positivas, ver tabla 2.12, como resultado de su interacción entre el bloque y el residuo, esto dependiendo de la aplicación que se desee.

Tabla 2.12 Tipos de residuos susceptibles de E/S, (Coz, 2001).

Compuestos	Efectos
Sales metálicas	Algunas retardan el fraguado
sales de mg, Sn, Zn, Cu y K	Reducen resistencia
sales de Na y K	Aumentan el pH e interfieren hidratación de Ca, aceleran a bajas concentraciones y retardan a altas
Silicato sódico	Acelerador del Fraguado consume exceso de agua y puede formar gel sílice
Carbonatos alcalinos	Retardan el fraguado producen thaumasita en lugar de ettringita
MgO y MgSO ₄	Destruyen la Matriz
Sulfatos	Aceleran o retardan. Forman yeso en lugar de ettringita
Cloruros	Destruyen la Matriz. Hacen las susceptible el ataque de por sulfatos
Sales solubles de Cr	Aceleradores. Disminuyen la resistencia
ZnSO ₄	pueden inhibir la hidratación del cemento
Cinc	retardador
Plomo	retardador
Orgánicos	Alteran el fraguado y las reacciones, retardan y formán enlaces más débiles. Fenol retarda y disminuya la resistencia

Tabla 2.13 Efecto de los compuestos orgánicos en la E/S, Fuente: Freeman y Harris, 1995.

Compuesto	Efecto
Semivolátiles	Pueden interferir en los enlaces del residuo-cemento
Aceites y grasas	Forman enlaces débiles reduciendo la resistencia
Fenoles	Disminuyen la compresión
Carbón lignito	Problemas en el fraguado y reducen la resistencia
Orgánicos no polares	Pueden impedir el fraguado y bajar la durabilidad del cemento
Orgánicos polares	Retardan el tiempo de fraguado y reducen la durabilidad del cemento
Orgánicos Clorados	Retardan el tiempo de fraguado y reducen la durabilidad del cemento
Hidrocarburos alifáticos	Aumentan el tiempo de fraguado

Durante este estudio se determinó que la eficacia, solo puede determinarse por su función de inmovilizar y no por su capacidad de retener el compuesto, esto debido a que algunos de ellos no lixivian pero si producen gases nocivos al fracturarse el bloque.

Durante el ensayo las capas liberadas de gas no son registradas por ello la eficacia se debe de analizar en lo subsecuente por los gases que este pudiera emitir, en la tabla 2.14 se muestran la eficacia de la inmovilización frente a la mayoría de las solidificaciones.

Tabla 2.14 Eficacia de los procesos E/S en función del tipo de compuesto (Andrés y Viguri, 1999).

Compuesto	Eficacia
orgánicos volátiles ya sean halogenados o no (COVs)	Inmovilización no efectiva
orgánicos halogenados semivolátiles	Eficacia demostrada
orgánicos semivolátiles y no volátiles y no halogenados	Eficacia demostrada
PCBs, plaguicidas, dioxinas y furanos, cianuros orgánicos y orgánicos corrosivos	Debe de estudiarse
Metales volátiles y no volátiles	Eficacia demostrada
Asbestos	Eficacia demostrada
Radiactivos	Eficacia demostrada
Corrosivos	Eficacia demostrada
Cianuros	Eficacia demostrada
Reactivos oxidables reductores	Eficacia demostrada

2.1.6 Bloques de jales en mina la Zacatecana.

Según Monreal, 2002 en estudios realizados en la presa el Pedernalillo, también conocida como La Zacatecana, de donde toma el nombre de la comunidad donde, la explotación de los ricos yacimientos minerales se realizó desde el Siglo XVI, fueron extraídos principalmente la plata y oro, contenidas geológicamente en las zonas de oxidación de los depósitos minerales. Por tal motivo, la metalurgia que se empleaba para la separación de los minerales, requería de mercurio. Esta tecnología se utilizó aún en las dos terceras partes del Siglo XX.

La minería en la región hasta antes de los años setenta, no fue de grandes volúmenes de extracción, las capacidades de las minas no rebasaban las 100 t/día, por el método de amalgamación. Lo trascendental, fue que durante esos 400 años, los productos de los jales, terreros y el intemperismo de las rocas, se depositaron en el Valle de Guadalupe, concentrándose los materiales aluviales a partir de 1938 en la presa La Zacatecana.

El suelo en la región, principalmente en su más cercana comunidad, la de Zóquite, se caracteriza por ser de migajón arcilloso limoso arenoso, xerosol cálcico y regosol calcárico.

La problemática se debe a que en 1986, la compañía Jales de Zacatecas intentó explotar la plata que contienen los jales. El proyecto presento serias irregularidades técnicas, que ponían en riesgo a los trabajadores y la población, por ello se enfrentaron a la desconfianza de la comunidad, al no cumplir con los acuerdos económicos contraídos con el ejido.

En la región, se instalaron microempresas que se dedicaron a extraer la plata de los jales en la elaboración artesanal de tabicones

Durante su producción, en promedio de procesamiento para la elaboración de tabicones de jales, era de 120 t/día y empleaban un promedio de 160 trabajadores.

Estudios hechos de 1990 a 1994, por investigadores universitarios zacatecanos determinan que existe grados relevantes de contaminación en suelos y peces, situación que empieza a manejarse para que se preste atención por parte de las autoridades gubernamentales estatales y federales. También se realizaron estudios de salud en trabajadores, donde se encontró, que personas que habían laborado en la mina y en las empresas ladrilleras que habían estado expuestos a los jales, contenían niveles de mercurio en orina de hasta 1.138 mg/l.

En conclusión:

La solución a la problemática de la presa la Zacatecana es compleja, y requerirá de continuar efectuando acciones interinstitucionales, que permitan en el largo plazo, restaurar o controlar la contaminación de metales pesados.

Es fundamental realizar un estudio epidemiológico con nichos de población que permitan conocer si en realidad existe relación entre las enfermedades de la localidad y los metales pesados.

Ante la actividad agropecuaria que se desarrolla en la zona, es necesario se genere un estudio de la absorción de los metales en las plantas cultivadas de los predios cercanos y al interior de la presa.

Ante la dispersión del plomo por los vientos, es preciso que el vaso de la presa contenga agua hasta los límites donde no se produzca un vertido de estas aguas que impliquen un riesgo a la zona.

Ordenar y reforestar los lamereros, para evitar, igualmente la dispersión de los jales por el viento, creando una barrera física que evite el transporte de los metales fuera de la presa.

Una opción puede ser, que una empresa se interesara en la restauración del sitio, mediante un sistema fiscal compensatorio por tratarse de remediación de suelos, aprovechando la extracción de la plata, plomo y cadmio del sitio cumpliendo con la normativa ambiental. De esta forma, no ocasionaría erogaciones gubernamentales

Se propuso dejar de utilizar los jales para su “recuperación”; la manera artesanal en que operan las microempresas, puede estar afectando fuertemente la salud de los trabajadores y habitantes, esparce la contaminación en la región y contribuye a depositar innecesariamente mercurio y otros metales al ciclo de la atmósfera.

Se estudiaron a 143 personas, en la muestra no se encontraron pigmentaciones amarronadas, a nivel de encía insertada, que pudiera ser manifestación tóxica por mercurio, no encontramos manchas gris azulosas, o café en encía insertada y libre que es un dato patognómico de la ingesta por metales pesados (Monreal, 2002).

2.2 Problemática.

En México así como en gran parte del mundo, el crecimiento desmedido de la población y la generación de residuos peligrosos y urbanos es cada día más alarmante, Al día de hoy existen más de 7 millones de materiales peligrosos y se crean unos 1200 nuevos cada año, de los cuales no se conoce bien su respuesta y toxicidad al ser humano o a la naturaleza, y mucho menos se sabe las consecuencias que generan el mezclarse con otro material y la sinergia que esto produzca. Estos residuos terminan en el mejor de los casos en un sitio controlado, produciendo un daño en la zona

en la que se disponen, provocando altos costos por su disposición, control y monitoreo, esto suponiendo que no generen ningún problema durante su vida en este lugar. Representando un fuerte desembolso del erario público o del generador (industrias) para mantener controlado sus residuos. En la mayoría de los casos son arrojados en tiraderos a cielo abierto generando un pasivo ambiental, o incluso rellenos sanitarios, producto de la corrupción en el país.

Lo más preocupante es que tampoco se conocen las posibles consecuencias en el presente o en un futuro, así como su persistencia en el medio ambiente (OIT, 2007).

En México así como en gran parte del mundo, millones de trabajadores son expuestos a sustancias de las cuales no se conoce sus efectos a la salud, de la misma manera las personas en sus hogares están expuestas a productos que incluso en muchas partes del mundo hoy en día están prohibidos, este es el caso de la “Docena sucia”, productos de los cuales no se conocían sus efectos y hoy en día se encuentran prohibidos su uso a nivel mundial, con sus respectivas limitaciones (Estocolmo, 2001). Este tipo de sustancias que fueron muy usadas y hoy en día ya no tienen una aplicación es un ejemplo muy claro de materiales peligrosos que pasaron a ser residuos peligrosos y requieren una fuerte atención.

La posibilidad de darle a los residuos peligrosos un tratamiento, estabilizarlos y lo más importante darles un valor para su reusó podrían generar un interés en un tercero, que se asegure que ya no se produzcan más residuos, valorizarlos y comercializarlos. Generando fuentes de empleo, desarrollo tecnológico y social, así como la disminución de los posibles pasivos ambientales y los posibles daños que estos puedan provocar a la salud pública.

La infraestructura al igual que la sociedad en las ciudades, generan al año un volumen de residuos peligrosos de 10 toneladas aproximadamente por empresa. Esto según reportes de la SEMARNAT, tan solo en el periodo del 2004 al 2007 se reportaron de la industria regulada un total de 7'813,504.9 TON. Mismas que no se cuenta con registro exacto de cuántas de ellas fueron tratadas o confinadas (SEMARNAT, 2008).

En México los principales dos generadores de pasivos ambientales son por un lado PEMEX con contaminación de hidrocarburos por generación de lodos aceitosos en todos sus diferentes variantes de la cadena de destilación del petróleo y por el otro la industria minera con la generación de los jales debido a su lixiviación y las partículas suspendidas producto de la molienda de la roca, siendo estos su principal problemática a atender (PROFEPA, 2002).

Los hidrocarburos, tienden a dañar todo sistema en el que se deposite, impidiendo su desarrollo aun cuando han sido remediados, el impacto que esto genera es grave, y produce un desequilibrio cuando ocurren accidentes donde los hidrocarburos o sus lodos desprenden o lixivian sustancias tóxicas al ambiente, estos compuestos se encuentran distribuidos en el suelo, mar, sistemas pluviales y sedimentos y su presencia se ha atribuido principalmente a los derrames de petróleo y descargas de plantas petroquímicas, aun cuando se puede deber al transporte atmosférico por los aportes de la combustión (Padilla 1989).

Los aceites y el petróleo crudo tienden a formar una capa en forma de nata en el nivel freático y se mueven horizontalmente en dirección al flujo del agua subterránea. Los compuestos orgánicos densos, migran hacia la base del acuífero creando una columna a partir de la cual pueden moverse en dirección del flujo del agua subterránea, contaminando así el acuífero en toda su profundidad.

Probablemente el componente más importante del suelo en relación con la persistencia de sustancias tóxicas es la arcilla. La persistencia aumenta cuanto más pequeña es la partícula debido a que aportan un área superficial mayor para la adsorción de los productos químicos.

Las propiedades químicas del suelo más afectadas por un derrame de hidrocarburos son:

- Aumento de carbono orgánico, ya que el 75% del carbono del petróleo crudo es oxidable
- Disminución del pH, debido a la acumulación del carbono orgánico y generación de ácidos orgánicos
- Aumento del manganeso y hierro intercambiable
- Aumento del fósforo disponible (SEMARNAP 1996).

PEMEX reporta un aumento del 120 % del 2001 al 2006 en la generación de residuos peligrosos totales, y una generación de lodos aceitosos del 26% del total de las 600,000 toneladas que genera al año, tan solo en 2006 generó poco mas de 116 mil toneladas, siendo la más alta después de los productos órganoclorados que ocupa el 17% (Duarte, 2007).

Aunque Pemex para algunos de sus lodos como son los lodos blancos, biológicos y aceitosos. Son tratados con cementos y cal para estabilizarlos y solidificarlos, estos siguen siendo un residuo con un volumen mayor y un costo mayor para su disposición.

Debido a esto se tomaron los lodos que se generan salientes de los API que son lodos aceitosos, de los cuales ya no se pueden obtener algún beneficio energético rentable o una extracción de hidrocarburos o derivados útiles y rentables.

Por otro lado la industria minera genera un problema de mucho interés que son los jales mineros, que son rocas molidas con concentraciones de metales pesados, sustancias floculantes y espesantes, entre otras, que se colocan por gravedad en una presa de jales en la que se depositan, al final del proceso, estas partículas son muy pequeñas y cuando llueve, lixivia al ambiente las concentraciones de contaminantes que en ellas hay, es muy importante considerar que estas presas con extensiones muy grandes con volúmenes importantes de material pulverizado, ver figuras 2.5 y 2.6. Además estas partículas muchas veces con partículas menores a $2.5 \mu\text{m}$. Estas partículas son separadas por acción del viento, transportadas muchos kilómetros y absorbidas por los pulmones a través de los alveolos de los seres vivos, tapándolos y dañándolos, provocando así daños en el sistema respiratorio, nervioso central y causando incluso la muerte (Moreno, 2008).



Figura 2.5 Presa de Jales colima fuente: Mota, 2011.



Figura 2.6 Presas de jales Fuente: Ramírez, 2008.

En algunas partes de la República Mexicana como Guanajuato, Sonora, Chihuahua, Durango, Zacatecas, San Luís Potosí e Hidalgo, la principal actividad económica en estos lugares es la explotación minera, por lo que millones de trabajadores al año, presentan casos de exposición a diversas sustancias químicas y su impacto en la salud merece ser analizado, debiéndose considerar como sitios potencialmente peligrosos.

Un estudio en 2002 en Vetagrande Zacatecas, demostró niveles de plomo en sangre de niños y mujeres en período de lactancia y embarazadas, que sobrepasaban los valores contemplados como normales por la OMS en un 76.7% de la población. Esto concluye que, el plomo está biodisponible para las personas que ahí habitan, y se afirma que son producto del transporte de los jales mineros sobre los que la comunidad vive (Manzanarez, 2002).

Esto se prevé que sea una solución a grandes pasivos ambientales que al día de hoy se tienen con antigüedades superiores a los 500 años, como son las minas de jales coloniales, y que comprenden extensiones de miles Km^2 expuestos al medio ambiente y a la población, provocando graves problemas a la salud pública, con daños permanentes, no reversibles y teratogénicos en las siguientes generaciones de esta población. A pesar de que muchas de las personas están consientes del riesgo que esto representa, la pobreza que enfrentan los hace aceptar esta condición y exponerse a los inevitables daños que sufrirán con el tiempo, viviendo sobre estas zonas contaminadas, esto podría generar un desarrollo en su comunidad y en su nivel de vida así como en la salud de estas personas y la mejora en el medio ambiente, evitando la bioacumulacion.

Por ello surge la necesidad de atender esta alarmante problemática proponiendo nuevas y mejores formas para reducir el efecto nocivo de los residuos peligrosos, convirtiendo residuos en materiales, por ello se busca elaborar bloques para un rehuso que sean sustentables, económica y tecnológicamente así como durables y en medida de lo posible reutilizables (Núñez, 2003).

En la actualidad los costos de tratamientos químicos para la extracción de metales residuales en los jales son muy caros y poco rentables, así como para los lodos.

Por lo que el tratamiento de solidificación podría ser una solución a este problema, y más aun si éste genera algún ingreso o simplemente se pagara solo.

En años anteriores grupos de investigadores a cargo del Dr. Pedro Bosh, se han dado a la tarea de buscar un material inerte, absorbente, liviano, con capacidades de neutralización, entre otras cosas, para combatir los efectos de la contaminación. Este es el caso de la zeolita, que puede ser utilizado en muchas actividades, así como neutralizar algunos contaminantes presentes en agua e incluso residuos radiactivos. Por ello se decidió tomar este mineral y ensayarlo para ver si puede o no reducir la toxicidad generada.

Este proyecto tiene la finalidad de buscar materiales y técnicas alternativas para la solidificación y aseguramiento a través de una matriz sólida de un residuo monolítico, que garantice una suficiente integridad estructural para poder ser trasladado a su sitio de disposición final, ya que estos no han sido suficientemente analizados previamente; así mismo, buscar que sean rentables y sustentables para ser aplicados en la industria, siempre buscando cumplir con la normativa mexicana y reintegrar recursos a las empresas para incentivar el tratamiento de los residuos..

Capítulo 3

Marco jurídico

3. Marco jurídico.

Derivado de la obligación del Estado por mantener condiciones de vida, seguridad y certeza a su población, se ha visto en la necesidad de crear leyes que puedan regular el actuar de las personas en sociedad, dependiendo de su contexto político económico social e incluso temporal, ya que si la sociedad evoluciona, estas normas deben evolucionar, para este efecto se crea el poder legislativo, mismo que está encargado de crear, modificar, derogar o abrogar esas normas de observancia obligatoria.

De la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos se puede deducir la jerarquía que ocupa cada tipo de normas, en su Título Séptimo "Previsiones Generales Art.133 "Esta Constitución, las leyes del Congreso de la Unión que emanen de ellas y todos los tratados que estén de acuerdo con las misma, celebrados y que se celebren por el Presidente de la República, con aprobación del Senado serán la ley suprema de toda la Unión". Los jueces de cada Estado se apegan a esta ultima elaborando y modificando sus normas locales, siempre manteniendo a la constitución, tratados internacionales y Normas oficiales por encima de sus leyes y jamás contradiciéndolas o interponiendo valores inferiores a los que en ellos se estipula.

De donde se desprende la siguiente jerarquía:

- I. La Constitución Federal es la norma suprema y de la cual emanan todas y cada una de las demás clasificaciones de normas, en ésta se encuentran preceptos para la protección de los ciudadanos y una parte orgánica que no es más que la estructura del estado, sus alcances y funciones.
- II. Los convenios internacionales.
- II. Las leyes del Congreso de la Unión y los tratados internacionales sean una norma suprema siempre y cuando no atente con los preceptos constitucionales. Existe jurisprudencia de la SCJN acerca de la superioridad de los Tratados Internaciones a las leyes federales.
- III. Constituciones locales
- IV. Las leyes Estatales.
- V. Los reglamentos que establecen los métodos que se deben llevar a cabo para el cumplimiento de algún precepto legal o algún derecho. (Constitución Política, 1917) en la figura 3.1 se muestra esta jerarquía.

Por otro lado, La constitución solo regula el Derecho Interno así como las relaciones de los poderes públicos mexicanos y no aplica en las relaciones externas, es decir, solo puede regular las acciones dentro del país y no fuera de ellas; para ello hace mano de los tratados internacionales. A nivel global los estados se apoyan en el principio de Derecho Internacional de la "igualdad soberana de los estados".



Figura 3.1 Jerarquía jurídica en México.

Elaboró Ing. Alfredo González Medina.

La estructura legal que da fundamento y sustento a este trabajo se presenta de manera puntual y precisa para cada jerarquía, a continuación:

3.1 Ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente (LGEEPA).

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), tiene por objeto propiciar el desarrollo sustentable, garantizando el derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente adecuado para su desarrollo, salud y bienestar; así mismo, preserva la restauración y el mejoramiento del ambiente, a través de la Protección de la biodiversidad, la restauración de todos los recursos naturales y la prevención y control de la contaminación del aire, agua y suelo (LGEEPA, 2005).

En su capitulado, los artículos más destacables para el actual trabajo son:

Art. 134. Menciona los criterios de la prevención y control de la contaminación; párrafo I. Corresponde al estado y la sociedad prevenir la contaminación del suelo. II. Deben controlarse los residuos en tanto que constituyen la principal fuente de contaminación del suelo; IV. Se establece que en los suelos contaminados por la presencia de materiales o residuos peligrosos, deberán llevarse a cabo acciones necesarias para recuperar o restablecer sus condiciones, de tal manera que puedan ser utilizados en cualquier tipo de actividad prevista por el programa o de ordenamiento ecológico que resulte aplicable.

Art. 136. Los residuos que se acumulen o puedan acumularse y se depositen o infiltren en los suelos deberán reunir las condiciones necesarias para prevenir o evitar: I. Contaminación del suelo, II Las alteraciones nocivas en el proceso biológico de los suelos; III. Las alteraciones en el suelo que perjudiquen su aprovechamiento, uso o explotación y; IV. Riesgos y problemas de salud.

Art. 139. Toda descarga, depósito o infiltración de sustancias o materiales contaminantes en los suelos se sujetará a lo que disponga esta ley, la ley de Aguas Nacionales, sus disposiciones reglamentarias y las Normas Oficiales Mexicanas que para tal efecto expida la Secretaría.

Art. 140. La generación, manejo y disposición final de los residuos de lenta degradación deberá sujetarse a la que establezca en las Normas Oficiales Mexicanas que al respecto expida la Secretaría, en coordinación con la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (Diario Oficial, 13 de Diciembre de 1996).

En el Capítulo 3 “Política ambiental”, artículo 15 (VIII); menciona que para la formulación y conducción de la política ambiental y la expedición de normas oficiales mexicanas en materia de preservación y restauración del equilibrio ecológico y protección al ambiente.

Así, esta Ley, señala que las normas oficiales mexicanas (INERTEC, 2009):

- Contendrán los requisitos y listados en los que se clasifiquen los materiales y residuos peligrosos indicando su grado de peligrosidad y considerando sus características y volúmenes.
- Establecerán los requisitos para el etiquetado y envasado de materiales y residuos peligrosos.
- Establecerán los requisitos para la evaluación de riesgo e información sobre contingencias y accidentes que pudieran generarse por su manejo.

3.2 Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos (LGPGIR).

La SEMARNAT publicó en el 2003, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR), que promueve la participación corresponsable de todos los sectores sociales, en las acciones tendientes a la prevención de la generación, valorización y lograr una gestión integral de los residuos ambientalmente adecuada, que sea tecnológica, económica y socialmente viable y de conformidad con las disposiciones establecidas en la misma. (Revista Agregados, 2007).

Manejo especial, que son aquellos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos y los que son producidos por grandes generadores. Los residuos de manejo especial, poseen una sub clasificación la cual se en lista en la misma ley.

Las entidades federativas y los municipios, con el propósito de promover la reducción de la generación, la valorización y gestión integral de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial con el fin de proteger la salud y prevenir y controlar la contaminación ambiental producida por su manejo, deberán llevar a cabo las siguientes acciones:

Controlar y vigilar el manejo integral de residuos, diseñar e instrumentar programas para incentivar a los grandes generadores de residuos a reducir su generación y orientarlos para elaborar un plan de manejo integral, integrar el registro de los grandes generadores de residuos peligrosos y de empresas prestadoras de servicios de manejo de dichos residuos, así como la base de datos en la que se recabe la información respecto al tipo, volumen y forma de manejo de los desechos peligrosos, Elaborar, actualizar y difundir el diagnóstico básico para la gestión integral de dichos residuos.

Artículo 97.- Los municipios regularán los usos del suelo de conformidad con los programas de ordenamiento ecológico y de desarrollo urbano, en los cuales se considerarán las áreas en las que se establecerán los sitios de disposición final de los residuos.

Artículo 98.- Para la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos de manejo especial, las entidades federativas establecerán las obligaciones de los generadores, distinguiendo grandes y pequeños, y en cuanto a las obligaciones de los prestadores de servicios de residuos de manejo especial, se formularán los criterios y lineamientos para su manejo integral.

3.3 Reglamento de la ley general para la prevención y gestión integral de los residuos (RLGPGIR).

El reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (RLGPGIR), en sus artículos 11 y 12; establece los criterios básicos que las normas oficiales mexicanas tienen que seguir, cuando estén sujetas a planes de manejo para residuos sólidos urbanos y de manejo especial, con el fin de determinar el plan de manejo más apropiado y la elaboración de listados de los residuos sujetos a estos planes, según las características de los desechos y sus mecanismos de control.

3.4 Convenios internacionales.

Los convenios internacionales son tratados o acuerdos entre naciones, que dan seguridad y obligaciones a todas las naciones que así decidan formar parte, cualquier valor o “conducta de honor” puede ser aplicada a un tratado internacional, que serán adoptadas por cualquiera de las partes que ratifiquen con el carácter de obligatoriedad.

Esto constituye un contrato entre naciones, que da como capacidad a cualquier individuo u organización contar con seguridad que sus derechos serán protegidos al mismo nivel que otros países, a través de este mecanismo de solicitar acuerdos, sanciones y conductas de los países miembro, ante las demás naciones que formen parte de dicho documento.

Tienen como función homogenizar y vincular a las organizaciones mundiales y los países que representan para poder convivir y beneficiarse mutuamente, dando certidumbre legal a las personas que deseen tener relaciones México.

Además los convenios internacionales son mecanismos utilizados por los países para integrar las relaciones comerciales, sociales, jurídicas y económicas con el fin de beneficiar a los ciudadanos de ambos países.

Convención de Viena 1969

En este convenio se establecen los derechos y obligaciones de los países que formen parte de los Tratados internacionales así como las estructuras, disposiciones y formas de cumplimiento y obligatoriedad de dichos países (Becerra, 2007).

Convenio internacional sobre cooperación, preparación y lucha contra la contaminación por hidrocarburos, Londres el 30 de noviembre de 1990.

Este tratado manifiesta la importancia del transporte por mar de productos químicos en el mar distintos de los hidrocarburos y medidas de mitigación para evitar la contaminación del mar y suelos coralinos, la OMI adoptó en el 2000 un protocolo al anterior convenio, el protocolo sobre cooperación, preparación y lucha contra la contaminación por sustancias nocivas y potencialmente peligrosas como precedente al convenio de Basilea en la prohibición de movimientos transfronterizos

Convenio Internacional sobre la constitución de un fondo internacional de indemnización de daños debidos a contaminación por hidrocarburos, (fondo 1971). Es un régimen internacional de carácter independiente y voluntario para los estados, que tiene como objetivo proporcionar indemnización complementaria por daños debidos a la contaminación producida por derrames de hidrocarburos persistentes procedente de la carga de los buques tanques, actúa en la medida que sea inadecuada la protección que presta el Convenio de Responsabilidad Civil, CLC 1969, y en su versión enmendada de 1992.

3.5 Normas oficiales mexicanas.

Toda norma jurídica debe encontrar un fundamento de validez en una norma superior que soporta su incorporación al sistema legal. Bajo este criterio, las normas oficiales mexicanas solo podría expedirse en aquéllos aspectos en que expresamente la legislación determina que son necesarias (INERTEC, 2009).

Por ello en la tabla 3.1 se enlistan Normas Oficiales Mexicanas que afectan al presente trabajo:

Tabla 3.1 Normas aplicables de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes		Relación con el proyecto y su cumplimiento
NOM-002-SCT2-1994	Listado de sustancias y materiales peligrosos más usualmente transportados.	Los residuos que tienen un tratamiento, se encuentran en su mayoría previstos en este listado.
NOM-010-SCT2-1994	Disposiciones de compatibilidad y segregación, para el almacenamiento y transporte de sustancias, materiales y residuos peligrosos.	En el transporte, se exigirá el cumplimiento de no mezclar residuos y se deberá evaluar esta condición en los bloques.
NOM-018-SCT2-1994	Disposiciones para la carga, acondicionamiento y descarga de materiales y residuos peligrosos en unidades de arrastre ferroviario.	Se considera como una posibilidad, debido es una de las maneras más comunes de transporte
NOM-043-SCT2-1994	Documento de embarque de sustancias, materiales y residuos peligrosos	El generador debe de poder ver, etiquetar y contralar los residuos que dispone al tratamiento.

Tabla 3.2 Normas aplicables de la Secretaría Medio Ambiente y Recursos Naturales y la Secretaría de Salud.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales		Relación con el proyecto y su cumplimiento
NOM-052-SEMARNAT-1993	Que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.	Se requiere saber si el residuo a tratar es peligroso o no.
NOM-053-SEMARNAT-1993	Que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente	Se requiere conocer los constituyentes que lo vuelven RP. y así determinar sus concentraciones.
NOM-054-SEMARNAT-1993	Que establece el procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o más residuos considerados como peligrosos por la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-1993.	El tratamiento no puede mezclar dos residuos que vuelvan aun más peligrosos o incompatibles el bloque.
Secretaría de Salud		Relación con el proyecto y su cumplimiento
NOM-141- SEMARNAT-2003	Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y pos operación de presas de jales	Se busca caracterizarlos jales y saber si pueden o no ser tóxicos o dañinos para el ser humano o el ambiente
NOM-025-SSA1-2005	Criterios para evaluar el valor límite permisible para la concentración de material particulado. Valor límite permisible para la concentración de partículas suspendidas totales PST, partículas menores de 10 micrómetros PM ₁₀ y partículas menores de 2.5 micrómetros PM _{2.5} de la calidad del aire ambiente. Criterios para evaluar la calidad del aire.	Se busca que los bloques sean reutilizados por ello no deben ni de lixiviar ni producir gases por ello se requiere esta prueba

Capítulo 4

Características generales de los residuos a estabilizar

4. Características generales de los residuos a estabilizar.

4.1 Jales de la producción minera.

Los jales en México representan el 65% de los residuos industriales (según reportes de la SEDESOL, 1993). Los jales (del náhuatl "xalli", arenas finas) son residuos sólidos producto de la molienda de rocas en las cuales se separa el mineral interesado, quedando principalmente conformados por finas partículas minerales fluidificadas en agua que incluyen, entre otros materiales, metales y metaloides potencialmente tóxicos en elevadas concentraciones, además de las sustancias químicas empleadas para los procesos de beneficio, ver figura 4.1 (González, 2006).

Por ello y debido a su gran importancia en la salud pública y ecológica, la ley Mexicana ha establecido la norma oficial mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003 que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y post-operación de las presas de jales, define "jales" como "residuos sólidos generados en las operaciones primarias de separación y concentración de minerales" y "presa de jales" como "obra de ingeniería para el almacenamiento o disposición final de los jales, cuya construcción y operación ocurren simultáneamente".

Siendo un residuo peligroso contenido dentro del listado de la NOM-052-SEMARNAT-2005 y siendo un gran problema en el país. Los jales para estudio fueron obtenidos de una tesis previa donde se les caracterizó, y se estimó la generación de sus lixiviados, en la presa de jales.

Dichas muestras fueron obtenidas de una mina ubicada en el Estado de México. Esta empresa, ha estado en operación desde hace diez años, produciendo zinc, plomo y cobre a partir de un yacimiento subterráneo de sulfuros masivos. El mineral extraído se somete a un proceso de trituración y molienda hasta llegar a malla 200 (75 μm) y, finalmente, se concentran los sulfuros de zinc, plomo y cobre en las celdas de flotación. En el proceso de separación se logran mezclar agentes espumantes como xantatos, ácidos y sales. Los minerales concentrados, conteniendo los sulfuros de zinc, plomo y cobre son recuperados en la superficie y el remanente, más del 90% del mineral (rico en pirita, FeS_2), llamado también ganga o cola se bombea, a la presa de jales, construida sobre un enrocamiento de basalto y una cama de arcilla, la cual tiene una profundidad máxima de alrededor de 100 m. En la presa de jales se decanta el agua, la cual se recupera, junto con una buena parte de los aditivos químicos y se bombea nuevamente a las celdas de flotación, por lo que, en principio, no existen aguas residuales en esta fase del proceso.

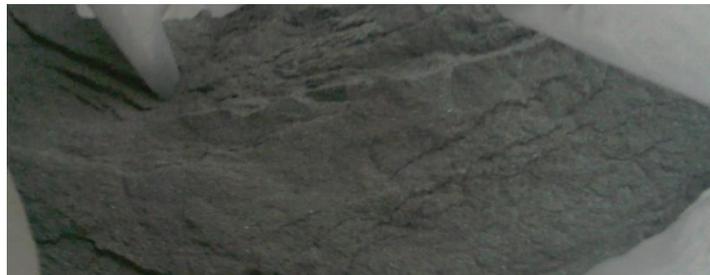


Figura 4.1 Jales mineros.

Caracterización de los jales de estudio.

La caracterización de los jales fue realizada por González (2006), en la Universidad Técnica de Brandemburgo en Cottbus, Alemania. Producto de su tesis doctoral.

Entre varios estudios que se realizaron los resultados obtenidos que vale la pena señalar para el presente proyecto son: las pruebas de metal son, pH, y la determinación de la concentración del metal predominante.

Dentro de su caracterización, (González, 2006) determinó que el mineral más abundante en los jales resultó ser la pirita, mientras que la presencia de carbonatos resultó prácticamente nula, por lo que en la prueba estática del balance ácido-base, se comprobó que los jales de esta mina son potencialmente generadores de acidez.

La Concentración de metales totales en muestras de jal Tabla 4.1

Tabla 4.1 Concentración de metales totales en muestras de jal.

Elemento (unidades)	Concentración promedio	Desviación estándar	CV (%)
Fe(%)	34.9	3.55	10.17
Zn (%)	1.7	0.52	31.06
Pb (%)	0.4	0.11	29.06
Cu (ppm)	1078.5	690.18	63.99
Ag (g/ton)	55.3	23.16	41.86
As (%)	0.3	0.05	15.33
B (ppm)	110	58.67	53.34
Ba (ppm)	65.6	32.01	48.76
Be (ppm)	0	N/A	N/A
Ca (%)	0.6	0.18	28.04
Cd (ppm)	137.3	37.22	27.12
Co (ppm)	5.6	1.52	26.96
Cr (ppm)	1.8	0.48	26.41
Ga (ppm)	95.6	8.28	8.66
Li (ppm)	10.3	7.34	71.63
Mg (%)	0.5	0.14	27.82
Mn (ppm)	380.4	94.76	24.91
Mo (ppm)	1.3	0.58	46.19
Ni (ppm)	8.6	4.78	55.37
Sb (ppm)	154.5	98.61	63.83
Si (%)	5.7	2.04	36.03
Sr (ppm)	32	9.26	28.93
Ti (ppm)	132.4	56.39	42.6
So₄² (%)	2.5	2.27	91.33

Fuente: González, 2006.

Por otro lado también el parámetro pH es muy importante en lugares donde los jales están depositados, para considerar las lixiviaciones acidas, éste se determinó en un periodo de 18

semanas iniciando con un promedio de 6.25 y finalizando con un promedio de 4.6, obteniendo un mínimo de 3.0 a la semana 16 de la experimentación.

En los jales, los metales que se presentaron en el lixiviado, sólo el cadmio excedió en algunos casos el límite máximo permitido en la NOM-052-SEMARNAT-2005. La presencia del Fe (III) en los jales de las celdas en donde se presentó una mayor acidificación, lo cual explica que las concentraciones de hierro en el agua de la presa sean predominantemente menores a 10 ppm.

Se determinó adicionalmente en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería el contenido de humedad así como la absorción máxima de agua del jal, mismos que son reportados en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Contenido de humedad y absorción de agua.

Peso seco de la muestra (Ws) [g]	Peso Húmedo (Ww) [g]	Contenido de Humedad [%]	Peso saturado [g]	Absorción máxima de agua [g]
15	19.371	1.8168	21.181	6.188

Ws: Peso seco.

Ww: Peso húmedo.

4.2 Lodos de refinería.

En México, la principal fuente de contaminantes en el suelo, es la industria de hidrocarburos, PEMEX genera una cantidad muy grande de pasivos ambientales producto de derrames, accidentes, y perforaciones de pozos en la zona del sur oeste de México (Altamira, 2010).

Los lodos de este estudio son material producto de un separador API en una refinería el cual, al ser dispuesto, podría contaminar el suelo con el hidrocarburo; este residuo tiene un color negro y una presencia alta de aceites, en forma líquida como se puede ver en la figura 4.2, así como un contenido de materia orgánica volátil y de compuestos aromáticos, percibibles.



Figura 4.2 Lodos de refinería o lodos aceitosos.

La caracterización que se le encontró a este residuo por parte de Mijaylova (2011), IMTA, UNAM. Se encuentran en la tabla 4.3

Tabla 4.3 Contaminantes de lodos de refinería, Mijaylova (2011).

Contaminante	Concentración	Unidades
Sólidos Totales	620	g/L
Sólidos Volátiles	210	g/L
Densidad	1.34	Ton/m ³
CRIT	Reactivo, Tóxico y peligroso al ambiente	NA

Se determinó adicionalmente en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería el contenido de humedad así como la absorción máxima de agua en el lodo, los cuales se reportan en la tabla 4.4, de la misma manera siguiendo la técnica de digestión de Sikleb (2010). Se realizó una digestión ácida con ácido nítrico en relación 1:20 que duro 6 h, para determinar metales pesados en la muestra, siguiendo esta técnica, se consideró en determinar Mn, Cd, Pb, Cu, Cr y Co. Ya que en este tipo de residuos con características similares a las de México así como otros metales de interés para tener un perfil más amplio sobre este contaminante tabla 4.5, estas determinaciones se realizaron en el Instituto de ciencias del mar y limnología, UNAM., adicionalmente se determinaron la capacidad de absorción máxima de agua y sus pesos seco y húmedos, estos resultados se encuentran expresados en la tabla 4.4.

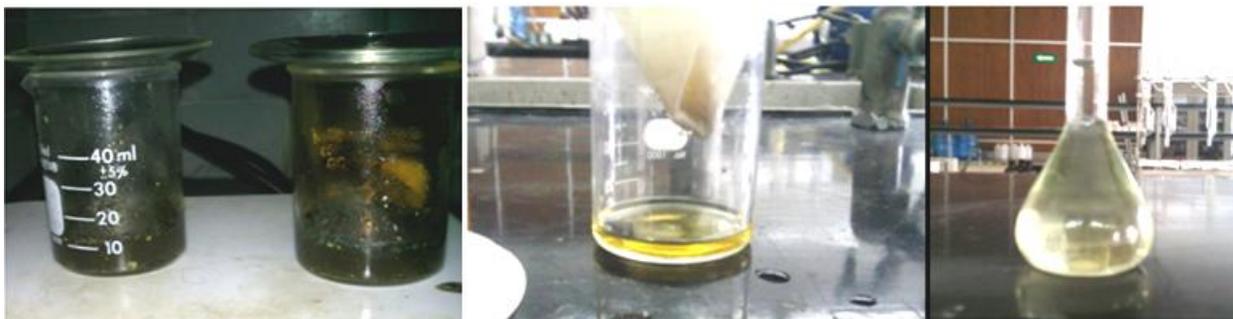


Figura 4.3 Digestión ácida de lodos de refinería.

Tabla 4.4 Contenido de humedad y absorción de agua.

Peso seco de la muestra (Ws) [g]	Peso Húmedo (Ww) [g]	Contenido de Humedad [%]	Peso saturado [g]	Absorción máxima de agua [g]
15	15.36	14.007	29.37	14.007

Tabla 4.5 Concentración de metales pesados en lodos de refinería.

METAL	Mg	Al	V	Cr	Mn	Fe
MASA	24	27	51	52	55	56
CONC	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
LDI	0.535	1.082	0.109	0.099	0.881	1.015
LECTURA	8457.299	30709.800	449.642	296.046	511.718	82786.770
CONC. mg/kg	18934.250	68753.283	1006.662	662.790	1145.637	185343.515
METAL	Co	Ni	Cu	Zn	Se	Sr
MASA	59	60	63	66	82	88
CONC	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
LDI	0.115	0.102	0.106	0.732	0.154	0.168
LECTURA	41.149	780.028	3124.069	6057.764	27.423	579.701
CONC. mg/kg	92.125	1746.331	6994.183	13562.157	61.395	1297.838
METAL	Mo	Cd	Sb	Ba	Pb	Hg
MASA	95	G.H/111	121	137	208	G.H
CONC	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
LDI	0.226	0.098	0.253	0.093	0.115	0.275
LECTURA	77.842	4.450	11.592	5507.100	733.487	9.057
CONC. mg/kg	174.274	9.9622	25.953	12329.328	1642.134	20.277

Durante el proceso de determinación del contenido de humedad, se presentó a las 72 h de saturación, hongos esponjosos microscópicos, debido a esto se realizó una saturación en cajas Petri estériles para comprobar que no fue causa de contaminación por la manipulación del residuo o la elaboración del experimento, se mantuvo siempre una zona estéril y alejada de toda contaminación posible para reproducir las colonias, éstas se presentaron en todos los cultivos a las 72h de haberse colocado, ver figura 4.4, por lo que se demuestra que el residuo contiene este organismo y podría afectar el desarrollo de la experimentación, se intentó determinar a través de sus hifas su especie, en el laboratorio de microbiología de la Facultad de Química, pero no fue posible determinar con precisión dicho parentesco, ver figura 4.5.



Figura 4.4 Presencia de hongos a las 72 h de saturación de la muestra inalterada.

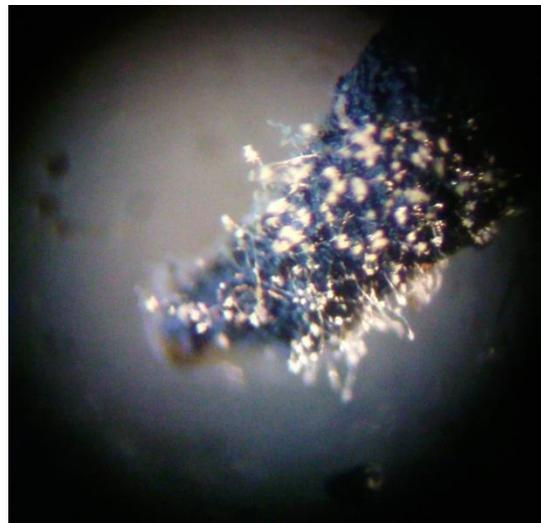


Figura 4.5 Hongos vistos en Microscopio estereoscópico Olympus SZ-PT 10X.



Figura 4.6 Hifas de hongos microscópicos vistos en Microscopio BH2 100X.

Se solicitó ayuda al laboratorio de microbiología para su determinación, sin embargo, debido a la cantidad de contaminante presentes en el lodo, la interacción del mismo con el tinte no permitió dicho proceso, por lo que se recomendó la técnica de Reacción de polimerasa en cadena (PCR) en tiempo real, sin embargo debido a que no se logro correr por falta del equipo se recomienda la posterior determinación para trabajos subsecuentes.

4.3 Caracterización de la zeolita.

Aunque la zeolita no es un residuo, sino el mineral que se uso para dar el tratamiento, se debe de conocer si propicio interferencias en la experimentación, así como las capacidades propias de este mineral, para ello fue necesario, evaluar la composición de este material. Por ello se investigo la procedencia de éste, obteniendo los resultados proporcionados por Jolumadi S.A. de C.V., distribuidor.

Zeolita traída de las minas de San Luis Potosí con especificaciones de: Mineral aluminosilicatos, altamente cristalino con compuestos principales de aluminio, silicio, sodio, hidrógeno y oxígeno. Las propiedades catalíticas son:

- Alto grado de hidratación.
- Baja densidad y gran volumen de vacíos cuando es hidratado.
- Estabilidad estructural alta al formar cristales cuando se hidrata.
- Presenta canales moleculares uniformes clasificados en los cristales hidratados.
- Alta habilidad de absorber gases y vapores.
- Principales usos: Filtrado de aguas, filtrado de aceites, arena para gatos y tratamiento de agua.

Este mineral ha sido analizado por muchas instituciones debido a sus diversas aplicaciones encontrando una fórmula química estable como es:



Así como altas características para absorber contaminantes a su cuerpo cristalino (Acosta, 2006).

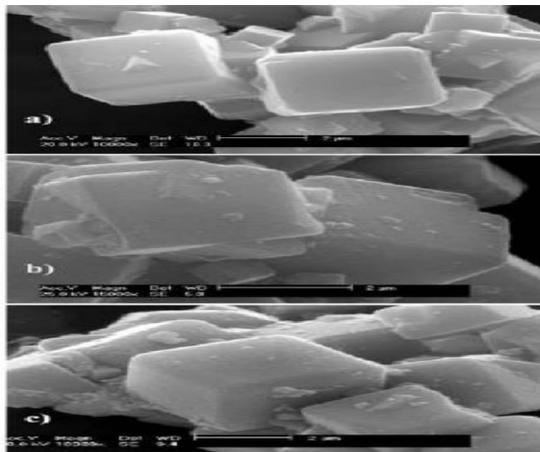


Figura 4.7 Imágenes obtenidas por microscopía electrónica de barrido, zeolita pura y de las zeolitas con PbS obtenidas a 40°C y 50°C, fuente Acosta, (2006).

4.4 Trabajo previo de laboratorio.

Se colocaron 10 g de residuo en un recipiente de plástico previamente pesado, y se calculó por diferencia el peso de la muestra. Se dejó saturado durante 7 días, al finalizar se extrajo el agua sobrenadante y se peso nuevamente, con el fin de determinar el peso húmedo del residuo.



Figura 4.8 Secado de las muestras para determinación de contenido de humedad.

Se saturaron los jales como se aprecia en la figura 5.5 y lodos en la figura 5.6 con agua destilada para determinar su contenido de humedad, esto para predecir la capacidad que tendrá de absorber agua, así como conocer la pérdida de materia durante la erosión de los bloques en la cámara de intemperismo y estimar la posibilidad de que el agua lave los contaminantes.



Figura 4.9 Muestra saturada de jal.

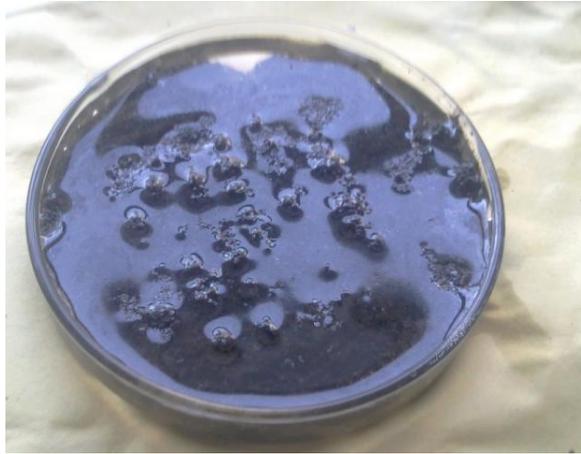


Figura 4.10 Muestra saturada de lodo.

Para conocer la absorción de agua en los lodos, se secaron por 48 h a 101 °C para compararla contra la saturación de agua en estado natural, esto debido a que al residuo le costó mucho tiempo liberar el agua absorbida y así conocer el peso de la muestra y el del agua retenida ver tabla 5.4

Tabla 4.6 Agua retenida por el residuo.

Muestra	Ws [g]	Ww [g]	Wr [g]
Jales secos	64.036	70.224	6.18
Jales inalterados	65.2948	659.666	4.3712
Lodos secos	117.7	144.296	14.376
Lodos inalterados	114.135	114.504	0.369

WS= peso seco del residuo

WW= peso saturado del residuo

Wr= Peso retenido de agua

Los bloques elaborados en la pre experimentación fueron de 15 cm de altura por 5 cm radio, con una geometría cilíndrica. Se elaboraron con zeolita y cemento variando estos dos últimos y 15 g de residuo.

Para esta etapa solo se determinó la resistencia alcanzada, obteniendo un promedio de 300 kg/cm² de resistencia en los bloques.

Cabe mencionar que estos bloques no fueron cabeceados con azufre por lo que las fallas se presentaron antes, producto de la excentricidad ver tabla 5.5.

Tabla 4.7 Resistencias de la pre experimentación.

Residuo [g]	Cemento [g]	Zeolita [g]	Resistencia zeolita [kg/cm ²]	Resistencia jal [kg/cm ²]
15	5	30	275	278
15	8	20	415	357
15	15	15	398	365
15	20	8	335	345
15	30	5	261	205
15	20	8	234	215
15	15	15	237	348
15	8	20	329	321
15	5	30	326	198

Cabe mencionar que el agua no fue una limitante, ya que se deseaba estimar cuanta se requería para la experimentación.

Se eligió el tratamiento de zeolita, para cada prueba, analizada en la experimentación final.

Las pruebas experimentales propuestas fueron:

- Compresión simple.
- Hídricas
- Extracto PECT
- Intemperismo acelerado

Todos los análisis se basaron en la normatividad actualmente vigente y se contrastará con los estudios previos encontrados.

Capítulo 5

Metodología

5. Metodología.

Para el presente trabajo se realizó la búsqueda de información pertinente que ayudó a la comprensión, desarrollo y sustento de la experimentación, para así dar una correcta solución a la problemática planteada.

Se realizó la obtención de las muestras de jales e hidrocarburos para este proyecto, buscando que éstas estén inalteradas del proceso final en el cual ellos las dispondrían al relleno o tratamiento para poder evaluarlas objetivamente.

La dosificación para la elaboración de los bloques, se hizo mediante técnicas de cuarteos y gravimétricas, las pruebas se realizaron con distintas dosificaciones. Esto para lograr el mayor número de capas posibles en el elemento estructural, o el mayor contenido de residuo en el bloque.

Se determinó una granulometría de diámetro contenido en la malla 30 de las charolas de separación gravimétricas con la finalidad de tener una muestra homogénea y representativa para una escala laboratorio



Figura 5.1 Zeolita de granulometría homogénea contenida en la malla 30.

Una vez contruidos los bloques de prueba se llevaron al cuarto de curado a temperatura constante de 25°C y una humedad relativa controlada del 90%, en la Facultad de Ingeniería de la UNAM, departamento de estructuras. Esto para garantizar su composición más favorable y buscar obtener los mejores resultados.

Las pruebas se realizaron a cuando se garantizó la resistencia aceptable a la edad de 21 días, una vez que el bloque solidifico.

Las muestras se tomaron de un bloque recién fraguado y una vez cumplido los 21 días. Para cuantificar la acción cementante de los materiales, y revisar si la estabilización con cada uno de los materiales cumple los lineamientos previamente establecidos.

Como son:

- Resistencia
- Relación modular de área
- Comportamiento a fatiga
- Lixiviación

- Pruebas de extracción de metales

Se llevó la bitácora de las pruebas y sus condiciones de ensayo, así como el número y el tipo de material y condición, se inspeccionó cada bloque una vez fraguado y se monitorearon durante todo su curado.

El monitoreo se realizó diario, para garantizar la humedad en cada bloque y la medición de posibles lixiviados o reacciones durante el curado.

La prueba de lixiviación se realizó por extracto PECT, de acuerdo a la NOM-053-SEMARNAT-1993.

Se buscó el reusó de los bloques en tabiques, dovelas, o bloques para cimentación (prefabricados) entre otros.

Se seleccionaron bloques que cumplan las normas vigentes de Construcción, ONNCCE y SEMARNAT según sea el caso.

Se realizó una pre experimentación para conocer los límites de fragua así como las resistencias asociadas con éste. Se determinó las concentraciones para la elaboración de 3 bloques que sirvieron para obtener los bloques finales, esto a través de la metodología planteada en la figura 5.2.

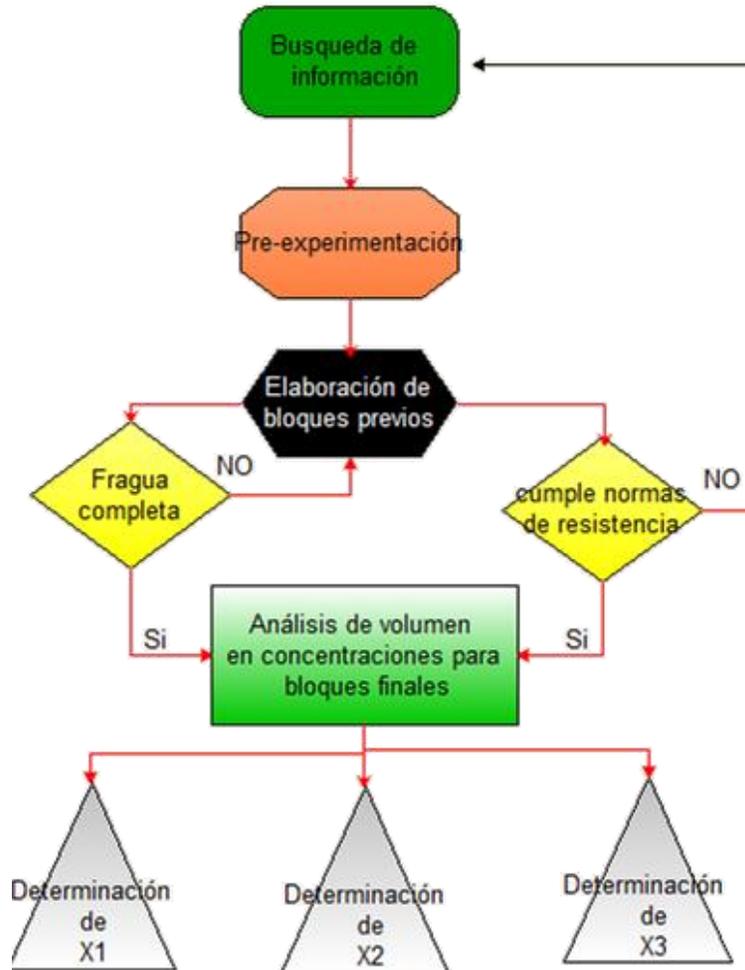


Figura 5.2 Diagrama de flujo de la metodología pre-experimental.

Una vez determinadas las concentraciones con las cuales se trabajaron, se elaboraron bloques por cuadruplicado, eligiendo dos al azar para pruebas de lixiviación e intemperismo, así como una para pruebas de resistencia, descartando uno. Posteriormente, se cortaron en el Instituto de Geología de la UNAM, con un espesor de 1 cm y precisión de 0.05 cm. De los bloques se extrajeron un promedio de 10 discos, de las cuales se eligió 2 al azar para ensayos en la cámara de intemperismo.

Una vez determinado el elemento que cumple con las mejores características, se elaboro, un bloque representativo a escala real y se le realizaron pruebas finales de resistencia, para esta parte se siguió la metodología plasmada en la figura 5.3.

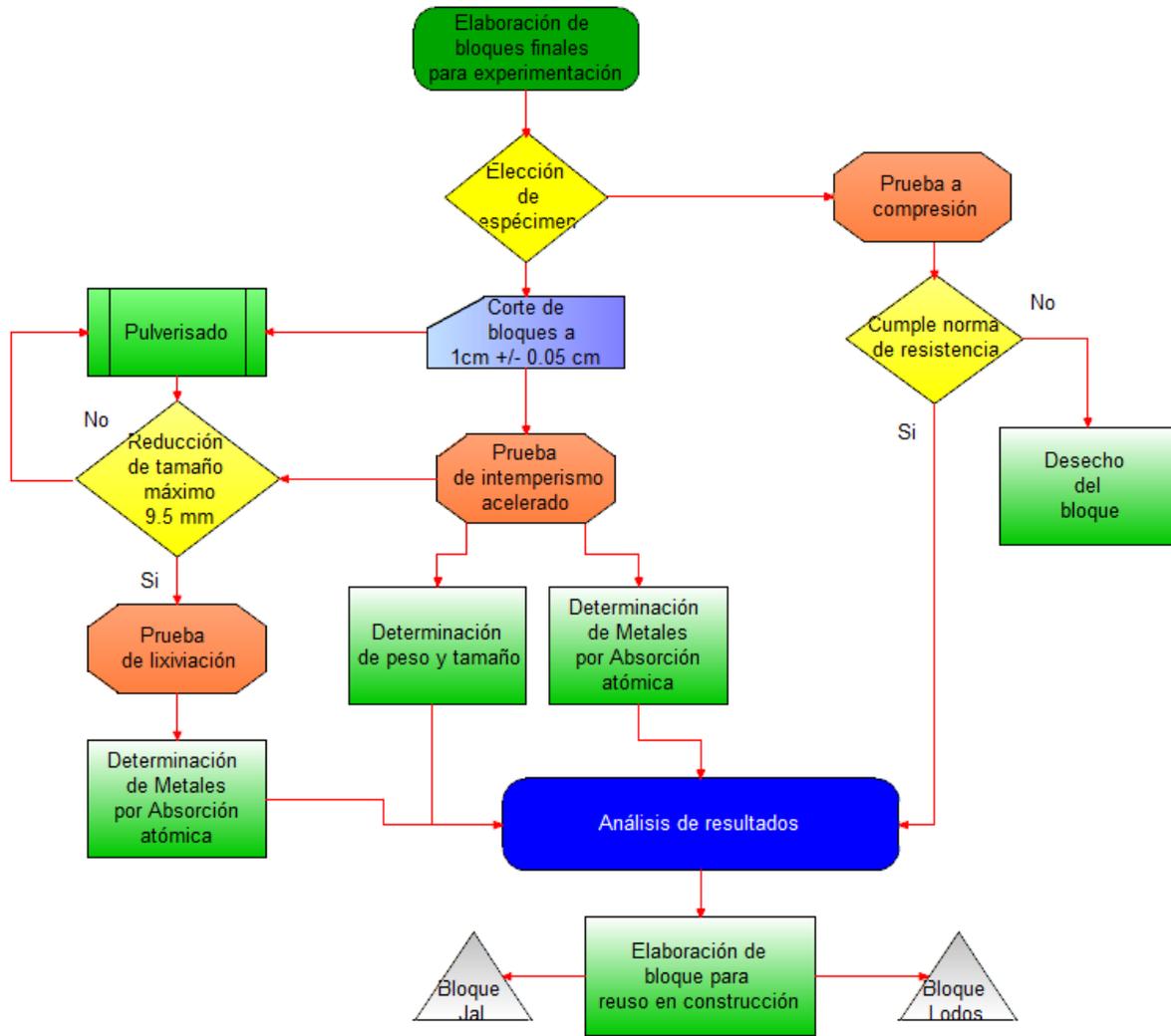


Figura 5.3 Metodología experimental para la elección del bloque final para reúso.

5.1 Diseño de experimento.

Se consideró un diseño de experimentos basados en bloques con parcelas para cada experimento, este diseño tiene la siguiente configuración:

Parcela 1	
Tratamiento	
Nivel 1 (X1)	Nivel 1 (X1)
Nivel 2 (X2)	Nivel 2 (X2)
Nivel 3 (x3)	Nivel 3 (x3)

Parcela 2	
Tratamiento	
Nivel 1 (X1)	Nivel 1 (X1)
Nivel 2 (X2)	Nivel 2 (X2)
Nivel 3 (x3)	Nivel 3 (x3)

Figura 5.4 Diseño experimental para cada prueba.

Para este diseño se consideraron variables y condiciones que se explican en los puntos a continuación.

5.1.1 Definición de la unidad experimental.

Se utilizó como unidad experimental bloques del mismo tamaño, homogéneos en su composición y con el mismo número de pruebas, a escala laboratorio para representar posteriormente bloques de la industria de la construcción.

La estructura de la experimentación es:

Dos parcelas, una de lodos y otra con jales, con 1 tratamiento de zeolita y 3 niveles de concentraciones X1, X2 y X3.

Los bloques se construyeron con residuos provenientes de una refinería y con jales mineros del Estado de México, estos fueron proporcionados por Mijaylova (2011) y Ramírez, (2008) respectivamente.

Los residuos se analizaron en estado seco y natural.

Las condiciones que permanecieron constantes son:

- El tiempo de curado, así como las características de temperatura y humedad.
- El tamaño.

La unidad experimental se ensayo, a través de una máquina de ensayo universal para las pruebas de compresión, equipo de extracción PECT para pruebas de lixiviación, cámara de intemperismo para pruebas de intemperismo acelerado y el material de laboratorio se lavo con ácido acético.

Se determinó por HPLC las concentraciones de iones y cationes en la lluvia ácida y se usó un espectrofotómetro de absorción atómica para determinación de metales en el lixiviado producto del lavado del bloque.

5.1.2 Definición de la variable de respuesta.

Se establece como variable de respuesta, la resistencia mecánica, la capacidad para no lixiviar y la resistencia a la erosión.

Buscando evaluar el tratamiento y la concentración de residuo óptima para la posterior elaboración de bloques o tabiques escala real.

5.1.3 Definición de factores y niveles.

Se definió 1 factor a emplear, siendo: Zeolita/cemento, con tres niveles tabla 5.1 se observa el factor y los niveles del mismo.

Tabla 5.1 Factor y niveles del experimento.

Factor	Nombre	Niveles	
1	Zeolita/cemento	Jales concentración x1	Lodos de la refinería concentración x1
		Jales concentración x2	Lodos de la refinería concentración x2
		Jales concentración x3	Lodos de la refinería concentración x3

5.1.4 Diseño experimental.

Se aplicó un diseño experimental multifactorial, completamente al azar, balanceado y completo, con x repeticiones (para poder comprobar los supuestos del diseño, tales como: Independencia de los residuales, errores normales, homogeneidad de varianzas). (Méndez y Moreno, 2003). De esta manera, en la Tabla 5.2 se muestra la estructura del modelo experimental empleado.

Tabla 5.2 Estructura del experimento Parcela X0.

Residuo X (Parcela X ₀) Ensayo X ₀	
Concentración	Tratamiento X ₁
C ₁	Y12
C ₂	Y21
C ₃	Y31

De esta manera el modelo estadístico a utilizar será:

$$\text{Modelo} \quad Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

y_{ij} = Observación del i -ésimo tratamiento (dosis suministrada) de la j -ésima unidad experimental.

μ = Media general, común a todas las unidades experimentales.

τ_i = Efecto del i -ésimo tratamiento (Concentración del residuo).

ε_{ij} = Error experimental.

$i = 1, 2, 3$.

$j = 1, 2$.

Se efectuó una aleatorización en la asignación de los elementos experimentales, utilizados en cada tratamiento, debido a que las unidades experimentales a emplear, presentan una cierta variabilidad entre ellas (diferente posición del difusor de aire); dicha distribución se puede observar en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 Asignación de las unidades experimentales a los diversos tratamientos.

Tratamiento x _i		
Prueba compresión	Prueba lixiviación	Prueba intemperismo
B3, B8	B2, B11	B5, B7
B4, B10	B1, B12	B6, B9

B: Bloque

El análisis estadístico de las variables de respuesta se llevó a cabo mediante una tabla de análisis de varianzas (ANOVA), estableciendo un valor de nivel de significancia (α) del 5% (probabilidad de cometer un error tipo I, es decir, probabilidad de rechazar la hipótesis nula siendo verdadera) (Montgomery, 1991);

5.1.5 Propuesta constructiva y de ensayo.

Para este punto se consideró que la hipótesis a comprobar sería que al menos uno de los bloques construidos tendría la capacidad de fijar los contaminantes a su cuerpo, su resistencia mecánica, estructura física y peso, serían lo suficientemente resistentes como para poder ser reutilizados en la construcción.

Los bloques se elaboraron con materiales uniformes y limpios, todo el cuerpo con el que se elaboró el bloque se tomó de la misma masa de control y se le adicionaron los elementos para el tratamiento.

Los ensayos fueron para: lavado por PECT, pruebas axiales de resistencia, pruebas de retención de agua en el bloque y del contaminante, peso, densidad e intemperismo acelerado de los bloques.

En base a una pre-experimentación, en la cual únicamente se revisó una sola prueba que fue de resistencia mecánica con dos repeticiones, se estableció que el peso de todos los bloques sería el mismo, por lo que solo cambiarían las proporciones en el bloque.

Se mantuvo un grupo de control sin residuo (blanco) y solo variando el tratamiento de su composición. Esto tuvo la finalidad de determinar sus respuestas a los contaminantes y no las características propias que el tratamiento le da al bloque.

Las muestras fueron tratadas por duplicado y se caracterizaron antes y después de los ensayos de esfuerzo mecánico, intemperismo y lixiviación.

La variable independiente que se consideró fue la concentración de residuo colocado en el bloque, de esta manera se evalúa su eficiencia a diferentes concentraciones y su capacidad de contención de contaminantes.

Para llevar a cabo un correcto ensayo se realizaron las pruebas de aleatoriedad con determinación ciega en cada prueba.

Al finalizar se eligió un tipo de bloque que tuvo las mejores condiciones para evitar la lixiviación. Y se le aplicaron distintos niveles de tratamiento para evaluar la concentración máxima que se le pueden fijar. Para este nivel sólo se tendrá un espécimen como grupo de control.

El posible ruido que se tuvo fue el lavado incorrecto del molde, ya que alguna cantidad de residuo quedó en él afectando el resultado, así como las condiciones propias del curado de cada bloque. Se intentó mitigar lavando con ácido nítrico 1N cada vez que se usó el mismo molde, sin embargo no se pudo evaluar si esto presentó un efecto real, y el segundo sólo se pudo medir la temperatura y humedad relativa de la cámara de curado.

Para eliminar estas fuentes de invalidación externa y garantizar la equivalencia de los grupos en esta experimentación, se mantuvo el tamaño del bloque con las mismas características para los diferentes tratamientos. De esa manera sólo fue efecto la respuesta por el contaminante.

5.1.6 Selección de parámetros.

Para poder evaluar los efectos que producen los jales así como los hidrocarburos sobre los tratamientos propuestos, se seleccionaron los siguientes parámetros:

El esfuerzo que puedan soportar los bloques, la capacidad para evitar la lixiviación, el intemperismo y el peso final del bloque. Adicionalmente, de manera cualitativa, su apariencia estética.

Capítulo 6

Resultados de laboratorio

6. Resultados de laboratorio.

6.1 Elaboración de bloques.

Los bloques se elaboraron después de una pre experimentación donde se buscó las resistencias óptimas para el reúso, que la fragua se lograra, que tuvieran acabados estéticos y que no hubiera lixiviación aparente, con esto se determinó las concentraciones para la experimentación final.

Para determinar las 3 concentraciones, se elaboraron los bloques con cada residuo, la elección se basó con la primicia de que el cemento es un producto que elevará el costo de este tratamiento, por lo que se probó para ambos residuos:

Primero menos cantidad de cemento y mayor de residuo, posteriormente mayor cantidad de residuo y menor de cemento y por último la opción de tener mayor cantidad de residuo y las mismas condiciones de cemento y zeolita, manteniendo los pesos para cada bloque, el residuo se saturó al dejarse reaccionar con la zeolita, por lo que posteriormente se agregó el agua para la reacción, este valor se determinó que sería el óptimo para que no hubiera un exceso de agua que interfiriera con la resistencia final, ver la tabla 6.1 para jales y 6.2 para lodos.

Tabla 6.1 Cantidades usadas para la elaboración los bloques con jales.

Jales				
Concentración	Residuo [g]	Cemento [g]	Zeolita [g]	Agua [g]
x1	100	80	160	60
x2	124	124	120	32
x3	140	120	120	20

Tabla 6.2 Cantidades usadas para la elaboración bloques con lodos.

Lodos				
Concentración	Residuo [g]	Cemento [g]	Zeolita [g]	Agua [g]
x1	92.5	74	148	55.5
x2	114.7	114.7	111	29.6
x3	129.5	111	111	18.5

Los tamaños promedios para todos los bloques fueron de 5.25 cm de diámetro y 9.89 cm de altura

El procedimiento para ambos residuos fue el mismo, solo varió el tiempo de reacción de los lodos con la zeolita, por lo que se les dejó reaccionar con ella por 10 minutos a cada uno; a diferencia de los jales que fue un tiempo de 5 minutos, ver figura 6.1 y 6.2



Figura 6.1 Reacción lodos con zeolita.



Figura 6.2 Reacción de jales con zeolita.

Una vez elaborados y comenzada la fragua se vertieron en moldes de polietileno de alta densidad (PEHD) marca BRAND se llevaron al cuarto de curado una vez alcanzado el 100% de la fragua de la Facultad de Ingeniería, UNAM. Esto permitió garantizar que no les faltara agua necesaria para la resistencia del bloque, ver figura 6.3.



Figura 6.3 Cuarto de curado Facultad de Ingeniería, UNAM.

Al finalizar el curado, los bloques que permanecieron dentro del molde obtuvieron acabados estéticos tipo espejo, a diferencia de los que no lo hicieron. Esto puede tener repercusión en el tipo de uso final que se les pueda dar.

Transcurridos 28 días se procedió a realizar las pruebas de compresión simple, y a los 45 días se cortaron en láminas de 1 cm +/- 0.05 cm con el fin de llevarlas a la cámara de intemperismo. En la figura 6.4 se observa la máquina de corte utilizada para hacer las láminas y evitar las excentricidades, en la figura 6.5 se aprecia el lijado para tener un corte final y un acabado óptimo en los bloques, así como para eliminar las posibles irregularidades en las láminas.



Figura 6.4 Máquina de corte de precisión.



Figura 6.5 Lijado de muestras para uniformizar.

Los discos finales obtuvieron las mismas medidas y el mismo peso con lo que se garantizó que la mezcla dentro del bloque fue homogénea, ver figura 6.6



Figura 6.6 Cortes o lajas para ensayos.

De las láminas cortadas se tomaron lascas al azar de cada concentración para pulverizarlas y realizar las pruebas PECT.

6.2 Compresión simple

Los ensayos de compresión simple al esfuerzo axial se realizaron en la Facultad de Ingeniería de la UNAM, para estos ensayos se buscó que se mantuvieran siempre una superficie horizontal, por lo que se cabecearon con azufre 24 hrs. antes de ser probados como lo indica la norma, cabe mencionar que debido a ello los bloques no pudieron ser utilizados nuevamente en ninguna prueba sucesiva, ya que por un lado al prueba es destructiva y fueron contaminados con azufre y diversos agentes externos al bloque, por ello se les desechó.



Figura 6.7 Ensayo de bloques a carga axial.



Figura 6.8 Lectura de resistencia.

Para cada parcela se obtuvieron diferentes resultados, considerando un diámetro de 25 cm² en la tabla 6.3 se expresa la resistencia en kg/cm².

Tabla 6.3 Resistencias obtenidas en cada parcela.

	Jales			Lodos			Patrón
	X1	X2	X3	X1	X2	X3	Blanco
Resistencia total (Kg)	5171.67	4618.33	4613.33	2871.7	3628.0	3487.3	3628.0
Resistencia por (Kg/cm ²)	195.911	174.949	174.760	108.783	137.434	132.105	137.434

Debido a que las pruebas mecánicas fueron bastas por cada concentración (6 ensayos por 3 concentraciones y dos residuos), se resume en la figura 6.9 los ensayos realizados en grupo de jales y lodos comparados contra un valor patrón máximo, de un bloque de concreto de alta resistencia llamado patrón (Blanco).

Los bloques elaborados con jales obtuvieron resistencias entre los 174 y los 195 kg/cm² contra los lodos que resistieron entre 108 y 137 kg/cm², y por el otro lado se muestran los promedios de las resistencias alcanzadas por parcelas en las figuras 6.10 y 6.11, respectivamente.

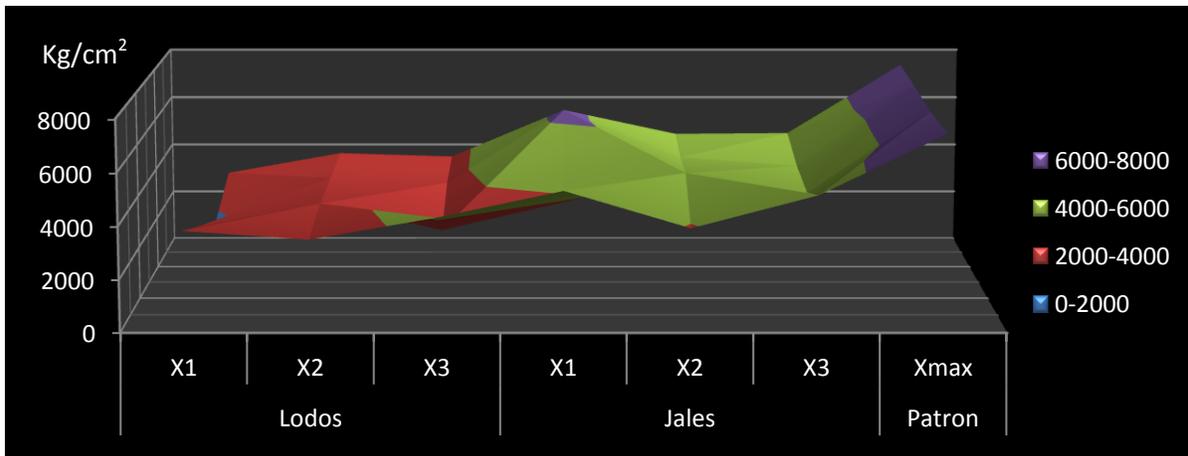


Figura 6.9 Comparación contra resistencias máximas.

Analizando por separado cada parcela, se tienen las gráficas siguientes, por un lado en la figura 6.10 y por otro lado se tienen las resistencias obtenidas por los lodos en kg/cm² en este contraste se puede apreciar la capacidad mecánica de los bloques con concentración X2 que equivalen a una concentración de residuos similar a la de zeolita.

Por otro lado se puede observar el caso para la figura 6.11 en el que la resistencia de los jales concentración X1 es muy notoria frente a las otras concentraciones en los cuales las resistencias son muy similares. Esto indica que la zeolita o el cemento no son variables decisorias, como lo es el propio residuo y las características que este provee.

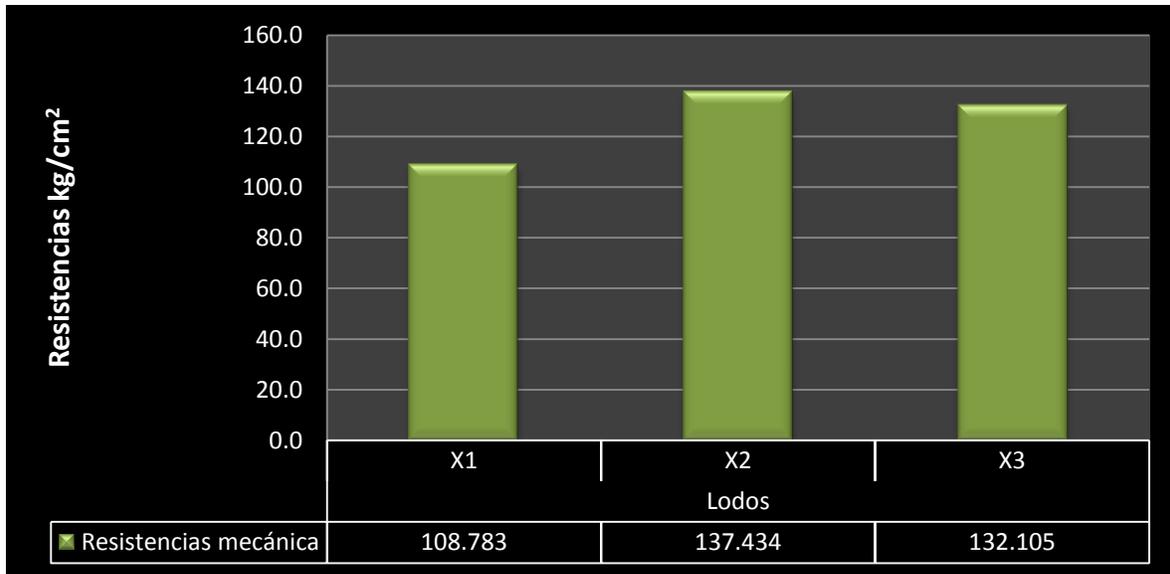


Figura 6.10 Resistencia promedio en kg/cm^2 de lodos.

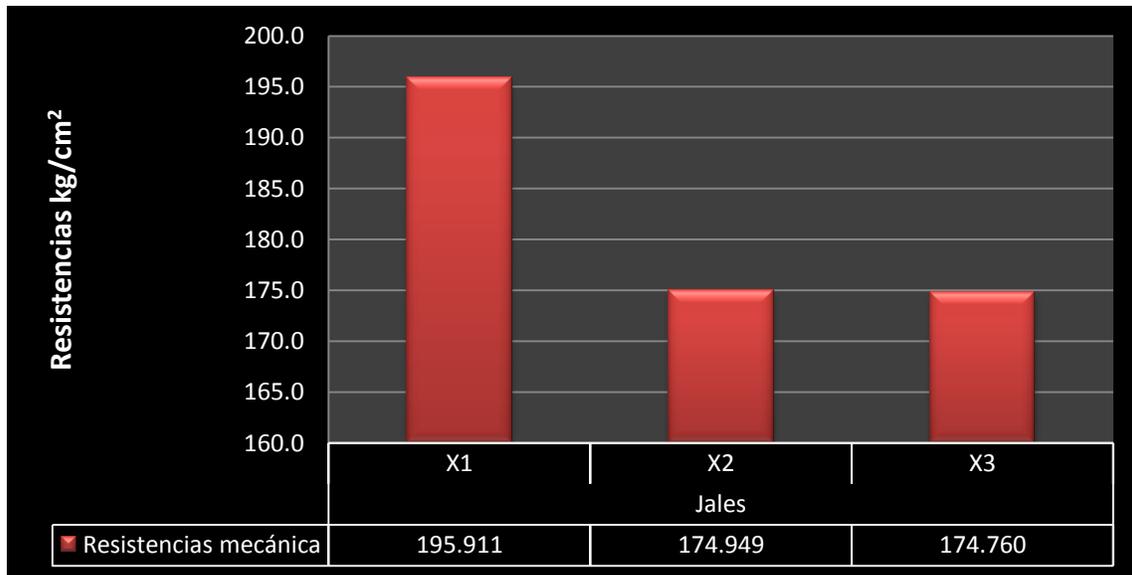


Figura 6.11 Resistencia promedio en kg/cm^2 de jales.

6.3 Pruebas hídricas.

Estas pruebas se realizaron para conocer el comportamiento de los bloques expuestos al agua, debido a que es la causante de la mayor lixiviación en la matriz estructural. Esto permite predecir y analizar las posibles condiciones a las que se podría enfrentar en un medio húmedo o totalmente saturado.

Adicionalmente con estos datos, se predice la erosión que sufre durante el intemperismo acelerado al que se les sometió y poder excluir el agua de saturación en el material del bloque.

Otra de las razones es debido a que este material se espera sea utilizado para elaborar blocks para reúso en la construcción y por ende no debe de ser un material expansivo que pueda comprometer la integridad estructural del o los elementos donde sea utilizado.

En consideración a lo anterior, también se determinaron otros factores como se muestran en la tabla 6.4, útiles para conocer el estado físico del material que se buscará reintegrar a la cadena productiva.

Tabla 6.4 Pruebas hídras.

Ensayos	Jales				Lodos			
	X1	X2	X3	Unidades	X1	X2	X3	Unidades
Volumen	224.72	232.22	201.57	cm ³	273.58	258.63	244.24	cm ³
Densidad	1.64	1.71	1.69	kg/m ³	1.28	1.43	1.42	kg/m ³
Porosidad abierta	39.56	56.58	55.36	%	42.00	44.44	34.19	%
Contenido en agua en saturación	17.21	18.55	17.90	%	27.53	21.62	20.78	%

Se considera que un elemento estructural tiene alta porosidad abierta si supera el 15% de poros abiertos (PROALSO, 2008), por lo que en el caso de los jales es muy alta lo que indica que la zeolita utilizada aun contiene muchos espacios sin utilizar, por lo que se puede reducir la concentración de zeolita para economizar en materiales, para el caso de los bloques elaborados con lodos, los poros abiertos también son muy altos, pero si se compara contra el volumen de los bloques, se aprecia que estos fueron más expansivos al momento de la fragua, encontrando huecos amigdaloides producto de la interacción del cemento y los contaminantes en las fases exotérmicas del proceso de fragua.

El contenido de saturación de agua es muy bajo por lo que se espera que no se encuentre una lixiviación por intemperismo alta así como una deformación sustancial en los bloques.

Se midió el pH del agua durante toda la prueba manteniéndose en 10, lo que lo hace un medio favorable para que no lixivie durante una lluvia ocasional.

Succión capilar.

Esta determinación se llevó a cabo en base al método UNE-EN 1925:1999; NORMAL 11/85, con esto se puede saber si el material estando en contacto ocasional con agua pueda reaccionar rápidamente con ella o no, así como las eventualidades que podrían surgir por esta condición.

En la figura 6.12 se puede apreciar la lenta absorción por parte de los bloques elaborados con jales X2 y X3 no así la absorción de los bloques X1, esto puede influir en el momento de realizar las pruebas de intemperismo debido a que este material absorbe más agua y puede lixiviar mayor contenido de contaminantes, esto indica que al incrementar la concentración de residuo disminuye la absorción de agua.

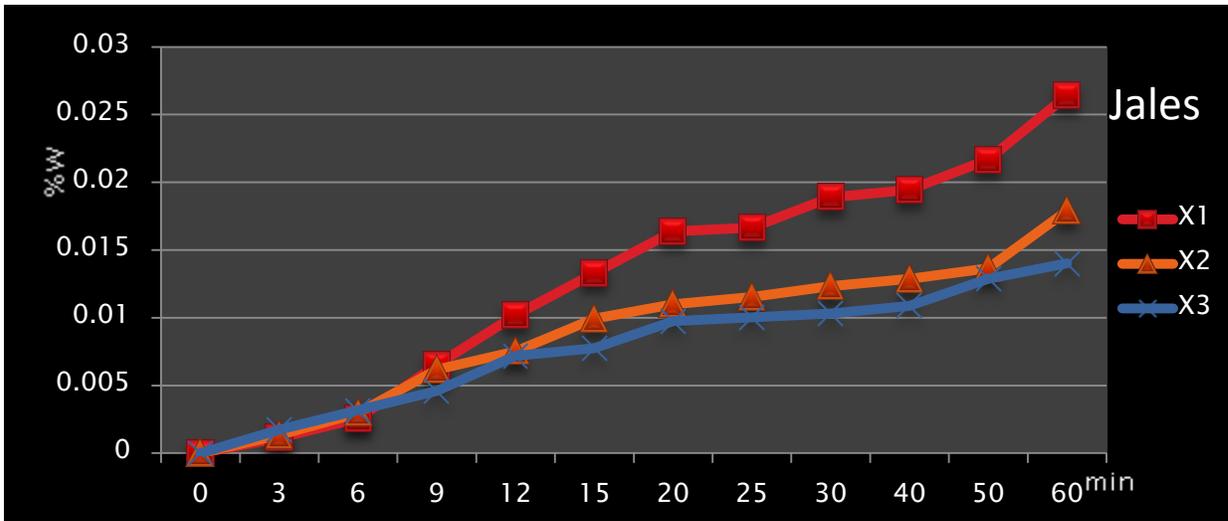


Figura 6.12 Sección capilar de Jales.

En la figura 6.13 se puede apreciar que el bloque X3 es el que absorbe mayor cantidad de agua y con mayor rapidez que los bloques X2 y X1, contrariamente a los resultados obtenidos con los jales, lo que demuestra una variable dependiente al residuo y no al material de soporte, esto indica que la cantidad de residuo es inversamente proporcional a la absorción de agua por parte del bloque.

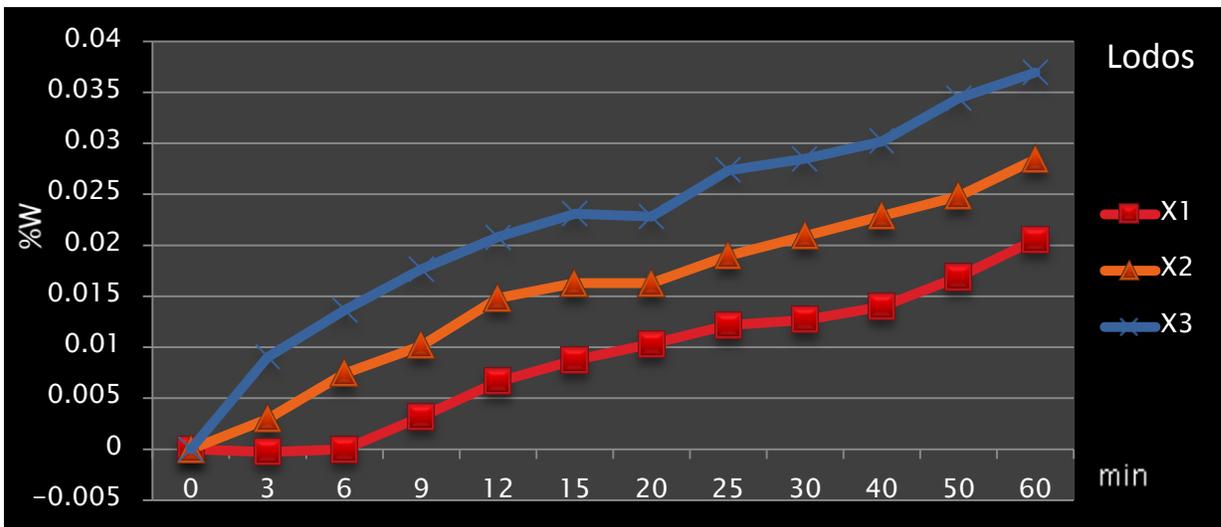


Figura 6.13 Succión capilar de lodos.

Absorción libre de agua.

Esta prueba permite conocer el estado máximo de saturación de agua en el material, para determinar si podría lixiviar, reaccionar o interferir con el estado físico del elemento estructural con respecto al tiempo, así como si los cambios volumétricos dependen del agua o de reacciones químicas con algún compuesto de los contaminantes presentes.

Para este caso, en la figura 6.14 se aprecia una absorción lineal sin poros vacíos no ocupados, a diferencia de la figura 6.15 que se puede ver una marcada condición donde los poros intermoleculares no son ocupados en su totalidad, en todo el tiempo, posiblemente por la característica impermeable del propio residuo (lodos), contrastando contra la tabla 6.4 se puede comprender que los espacios vacíos no contienen jales, por lo que es viable reducir la cantidad de zeolita para este bloque, contrario a los lodos donde la interacción con el agua puede deberse a una condición de impermeabilidad contra la zeolita o simplemente una reacción química con el residuo.

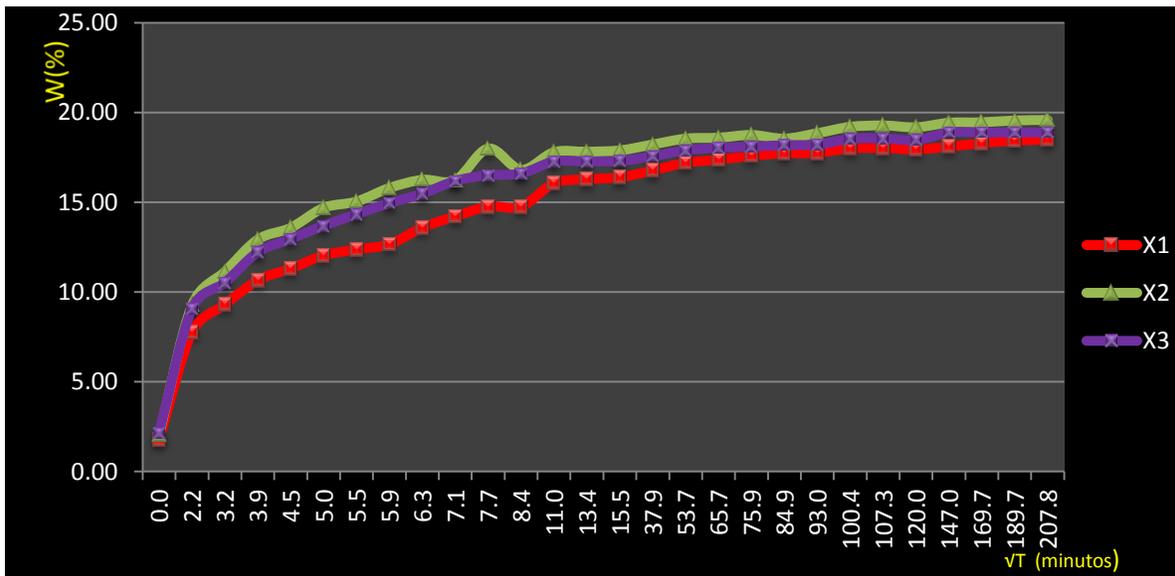


Figura 6.14 Absorción libre de agua por inmersión total de los bloques con jales.

Esto indica que el agua es el único causante de la interacción del volumen con este elemento estructural.

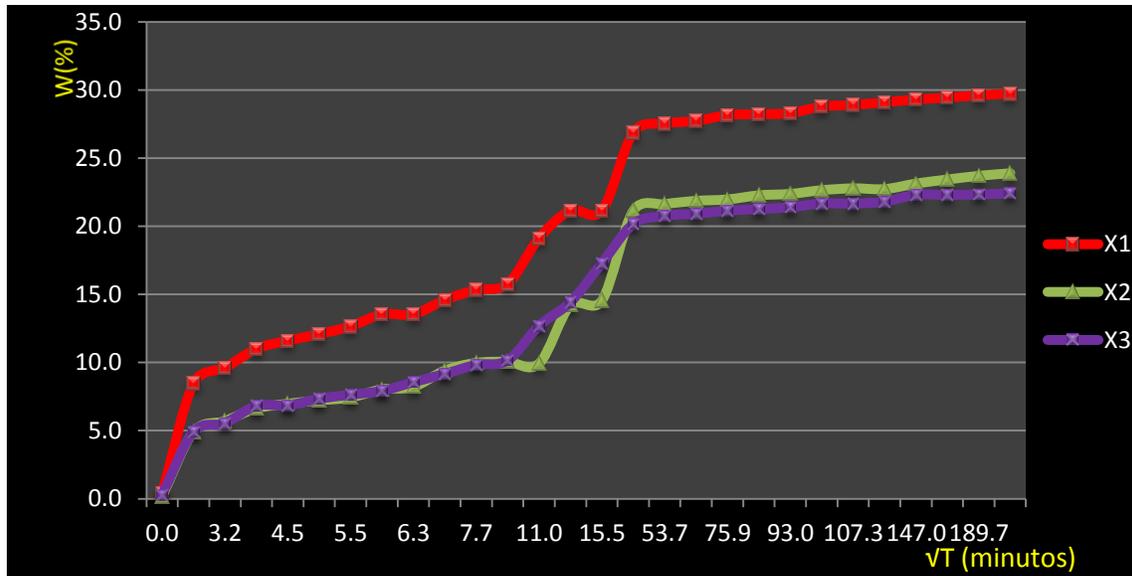


Figura 6.15 Absorción libre de agua por inmersión total de los bloques con lodos.

En la tabla 6.5 se resumen los porcentajes de agua que retuvo el bloque con respecto al peso propio del elemento y el peso del agua absorbida en el tiempo, de manera independiente y en contraste se realizó con tabiques convencionales de la construcción y se encontró una absorción promedio de 35% de agua retenida, cabe mencionar que no se realizó en blocks convencionales debido a que por su tamaño no cabrían en la cámara de saturación.

Tabla 6.5 Por ciento de agua retenida.

	Jales			Lodos		
	X1	X2	X3	X1	X2	X3
%w	16.43	17.17	16.36	29.21	23.67	22.07

Cambios volumétricos.

En esta etapa se pretendió determinar si estructuralmente plantea una problemática la expansión o compresión volumétrica producto del contacto por inmersión en agua. Estos cambios se plantearon en las 3 direcciones (X, Y, Z), sin embargo, debido a que el elemento es circular las direcciones X e Y son los promedios del diámetro en tres regiones del elemento (las dos esquinas y el centro) para poder tener los datos promedios y representativos.

Deformaciones en eje X e Y.

Para esta prueba se midieron las variaciones de volumen en el tiempo, encontrando que las diferencias son mínimas y estas se aprecian en las figuras 6.16 para el caso de los jales y en la figura 6.18 para el caso de los lodos.

En la figuras 6.16 y 6.17 se observan, que las deformaciones registradas en el bloque elaborado con jales, incluyendo el tamaño total del elemento y las deformaciones parciales respectivamente para el caso de los jales.

En la figuras 6.18 y 6.19 se aprecian las deformaciones totales mostradas para los bloques elaborados con lodos. Para el caso de los lodos, se analizo independientemente del tamaño del bloque, para conocer en qué momento la deformación es mayor y si el elemento permite mantener deformaciones sustanciales sin comprometer su estado estructural, ya que esto provocaría un decaimiento de la resistencia (fluencia) y una liberación de contaminantes al medio.

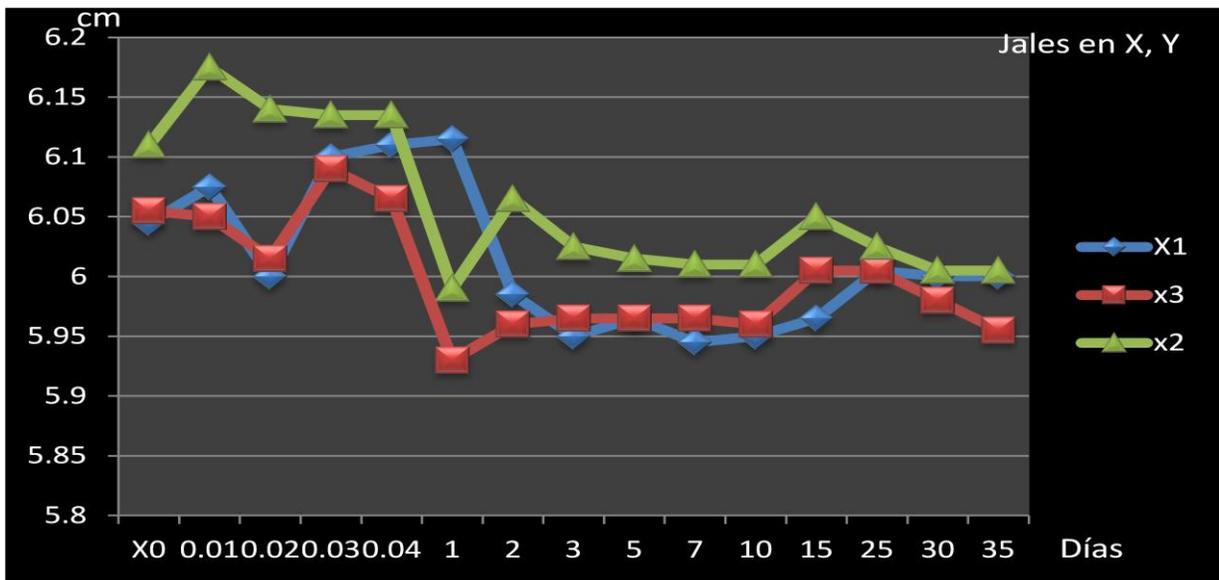


Figura 6.16 Cambios volumétricos en dirección X, Y Jales.

Separando el tamaño del bloque y analizando independientemente el cambio en el tamaño se representan los valores de la figuras 6.17 y 6.19.

Debido a que durante las primeras horas se encuentran las principales deformaciones, se nota que los cambios en los bloques (con concentraciones con menor y mayor cantidad de residuo) tienen un comportamiento muy similar en la deformación, como puede observarse en la primera etapa de la gráfica en la figura 6.17; posteriormente, la deformación aumenta entre mayor cantidad de residuo se tiene, esto indica que no hay una relación directa entre la deformación y la cantidad de residuo, esto puede explicarse al analizar la cantidad de material dentro de los poros de la zeolita los cuales no están totalmente saturados, por lo que después de un tiempo estos son ocupados con agua y producen un cambio en la absorción, y la eficacia en la elaboración de los bloques, al final de la gráfica puede observarse que todos los bloques tienen un comportamiento muy similar como se esperaba.

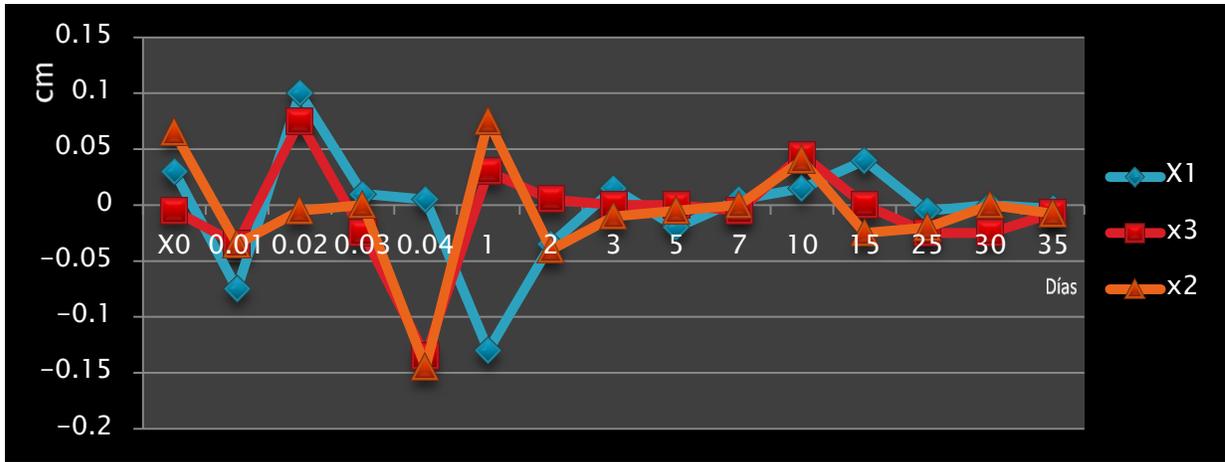


Figura 6.17 Expansiones y compresiones en el bloque de jales en dirección X y Y.

La deformación de los lodos con respecto al tiempo es más estable comparada con la de los jales, esto posiblemente debido a la característica impermeable del residuo, ver figura 6.18.

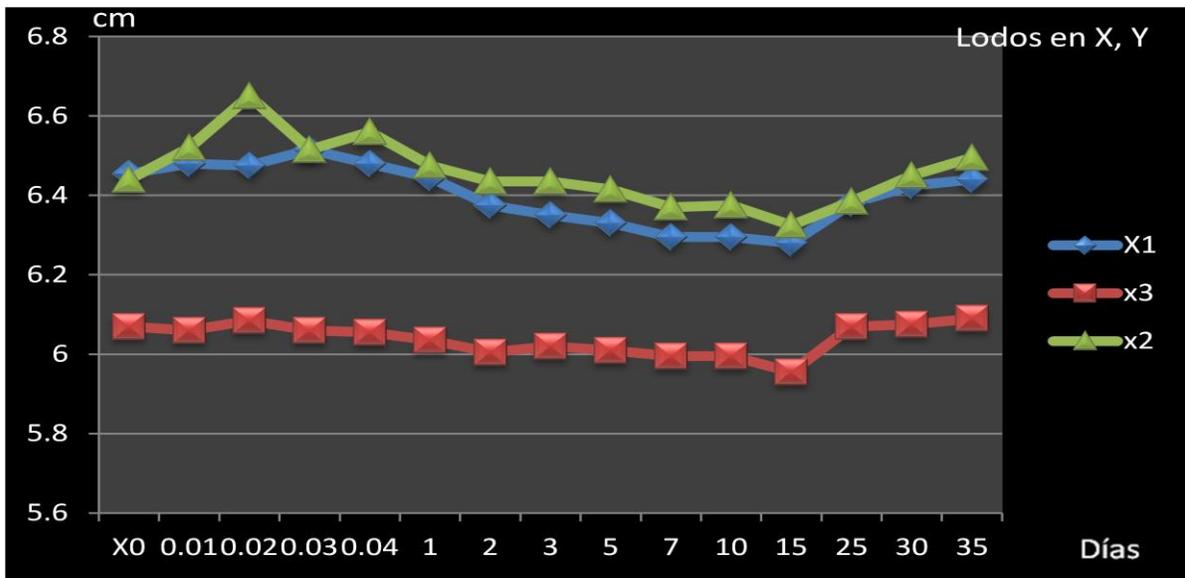


Figura 6.18 Cambios volumétricos en dirección X, Y lodos.

En la figura 6.19 se aprecian las deformaciones máximas de 3 mm que se tiene en los lodos al principio de la prueba por parte de la concentración x2, sin embargo, poco después toman el mismo comportamiento todas las concentraciones, variando con respecto al tiempo de la misma manera, el cambio entre las concentraciones se puede apreciar debido a la porosimetría que hay en la zeolita y el acomodo que tiene el lodo en la estructura del mineral, lo que provoca una variación no lineal.

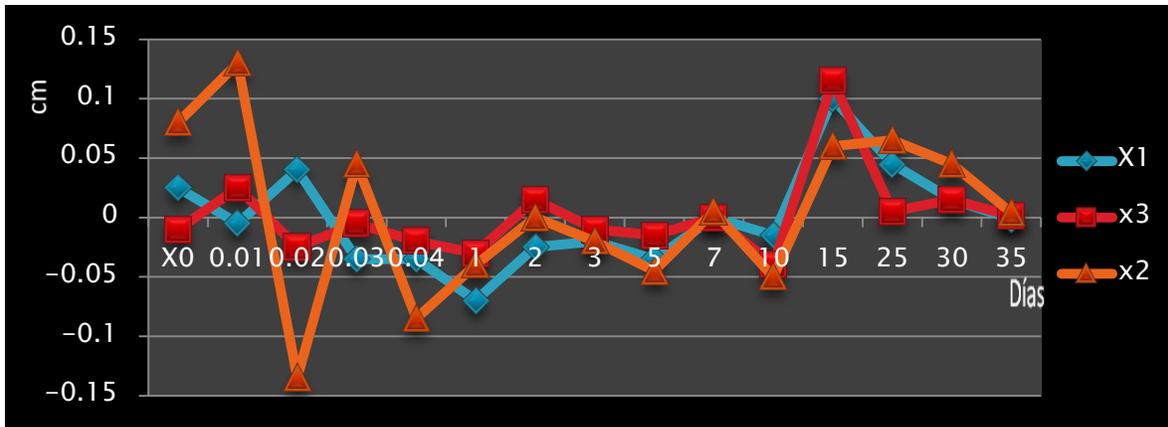


Figura 6.19 Expansiones y compresiones en el bloque de lodos en dirección X y Y.

Resumiendo los resultados de las figuras anteriores se elaboró la tabla 6.6 donde se apreciar el promedio de deformaciones y la deformación máxima de una lectura a otra. El promedio indica una baja deformación, aunque en algunos elementos pueden ser mayores, esto le provee un poco de elasticidad estructural al elemento.

Tabla 6.6 Resumen de deformaciones máximas y promedios eje x y.

Deformación	Jales X,Y			Lodos X,Y		
	X1	x2	x3	x1	x2	x3
Promedio [cm]	-0.003	-0.007	-0.007	-0.001	0.004	0.001
Máxima [cm]	0.1	0.075	-0.135	0.1	0.13	0.115

Deformaciones en eje Z.

Finalmente las variaciones en el eje Z son importantes para el caso de los bloques elaborados con jales, durante el comienzo de la prueba el residuo absorbe mucha agua y provoca una deformación, pero al pasar el primer día se estabilizan, ver figura 6.20, en el caso de los lodos, ver figura 6.21, el comportamiento es muy estable exceptuando por el día 15 donde el incremento está ligado con la porosidad abierta y se refleja en los ejes X e Y.

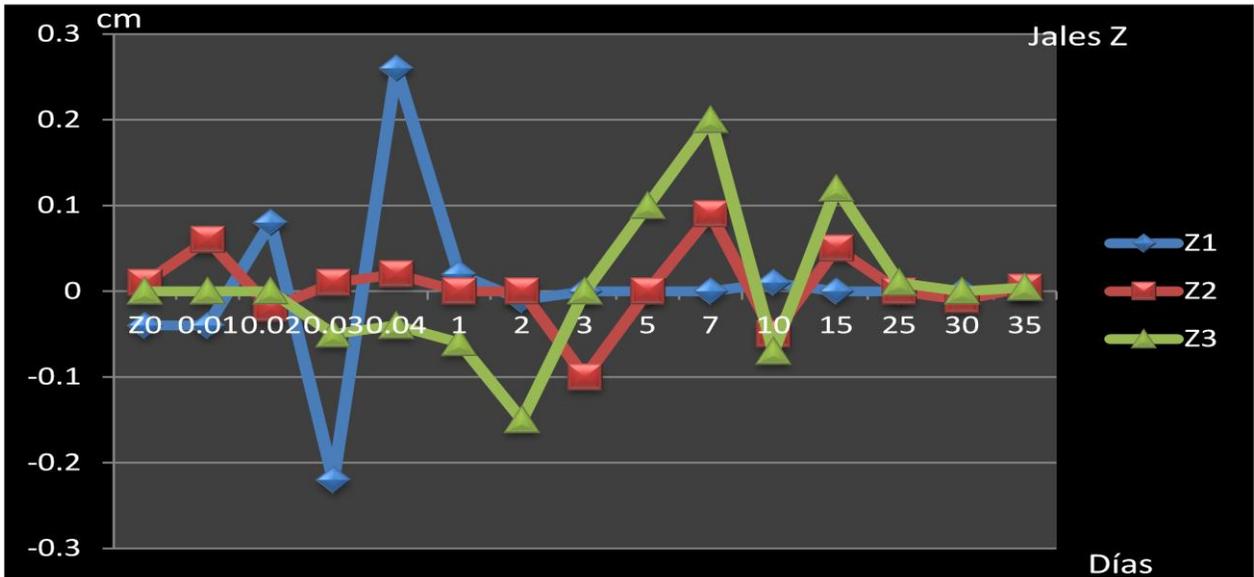


Figura 6.20 Expansiones y compresiones en el bloque de jales en dirección Z.

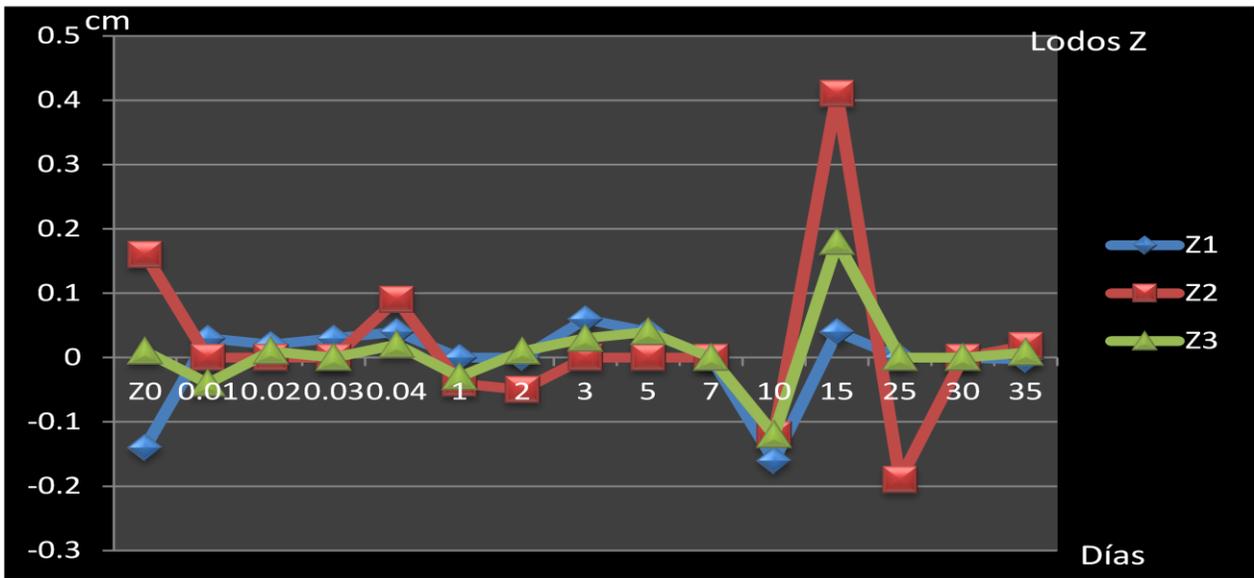


Figura 6.21 Expansiones y compresiones en el bloque de lodos en dirección Z.

Tabla 6.7 Resumen de deformaciones máximas y promedios.

Deformación	Jales Z			Lodos Z		
	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3
Promedio [cm]	0.0043	0.0043	0.0043	-0.0029	0.0186	0.0079
Máxima [cm]	0.26	0.09	0.2	0.06	0.41	0.18

6.4 Prueba PECT.

Los ensayos correspondientes a la NOM 053 SEMARNAT 1993 se realizaron con apoyo técnico del centro nacional de investigación y capacitación ambiental (CENICA) en sus instalaciones, con el equipo de rotación donado por el gobierno japonés, ver figura 6.22, en apego a los estándares y como la norma antes citada lo indica, las cámaras de extracción bajo el mismo estatus, ver figura 6.23, sin Marca (construidos en laboratorio), que se usaron posteriormente para la extracción usando $N_2(g)$ con una presión de 40 psi, esto para obtener el extracto contenido en el agua provenientes del lavado de los metales.



Figura 6.22 Equipo de extracción.



Figura 6.23 Cámara de extracción.

Las muestras se preservaron a una temperatura de 4 °C y se acidificaron a un pH de 2 con ácido nítrico, ver figura 6.24, para su posterior determinación por absorción atómica, a los 40 días de su extracción en CENICA.



Figura 6.24 Preservación de las muestras de extracto PECT.

En la figura 6.25 se puede apreciar las determinaciones de los metales analizados como son: Al, Cd, Cr, Mn y Pb. Sin embargo, metales como: Zn, Cu, Sb, Ti, Ba y Hg que también fueron analizados no pudieron ser leídos por el equipo de plasma debido a que sus concentraciones, son muy bajas quedando fuera del límite de detección.

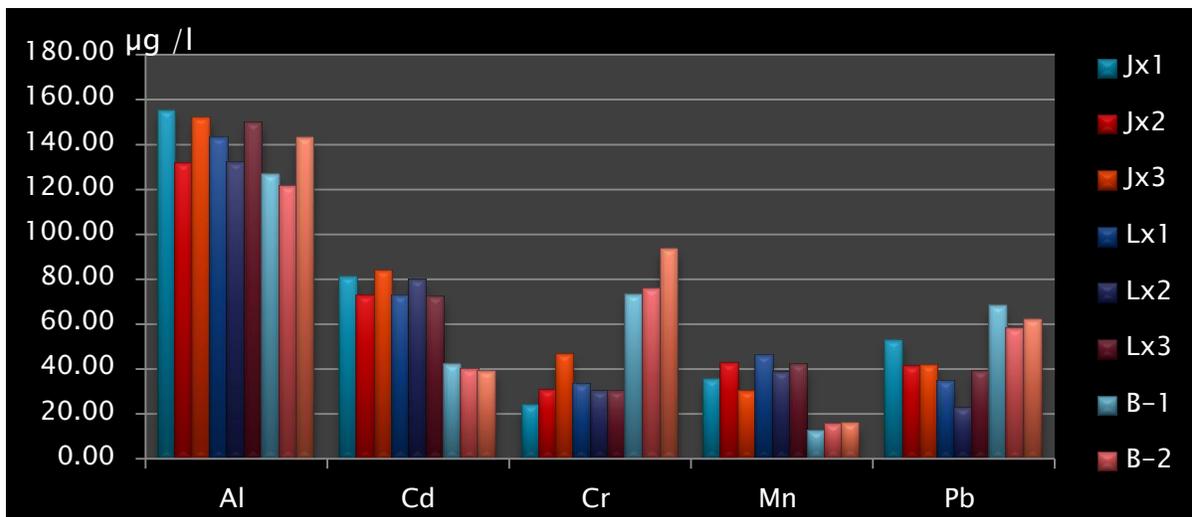


Figura 6.25 Determinación de metales en extracto.

6.5 Pruebas de intemperismo.

Las pruebas de intemperismo se realizaron en el Centro de Ciencias de la Atmosfera, este ensayo, se llevo a cabo en una cámara donde se simula lluvia ácida con un difusor de vidrio y con goteo independiente variado con válvulas de control, con humedad controlada a través de una resistencia eléctrica acoplado a un autotransformador variable marca Autovac, de 0 a 130 V, estas lecturas se registraron en un higrómetro y un termómetro para mantener las condiciones constantes, ver figura 6.26.



Figura 6.26 Cámara de intemperismo.

Para este experimento se consideraron las condiciones más desfavorables medidas en la zona metropolitana, con un pH de 4.0, una lluvia de promedio anual de 722.31 mm, una temperatura de 25 °C y una humedad del 75% (Ruiz, 2004). Para la preparación de la lluvia ácida artificial se tomaron en cuenta los valores de aniones y cationes promedios medidos en la zona metropolitana, ver tabla 6.8.

Tabla 6.8 Aniones y cationes para lluvia ácida en meq. (fuente: Alarcón, 2011).

Na ⁺	Nh ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	OH ⁻
45.91	334.83	36.51	82.72	252.67	100	82.42	333.84	435.39	3.65E-4

Estos cationes y aniones fueron monitoreados del agua de lluvia durante toda la experimentación por medio de HPLC 883 Basic IC plus marca Metrohm, también se midió el agua del lavado para saber si hubo contaminación durante el proceso o si las concentraciones estaban dentro de lo esperado.

Funcionamiento de la cámara de intemperismo:

Se modificó el funcionamiento convencional con el que la cámara ha trabajado, realizando modificaciones que permitieran tener 2 muestras en cada charola, manteniendo independiente el

goteo y recolectando de cada muestra el lavado, a diferencia de la manera convencional que era la colecta de la lluvia ácida en los bidones por donde esta agua se almacenaba, ver figura 6.27. Adicionalmente cada muestra se acidificaba y conservaba para evitar contaminaciones y degradaciones de los contaminantes.

Para la lluvia ácida, se colocó agua con un pH y una mezcla de cationes y aniones que se enuncian previamente, ver tabla 6.8, esta agua se colocó en un bidón por encima de los difusores para que por gravedad el flujo de agua irrigue todas las muestras, el flujo de lluvia se reguló por una válvula de paso quirúrgica seguida de un difusor de dos vías que desembocan a una válvula de goteo, estos goteos caen en la muestra descendiendo a una caja Petri estéril independiente para evitar contaminación, de donde son tomadas las muestras de agua de lluvia para su posterior determinación de metales y la valoración en el tiempo.

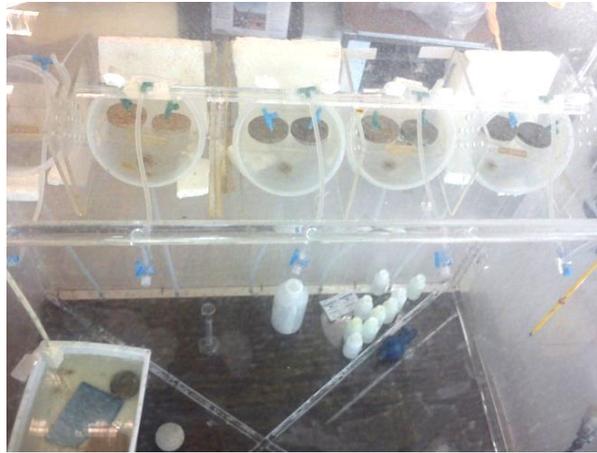


Figura 6.27 Irrigado de muestras por lluvia ácida.

Ya que la humedad es constante, esto evito que se incrementará el goteo por la condensación y la posible dilución en la muestra así como el lavado de los metales que se analizo, teniendo un gasto a la salida mayor del que se irrigó, ver figura 6.28.



Figura 6.28 Interior de cámara de intemperismo con humedad controlada.

Fue muy importante que durante la toma de muestras del agua de lluvia, no se retirara el bloque, ya que esto provocaría que alguna gota cayera directamente sobre la caja Petri diluyendo el lavado de metales de la muestra.



Figura 6.29 Irrigado independiente de muestra.



Figura 6.30 Toma de la muestra.



Figura 6.31 Preservación de la muestra.

Durante la experimentación se midieron los parámetros de entrada (lluvia ácida) y de salida (agua del lavado de las muestras) que están representados por el promedio de los 10 años de experimentación mostrados en la tabla 6.9. Adicionalmente los valores de pH medidos en el agua de la lluvia ácida y conductancia eléctrica de 4.2 y 154.2 μS , respectivamente.

Tabla 6.9 Resumen de pH y conductancia eléctrica.

pH de muestras			
	Jales	Lodos	Blanco
X1	9.42	9.26	9.35
X2	10.3	9.65	10.89
X3	7.55	9.99	9.8
Conductancia eléctrica			
	Jales	Lodos	Blanco
X1 [μS]	168.8	240	128.7
X2 [μS]	172.5	131.8	224
X3 [μS]	158.5	172.4	122.7

Con el tiempo se presentaron condiciones de oxidación en todos los bloques en áreas expuestas (no impermeables) así como una severa fractura en los bloques jales X2, ver figura 6.32, esto impediría usarlos en intemperie, y quedando descartados para la elección final del bloque.



Figura 6.32 Fractura de bloques por exposición a lluvia ácida.

Al finalizar la experimentación y secar las muestras para determinar el peso erosionado se puede apreciar las zonas de exposición a la lluvia ácida así como el efecto producido después de 10 años con este elemento corrosivo, ver figura 6.33.



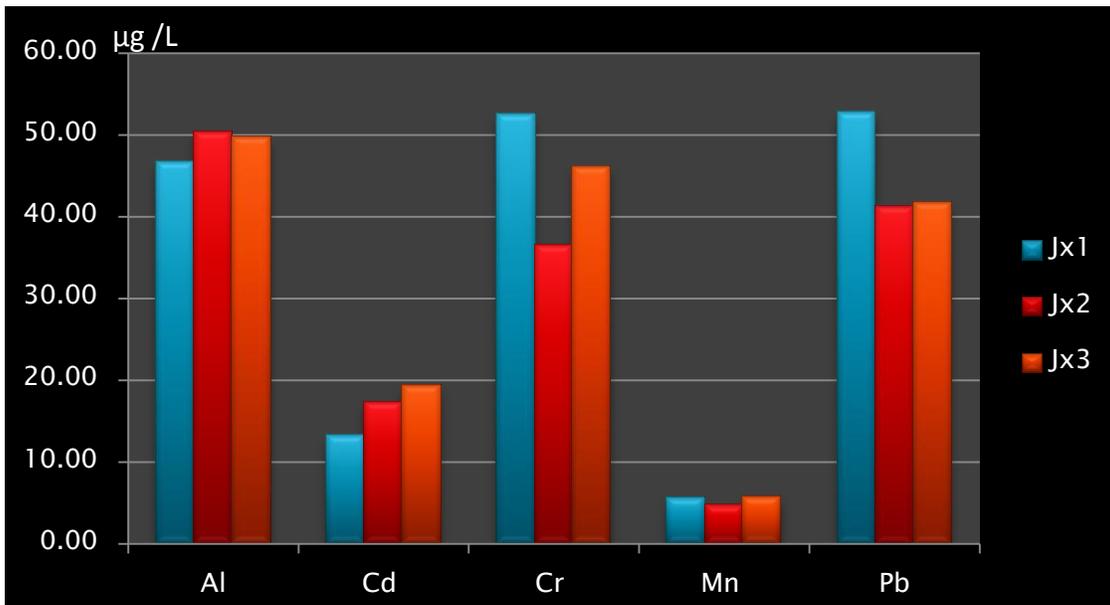
Figura 6.33 Erosión después de 10 años.

Después de simular 10 años de exposición a la lluvia ácida se probaron de nuevo las resistencias mecánicas de los bloques para comprobar si había una disminución de esta, producto de la erosión, y la afectación de los iones presentes en el agua, así como en el pH.

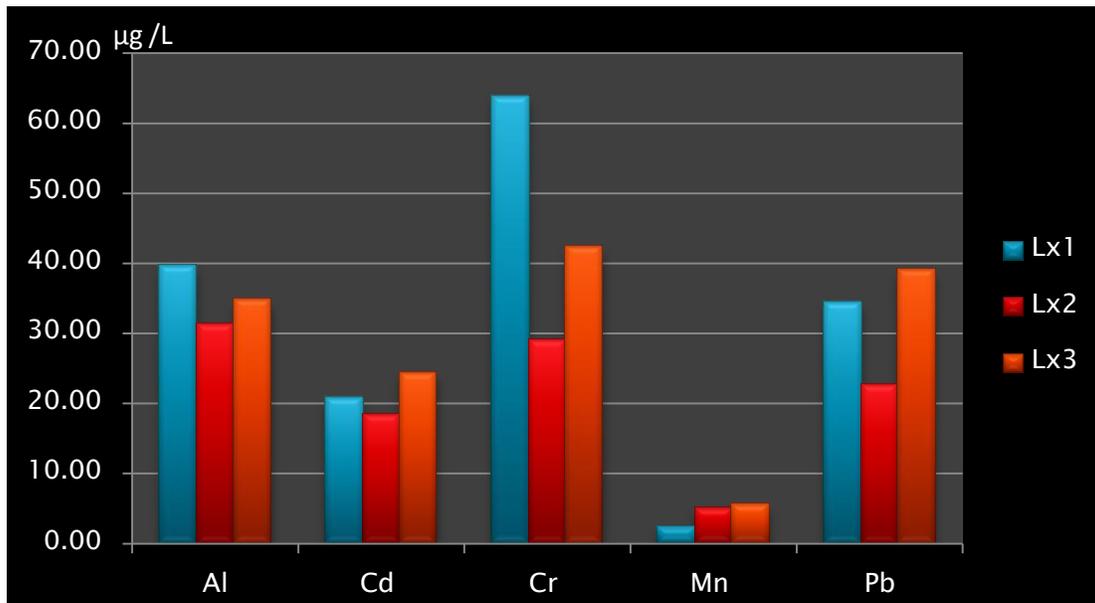
Al finalizar el ensayo se determinaron los metales para cada año por absorción atómica, encontrándose la mayoría por debajo de los límites de detección, por ello se decidió realizar una

mezcla compuesta de los 10 años para determinarles las concentraciones de metales presentes en el agua.

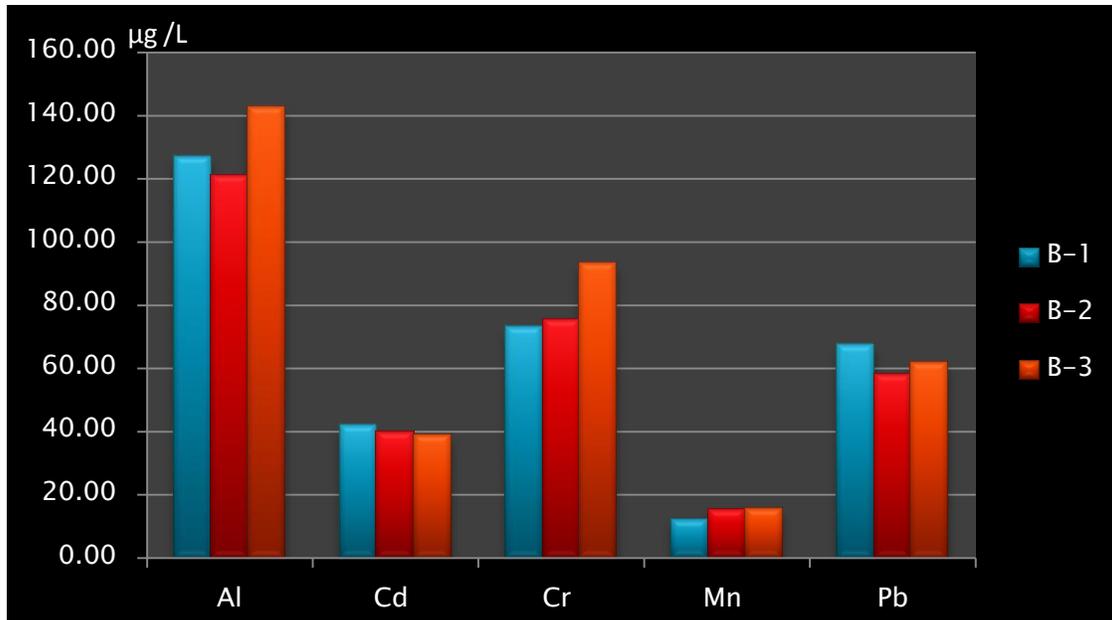
En esta determinación en ningún caso se aproximó a la norma, debido a que las concentraciones son muy bajas y no presentan un riesgo para la salud o la ecología. Las concentraciones de metales encontradas en la lixiviación de los jales están representadas en la figura 6.34, por otra parte los lodos se pueden apreciar en la figura 6.35 y finalmente la de los blancos en la figura 6.36.



6.34 Determinación de metales presentes en la lixiviación de jales.



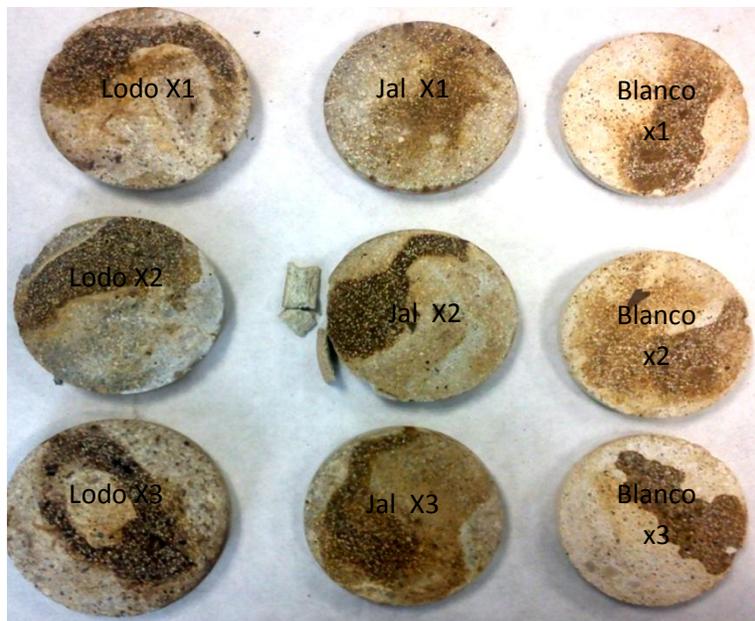
6.35 Determinación de metales presentes en la lixiviación de lodos.



6.36 Determinación de metales presentes en la lixiviación de blancos.

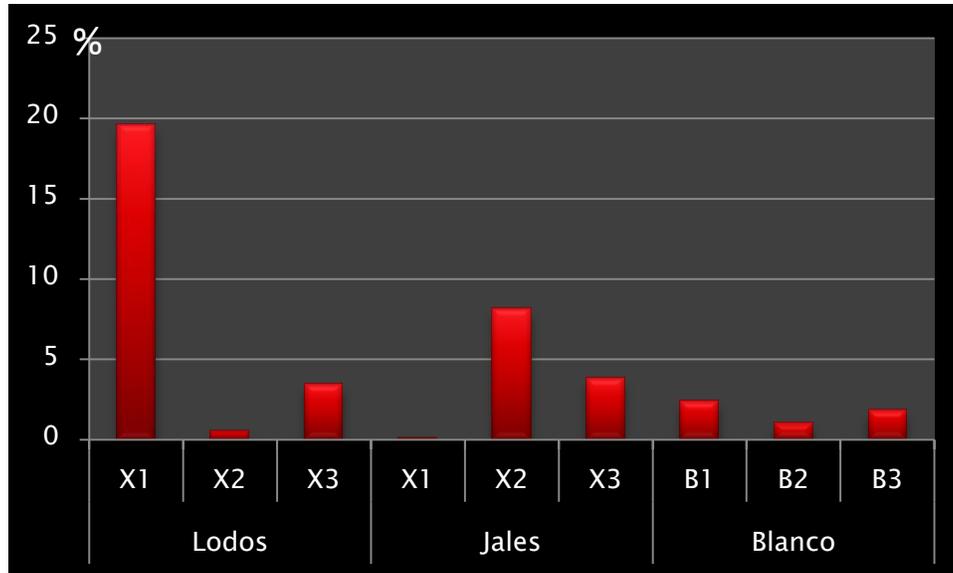
6.6 Erosión y decaimiento de la resistencia.

Producto del intemperismo acelerado se logró conocer la erosión presente en los bloques, esta fue determinada por la pérdida de masa, con una medición inicial antes del ensayo de cámara de intemperismo, y una lectura final del mismo, indicando la pérdida de masa después de 10 años de estar expuesto a las peores condiciones registradas. En la figura 6.37 se puede apreciar la pérdida de material en los bloques al final de la experimentación.



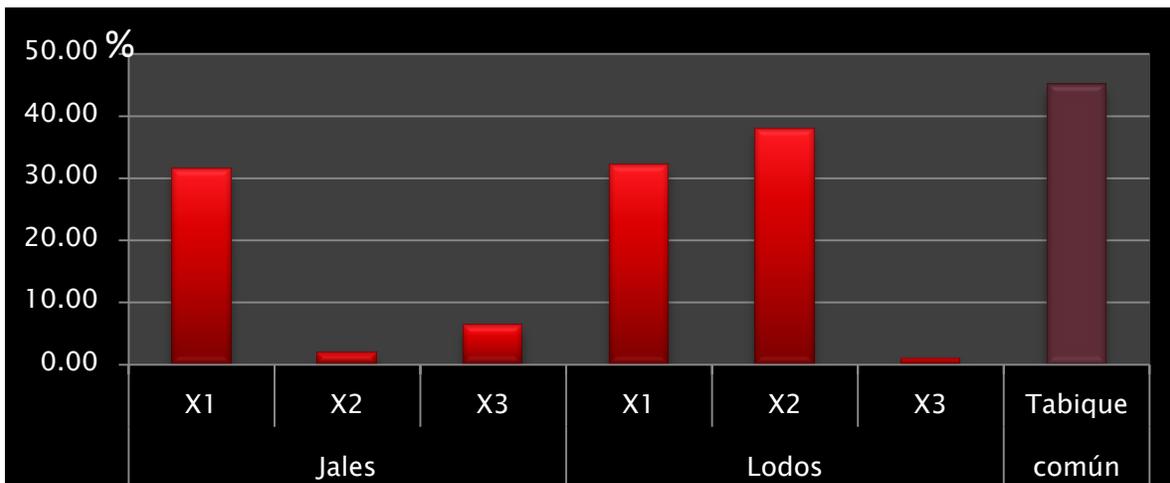
6.37 Erosión de los bloques.

En la figura 6.38 se aprecia una comparativa de los porcentajes de erosión en los bloques, así como los impactos producidos en cada uno por efecto de la erosión hídrica.



6.38 Comparativa de erosión.

Finalmente al transcurrir una simulación de 10 años con lluvia ácida se procedió a realizar pruebas de ensayo mecánico para conocer si la resistencia como se presumía, reduciría sustancialmente, ver figura 6.39.



6.39 Reducción de la resistencia producto de la lluvia ácida.

6.7 Análisis de costos.

Para esta etapa del proyecto se presenta a manera de ejemplo la experiencia de la que fueron parte tabiqueros zacatecanos con una idea similar, donde comenzaron en 2001 a elaborar tabiques mezclando fango con jales y posteriormente dándoles una cocción en horno, esto sin conocer las repercusiones que esto tenía en la salud, sin embargo la SEMARNAT decidió parar este proyecto debido a que no existían estudios que respaldaran esta actividad económica y de riesgo a la salud (Monreal, 2002), debido a ello se consideraron diferentes factores como el costo del salario mínimo, precio de agua, luz, etc. en zacatecas para poder contrastarlos con estos, ya que los datos que se tienen se obtuvieron de esta zona, para así, para poder evaluar si es rentable o no.

Cabe mencionar que estos datos son estimativos, debido al cambiante mercado, las condiciones políticas y que estos datos son de tabiques y este proyecto postula la elaboración de blocks (prefabricados), que podrían afectar que este proyecto se logre llevar a cabo.

Como primer paso se considera que el residuo es materia prima gratis y disponible, por lo que si se convence al generador de aportar una fracción de lo que a éste le cuesta el tratar sus residuos disminuirá el precio del tabique y será mucho más rentable.

Los costos indirectos que se proyectan son muy difíciles de calcular, ya que dependerá de la depreciación del equipo a utilizar, si se cuenta con un lugar donde se llevará a cabo dichas operaciones (predio), la difusión del producto, la disponibilidad y cercanía de los materiales, y de los equipos de apoyo con los que se cuente, por lo que se estimó para una aproximación un valor del 18% del valor de los costos indirectos para simular el precio a lo más real posible ya que es lo que en promedio en un análisis de precios unitarios este es el valor que se refleja.

Los impuestos se estimaron en un 20% ya que la recaudación fiscal es muy variada en cada zona y conforme el tiempo pasa, además se debe de considerar que durante los primeros 3 años de constitución de una empresa esta no paga impuestos por lo que si este valor esta por debajo, se puede amortizar con la finalidad de llegar a un precio cercano al obtenido.

El rendimiento de un tabiquero se consideró tomando en cuenta que según datos de 2 empresas de tabiqueros, está en promedio los 130 tabiques al día, sin equipo alguno. Y se tomó el salario mínimo del 2012 para la zona de Zacatecas, también se consideró que los obreros trabajarían en una jornada de 8h por 5 días a la semana.

El costo de la luz se estimó con el precio por kwh en la ciudad de zacatecas y un consumo de una resistencia de 100 W trabajando 6 h por 30 días.

El agua se estimó con el costo promedio para empresas y se tomó sólo para la elaboración de los bloques, el resto deberá de ser incluida en los costos indirectos.

Se estima una ganancia del 15% por unidad para que este sea rentable, sin embargo se puede incrementar según sea la decisión del empresario.

En primer lugar se obtuvieron las cantidades de material requeridas y el costo para cada bloque, ver tabla 6.10.

Tabla 6.10 Costo del material requerido.

Unidad	kg	kg	m ³	Día
Peso unitario	50	100	1	
Costos directos	cemento	zeolita	agua	mano de obra
Precio \$	110	100	0.5	56.7

Posteriormente, se obtuvo el costo en pesos por unidad utilizada de material, ver tabla 6.11.

Tabla 6.11 Costo directo del block.

	cantidad utilizada	\$ cemento	\$ zeolita	\$ agua	\$ mano de obra	\$ cuarto de curado	\$ luz	\$ Costo directo total
jales	x1	0.528	0.48	0.00009	0.4362	0.200	0.21	1.854
	x2	0.8184	0.36	0.00005	0.4362	0.200	0.21	2.025
	x3	0.792	0.36	0.00003	0.4362	0.200	0.21	1.998
lodos	x1	1.056	0.444	0.00008	0.4362	0.200	0.21	2.346
	x2	0.792	0.33	0.00004	0.4362	0.200	0.21	1.968
	x3	0.792	0.33	0.00003	0.4362	0.200	0.21	1.968

Finalmente se estimaron los costos indirectos y los se le sumaron tanto los impuestos como la ganancia esperada para obtener el costo final del bloque y el precio al público del tabique.

Tabla 6.12 Precio final del block.

		Jales			Lodos		
costos indirectos		x1	x2	x3	x1	x2	x3
% de los directos=	18%	0.3338	0.3644	0.3597	0.4223	0.3543	0.3543
% impuestos=	20%	0.4376	0.4778	0.4716	0.5537	0.4645	0.4645
costo total	NA	2.6256	2.8668	2.8294	3.3223	2.7870	2.7869
Ganancia	15%	0.3938	0.4300	0.4244	0.4983	0.4180	0.4180
Precio al público	\$	3.0195	3.2969	3.2538	3.8206	3.2050	3.2050

Capítulo 7

Análisis de resultados

7. Análisis de Resultados.

7.1 Elaboración de bloques.

Los bloques tienen un acabado estético agradable que le dará una mejor calidad al intentar comercializarlos, así como una facilidad para su elaboración.

La condición más importante que se debe tener en esta etapa es la saturación del residuo y el tiempo de contacto antes de ser solidificada, esto para que la lixiviación sea prácticamente nula, permitiendo formar estructuras más estables y más duraderas.

7.2 Resistencias mecánicas.

Según Trezza y Scian (2009), las resistencias obtenidas en su experimentación en promedio fueron de 350 kg/cm^2 con concentraciones altas de cemento por lo que los resultados obtenidos en esta experimentación confirman ser aptos para ser reusados en construcción, como elementos de mampostería.

Cabe mencionar que si se requiriera mayor resistencia como fue en ensayos previos, se pueden aumentar las concentraciones de cemento y jal para el caso particular de los bloques elaborados con jal, obteniendo resistencias de hasta 400 kg/cm^2 para elementos estructurales, (ASTM, 2009).

Freeman y Harris, (1995), mencionan que al usar la solidificación para el caso de lodos en forma de aceites o grasas se reducirán la resistencia, esto es comprobado en la presente experimentación donde las resistencias menores son de los bloques elaborados con lodos, contrastadas contra la de los bloques elaborados con jales.

7.3 Pruebas hídricas.

Según Romero et al (2007), en estos ensayos determinó que el pH es un factor decisivo en la lixiviación, por lo que con un pH de 10 la lixiviación no es esperable, por otro lado la cantidad de poros abiertos que el elemento posee es fundamental para conocer si es capaz o no de lixiviar.

Romero et al (2007), determinó que al agregar CaCO_3 en los elementos estructurales, el pH de salida de un sistema de análisis, se alcalinizara, como fue el caso de este pH en donde se obtuvieron condiciones básicas con la lluvia ácida, esto ayudará a disminuir la lixiviación durante su periodo de confinamiento a través de la inclusión de cemento Portland.

La determinación de la cantidad de agua que absorbe durante el proceso de saturación es fundamental, debido a que un elemento que propicia la lixiviación de metales o la dilatación del material, es contraproducente para reutilizarlo en la construcción.

Sin embargo, la cantidad de agua absorbida por el bloque es mínima, y se puede observar que en el caso de los lodos después de un tiempo la absorción aumenta, lo que indica que no todos los poros de la zeolita fueron saturados, lo que permitiría reducir la concentración de zeolita para volver más económico y por tanto eficiente este proceso.

En el caso de los lodos una consideración que se puede tomar para que la solubilización mejore, es aumentar la temperatura durante el reposo o agregar algún disolvente como el hexano para ayudar a separar las cadenas que mantienen unidas a los contaminantes a la matriz acuosa.

Las deformaciones no deben de ser muy grandes ya que el reglamento de construcción del DF sólo permite una deformación máxima de 2 cm en toda la estructura y en un elemento de mampostería no debe de pasar de 2 mm, por lo que en el caso de X2 se rebasó, descartando este elemento, por lo que el resto de los bloques cumple siendo viables para reutilizarlos.

7.4 Prueba PECT.

Fáber (2006), habla sobre mitigación ambiental por el uso de zeolita en diferentes procesos, sin embargo no hay resultados concluyentes de ello. Debido a ello al realizar un tratamiento con zeolita se puede ver su eficiencia de estabilización, donde alrededor del 99% de los contaminantes son retenidos por la zeolita, esto se sabe por la diferencia entre los metales contenidos en el residuo colocado menos los metales obtenidos tras su lavado, considerarlo viable como mitigador de residuos peligrosos, caso jales mineros y lodos aceitosos.

Esto evitará que los residuos salgan de la matriz sólida, impidiendo que las personas, o el medio ambiente se expongan, siendo un excelente material para ser reutilizado en la construcción y para ser comercializado en cualquier sitio.

7.5 Prueba de intemperismo.

Analizando los límites de detección del equipo de absorción atómica y considerando que el disco colocado solo contiene aproximadamente un 10% de cada metal, al contrastarlos, el único metal para el caso de los jales que puede quedar fuera de detección es el arsénico para el caso de los lodos todos los metales están por encima del límite de detección.

Debido a que este material estará mucho tiempo expuesto a los medios, se debe de comprobar que no genere lixiviados importantes al ambiente o a las personas para el caso del resto de metales.

Al principio de la experimentación el tratamiento con jales x2 al año 2 comenzó a experimentar fracturas de consideración, continuando con el tiempo, por lo que no se considera opción para un uso en exteriores.

Según Sandoval y Jáuregui (2002), la exposición a la lluvia ácida reducía la resistencia en un 43%, valores que son similares a los obtenidos que en promedio son de 40% en todos los bloques.

Estos valores cabe mencionar que se obtienen con las condiciones más desfavorables presentes en México y que hasta le fecha no se han presentado por más de 3 años seguidos, por lo que se puede inferir que si ha logrado mantenerse sin lixiviar por este periodo de tiempo, lo conseguirá para una vida útil de al menos 20 años, como se espera que duren en la vida media de los elementos constructivos, sin mantenimiento. Haciéndolo un material rentable y duradero para cualquier construcción o elemento estructural.

7.6 Erosión y decaimiento de la resistencia.

La resistencia según Fáber et al, (2006), tiende a disminuir hasta un 40% , siendo consistente con algunos de los bloques analizados, sin embargo el promedio de disminución de la resistencia fue menor al 17%, en este caso se puede deber a la característica propia del cemento de realizar micro floculaciones en la estructura del bloque. Adicionalmente a esto, la superficie libre expuesta presenta una resistencia alta a la abrasión mecánica, esto se logró observar durante el proceso de corte de lajas para la cámara de intemperismo esta propiedad se encuentra estrechamente relacionada con la erosión, debido a que los discos o lajas con mayor erosión presentaron una menor resistencia mecánica después de haber sido expuestos a la lluvia ácida.

La resistencia debida a la erosión de estos bloques puede ser principalmente a la matriz estructural que se forma con el residuo y la simbiosis que representa un elemento tan pequeño ocupando los espacios moleculares que la zeolita provee.

7.7 Análisis de costos.

Se encontró que los costos por usar este método en el ejemplo del punto 6.7 en una zona donde se intentó aplicar una tecnología similar son menores y es sustancialmente más

rentable, por un lado se incrementaría el trabajo, el desarrollo social y se obtendrían ganancias entre particulares, proponiendo una solución al problema de los jales mineros.

De la misma forma se podrá dar garantía laboral y social a los trabajadores que laboran en las tabiqueras.

Los costos en el ejemplo se comparan contra valores proporcionados por empresas tabiqueras que a la fecha aún los comercializan, después de revisar el precio de los insumos y servicios, se puede determinar que el precio al público final sería de alrededor de \$3.3 M.N esto equivale a menos de \$0.30 de dólar, en comparación con \$3.80 de tabique convencional sin ningún color o acabado, y si se deseara con un colorante el precio es de \$5.50MN (COINSA, 2012).

Con este ejemplo se presenta un panorama de los precios estimados en el mercado actual y la competencia que podría haber, aunque este material está siendo usado en algunas zonas, la población está un poco renuente en usarlos por los costos, sin embargo estos costos son muy competitivos y tienen adicionalmente un acabado que ayudaría a que los inversores se interesen más en la distribución para fachadas o acabados arquitectónicos.

CAPITULO 8

CONCLUSIONES

8. Conclusiones.

- 8.1** Se Propuso una metodología para la elaboración de los bloques buscando las mejores características para poder hacer el reúso de los jales y lodos, transformarlos en un material aprovechable y sustentable, encontrado que el curado dentro de los bloques les provee una característica estética adicional.
- 8.2** Se realizaron diversas pruebas de compresión mecánica, encontrando que los bloques creados en este proyecto tienen resistencias superiores en contraste con blocks o tabiques convencionales, estos últimos también se probaron en el laboratorio para conocer su resistencia mecánica en el mercado, obteniendo resistencias de 75 kg/cm^2 mismos que no cumplen con las especificaciones mínimas, por otro lado los blocks (prefabricados) de concreto resistieron 130 kg/cm^2 . Por lo que se concluye que los bloques creados son más resistentes que los blocks convencionales o tienen resistencias similares a los que estos reportan resistir.
- 8.3** Se realizaron pruebas hídricas para conocer la reacción del residuo con el agua así como del bloque, encontrando que el caso de los bloques fabricados con jales pueden retener una gran cantidad de agua, caso contrario de los bloques elaborados con lodos. Los bloques son de cierta manera impermeables, ya que un block convencional tiene una capacidad de absorción de agua de hasta un 35%, adicionalmente se registró el pH determinando que los carbonatos del cemento propician un medio básico para ayudar a evitar la lixiviación presente en los bloques misma que se comprueba en la cámara de intemperismo acelerado.
- 8.4** Se realizaron pruebas de lixiviación por NOM 053 SEMARNAT 1993, encontrando valores traza, los valores promedios más altos encontrados son de aluminio mismos que se le atribuyen a la zeolita, siendo éste un micronutriente no tóxico. La eficiencia promedio es de un 99.99% con niveles máximos de lixiviación de cadmio en todos los bloques de máximo $82 \mu\text{g/L}$, esto indica una alta fijación al cuerpo de la zeolita, por lo que se puede deducir que si el resto de metales no son detectables por el equipo, su lixiviación es tan baja que se puede considerar una eficiencia del tratamiento cercana al 100%.
- 8.5** Se realizaron pruebas de intemperismo acelerado con el fin de conocer lo que sucedería con el tiempo, en estas pruebas se encontraron concentraciones traza muy bajas como para ser detectadas en la simulación anual de la cámara, por lo que se tomó una muestra

compuesta para conocer lo que sucedió durante los 10 años de simulación en las peores condiciones, encontrando una eficiencia promedio en inmovilización para el caso de los bloques fabricados con jales se obtuvo una eficiencia del 99.99% , donde para el cadmio se obtuvo, 99.95% para el cromo 88.67%, para el plomo 82%, cabe mencionar que el resto de metales quedaron por debajo del límite de detección, lo cual permite inferir una eficiencia del orden de 100%.

Para el caso de los bloques elaborados con lodos, se encontró una eficiencia 99.99% de retención para el manganeso, un 95.63% para el plomo, 84.76% para el cromo, y menos del 1% para el cadmio el resto de todos los contaminantes también quedaron por debajo de los límites de detección por lo que de la misma manera que a los jales se les puede dar una eficiencia del 100%. Estos últimos valores son los promedios de retención de lixiviación por cada contaminante, analizando los valores de los bloques seleccionados se tiene que los jales con concentración X1, los valores de la concentración del cadmio y plomo no rebasan los 50 µg/L y el manganeso apenas llega a los 5µg/L. Siendo estos los que más lixivieron, pero en ningún momento rebasaron la norma.

Para el caso de los lodos, la concentración más alta fue de 30 µg/L para el Cromo y el más bajo 5 µg/L para el Manganeso, ninguno rebasa ni se acerca a la NOM 053 SEMARNAT 1993.

- 8.6** Se realizó un estudio de viabilidad económica, con ayuda de tabiqueros zacatecanos, encontrando que el precio de producción de un bloque convencional de jal es de \$3.8 M.N. por otro lado una empresa de venta de blocks convencionales los vende a un precio de producción de \$5.50M.N. lo que indica que este proyecto genera productos más económicos y rentables.
- 8.7** Se buscaron aplicaciones para los bloques finales acorde con su rendimiento del material utilizado, viabilidad tecnológica y económica, proponiendo al final, bloques tipo block elaborados con moldes de plástico para dar un acabado estético, estos no deberán ser desmoldados hasta terminar su curado para garantizar su acabado.
- 8.8** No se recomienda el reúso de los bloques elaborados con lodos debido a que no se logró determinar la naturaleza de los hongos encontrados, así como los compuestos orgánicos volátiles presentes en el residuo.

Referencias

- Acosta F.**, Salas P. (2006), "Zeolitas na-a4 como anfitrión de nano partículas de PBS", Revista Mexicana de Física, junio, año/vol. 52, número regular 3, Sociedad Mexicana de Física, A.C., Distrito Federal, México.
- Andrés A.**, Viguri, J., Irabien, A, Castro, F., (2001), "Cement-waste and clay-waste derived products from metal hydroxides wastes", Environmental characterization. Trans. IchemE, vol. 79, Part B, pp. 38-44.
- ASTM** C31, C39, C617, (2009), "CIP-35 Pruebas de resistencia la compresión de concretos", Libro anual ASTM, volumen 04.02.
- Altamira** (2010), "Reporte situación, pasivos ambientales en municipio de Altamira Tamaulipas", tercer informe del municipio de Altamira, Tamaulipas.
- Becerra R.** (2007), "Sujetos del Derecho Internacional", Derecho internacional público. Ed. 4ta, Mexico DF., suprema corte de justicia.
- Botasso H.G**, Rivera J, Fensel E.,(2006), "Experiencia en la utilización de residuos industriales en la obra vial", LEMaC (Centro de investigación Ambiental) – Áreas: Medio Ambiente y Obras Civiles, Estudios del Transporte, Universidad Tecnológica Nacional- Facultad Regional La Plata.
- CATC** (CLEAR AIR TECHNOLOGY CENTER), (1999). Fecha de Consulta: 16 de octubre de 2010, disponible en <http://www.epa.gov/ttn/catc>.
- COINSA**, S.A., 2012 comunicación directa, Ahome, Sinaloa, México, venta al por mayor de tabiques con jal.
- Conner**, J.R. y Hoffiener, S.L., (1998). "A Critical Review of Stabilization/Solidification Technology. Critical Reviews in Environmental", Science and Technology.
- Coz F. A.** (2001), "Comportamiento ambiental de lodos de fundición estabilizados/solidificados", tesis doctoral, Facultad de química, Universidad de Cantabria.
- CNPMS** (Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos), (2002), "El factor de eficacia cementante de puzolanas silíceas y silico-aluminosas muy reactivas", Artículo 591-600, Gandia.
- CNA** (2000), Comisión Nacional de Agua, Precipitación en la ciudad de México, <http://www.cna.gob.mx/SMN>.
- Cullinane M. J.**, Jones L.W., (1986) "Hand book for Stabilization /Solidification of Hazardous Wastes", USEPA Hazardous Waste Engineering Research Laboratory, Cincinnati Ohio.
- Duarte M.**,(2007), "Generación de Residuos peligrosos y de manejo especial" informe de desarrollo sustentable 2006", desempeño ambiental.

El universal (31 de enero 2008), Cultura, "Explotan bondades de las Zeolitas", Dr. Pedro Bosh Giral, sección E-16.

Estocolmo Convenio, (2001), "Por la prohibición de la docena sucia, no a los plaguicidas mas nocivos", documento de trabajo No. 5", disponible en: <http://chm.pops.int/default.aspx>.

Fáber D. J.C.T., Lodoño L., Álvarez M., (2006), "La zeolita en la mitigación ambiental", Revista Lasallista de Investigación, enero-junio, año/vol. 3, número 001, pp. 30-34, Corporación Universitaria Lasallista, Antioquia, Colombia.

Freeman H. M., Harris E., (1995), "Hazardous waste remediation. Innovative treatment technologies". Ed. Technomic. Lancaster.

González T. S., (1998), Tesis, "Procesos para la estabilización de residuos peligrosos industriales" Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM.

González S. Ma. R., (2006), Tesis "Generación de lixiviados ácidos de jales ricos en pirita", Facultad de Química, UNAM.

Hermann D. R. H. R., (2008), Tesis, "Los residuos peligrosos en México y el marco jurídico aplicable", Facultad de Derecho, UNAM, 2008.

Herrera F. S. D. (1999), "Suelos contaminados con residuos peligrosos y con metales pesados", Programa nacional de residuos peligrosos, SEMARNAT.

INERTEC (2009), "'planta de tratamientos por estabilización y solidificación de residuos peligrosos", Manifestación de impacto ambiental, presentada por: PROFIQ, S.A. DE C.V., con clave del proyecto: 24SL2005I0009

Kiang y Amir, (1982), "Enviromental Managent", volumen 6 numero 5.

Malone P.G. L; W. Walsh, (1982), "Guide to the disposal of chemically stabilized and solidified wastes" USEPA September.

Manzanares A. (2002), "Estudio del perfil elemental de Pb y mercurio en suelo, en sangre de niños menores de 5 años y embarazadas en Vetagrande Zacatecas", Universidad Autónoma de Zacatecas.

Menéndez M., (2007), Apuntes de Clase de Impacto Ambiental, Facultad de ingeniería, UNAM.

Méndez I., Moreno H. (2003). "Modelos estadísticos lineales en la investigación comparativa". Segunda edición. Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Mijaylova P (2011), comunicación directa, IMTA, UNAM, campus Morelos.

Monreal R., Ávila R. (2002), "Plan de acción de la presa la zacatecana para la contención de metales pesados municipio de Guadalupe, Zacatecas", gobierno del estado de Zacatecas.

Montgomery D. (1991). "Diseño y análisis de experimentos". Ed. Iberoamérica. México.

Moreno D., (2008), "Que son los jales", Centro Binacional es resolver los retos de salud humana y ambiental a lo largo de la frontera entre los Estados Unidos y México, Tucson, Arizona.

Núñez C. A., Situación en materia de residuos peligrosos en México, Asociación Mexicana para el Control de los Residuos, Vol. 4 No.2 Abril-Junio 2003.

OIT, Organización mundial del trabajo, (2007), "Los productos químicos en el trabajo", Colección de la salud y la seguridad en el trabajo, Ed. oficina Internacional del trabajo.

Oviedo, Universidad Nacional De Oviedo, Reacciones Puzolánicas 2010, Fecha de consulta: 14 de Octubre del 2010, disponible en: <http://www.etsimo.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion4.Reaccion.PUZOLANICA.pdf>.

Pollard S. J. T., Montgomery, D. M., Sollars, C. J., Perry, R., (1991), Organic compounds in the cement-based stabilisation/solidification of hazardous mixed wastes-Mechanistic and process considerations. Journal of Hazardous Materials, vol. 28, pp. 313-327.

Padilla, R. M. Y., (1989). "Determinación de los Niveles de Hidrocarburos en Sedimentos Recientes del Río Calzadas en la Región del Bajo Río Coatzacoalcos, Veracruz. México" . Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM.

Pojaesk R.B., (1979), "Toxic and hazardous westes disponsal" Ann Arbor Science Publisher Michigan.

PROFEPA (2002), "Principales sustancias involucradas en emergencias ambientales reportadas a la PROFEPA entre 1997 y 1999", Tecnologías para la remediación de sitios contaminados, INE, primera edición.

PROALSO (2008), "clasificación de la selección de elementos prefabricados y baldosas cerámicos", UNE-EN 14411, USA.

Ramírez B. (2008), "Sistemas de calidad en México, estabilización de residuos peligroso derivados de la medición de contaminantes como Dbo", vol. 1.

Rodríguez J. J. e Irabien A.(1999), "Los Residuos Peligrosos: caracterización, tratamiento y gestión", Editorial Síntesis, S.A. España.

Romero E. L., Vargas C. M. y Padilla B. F. (2007) "Desarrollo de la tecnología de inmovilización: estabilización/ solidificación de desechos peligrosos en costa rica. Estudio de caso en lodo de electrodeposición", Avances en química, año/vol. 2, num. 003 Universidad de los Andes Mérida, Venezuela pp. 9-14.

Ruiz B., (2004), "Efecto de la lluvia ácida en el material pétreo constituyente de los monumentos de la zona arqueológica del Tajin, Veracruz, México", tesis, UNAM

Sandoval L. y **Jauregui L.** (2002), "Tratamiento de residuos de arsénico provenientes del tratamiento del agua", IMTA, Juitepec, Morelos, México.

SEDESOL. (1993). Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente 1991-1992. Secretaría de Desarrollo Social. En Mejía, J., Carrizales, 1999. Un método para la evaluación de riesgos para la salud en zonas mineras. Salud Pública de México. Vol. 41, Suplemento 2, P. S132. México D.F. México

Stegemann J.(2008), "Reader in Environmental Engineering", Section Head, Civil & Environmental Engineering, Ontario.

SEMARNAP, (1996). "Los Suelos de Tabasco Restauración, Conservación y Uso", Gobierno Constitucional del Estado de Tabasco.

SEMARNAT, (2008), Reporte, "Generación de Residuos Peligrosos", Actualización del 01 de febrero.

Stegemann J., **Buenfeld N.**, (1999), "Neural network analysis for prediction of interactions in cement waste systems NNAPICS." Proceedings for the Waste Stabilization & Environment 99. Mehu, J., Keck, G., Navarro, A. Ed. Societé Alpine de Publications. Lyon. France, pp. 226-254

Suarez M. B., "Las arcillas sus propiedades y sus usos", Universidad Complutense (Madrid), fecha de consulta: 7 de septiembre 2010, disponible en: <http://www.uclm.es/users/higueras/yymm/arcillas.htm>.

Tallez R.W. y **H.R. Lubowits** (1984) "Review of fixation processes to manage hazardous wastes" USEPA y oficina de manejo de agua y residuos, Cincinnati Ohio.

Taylor, M. A., **Fuessle, R. W.**, (1994), "Effects of accelerators on stabilization of K061 hazardous waste", Hazardous Waste & Hazardous Materials Encyclopedic, vol. 11, nº 4, pp. 529- 539.

Trezza, M.; **SCIAN, A.**, 2009, "Estructura y Propiedades de Clinkers de Cemento Pórtland Obtenidos con Combustibles Residuales", Revista de la Construcción, vol. 8, núm. 1, pp. 4-12 Pontificia Universidad Católica de Chile Chile.

Trussell S., **Spence, R. D.**,(1994), "A review of solidification/stabilization interferences", Waste Management, vol. 14, nº6, 507-519.

USEPA, (1981), "Reporte de Gestión de Residuos Sólidos", Fecha de consulta: 5 Septiembre, disponible en: <http://www.epa.gov/espanol/consejos.htm>

Wiles R.W., (1989), "Toxic and hazardous wastes", Procedimientos de la 16^{ava} conferencia de residuos peligrosos del atlántico.

“El trabajo nos libera de tres grandes males: el aburrimiento, el vicio y la pobreza.”
Voltaire

La inteligencia no se mide por cuantas operaciones o cálculos puedo hacer, la inteligencia se mide por la creatividad y la imaginación de cada persona, lo demás solo es memoria.

“Tiempo al tiempo y solo el tiempo te dirá la verdad”
Mi Padre