

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY  
CAMPUS MONTERREY

DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA



INTEGRACIÓN DE UN RESIDUO PROVENIENTE DE LA PRODUCCIÓN DE  
CARBONATO DE ESTRONCIO EN LA FABRICACIÓN DE  
BLOQUES PARA CONSTRUCCIÓN

**TESIS**

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO  
ACADÉMICO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**SARYNNA LÓPEZ MEZA**

**MAYO DE 1999**

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY  
CAMPUS MONTERREY

DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA



INTEGRACIÓN DE UN RESIDUO PROVENIENTE DE LA PRODUCCIÓN DE  
CARBONATO DE ESTRONCIO EN LA FABRICACIÓN DE  
BLOQUES PARA CONSTRUCCIÓN

**TESIS**

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO  
ACADÉMICO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS**

ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA AMBIENTAL

**SARYNNA LÓPEZ MEZA**

MAYO DE 1999

# DEDICATORIA

*A Dios:*

*Por iluminar cada momento de mi existencia mediante el amor de mis seres queridos, y por permitirme lograr una meta más en mi vida.*

*A Luis:*

*Por brindarme tu amor y tu apoyo en mis momentos de flaqueza. El sacrificio valió la pena. Te Amo.*

*A mis padres:*

*Juan Francisco y Azucena, por ser unos padres maravillosos y darme su amor y su paciencia. Los quiero mucho.*

*A mis hermanos:*

*Tania, Claudia y Julián, por brindarme siempre su alegría y amor. Luchen siempre por sus sueños, no están solos.*

*A mis tíos:*

*Ludovico y Yolanda, por su cariño y apoyo a través de mis años de estudio. Gracias por ser unos segundos padres para mí.*

*A mis amigos:*

*Clau, Irina, Tere, Dalia, Daniel, Esteban, Vic, Idalia, Luisito, Mario y Johnny, por sus constantes muestras de amistad y hacer más ameno este tiempo.*

# AGRADECIMIENTOS

Al ITESM, Campus Monterrey, por darme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado. A mi comité de Tesis, Dr. Belzahet Treviño Arjona, Dr. Francisco Lozano García y Dr. Jorge Gómez Domínguez, por otorgarme sus valiosos consejos y su tiempo.

Al Departamento de Ing. Civil y de Ing. Química del ITESM, Campus Monterrey, por permitirme realizar mis experimentos en sus laboratorios.

Al Ing. Luis Enrique Fong de los Santos, por su apoyo, su consejo y sus constantes palabras de aliento en el desarrollo de esta tesis; finalmente terminé!

Al Ing. Daniel Torres Rangel, por su apoyo y compañía en los días de experimentación (y por la comida también!), y por darme sus consejos para la elaboración de la tesis. Al Ing. Víctor Hugo Ruíz Díaz, por las palabras de ánimo. Que terminen pronto su tesis!

A los Ingenieros Erick Santos Rodríguez, Carlos Webb Balderas, Javier García Pérez, Jerónimo Godínez y Juan Gerónimo Coronado, por haberme ayudado a transportar la bloquera y poder así comenzar a hacer mis pruebas.

Al Ing. Salvador Villarreal por ayudarme con la mezcla de los materiales y aguantar el cansancio una y otra vez.

Al Ing. Gustavo Adolfo Salinas Mejía, por ir a regar los bloques en mi ausencia, por su compañía en la realización del escrito de esta tesis, y por aguantar la música melosa que me gusta escuchar.

A la M.C. Ma. Gabriela Ortiz Martínez y la Ing. Carmen Rosario Martínez Izquierdo, por escucharme en mis días de desesperación, gracias niñas!.

A la Srita. Lourdes Jurado, por sus constantes llamadas para que todo estuviera en orden para iniciar mi experimentación

Y finalmente, a todas aquellas personas, a quienes no he nombrado en este momento, pero que contribuyeron de una u otra forma a que esta tesis pudiera ser terminada. Muchas gracias a todos ustedes.

# RESUMEN

La problemática en la generación de residuos sólidos se incrementa diariamente en México, se estima que el 89% del total de los residuos generados en México, lo aporta el sector industrial. Aunque en la actualidad se trata de enfocar los esfuerzos hacia la prevención en la generación de residuos, existen procesos industriales que son muy difíciles de cambiar, y que aún bajo modificaciones siguen generando residuos en forma considerable. En estos casos, es necesario buscar alternativas de reciclaje o integración de los residuos, con el fin de que se puedan obtener beneficios económicos y ambientales que favorezcan el desarrollo sustentable de nuestra sociedad.

La industria química es considerada como una de las bases de la economía nacional, por su gran participación en el mercado. La producción en esta rama, genera una gran cantidad de residuos, peligrosos y no peligrosos, para los que en muchas ocasiones, no se encuentra ninguna alternativa de prevención, llevándose directamente a sitios de confinamiento, representando esto un gasto para las empresas generadoras.

Durante el desarrollo del presente trabajo de investigación, se identificó un residuo particular en la producción de carbonato de estroncio, mismo que después de analizar física y químicamente sus propiedades, se consideró apto para ser integrado en la fabricación de bloques para construcción.

Para encontrar una integración factible del residuo en la producción de bloques, se dividió la experimentación en dos áreas: la integración mediante la sustitución de cemento y la integración mediante la sustitución de arena, ambos componentes básicos en la producción de bloques. En ambos experimentos, la integración se llevó a cabo en diversos porcentajes hasta encontrar los niveles que cumplieran con los requisitos especificados por las normas mexicanas correspondientes.

Las pruebas de calidad realizadas a los bloques fabricados fueron el peso de los bloques generados, la absorción de agua y la resistencia a la compresión de los mismos. Se encontró que los bloques en los que se sustituye cemento en un 15% y aquellos en los que se sustituye arena en un 25%, cumplen con la calidad requerida en las 3 pruebas especificadas.

La integración del residuo en ambos casos no requiere de ningún costo de inversión, y genera ahorros en la compra de materia prima de 22.4 centavos por bloque fabricado (1999), en el caso de ambas sustituciones, cemento y arena, lo cual representa un ahorro para las empresas bloqueras que fabrican miles de bloques diariamente.

# ÍNDICE.

## 1. INTRODUCCIÓN.

1.1.	Antecedentes. ....	1
1.2.	Hipótesis. ....	3
1.3.	Objetivo. ....	3
1.4.	Alcance. ....	3

## 2. MARCO TEÓRICO AMBIENTAL.

2.1.	Generalidades sobre residuos industriales. ....	5
2.2.	La estrategia para la minimización de residuos. ....	9

## 3. LA INDUSTRIA DE BLOQUES.

3.1.	Antecedentes. ....	17
3.2.	Generalidades sobre los bloques de concreto. ....	18
3.2.1.	Agregados. ....	20
3.2.2.	Mezclado. ....	21
3.2.3.	Fraguado y Curado. ....	22

3.2.4.	Estándares de calidad. ....	24
3.3.	Desarrollo de nuevas aplicaciones. ....	26
3.4.	Estudio de mercado. ....	26

#### **4. METODOLOGÍA.**

4.1.	Caracterización del residuo. ....	29
4.1.1.	Análisis químicos. ....	29
4.1.2.	Análisis físicos. ....	30
4.2.	Diseño del experimento para la integración del residuo en la fabricación de bloques .....	30
4.2.1.	Experimento de sustitución de cemento. ....	31
4.2.2.	Experimento de sustitución de arena. ....	31
4.3.	Pruebas de calidad en los bloques. ....	32
4.3.1.	Peso de los bloques. ....	32
4.3.2.	Absorción de agua. ....	32
4.3.3.	Resistencia a la compresión. ....	33
4.3.4.	Lixiviado. ....	33

#### **5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.**

5.1.	Caracterización del residuo. ....	35
------	-----------------------------------	----

5.1.1.	Análisis químicos. ....	35
5.1.2.	Análisis físicos. ....	37
5.2.	Experimentos de la integración del residuo en la producción de bloques. ....	40
5.2.1.	Experimento de sustitución de cemento. ....	41
5.2.2.	Experimento de sustitución de arena. ....	43
5.2.3.	Observaciones sobre mezclado y curado. ....	44
5.3.	Pruebas de calidad en los bloques. ....	47
5.3.1.	Peso de los bloques. ....	47
5.3.2.	Absorción de agua. ....	50
5.3.3.	Resistencia a la compresión. ....	53
5.3.4.	Lixiviado. ....	57
5.4.	Discusión de resultados. ....	60
5.4.1.	Caracterización del residuo. ....	60
5.4.2.	Experimento de integración del residuo en la producción de bloques. ....	60
5.4.3.	Pruebas de calidad en bloques. ....	60
5.5.	Factibilidad económica. ....	62

## **6. CONCLUSIONES.**

6.1.	Conclusiones generales. ....	65
6.1.1.	Conclusiones particulares. ....	65
6.2.	Recomendaciones. ....	66

## **BIBLIOGRAFÍA.**

<b>APÉNDICE A.</b>	Datos de los experimentos realizados.
<b>APÉNDICE B.</b>	Resultados de las pruebas de calidad.
<b>APÉNDICE C.</b>	Descripción de los análisis realizados al residuo.

# ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 2.1	Normas Ambientales Mexicanas en materia de residuos peligrosos.	6
Tabla 3.1	Relaciones cemento-agregado para bloques.	20
Tabla 3.2	Requisitos físicos para bloques de concreto.	25
Tabla 4.1	Diseño del experimento de sustitución de cemento.	31
Tabla 4.2	Diseño del experimento de sustitución de arena.	31
Tabla 5.1.	Componentes principales en el residuo.	35
Tabla 5.2	Elementos presentes en el residuo.	36
Tabla 5.3	Análisis granulométrico del residuo.	37
Tabla 5.4	Análisis granulométrico del agregado.	38
Tabla 5.5	Límites de consistencia del residuo.	39
Tabla 5.6	Composición básica de un bloque.	40
Tabla 5.7	Experimento de sustitución de cemento.	41
Tabla 5.8	Datos de las corridas realizadas para el experimento de sustitución de cemento.	42
Tabla 5.9	Experimento de sustitución de arena.	43
Tabla 5.10	Datos de las corridas realizadas para el experimento de sustitución de arena.	43
Tabla 5.11	Pesos de los bloques del experimento de sustitución de cemento.	48
Tabla 5.12	Pesos de los bloques del experimento de sustitución de arena.	49
Tabla 5.13	Densidad de los bloques del experimento de sustitución de arena.	50
Tabla 5.14	Resultados de la prueba de absorción de agua para el experimento de sustitución de cemento.	51

Tabla 5.15	Resultados de la prueba de absorción de agua para el experimento de sustitución de arena.	52
Tabla 5.16	Resultados de la prueba de resistencia a la compresión para el experimento de sustitución de cemento.	55
Tabla 5.17	Resultados de la prueba de resistencia a la compresión para el experimento de sustitución de arena.	56
Tabla 5.18	pH de las muestras resultantes del experimento de sustitución de cemento.	57
Tabla 5.19	pH de las muestras resultantes del experimento de sustitución de arena.	58
Tabla 5.20	Elementos encontrados en el análisis cualitativo.	58
Tabla 5.21	Concentraciones para las muestras del experimento de sustitución de cemento.	59
Tabla 5.22	Concentraciones para las muestras del experimento de sustitución de arena.	59
Tabla 5.23	Costo de componentes básicos.	62
Tabla 5.24	Composición básica de un bloque.	62
Tabla 5.25	Composición básica de un bloque con 15% de sustitución de cemento.	63
Tabla 5.26	Composición básica de un bloque con 25% de sustitución de arena.	63

# ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 2.1	Generación de residuos por giro industrial a nivel nacional.	8
Figura 2.2	Generación por tipo de residuo para el estado de Nuevo León.	8
Figura 2.3	Estrategia para la Minimización de Residuos.	9
Figura 3.1	Bloques de concreto.	18
Figura 3.2	Proporciones en peso de materiales.	19
Figura 3.3	Procedimiento a seguir para un mezclado correcto.	21
Figura 3.4	Procedimiento a seguir para un mezclado correcto según el tipo de agregado utilizado en la mezcla.	22
Figura 3.5	Comportamiento histórico del consumo de bloques en el Estado de Nuevo León (1973 –1994).	27
Figura 3.6	Participación en el consumo del mercado de bloques en el Estado de Nuevo León.	28
Figura 5.1	Análisis granulométrico del residuo.	38
Figura 5.2	Análisis granulométrico del agregado.	39
Figura 5.3	Equipo utilizado para fabricar los bloques.	41
Figura 5.4	Mezclado de materiales.	44
Figura 5.5	Alimentación de la mezcla en la bloquera.	45
Figura 5.6	Aspecto de los bloques húmedos antes de ser retirados de la bloquera.	45
Figura 5.7	Aspecto de los bloques fabricados.	46
Figura 5.8	Peso de los bloques.	47
Figura 5.9	Distribución de los pesos de los bloques para el experimento de sustitución de cemento.	48

Figura 5.10	Distribución de los pesos de los bloques para el experimento de sustitución de arena.	49
Figura 5.11	Aspecto de los bloques en la pila de agua.	50
Figura 5.12	Secado de los bloques.	51
Figura 5.13	Resultados de la prueba de absorción de agua para el experimento de sustitución de cemento.	52
Figura 5.14	Resultados de la prueba de absorción de agua para el experimento de sustitución de arena.	53
Figura 5.15	Máquina Universal.	54
Figura 5.16	Fractura de los bloques después de ser sometidos a la prueba de resistencia a la compresión.	54
Figura 5.17	Resultados para la prueba de resistencia a la compresión para el experimento de sustitución de cemento.	55
Figura 5.18	Resultados de la prueba de resistencia a la compresión para el experimento de sustitución de arena.	56

# 1. INTRODUCCIÓN.

Para tratar de mejorar el equilibrio ambiental entre las actividades antropogénicas y el medio ambiente, no basta cumplir con la normatividad establecida para tal motivo, sino que es necesario desarrollar tecnologías para el aprovechamiento de los residuos generados por los procesos industriales, ya que además de preservar el ambiente, las empresas se verán favorecidas con los beneficios que dicho aprovechamiento puede brindar, desde los económicos hasta aquellos que ayudan a cumplir con la responsabilidad civil.

## 1.1. ANTECEDENTES.

El sector industrial reviste una gran importancia para nuestro país; ha sido de manera importante el impulsor de la urbanización de México y ha favorecido el surgimiento de un sector de servicios que actualmente se presenta como uno de los principales elementos dinámicos para el desarrollo. Además, es también una de las bases de la economía nacional según su contribución al PIB y a su crecimiento [1].

La industria, en sus procesos, utiliza materias primas, energía, capital y fuerza humana para generar aquellos bienes demandados por la sociedad, y al mismo tiempo, sus procesos de producción arrojan al medio ambiente subproductos indeseables, mismos que generalmente no tienen mercados. Entre estos residuos se pueden encontrar las emisiones a la atmósfera, las descargas de aguas residuales, la contaminación de suelos, y la generación de residuos industriales.

De aquí que el impacto que esta industria causa mediante la generación de residuos es de gran importancia, pues en la actualidad se estima que en México son generadas 524,865 toneladas de residuos sólidos diariamente, siendo el 89% de estos residuos generado por el sector industrial. De las 464,500 toneladas que corresponden a este porcentaje, que en su mayoría proviene de aquellos residuos generados por la industria química, solamente el 4% es tratado o confinado de una manera apropiada, desconociéndose el destino final de las 445,920 toneladas restantes (Sedesol / INE, 1994).

En el pasado, el manejo de residuos se encontraba direccionado hacia las tecnologías de "fin de tubo", el diseño de plantas de tratamientos de residuos y la instalación de equipo para el control de la contaminación. Este manejo requería de altos costos de inversión y el incremento en los costos de operación en algunas empresas.

El uso de estas alternativas para la solución al problema de la generación de residuos provocaba en muchos casos, que los contaminantes simplemente fueran trasladados de un lugar a otro.

Está demostrado que el control de la contaminación no es la solución a los problemas ambientales, ya que no representa un beneficio económico para las empresas, y su impacto positivo ante el medio ambiente es limitado [22, 23, 24].

Actualmente se presenta una nueva filosofía, que se hace llamar “cero descargas”, en la cual se pretende minimizar y, en el mejor de los casos, eliminar los residuos generados. Es aquí donde entran los Programas de Minimización de Residuos Industriales, que básicamente son un conjunto de actividades enfocadas a reducir la generación de desechos en los procesos, buscando alternativas para la reducción, el reciclado, reuso, integración, conversión, tratamiento y/o confinamiento de los mismos. La disminución en la generación de residuos permite obtener beneficios económicos, ya que se tiene un mejor aprovechamiento de las materias primas y un ahorro en los costos de manejo, tratamiento y/o disposición de los residuos. Además, también se tienen otro tipo de beneficios, que bien podrían ser catalogados como imagen de la empresa ante las autoridades, la comunidad y la sociedad en general.

Desafortunadamente, no es posible descartar la tecnología de “fin de tubo” en muchos procesos existentes de la industria mexicana, pues los efectos negativos serían muy tangibles, ya que no se dispone en muchas de ellas del tiempo y el personal capacitado para estudiar los problemas a fondo y poder encontrar formas de eliminar el problema desde sus raíces, y así poder tener tecnologías más limpias operando en los procesos.

Esta investigación surge de la necesidad de encontrar una alternativa para la integración de un residuo proveniente de la producción de carbonato de estroncio. Como parte del proceso de producción de carbonato de estroncio se tiene una operación de filtrado, en donde mediante un filtro rotatorio por el que continuamente pasa la corriente principal, se genera un lodo o torta. Este residuo indeseable actualmente se va apilando en los patios del predio, puesto que se desconocen las posibilidades para su aprovechamiento. Después de un análisis CRETIB, se sabe que el residuo está catalogado como un residuo no peligroso y considerando que a la fecha se tienen acumulados cerca de 42,000 m<sup>3</sup> de residuo, resulta poco rentable la alternativa de mandar este material a un relleno sanitario, ya que representaría un alto costo para la empresa. Por esta razón, se optó por encontrar alternativas para su integración en algún ramo industrial.

Debido a las características físicas y químicas del residuo, una alternativa posible es la utilización del residuo en el área de materiales de construcción, siendo este el objetivo de lo que se pretende investigar en este proyecto.

## 1.2. HIPÓTESIS.

Es factible la integración del residuo dentro del proceso de elaboración de bloques para construcción, basando la investigación en las propiedades de los compuestos del lodo y las propiedades requeridas por los materiales utilizados en construcción.

## 1.3. OBJETIVO.

Utilizar el residuo generado como materia prima para la fabricación de bloques de concreto.

### Objetivos específicos.

- a) Identificar los compuestos existentes en el residuo y analizar sus ventajas y desventajas para ser considerados en la fabricación de materiales de construcción.
- b) Realizar pruebas para determinar una mezcla que brinde un material de construcción con las características y propiedades requeridas para su utilización.
- c) Proporcionar un diagrama conceptual del proceso para la elaboración del material de construcción.
- d) Evaluar la peligrosidad de los bloques elaborados.
- e) Evaluar el análisis costo-beneficio de la integración.

## 1.4 ALCANCE.

El alcance de este trabajo de investigación es el proponer un procedimiento para la utilización del residuo generado en la manufactura de bloques de concreto, evaluando dicha alternativa dentro de un marco de factibilidad técnica y económica.

## **Esta página no está disponible**

Este mensaje se intercala en los documentos digitales donde el documento original en papel no contenía esta página por algún error de edición del documento.

Al momento los creadores de este documento no han localizado esta página.

## **Preguntas frecuentes:**

---

### **¿Qué puedo hacer?**

Ten por seguro que hemos informado al creador original del documento y estamos intentando reemplazar esta página.

### **¿Quién convierte estos documentos a formato digital?**

Esta tarea se realiza por un grupo de personas que laboran en el proyecto de Biblioteca Digital. Nos esforzamos por convertir documentos originales a una versión digital fidedigna y comunicar a los creadores del documento original de estos problemas para solucionarlos. Puedes contactarnos visitando nuestra página principal en:



<http://biblioteca.itesm.mx>

## 2. MARCO TEÓRICO AMBIENTAL.

El tema de los residuos industriales, su minimización y control, es algo crecientemente importante a la luz de las necesidades de protección ambiental y competitividad. La industria utiliza materias primas para obtener productos finales con valores de mercado positivos, mediante procesos que básicamente separan, transforman y purifican los insumos. Durante los procesos industriales se presentan salidas intermedias en forma de subproductos indeseables, comúnmente llamados residuos.

### 2.1. GENERALIDADES SOBRE RESIDUOS INDUSTRIALES.

En etapas incipientes del proceso de industrialización, el volumen de generación de residuos es relativamente pequeño, y permite que éste sea asimilado dentro de las capacidades de carga de suelos, cuerpos de agua y drenajes urbanos. Sin embargo, al avanzar el proceso, el volumen desborda las capacidades biofísicas e institucionales de asimilación y manejo, transgrediendo ciertos umbrales críticos y provocando costos socio-ambientales excesivos. Por otro lado, la sustentabilidad en el crecimiento industrial demanda que se respeten las capacidades de carga de los sistemas atmosféricos, hidrológicos y de suelos para transformar y asimilar los residuos [3].

Es considerable el incremento en la generación de residuos, tanto en cantidad como en su grado de peligrosidad, con lo cual pueden tener efectos adversos en el ambiente. Aquellos residuos que después de un cierto análisis resultan ser peligrosos, son dispuestos de manera final en sitios controlados por el gobierno, mientras que aquellos que no resultan tener características de peligrosidad presentan destinos diferentes, desde un confinamiento en basureros industriales de residuos no peligrosos, hasta el aprovechamiento, dentro del cual entra la compra - venta de los mismos.

Para tomar una decisión respecto al tipo de manejo que se le debe de dar a un residuo, ya sea almacenamiento, transporte, colección, reuso, reciclaje o disposición final, se debe caracterizar el residuo según la norma NOM-052-ECOL-1993, para conocer su naturaleza y así, poder identificar si es o no perjudicial para la salud humana y saber su grado de afectación al ambiente.

La definición del concepto de residuo generalmente varía según el enfoque que se trate en particular, sin embargo, para efectos legales según la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), se considera como residuo a “cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, utilización, control o tratamiento, cuya calidad no permita utilizarlo nuevamente en el proceso”. Así también, la LGEEPA considera como residuo peligroso a aquellos residuos, en cualquier estado físico, que por sus características corrosivas, tóxicas, reactivas, explosivas, inflamables y biológico - infecciosas, representen un peligro para el medio ambiente. Las acciones que se tomen respecto al manejo de los residuos identificados como peligrosos deben de sujetarse al cumplimiento de las siguientes normas, cuyo objetivo también se menciona (Diario Oficial de la Federación, 22 de octubre de 1993).

Tabla 2.1. Normas Mexicanas en materia de residuos peligrosos.

Norma Oficial Mexicana	Objetivo
NOM-052-ECOL-1993	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.
NOM-053-ECOL-1993	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.
NOM-054-ECOL-1993	Establece el procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o más residuos considerados como peligrosos por la norma oficial mexicana NOM-052-ECOL-1993.
NOM-055-ECOL-1993	Establece los requisitos que deben reunir los sitios destinados al confinamiento controlado de residuos peligrosos, excepto los residuos radioactivos.
NOM-056-ECOL-1993	Establece los requisitos para el diseño y construcción de las obras complementarias de un confinamiento controlado de residuos peligrosos.
NOM-057-ECOL-1993	Establece los requisitos que deben de observarse en el diseño, construcción y operación de celdas de un confinamiento controlado de residuos peligrosos.
NOM-058-ECOL.-1993	Establece los requisitos para la operación de un confinamiento controlado de residuos peligrosos.

Además, es necesario cumplir ciertos requisitos ante la Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), como son los manifiestos y reportes de la generación de los residuos peligrosos y su manejo.

La clasificación de los residuos, al igual que su definición, depende del enfoque que cada autor le da según el área de trabajo. Una de las formas utilizadas para su clasificación es según su procedencia [1]:

- Residuos municipales: Son aquellos residuos alimenticios, basura y materiales no degradables, cenizas, residuos de combustión e incineración a nivel hogar, materiales de la demolición de construcciones y desechos sólidos y semi-sólidos de las plantas de tratamiento de aguas.
- Residuos industriales: Son todos aquellos residuos provenientes de las actividades industriales, donde se encuentran residuos combustibles y no combustibles, cenizas de combustiones a nivel industrial, materiales de construcción, y materiales específicos como resultado de productos no deseados en los procesos industriales, tales que pudieran o no ser peligrosos.

Las fuentes principales de generación de residuos industriales, ya sean peligrosos o no peligrosos, son las plantas industriales, plantas nucleares, hospitales, laboratorios de investigación, producción de agroquímicos, constructores, etc. Las causas de la generación de los residuos en estas áreas son muchas, pero entre las más importantes destacan:

- Reacciones químicas incompletas.
- Generación de subproductos no deseados.
- Limpieza de equipos.
- Fugas y derrames en equipos.
- Utilización de materiales obsoletos.
- Ineficiencia de los procesos productivos.

En la siguiente gráfica se puede observar el porcentaje de contribución de cada área de la Industria química en la producción de residuos industriales a nivel nacional, según una generación estimada (INE, 1997).

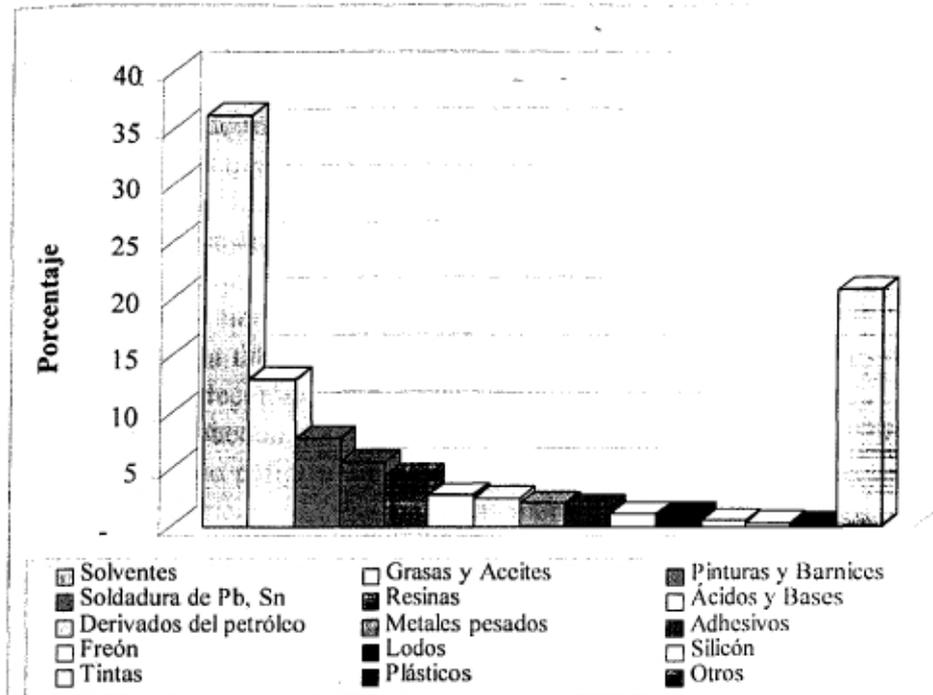


Figura 2.1. Generación de residuos por giro industrial a nivel nacional.

Como se muestra en la figura 2.1, la industria de la manufactura, que generalmente es donde se puede catalogar la industria química, es la que presenta una mayor cantidad de residuos generados. Estos residuos se pueden agrupar en los principales residuos que normalmente se generan. En la siguiente figura se muestran la generación en toneladas métricas para esta agrupación en el estado de Nuevo León (INE, 1997).

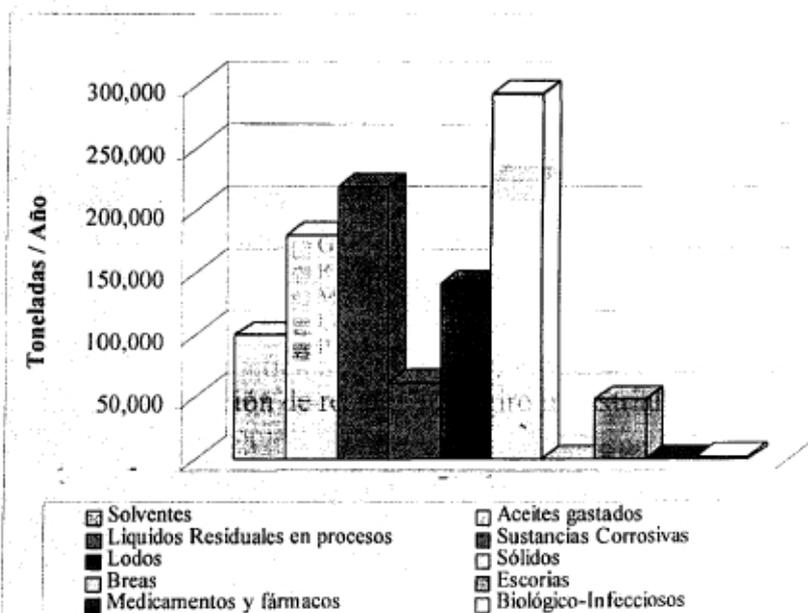


Figura 2.2. Generación por tipo de residuo para el estado de Nuevo León.

De las gráficas anteriores se concluye que las diversas áreas de la industria química hacen de esta una de las principales generadoras de residuos y a la vez, considerando su contribución al PIB (18 % de la industria manufacturera, que a su vez contribuye con un 28%) [1], uno de los componentes más importantes de la economía de nuestro país, por lo que resulta de suma importancia reducir la generación de los mismos o desarrollar nuevas tecnologías para su aprovechamiento, y de esta manera, disminuir el impacto que se está teniendo en la actualidad sobre el medio ambiente. Uno de los caminos para lograr esto, es la implantación y desarrollo de programas de minimización de residuos, mismos que implican una reducción de residuos, reciclamiento o integración.

## 2.2. LA ESTRATEGIA PARA LA MINIMIZACIÓN DE RESIDUOS.

Un programa de minimización de residuos implica un conjunto de actividades sistematizadas enfocadas a la reducción de residuos, que se basa en la búsqueda de alternativas para la prevención, reciclamiento o integración de los mismos, tal y como se especifica en las prioridades asignadas actualmente al manejo de residuos, como se muestra en la siguiente figura:

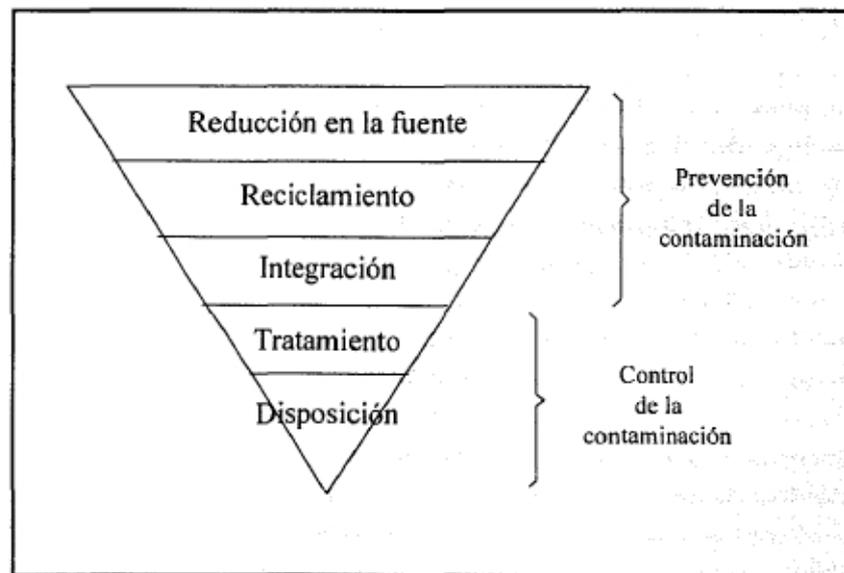


Figura 2.3. Estrategia para la Minimización de Residuos.

Como se puede observar en la figura anterior, la estrategia para el manejo de residuos se divide principalmente en dos áreas: prevención y control de la contaminación. En la prevención de la contaminación se encuentra la reducción del residuo desde las fuentes generadoras, el reciclamiento, y la integración. El control de la contaminación se refiere, por otra parte, únicamente al tratamiento de un residuo que ya ha sido generado, y finalmente, a su disposición. Estos componentes de la estrategia para el manejo de residuos se explican con más a detalle a continuación.

### Reducción en fuentes generadoras.

La reducción en las fuentes generadoras es la primera alternativa a considerar en las evaluaciones para una minimización de residuos, esta técnica implica la reducción o eliminación del residuo en aquella operación unitaria del proceso en donde es generado, quedando eliminadas, con esta acción, todas las técnicas de minimización posteriores, como lo son el reciclamiento, la integración, el tratamiento y la disposición final [5, 6].

Generalmente, cuando se trata de una industria que intenta exportar sus productos, el empleo de tecnologías más limpias, esto es, tecnologías que hacen factible la producción sin la generación de residuos, facilita su certificación futura por el sistema de normas ISO 14000, mismas que se consideran indispensables para los productos manufacturados de exportación fabricados en industrias potencialmente contaminantes.

La reducción en fuentes generadoras puede ser dividida en 2 tipos diferentes de acciones:

- 1) Diseño de procesos ecoeficientes.
- 2) Reingeniería de Procesos y Optimización de los mismos.

El primer punto, concerniente al diseño de procesos ecoeficientes, consiste así como su nombre lo indica, en el diseño de procesos con una generación de residuos mínima termodinámica y económicamente factible, tal que las normas ambientales se cumplan con un amplio margen. Esto implicaría la construcción, por ejemplo, de una nueva planta, con un proceso diferente, quizá con una tecnología diferente, y en general suele representar, si bien la opción más eficiente en la mayoría de los aspectos, la opción más costosa de implantar. Generalmente la ecoeficiencia de un proceso se mide comparando sus valores de ecoeficiencia en proceso y los valores ambientales.

La reingeniería de procesos puede estar conformada con los siguientes tres aspectos: cambios o sustitución de materias primas, cambios en el proceso productivo y prácticas de buena operación. Estos tres aspectos se explican a continuación con mayor detalle:

- Cambios o sustitución de materias primas.

Existen ciertos materiales considerados como peligrosos, y si estos se utilizan en la fabricación de un producto, entonces todos los residuos generados en esa producción serán considerados peligrosos también. Estos materiales peligrosos pueden ser reemplazados con materiales de menor peligrosidad o con materiales no peligrosos. Si el producto puede reformularse con la finalidad de que al fabricarse contenga una menor cantidad de materiales peligrosos, entonces la cantidad de residuos peligrosos que se generan en esa producción disminuiría en forma automática.

Además de la peligrosidad de los materiales, es muy importante considerar también la calidad de los mismos, ya que en ocasiones pueden estar contaminados con impurezas que en algún momento del proceso tienen que ser separadas del material, convirtiéndose también en residuos. Al cambiar un material con muchas impurezas por uno con menos impurezas puede llevar a la eliminación de operaciones innecesarias, como pudieran ser las operaciones de separación y purificación de la materia prima, lo cual produciría un ahorro en los costos de operación y mantenimiento de los equipos en los cuales se llevan a cabo dichas acciones. Cuando no se es posible encontrar materias primas de mejor calidad se considera recomendable cambiar completamente la materia prima utilizada, por una que tenga las propiedades requeridas, pero no contenga características peligrosas.

El cambio o sustitución de materia prima es una de las técnicas más difíciles de la estrategia de minimización de residuos, ya que en ocasiones requiere del planteamiento de una reformulación total de los productos, tarea que no es fácil y que requiere de estudios especializados por parte del personal de la empresa, así como un largo proceso de experimentación a nivel laboratorio y pruebas piloto antes de poder implantar estas reformulaciones a nivel proceso.

Sin embargo, esta alternativa puede traer no sólo grandes beneficios ambientales, sino también beneficios económicos, como pueden ser la disminución en costos de operación y aumento en la calidad de los productos manufacturados.

#### - Cambios en el proceso productivo.

En algunas ocasiones, el equipo de producción es el promotor de la generación de residuos, ya sea porque es obsoleto, porque no fue diseñado para trabajar bajo las condiciones de operación requeridas en proceso, o simplemente, por falta de mantenimiento. En este caso, la reducción en la generación de residuos puede lograrse instalando equipo adecuado para esa operación específica, equipo más eficiente, o bien, modificando el equipo ya existente, con la finalidad de lograr optimizar las técnicas de producción.

Los cambios o modificaciones al equipo de proceso pueden aumentar el rendimiento de la materia prima, generando una menor cantidad de residuos, y se puede decir que los sistemas que operan con una mayor eficiencia disminuyen el número de devoluciones de productos fuera de especificación o de mala calidad por parte de los clientes, por lo que se tendría también una menor cantidad de residuos, ya que suelen considerarse como tales aquellos productos rechazados por clientes.

La instalación de equipo nuevo o las modificaciones al equipo ya existente, requieren de costos de inversión, sin embargo, el capital invertido puede pagarse, ya que se lograría aumentar la productividad al disminuir el consumo de materia prima y reducir la cantidad de residuos generados.

- Prácticas de buena operación.

Es posible lograr una reducción significativa de los residuos mediante mejoras en los procedimientos de operación y mantenimiento. Generalmente este punto es pasado por alto, debido a que los procedimientos que normalmente se llevan a cabo en las empresas son procedimientos que se han seguido durante mucho tiempo, y resulta muy difícil cambiar la forma de trabajar del personal.

El hecho de establecer procedimientos de operación y mantenimiento más eficientes es una técnica de minimización de residuos muy simple y con un bajo costo. Todos los procesos productivos, sin importar el tiempo que llevan establecidos, son susceptibles de mejoras, con el fin de lograr que se lleven a cabo con una mayor eficiencia.

Muchas fuentes de generación de residuos son ignoradas argumentando que "esa es la forma en como se ha hecho siempre", lo cual muchas veces lleva a que el proceso tenga etapas innecesarias, las cuales al ser eliminadas reducen la cantidad de residuos generados.

Con referencia a este punto, en la empresa no es posible reducir el residuo en la fuente generadora, ya que el paso en donde se genera este residuo es parte del mismo proceso de fabricación del carbonato de estroncio. La única forma en que podría aplicarse este paso de la estrategia de minimización de residuos, sería la consideración de alguna tecnología con la cual también se pueda producir carbonato de estroncio, pero que el proceso para su aplicación sea distinto, de tal manera que no se genere este residuo. Esto podría lograrse quizá, si se utilizara como materia prima mineral con mayor cantidad de sulfato de estroncio.

### Reciclamiento.

El reciclamiento es otro enfoque aplicable a los residuos generados en algunas industrias. En esta etapa se encuentran el reuso o la recuperación de los residuos. Existen algunos residuos que debido a sus características pueden ser utilizados nuevamente en alguna de las etapas del proceso, eliminando así la necesidad de darles algún tratamiento o de disponer de ellos. Para poder reincorporar estos residuos, o alguna parte de ellos, se debe analizar a fondo el procedimiento a seguir mediante pruebas a nivel laboratorio y piloto [5, 7].

Para lograr el reuso de los residuos habrá que tener un cuidado especial en su manejo desde el momento en que son generados, evitando que se contaminen con otros materiales u otros residuos, ya que sus características se verían modificadas e impedirían su reutilización. Para poder mantener la factibilidad de reuso, se debe considerar y manejar a estos residuos como si fueran una materia prima.

Por otra parte, en ocasiones la composición del residuo no permite reincorporarlo nuevamente a proceso, y es entonces cuando el reciclaje se considera. Es importante analizar la opción de recuperar el residuo asignándole un tratamiento previo para modificar su composición o aumentar su pureza, según se requiera.

Gracias al reciclaje de ciertos materiales contenidos en los residuos, es posible absorber por lo menos una parte de los costos que estos residuos representan, a través de la valorización de los materiales reciclados, logrando con esto una ganancia adicional para la empresa generadora del residuo, a la vez que se reducen sus costos totales que ya consideran la protección ambiental.

Debido a las características con que cuenta el residuo una vez generado, actualmente se desconoce alguna forma para su reciclamiento a proceso sin un tratamiento previo. Después de unos experimentos realizados, se sabe que es posible recuperar el Sr, en forma de nitrato con una alta pureza (>95%). Probablemente también convendría hacer algún estudio para ver si es posible recuperar celestita (sulfato de estroncio) del residuo y así reciclarla a proceso en forma de materia prima.

### Integración.

Este concepto actualmente está comenzando a tener más importancia en el ámbito de la prevención de la contaminación. Conocido en inglés como “by product synergy”, esta alternativa promueve la utilización de los residuos de una industria, como materia prima para otra industria. La definición formal de este concepto es: “la integración entre diversas industrias, agricultura y comunidades, que resulte en una conversión ventajosa de residuos hacia recursos, y que promueva la sustentabilidad” [2].

En este proyecto de investigación se propone la integración del residuo proveniente del proceso de producción de carbonato de estroncio, en la industria de la construcción, y más específicamente, en la fabricación de bloques para construcción. Se considera posible además, su integración en algunas otras áreas de esta misma industria.

## Tratamiento.

Una vez agotadas las estrategias de prevención de la contaminación, esto es, reducción en la fuente generadora, reciclaje e integración, el tratamiento de los residuos se presenta como la siguiente opción viable. El tratamiento de residuos contempla todas aquellas tecnologías y equipos que sean útiles para reducir la toxicidad, volumen de los residuos y/o lograr un cambio de fase en el residuo con el fin de que aumente su manejabilidad. Este tipo de tratamientos se conocen como tratamientos de control de la contaminación o de "fin de tubo" (esto es, una vez que el residuo ha sido generado). Estos tratamientos pueden ser de diversos tipos, pero se pueden agrupar en tres categorías: tratamientos térmicos, fisicoquímicos y biológicos.

Los tratamientos térmicos más utilizados son los incineradores. Estos equipos representan la opción técnica más favorable dado que destruyen los componentes peligrosos de los residuos y reducen en gran medida su volumen, teniendo como residuo final únicamente las cenizas, sin embargo, el tratamiento presenta costos de operación muy elevados. Esta alternativa se debe considerar desde dos puntos de vista: el de enviar los residuos a incinerar a una empresa externa, o el adquirir un incinerador en conjunto con otras empresas de problemática semejante.

Una alternativa que está tomando importancia en el mercado nacional es la incineración en hornos de cemento. Las características de operación de estos equipos son: altas temperaturas, largos tiempos de residencia y alto grado de turbulencia de los gases, condiciones que permiten que estos equipos sean considerados como una muy buena opción para destruir a casi todos los tipos de residuos peligrosos.

Los tratamientos fisico-químicos reducen la peligrosidad de los residuos y los hacen más adecuados para su disposición en rellenos o drenajes municipales. Los costos son más bajos que el de los tratamientos térmicos y en ocasiones permiten recuperar los subproductos generados. Los tratamientos fisico-químicos se dividen en físicos y químicos. Los tratamientos químicos más comunes son: neutralizaciones ácido-base, absorción en carbón activado, reacciones reducción-oxidación e intercambio iónico. Los tratamientos físicos más comunes son los sedimentadores, que consisten de tres etapas básicas: precipitación, clarificación y filtración.

En el caso del residuo en particular, actualmente se puede decir que se maneja un tratamiento térmico para el residuo, que consiste en dejarlo secar al sol, con el fin de reducir su contenido de agua. También podría considerarse un tratamiento físico el filtro rotatorio del proceso, que reduce el volumen del residuo generado. Posiblemente después de algún tratamiento fisicoquímico, sería posible modificar las características propias del residuo, y tal vez recuperar algunos metales importantes, como es el caso del estroncio. No se descarta la posibilidad de que después de un tratamiento, pudiera ser de utilidad en la misma empresa o bien, en alguna otra empresa afín a los materiales.

## Disposición.

Finalmente, cuando después de haber considerado todas las alternativas anteriores aún queda una gran cantidad de residuos que no han podido ser eliminados, la solución viable más simple y frecuentemente más económica es la instrumentación de sitios en los cuales se pueden disponer los residuos.

La disposición de residuos no se considera como una minimización de los mismos, sin embargo, la estrategia de minimización de residuos garantiza que la cantidad de residuos a disponer sea la menor posible.

El tipo de disposición a dar a un residuo depende de la naturaleza del mismo. Para los residuos no peligrosos se encuentran los rellenos sanitarios, y para los residuos peligrosos, los confinamientos especializados en residuos peligrosos.

Actualmente, en México existen varios sitios para la disposición de residuos no peligrosos, el número exacto se desconoce debido a que existen algunos sitios registrados como rellenos sanitarios, y algunos otros, registrados y no registrados, conocidos como "tiraderos". Además debido a que el registro se lleva a cabo a nivel estatal, no se lleva un control de la existencia de este tipo de confinamientos.

El establecimiento de este tipo de lugares en general suele conllevar un complicado proceso de aceptación por parte de la sociedad. Sean peligrosos o no peligrosos los residuos a disponer en el sitio, la presión social puede ser muy fuerte. El problema radica en que las personas suelen estar mal informadas, y creen que la presencia de un sitio para la disposición de residuos, les traerá un gran riesgo a sus vidas. Como solución a este problema, algunas empresas dedicadas a la disposición de residuos tienen programas de Educación Ambiental, los que incluyen pláticas informativas del sitio en cuestión, o bien, visitas a los confinamientos, de tal manera que las personas puedan estar informadas correctamente.

Para el caso del residuo en estudio, la posibilidad de disponer el residuo no se considera económicamente factible, debido a la gran cantidad de este residuo que se tiene apilado en la empresa, y además, al costo que se tendría por el transporte del mismo hacia el confinamiento más cercano.



## 3. LA INDUSTRIA DE BLOQUES.

Una vez analizadas las alternativas con que se cuenta para el aprovechamiento del residuo, en este capítulo se analizarán las generalidades referentes a la Industria de bloques, área en la cual se pretende hacer la integración del residuo. Se mencionarán algunas características básicas a considerar para la fabricación de bloques, los materiales que se utilizan, así como los requisitos de calidad con los que deben cumplir. De forma adicional, se presenta un breve estudio de mercado en el que se muestra el crecimiento que ha experimentado esta industria a través de los últimos años.

### 3.1. ANTECEDENTES.

Desde tiempos remotos, cuando los cazadores de la Edad de Piedra viajaban de un lugar a otro en busca de comida, hubo la necesidad de construir guaridas que aparecen en los registros arqueológicos. Algunas excavaciones que se han realizado en Europa, mismas que datan de años anteriores a los 12,000 a.C., muestran anillos de piedras circulares que se cree eran parte de esos refugios. Probablemente eran los cimientos de alguna cabaña hecha con palos de madera o quizá soportaban paredes de tiendas hechas a base de pieles de animales.

La revolución agrícola, que data del 10,000 a.C. representó un gran avance para la industria de la construcción, debido principalmente a que las personas ya no tenían que moverse constantemente para sobrevivir, y se establecían en torno a los campos que sembraban. Así, las viviendas comenzaron a ser más permanentes. Los registros arqueológicos no son muchos, pero se sabe que en el medio Este se encuentran los restos de villas enteras con viviendas redondas cuyas paredes estaban construidas con arcilla; estas viviendas eran denominadas tholoi. En Europa, los tholoi eran construidos de piedra seca con techos en forma de domo, y se sabe que aún existen ese tipo de viviendas en algunos lugares de los Alpes [11].

El tholoi marcó una etapa importante en la búsqueda de la durabilidad de las viviendas; fue el principio de la construcción de albañilería.

### 3.2. GENERALIDADES SOBRE LA INDUSTRIA DE BLOQUES.

El bloque de concreto es una unidad de mampostería, generalmente con uno o varios huecos, aunque también se encuentra en forma sólida, fabricado con los siguientes ingredientes: agua, cemento portland, cementos mezclados y diversos tipos de agregado, tales como arena, grava, piedra triturada, escoria enfriada al aire, cenizas de carbón mineral, lutita o arcilla expandidas, escoria expandida, cenizas volcánicas (puzolana), piedra pómez, diferentes tipos de cuentas de plástico y escorias (generalmente desechos obtenidos en la reducción de los minerales y de la fundición de metales) [8].

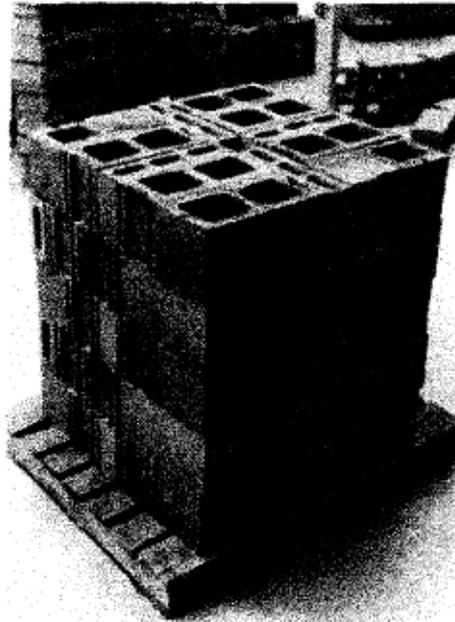


Figura 3.1. Bloques de concreto

La denominación “bloque de concreto” anteriormente se limitaba a las unidades huecas de mampostería, hechas con agregados del tipo de arena, grava y piedra triturada, pero actualmente incluye a todos los tipos de bloques de concreto, inclusive a las unidades sólidas, fabricados con cualquiera de las distintas clases de agregados mencionados previamente. Abarca las unidades con superficie vidriada aplicada, diversos diseños con agujeros pasados en distintas formas, tipos acústicos perforados, y una gran variedad de texturas superficiales.

Su dimensión más común es de 8 x 8 x 16 pulgadas (20.32 x 20.32 x 40.68 cm) y debe satisfacer requisitos específicos que incluyen color, tamaño, tipo, peso, contenido de humedad, resistencia a la compresión y algunas otras características especiales, mismas que se explicarán a detalle más adelante.

Existen tres tipos de bloques de concreto:

Existen tres tipos de bloques de concreto:

- Los huecos, aptos para soportar carga
- Los huecos, no aptos para soportar carga
- Los sólidos, aptos para soportar carga

Los tipos de bloques aptos para soportar carga se obtienen en dos grados o calidades: grado N para uso general, como muros exteriores arriba o abajo del terreno, que pueden o no estar expuestos a la penetración de humedad o a la intemperie, y para muros de respaldo e interiores; grado S, para muros exteriores situados arriba del terreno, con recubrimiento protector contra la intemperie, y para muros interiores. Estos grados a su vez se subdividen en dos tipos: unidades del Tipo I de humedad controlada, N-I y S-I, y unidades del Tipo II de humedad no controlada, N-II y S-II [9].

En general, los principales materiales que se requieren para elaborar los bloques de concreto son los siguientes:

- Agregados (grava, arena, granito, etc.).
- Cemento Portland.
- Agua.
- Aditivos (opcional).

Las proporciones indicadas de cada componente, se muestran en la Figura 3.2. [10]. El ingrediente más importante de los tres es el agregado, debido principalmente a la alta proporción en que se presenta en la mezcla, y a que es el elemento que provee a los bloques de sus principales características físicas, como lo son la apariencia, la densidad, la absorción de agua y la resistencia a la compresión, entre otras. Además, a medida que se tengan mejores agregados, se requerirá un menor consumo de cemento para producir bloques de alguna resistencia definida.

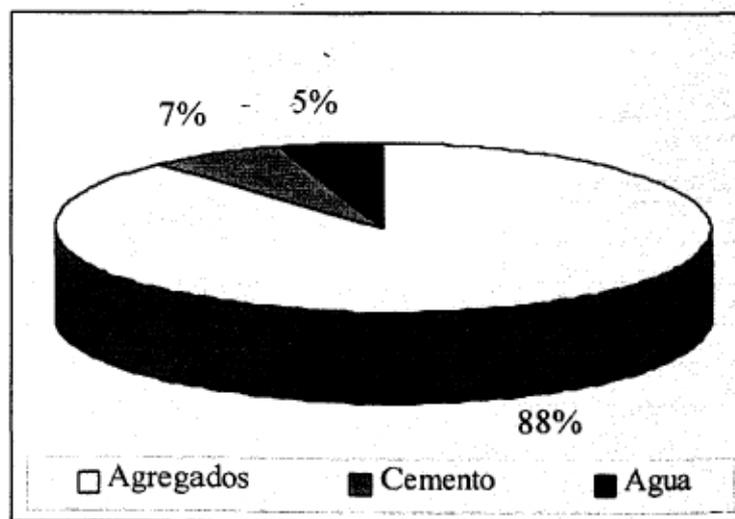


Figura 3.2. Proporciones en peso de materiales

### 3.2.1. Agregados.

Debido a la extensa gama de tipos de agregados que se utilizan para los bloques de concreto, es muy importante conocer las características básicas de estos. Un agregado es todo material inerte, que al combinarse con agua y cemento produce los materiales para construcción conocidos como mortero o concreto.

Los agregados, según su tamaño, se clasifican de la siguiente forma:

- Agregado fino (Arena): Partículas hasta de 5 mm de tamaño.
- Agregado grueso (Grava): Partículas de más de 5 mm de tamaño.

También, según su peso, se clasifican de la siguiente manera:

- Agregado ligero: Densidad menor de 1.12 g/cm<sup>3</sup>.
- Agregado normal: Densidad de 1.12 a 3.0 g/cm<sup>3</sup>.
- Agregado pesado: Densidad mayor a 3.0 g/cm<sup>3</sup>.

Es muy importante la limpieza de los agregados, definiéndose ésta como la ausencia de materiales tales como la materia orgánica, el limo o la arcilla, ya que al estar adheridos a la superficie del agregado, disminuyen la capacidad de adherencia de éste con el cemento.

La granulometría del agregado es una de las características más importantes, ya que esto permitirá producir bloques de buena calidad y optimizar los costos de producción.

Existen valores encontrados por W. Grant [10], para proponer relaciones cemento - agregado (en peso), lo cual es básico para el diseño de las mezclas. Algunas de estas relaciones se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.1. Relaciones cemento-agregado para bloques.

Tipo de Agregado	Uso Común	Uso Especial:	
De peso normal:			
Arena y grava natural:	1:9 - 1:12	1:5 - 1:6	Pavimentos
Caliza	1:9 - 1:12	1:7 - 1:8	Split block
Granito	1:9 - 1:12		
Agregado ligero:			
Escoria	1:6 - 1:8	1:5 - 1:7	Split block
Pumicita	1:4 - 1:6	1:5 - 1:7	Split block

### 3.2.2. Mezclado.

El procedimiento de mezclado afecta en gran medida la calidad y la homogeneidad de las características de los bloques, por lo que es necesario tomar en cuenta lo siguiente:

- Dosificar los materiales siempre en cantidades exactas e iguales.
- No permitir que exista una segregación de partículas en la mezcla.
- Lograr que los agregados alcancen su absorción inicial de agua.
- Uniformizar los tiempos parciales y totales de mezclado.
- Añadir el agua en forma distribuida durante el mezclado.

Los pasos a seguir para lograr un mezclado que produzca bloques con las características deseadas se muestran en la Figura 3.2. Además, en la Figura 3.3, se muestran los pasos a seguir en el mezclado, según el tipo de agregados a utilizar, ya que el procedimiento para el mezclado es diferente si se trata de materiales ligeros o materiales comunes.

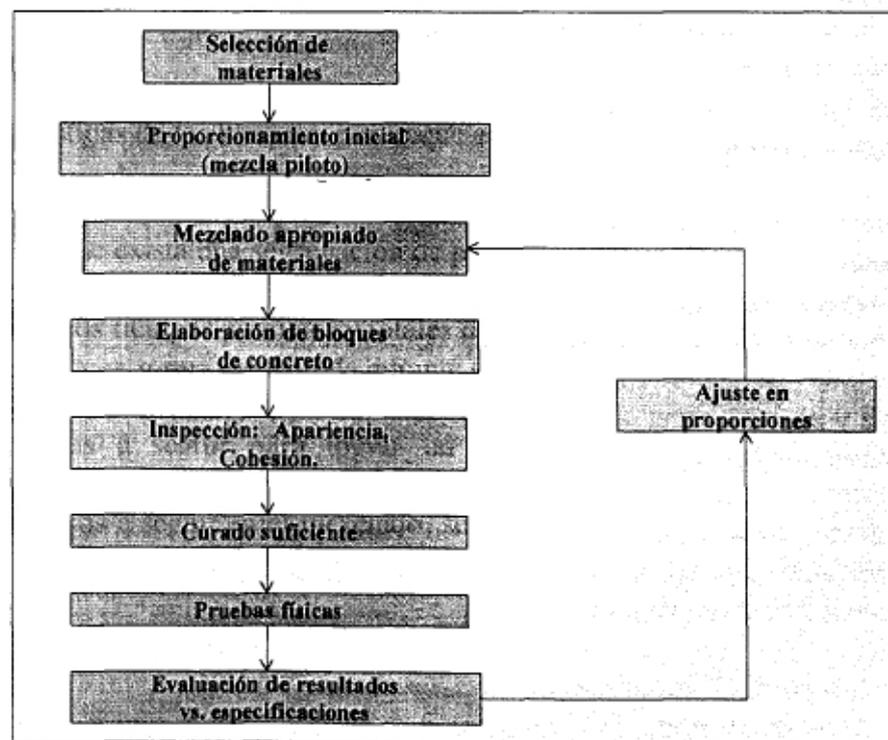


Figura 3.3. Procedimiento a seguir para un mezclado correcto.

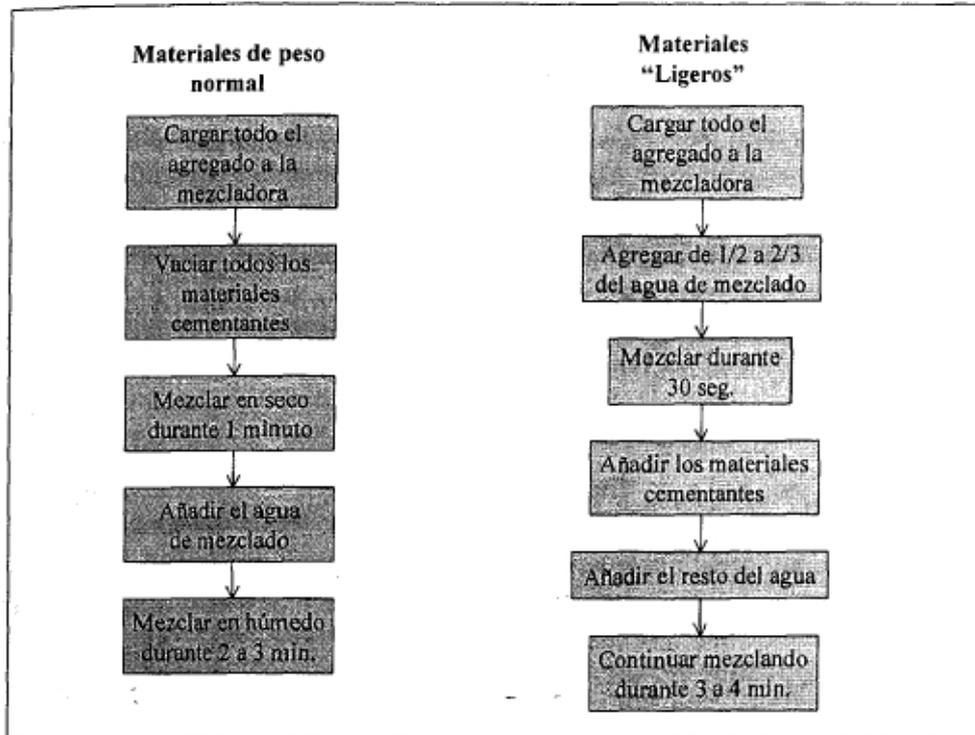


Figura 3.4. Procedimiento a seguir para un mezclado correcto según el tipo de Agregado utilizado en la mezcla.

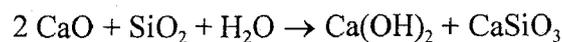
### 3.2.3. Fraguado y Curado.

#### Fraguado.

Para comprender mejor el concepto de fraguado, se explicará a detalle el comportamiento del cemento al momento de adicionarle agua. Esto se considera importante ya que éste es el material que proporciona la ayuda necesaria para que el material frague y se endurezca; en el caso del cemento, esto se debe a la cantidad de sílice con que cuenta en su estructura.

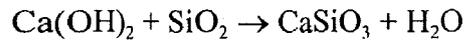
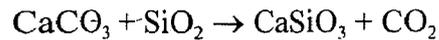
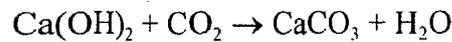
El cemento puede ser definido como un material calcáreo, finamente pulverizado, que al ser mezclado con agua forma una pasta plástica que fragua y con el tiempo finalmente se endurece hasta llegar a tener una consistencia semejante a la de una roca.

El proceso de solidificación es ocasionado por la formación de una matriz rígida de los productos de hidratación, que paulatinamente va sustituyendo el agua existente entre las partículas de cemento, hasta ligar finalmente toda la masa [25, 26].



El hidróxido de calcio,  $\text{Ca(OH)}_2$  es un compuesto conocido también como cal apagada; es un cuerpo sólido, blanco, amorfo, pulverulento, algo soluble en agua (1.23 g/L @ 20°C) a la que le da un color blanco, solución conocida como “lechada”, y en mayor cantidad, forma una pasta fluida y untuosa, llamada cal apagada.

La cal apagada en pasta tiene la propiedad de endurecerse lentamente en el aire, entrelazando los cuerpos sólidos, por lo cual se emplea como aglomerante. Este endurecimiento recibe el nombre de fraguado, y es debido primeramente a una desecación por evaporación del agua con la que se formó la pasta, y después, a una carbonatación por absorción del anhídrido carbónico del aire.



Los silicatos son los que le proporcionan al cemento la capacidad de endurecerse mediante la reacción con agua, siendo esta propiedad llamada “característica hidráulica” [25]. La solidez en el período de endurecimiento está asociada con un cambio en la microestructura del cemento.

Los recubrimientos iniciales del agua en cada grano de cemento forman un cierto tipo de gel, que va desarrollando finas protuberancias superficiales, mismas que crecen hasta formar una especie de fibras delgadas muy comprimidas, que surgen de cada grano de cemento. Este desarrollo de fibras no es más que el gel de silicato hidratado de calcio, que es el producto de la reacción entre los silicatos presentes en el cemento y el agua asociada.

Paralelamente, el hidróxido de calcio precipita como un residuo y forma grandes cristales angulares que son muy prominentes en la microestructura. Conforme se produce la hidratación, las fibras del gel penetran poco a poco en la región de los granos de cemento adyacentes, formando así una malla entretrejida que se solidifica, resultando así una matriz rígida que une toda la masa compuesta, formada de granos residuales de cemento sin reaccionar y algunos agregados.

### Curado.

Casi todos los silicatos de calcio son insolubles en agua [26]. Para obtener silicatos cálcicos cristalinos se necesitan ciertas condiciones hidrotermales para que se lleve a cabo la reacción en presencia de agua (100°C, 1 atm).

El curado es la operación por medio de la cual se facilita y se promueve la reacción de fraguado del cemento con el agua y los agregados. Esto se logra manteniendo el concreto bajo una humedad y temperatura definidas. Los procedimientos de curado más comunes son los siguientes:

- Riego a la intemperie.

Este sistema consiste en dejar secar a la intemperie el bloque, regándolo periódicamente hasta que se logre el fraguado. Las ventajas de este sistema son el bajo costo de inversión y mantenimiento y su fácil aplicación. Las desventajas son la inconsistencia del curado y los problemas causados por los efectos climáticos.

- Aspersión confinada.

Este método, conocido también como “Agua a temperatura ambiente”, consiste en dejar secar los bloques en algún sitio cerrado, utilizando la aspersión como el método de riego para lograr el fraguado de los bloques. Al hacer esto, se tiene como ventaja una mayor consistencia en la humedad y la temperatura del curado, a la vez que se tiene un menor tiempo para la maniobra de las piezas, ya que éstas se colocan en anaqueles. Las desventajas son la inversión de la instalación y el equipo alterno, tal como estanterías, montacargas, etc.

- Curado “a vapor”.

En el curado a vapor, los bloques se meten en una cámara de concreto en la cual se tienen aspersores que suministran al bloque la humedad necesaria para su fraguado. Las ventajas de este sistema son una rapidez de curado y maniobra superior a los dos métodos anteriores, además de que se puede tener un mayor control sin importar los efectos del medio ambiente. Las desventajas son los mayores costos de inversión inicial y de mantenimiento, además de que se requiere de una caldera para tener un flujo de vapor constante.

#### 3.2.4. Estándares de calidad.

Los principales estándares que se deben considerar en la producción de bloques son los siguientes:

- ANSI A108: Superficie de instalación.
- ASTM C373: Absorción de agua.
- ASTM C648: Rompimiento.
- ASTM C650: Resistencia al ácido.
- ASTM C503; 568, 615, 616, 629: Baldosa de piedra.

Los estándares de fuerza, dureza y resistencia están regidos por los siguientes estándares ASTM:

- ASTM C97: Absorción de agua / Peso específico.
- ASTM C99: Ruptura.
- ASTM C170: Compresión.
- ASTM C241: Abrasión.
- ASTM C531: Expansión.
- ASTM C648: Rompimiento.

Estos estándares son muy importantes ya que las características en las cuales se basa la calidad de un bloque son las siguientes:

- Resistencia a la compresión.
- Absorción de agua.
- Variaciones de peso.
- Variaciones dimensionales.

La cantidad mínima de muestra para evaluar los bloques es de 5 piezas, de acuerdo con la NOM-C-10, aunque la ASTM C-90-85, especifica utilizar 3 piezas como cantidad mínima de muestra. En México, los aspectos de calidad se rigen de acuerdo a la NOM-C-10 "Bloques, tabiques y tabicones de concreto. Especificaciones". Los requisitos físicos para los bloques de concreto se muestran en la Tabla 3.2:

Tabla 3.2. Requisitos físicos para bloques de concreto [8].

Tipo de bloque	Grado	Resistencia a la compresión. Mínimo de área bruta media		Absorción mínima de agua kg / m <sup>3</sup> Promedio de 3 unidades con peso del concreto secado en horno en kg / m <sup>3</sup>			
				Ligero		De peso medio	De peso normal
				Promedio de 3 unidades kg / m <sup>2</sup>	Unidad individual kg / m <sup>2</sup>	Menos de 1367.7 kg / m <sup>3</sup>	Menos de 1682.1 kg / m <sup>3</sup>
Hueco, apto para soportar carga	N - I N - II	703,070	562,450	320.4	168.2	240.3	208.2
	S - I S - II	492,148	421,840				
Hueco, no apto para soportar carga	I II	246,070	210,920	320.4	168.2	240.3	208.2
Sólido, apto para soportar carga	N - I N - II	1'265,520	1'054,600	320.4	168.2	240.3	208.2
	S - I S - II	843,680	- 703,070				

### 3.3. DESARROLLO DE NUEVAS APLICACIONES.

Actualmente se llevan a cabo distintos tipos de investigaciones, en las cuales se pretende integrar diferentes residuos provenientes de diversas industrias, en la producción de bloques [16, 21]. La mayoría de estas pruebas se han realizado con cenizas [14, 18], producto de la incineración de residuos generados por varias ramas de la industria. Sin embargo, también se encontró que el residuo proveniente de la industria de plásticos ha sido integrado exitosamente [15], así como el residuo generado por la industria papelera [19, 20]

Con base en estos antecedentes, es que se propone la integración del residuo en esta área, ya que se cree que puede tener características tales que puedan hacerlo suplir al cemento y/o la arena que conforman normalmente los bloques que se fabrican en la actualidad, con la ventaja de que sería un producto "ecológico" desde el punto de vista ambiental, ya que al utilizarlo se estaría poniendo en práctica la integración de residuos en el área industrial, previniendo así el confinamiento del residuo en cuestión.

### 3.4. ESTUDIO DE MERCADO.

Dentro de territorio nacional, la fabricación de cemento, cal, yeso y otros productos a base de minerales no metálicos está concentrada en los estados de Puebla, Jalisco, Estado de México, Nuevo León, Veracruz y Campeche. Además, los yacimientos de arcilla más importantes se encuentran en Nuevo León, Chihuahua, Coahuila, Guanajuato, Puebla, Estado de México y Durango, por lo que las principales empresas productoras y exportadoras de materiales relacionados se encuentran ubicadas en estas zonas.

Se realizó un análisis de los datos históricos del consumo de bloques en el estado de Nuevo León, de 1973 a 1994. El volumen de mercado reportado para 1994 fue el resultado de la investigación realizada en diferentes fuentes privadas y oficiales del estado (INEGI, ADIVAC; 1994).

En la Figura 3.4 se puede observar que el consumo de bloques en el estado de Nuevo León ha ido aumentando considerablemente a través de los años. Este comportamiento indica que existe una tendencia hacia la alza en el consumo de este material, debida principalmente al crecimiento de la población. Además, durante el período de 1988 a 1992 existe un marcado incremento en su consumo, debido al abatimiento inflacionario y a la estabilidad económica en dicho período.

La producción de bloques prefabricados a base de concreto a nivel nacional mostró una sensible baja en 1995 en relación al año anterior, 39.5% en términos de volumen y 30.7% en valor. Para 1996, tanto el valor como el volumen se recuperaron, como reflejo de una mejora de la situación económica del país, y así, la variación anual acumulada del volumen de producción fue de 11.59% y la del valor en 40.1%.

Con base en estos datos, las perspectivas indicaban una recuperación de la demanda de este producto, pero no se esperaba que la expansión fuera muy rápida, teniendo para 1997 un aumento en el volumen de producción del 22.63%.

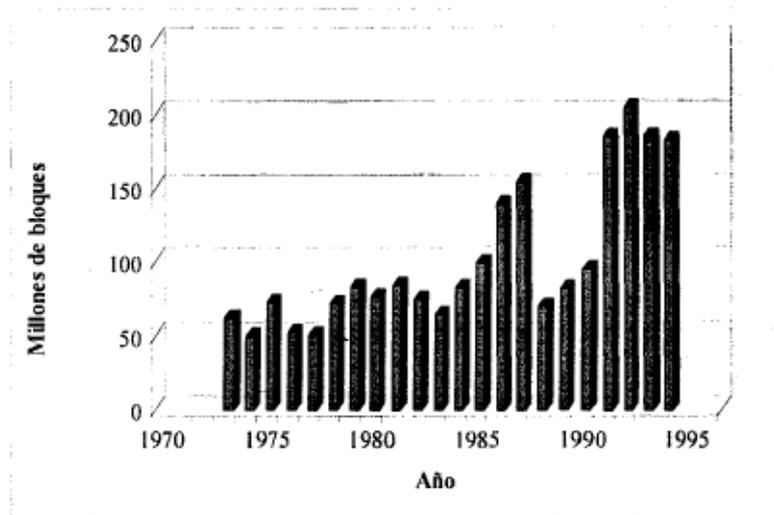


Figura 3.5. Comportamiento histórico del consumo de bloques en el Estado de Nuevo León (1973 – 1994).

La industria de la construcción tuvo una producción total bruta de 760 millones de pesos para 1990, resultando 500 millones de pesos de insumos totales, lo que deja un margen de 260 millones de pesos concerniente a la operación total. Por otra parte, el volumen total de mercado de bloques para 1997 fue de 164.32 millones de bloques, y hasta mayo de 1998, este valor era de 68.88 millones de bloques producidos.

Estos fueron principalmente construidos por constructoras particulares afiliadas a ADIVAC (Asociación de Desarrolladores Inmobiliarios y de Vivienda, A. C.) más 91 fabricantes afiliados a la CAINTRA.

El mercado de consumo de bloques se encuentra repartido principalmente en 3 áreas:

- Organismos del Gobierno del Estado, INFONAVIT, FOVISSSTE.
- Constructoras de la iniciativa privada.
- Otros, donde figuran casas habitación construidas por particulares no afiliados a ADIVAC.

La participación de estos sectores se puede apreciar de forma gráfica en la siguiente figura:

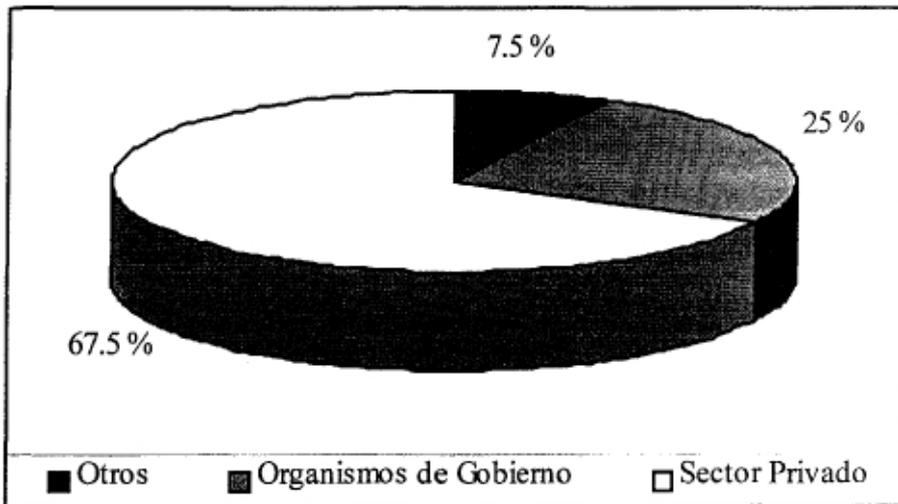


Figura 3.6. Participación en el consumo del mercado de bloques en el Estado de Nuevo León.

Como puede observarse en la figura anterior, el área principal en donde se consumen bloques, es la que corresponde al sector privado, por lo que sería conveniente, en caso de que la alternativa propuesta sea factible técnica y económicamente, que ésta sea presentada a las principales constructoras de este sector, con el fin de ir definiendo un mercado para el producto.

## 4. METODOLOGÍA.

Una vez analizada la industria de producción de bloques, en este capítulo se procede a describir la metodología a seguir en esta investigación. Esta metodología se divide en dos fases principales: Análisis del Residuo y Pruebas para determinar la factibilidad técnica de la alternativa propuesta.

### 4.1. CARACTERIZACIÓN DEL RESIDUO.

Los análisis que se consideran convenientes para determinar las características y propiedades del residuo, pueden clasificarse en dos tipos: Químicos y Físicos. Los análisis correspondientes a cada clasificación, así como las características que cada uno puede brindar, se explican a continuación. Es importante mencionar que el residuo se tiene en dos formas diferentes: húmedo y seco; sin embargo, para fines de utilización como cemento o arena, los estudios se enfocaron más al residuo ya seco.

#### 4.1.1. Análisis Químicos.

Los análisis químicos a los que se va a someter al residuo con el fin de conocer más acerca de su composición, son los siguientes:

##### Difracción de Rayos X.

Este análisis se mandará a hacer en el Centro de Investigación y Desarrollo de Materiales Cerámicos (CIDEMAC), que pertenece a la Facultad de Ciencias Químicas de la U.A.N.L. El objeto de llevar a cabo este análisis es el de determinar de forma cualitativa la composición del residuo.

##### Espectrofotometría de plasma.

Este análisis se realizará una vez que se hayan obtenido resultados de la Difracción de Rayos X, ya que con base en estos resultados, se observará cuáles elementos están presentes en mayor cantidad, según el pico reportado en las gráficas, y posteriormente, se mandará analizar el residuo para medir cuantitativamente la presencia de dichos elementos. Este análisis se mandará a hacer en el Laboratorio de Materiales del Centro de Sistemas Integrados de Manufactura (CSIM) del ITESM, Campus Monterrey.

#### 4.1.2 Análisis Físicos.

Por otro lado, los análisis físicos que se van a realizar al residuo, con el fin de conocer más acerca de sus propiedades como material, se listan a continuación, con una breve descripción de la importancia de cada análisis. La descripción detallada de los métodos a seguir se explica en el Apéndice E. Los análisis físicos se realizarán en los Laboratorios del Departamento de Ing. Civil, del ITESM, Campus Monterrey.

##### Densidad.

La densidad se medirá como densidad absoluta del compuesto. Esta propiedad es muy importante, ya que de ella depende la forma en como será considerado el residuo a la hora de hacer la mezcla de los bloques. Como se observó en el capítulo anterior, el mezclado de los materiales depende en gran parte del tipo de agregado, y a la vez, el tipo de agregado se define según la densidad del mismo.

##### Granulometría.

La granulometría se hará por el método de tamizado. La granulometría del compuesto es también un factor muy importante para la fabricación de bloques para construcción. Según la gráfica que se obtiene del análisis granulométrico se sabe el tamaño y la distribución de partícula del compuesto analizado, y en el caso de la industria de materiales para construcción, el tamaño de partícula de partícula del compuesto define la clasificación en que este compuesto será considerado. Además, la granulometría de algunos componentes de los bloques, como es el caso de los agregados, representa una de las características más importantes porque permite producir bloques de buena calidad a la vez que optimiza los costos de producción.

##### Límites de Atterberg.

Estos límites que son el Límite Líquido, Límite Plástico, Índice Plástico y Contracción Lineal son importantes, ya que cada uno representa una propiedad importante del residuo, misma que será de interés para saber cómo se comportará al momento de ser mezclado con otros compuestos. La contracción lineal es uno de los más importantes, ya que esta propiedad mide que tanto se contrae el compuesto al experimentar una humedad diferente.

#### 4.2. DISEÑO DEL EXPERIMENTO PARA LA INTEGRACIÓN DEL RESIDUO EN LA PRODUCCIÓN DE BLOQUES.

Los bloques se realizarán con la ayuda de una bloquera con capacidad para realizar 2 bloques de 4 pulgadas de grosor, cuyas medidas exactas son 10 cm de ancho, 20 cm de alto y 40 cm de longitud, por cada corrida. Los materiales a utilizar serán únicamente Arena #4 y Cemento gris; inicialmente no se considerará la adición de algún otro agregado.

El cemento gris se utiliza por ser el más común, aunque pueden utilizarse mezclas de cementos, pero las propiedades de los bloques obtenidos diferirían de las esperadas comúnmente.

Se utiliza Arena #4 debido a que este tipo de agregado, considerado como de textura fina, le brinda al bloque un color gris claro, un peso de entre 9 y 10 Kg., e importantes características, como son una alta resistencia a la compresión, baja absorción de agua, una buena densidad y durabilidad [8].

#### 4.2.1. Experimento de Sustitución de Cemento.

El cemento tiene un porcentaje de CaO que oscila entre el 60 y el 66%, y es este compuesto el que al humedecerse, forma el  $\text{CaSiO}_3$ , compuesto que al entrar en contacto con el agua forma el gel de silicato hidratado, compuesto que en conjunto con el  $\text{Ca(OH)}_2$  proporciona a la mezcla la capacidad de endurecerse. Se sabe que el residuo tiene un determinado porcentaje de CaO, ya que en los análisis químicos realizados se reportó  $\text{Ca(OH)}_2$  en el mismo, compuesto que se genera al hidratar el CaO presente, y por esta razón se propone su integración como material cementante.

Tabla 4.1. Diseño del experimento de sustitución de cemento.

% de Cemento Sustituido						
5	15	25	35	50	65	75

#### 4.2.2. Experimento de Sustitución de Arena.

Además, por la consistencia que a simple vista tiene el residuo, así como por la cantidad que se tiene del mismo en la empresa, se propone también la integración de éste como un material agregado en la mezcla para la fabricación de bloques para construcción.

Ambos experimentos se harían sustituyendo diferentes porcentajes de los materiales antes mencionados con residuo, en distintas proporciones, con el fin de obtener una mezcla tal que el bloque fabricado cumpla con las características de calidad requeridas por la norma.

Tabla 4.2. Diseño del experimento de sustitución de arena.

% de Arena Sustituida		
25	50	75

### 4.3. PRUEBAS DE CALIDAD EN BLOQUES.

Las pruebas a realizar para verificar la calidad de los bloques fabricados son las siguientes:

- Peso de los bloques.
- Absorción de agua.
- Resistencia a la compresión.
- Lixiviado resultante.

Para poder tener un resultado confiable de cada prueba, es necesario obtener un promedio de 3 bloques, por lo que para efectuar las pruebas necesarias, y suponiendo que de cada corrida se obtendrán entre 3 y 4 bloques, se requerirá realizar un mínimo de 2 corridas por cada nivel del experimento, y así, poder obtener los 6 bloques mínimos necesarios para poder hacer una evaluación de la calidad de los bloques fabricados.

#### 4.3.1. Peso de los bloques.

El peso de los bloques, debido a que es una característica importante en su fabricación, se presenta como una prueba de calidad. En este punto se observará que tanto varían los pesos de los bloques en cada nivel de los dos experimentos, cemento y arena, según la adición del residuo.

#### 4.3.2. Absorción de agua.

Esta prueba consiste en determinar la cantidad de agua que un bloque es capaz de absorber en un determinado tiempo. El procedimiento a seguir es el que sugieren las normas correspondientes de cemento, y es el siguiente [4]:

- 1) Se pesa el bloque.
- 2) Se sumerge en una pila con agua y se deja sumergido durante 24 horas.
- 3) Una vez transcurridas las 24 horas, se saca el bloque de la pila, se deja escurrir para eliminar el excedente de agua, y se vuelve a pesar. Se registra ese peso ( $P_h$ ).
- 4) El bloque ya escurrido y pesado, se mete a un horno y se deja secando durante 24 horas. La temperatura del horno debe mantenerse constante en  $110^{\circ}\text{C}$ .
- 5) Pasado este tiempo, se saca el bloque del horno y se pesa nuevamente. El peso se registra ( $P_s$ ).

La cantidad de agua absorbida se calcula restando el peso seco del peso húmedo. Para poder obtener el valor en las unidades estandarizadas ( $\text{L}/\text{m}^3$ ), es necesario saber el volumen del bloque ( $V$ ), y por medio de la siguiente fórmula se obtiene el valor de Absorción de Agua.

$$\text{Absorción de agua} = \frac{P_h - P_s}{V}$$

#### 4.3.3. Resistencia a la compresión.

Esta prueba es muy importante porque demuestra la carga máxima que un bloque podrá soportar. La prueba se realiza con la ayuda de la máquina univresal, que consiste básicamente en dos superficies con movimiento contrario. En el tablero se accesan los datos del bloque a muestrear (ancho, largo y altura) y se procede a iniciar la prueba [4].

El bloque se coloca sobre una tabla de madera en la superficie inferior, y encima se coloca otra tabla de madera para que no quede en contacto directo con la superficie superior de la máquina. Además, esta tabla tiene como objetivo eliminar cualquier imperfección que tenga el bloque en la parte superior, y que pueda ser fuente de error en la medición de la carga máxima a soportar.

Una vez que el bloque se encuentra debidamente colocado en la máquina, se inicia la prueba, y entonces, la superficie inferior comienza a subir y la superficie superior a bajar. La velocidad con que se mueven ambas superficies, ofreciendo una carga, es de 300 Kg/s. Ambas superficies continúan desplazándose hasta que el bloque se fractura. La carga máxima es la carga soportada hasta antes de que el bloque se fracturara.

Los resultados obtenidos de la máquina son la Carga máxima soportada (KgF) y el Esfuerzo máximo soportado ( $\text{Kg}/\text{cm}^2$ ). Este último se obtiene mediante un cálculo que involucra la carga máxima soportada y el área del bloque.

#### 4.3.4. Lixiviado resultante.

Este análisis se considera muy importante desde el punto de vista ambiental, ya que nos da una idea de los materiales que serán lixiviados de los bloques, por ejemplo, al llover, y de esta forma, es posible medir en cierto grado, la toxicidad de los bloques. Para llevar a cabo este análisis, se realizó una extracción de compuestos, según se especifica en la NOM-053-ECOL-1993. El procedimiento se explica con detalle en el Apéndice E.

Para obtener 2 L de lixiviado se utilizan 100 g de muestra (previamente molida), esto es, 50 g por cada litro. Los reactivos que se utilizan para la extracción de los compuestos varían según el pH de la muestra a lixiviar. El reactivo #1 está preparado con ácido acético glacial, y su pH es de aproximadamente 4.93; este reactivo se utiliza cuando la muestra tiene un pH menor o igual a 5.

El reactivo #2 se prepara también con ácido acético glacial, pero el pH de este reactivo es de 2.88 aproximadamente. Este reactivo se utiliza en muestras con un pH mayor a 5. El pH de la muestra se determina con la ayuda de papel pH, haciendo una comparación entre los colores que se obtienen al sumergirlo en el líquido y los que ya están determinados según el pH del compuesto.

Los pasos básicos a seguir para la extracción de los compuestos son:

- 1) Determinar el pH de la muestra, mezclando 5 g de muestra con 96.5 mL de agua destilada.
- 2) Agregar 3.5 mL de HCL 0.1 N, calentar hasta 50°C en una plancha, dejar enfriar nuevamente hasta temperatura ambiente, y determinar nuevamente el pH. Con base en este pH es la determinación del reactivo a utilizar.
- 3) Se agregan 2 L del reactivo a 100 g de muestra, en un frasco de vidrio, se tapa y se cierra de tal forma que no se vaya a escurrir material (esto generalmente se hace con cinta de teflón y después, con cinta adhesiva).
- 4) Se deja agitar en un lixiviador durante 18 horas (con un margen de 2 horas) a 30 agitaciones por minuto aproximadamente.

Una vez terminada la agitación, se pasa el material a través de un filtro, y se obtiene el lixiviado, mismo que se someterá a análisis posteriores. Estos serán un Barrido electrónico, con el fin de determinar los cationes presentes en el líquido de forma cualitativa, y después se mandarán analizar cuantitativamente los cationes que hayan estado presentes en mayor cantidad, para saber si entran dentro de las especificaciones que marcan las normas ambientales.

# 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Una vez que se ha descrito detalladamente la metodología a seguir para realizar los experimentos, en este capítulo se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los análisis y las pruebas de calidad del residuo, con el fin de determinar la factibilidad técnica y económica de la alternativa que se propone de integración del residuo.

## 5.1. CARACTERIZACIÓN DEL RESIDUO.

Como se mencionó en el capítulo anterior, los análisis que se consideraron convenientes para llevarlos a cabo se pueden dividir en dos categorías: 1) Químicos (Difracción de Rayos X, Espectrofotometría de plasma) y 2) Físicos (Granulometría, Límites de consistencia, Densidad). Los resultados de estos análisis se explican con más a detalle a continuación.

### 5.1.1. Análisis Químicos.

Se realizó un análisis de Difracción de Rayos X al residuo en dos muestras diferentes; una con una antigüedad de 6 meses, y la otra húmeda, esto es, recién salida de proceso, o a lo mucho, con 1 ó 2 días de antigüedad. Los compuestos identificados en cada muestra se listan en la siguiente tabla:

Tabla 5.1. Componentes principales en el residuo.

“ 6 meses ”	“ Húmeda ”
++ SrSO <sub>4</sub>	++ Ca(OH) <sub>2</sub>
Ca(OH) <sub>2</sub>	SrCO <sub>3</sub>
SrCO <sub>3</sub>	SrSO <sub>4</sub>
SrSO <sub>3</sub>	SrSO <sub>3</sub>
	S

Nota: ++ Compuestos presentes en mayor cantidad.

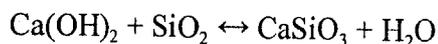
Además, después de un estudio por Espectrofotometría de plasma, se sabe que la composición del residuo húmedo es como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 5.2. Elementos presentes en el residuo húmedo.

Compuestos	Porcentaje en peso
H <sub>2</sub> O	38.30
Ca(OH) <sub>2</sub>	30.23
SrCO <sub>3</sub>	11.72
Ca(SO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · 12 H <sub>2</sub> O	8.64
SrSO <sub>4</sub>	5.55
SrSO <sub>3</sub>	2.47
SrS	1.33
CaF <sub>2</sub>	0.42
BaS	0.04
Otros	0.68

Como “otros” es muy posible que se encuentren sales de aluminio y calcio, además de silicatos y otros compuestos que no fue posible determinar mediante los análisis realizados, los cuales por si solos no representan composiciones mayores al 5% en peso.

Una vez conocidos los compuestos presentes en el residuo, se puede plantear la posible reacción que podría suceder como parte del fraguado de la mezcla:



cuyo calor de reacción es 32.25 kJ/mol; por lo que es una reacción endotérmica y está favorecida a condiciones normales, por lo que no se considera necesario agregar algún otro compuesto que ayude a favorecer la reacción, aunque ciertamente la adición de sílice reactiva mejoraría el desempeño de esta reacción a condiciones ambiente.

El silicato cálcico hidratado es el que da la resistencia a los bloques y como se puede observar en la reacción anterior, este compuesto se formará al entrar en contacto el residuo con el agua. Además, se sabe que según el concepto de incorporación cristaloquímica, es posible la fijación de algunos metales contaminantes comunes en la red cristalina de algunos hidratos, como por ejemplo, la sustitución del calcio por el estroncio, el bario y el plomo para formar los hidróxidos correspondientes, o la sustitución de los compuestos hidroxilos por flúor, cloro, bromo y yodo.

Sin embargo, para el caso del estroncio existente en el residuo, esta incorporación no se considera posible, ya que el  $\text{Sr}(\text{OH})_2$  es más soluble que el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , por lo que al momento de competir ambos iones para formar el compuesto, el calcio no sería desplazado por el estroncio. Otro aspecto que se considera para poder hacer esta afirmación es el hecho de que considerando las solubilidades del  $\text{SrSO}_4$  y  $\text{SrSO}_3$ , la cantidad que se liberaría de  $\text{Sr}^{+2}$  sería tan baja que no podría competir con el  $\text{Ca}^{+2}$  para la formación del compuesto hidratado.

Para el caso del residuo presente, se espera una sustitución tal vez pequeña pero significativa del calcio con el estroncio, además de la reacción de fraguado que se mencionó anteriormente.

### 5.1.2. Análisis Físicos.

#### Densidad.

Se determinó la densidad real del residuo seco, siendo esta de  $2,930 \text{ kg/m}^3$ . Este valor de densidad corresponde al de un agregado de tipo normal, por lo que se considerará la adición del residuo de esta forma.

#### Granulometría.

Se realizó un análisis de Granulometría por tamizado del residuo y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 5.3. Análisis granulométrico del residuo.

Diámetro de partícula ( $\mu\text{m}$ )	% Retenido
4,000	40
1,000	22
850	2
425	28
149	6
74	1
53	0
Plato	0

Estos resultados se pueden apreciar gráficamente a continuación:

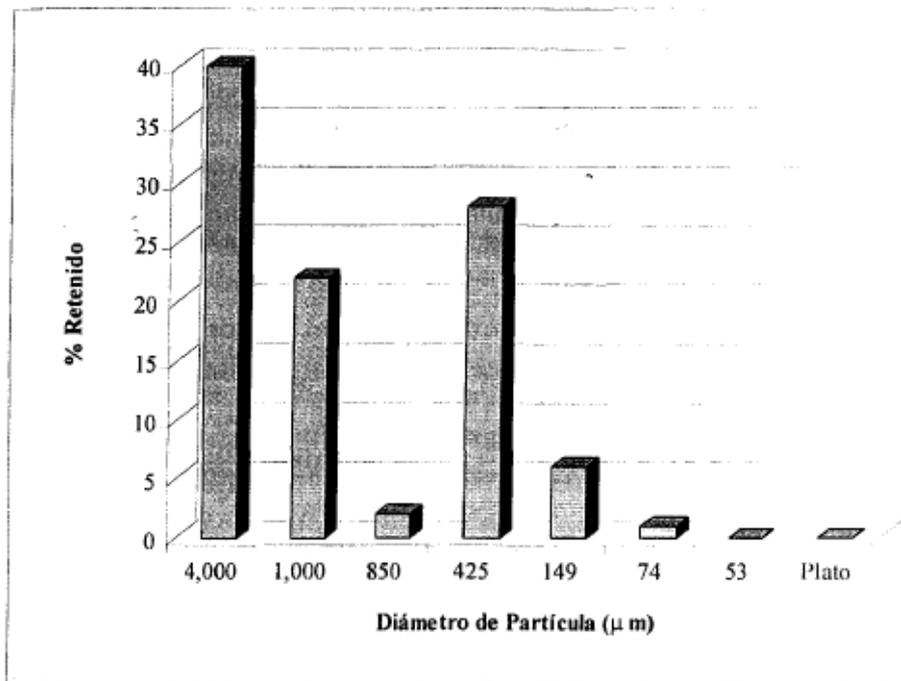


Figura 5.1. Análisis granulométrico del residuo.

Del análisis granulométrico se puede concluir que la distribución de tamaño de partículas del residuo está básicamente en las mallas de mayor diámetro, por lo que es posible que esto afecte un poco la mezcla utilizada para la fabricación de bloques en caso de que el residuo se utilizara así como está en la empresa, sin una molienda o un tamizado previo, ya que si se considera la distribución granulométrica del agregado, en este caso la arena, se puede observar que las partículas de ésta son más finas, y esta variación en el diámetro de partículas tiene una gran influencia en las características de los bloques a obtener.

Tabla 5.4. Análisis granulométrico del agregado.

Diámetro de partícula (µm)	% Retenido
4,000	
1,000	30
850	63
425	77
149	90
90	97
53	99
Plato	100

Estos resultados se pueden apreciar gráficamente a continuación:

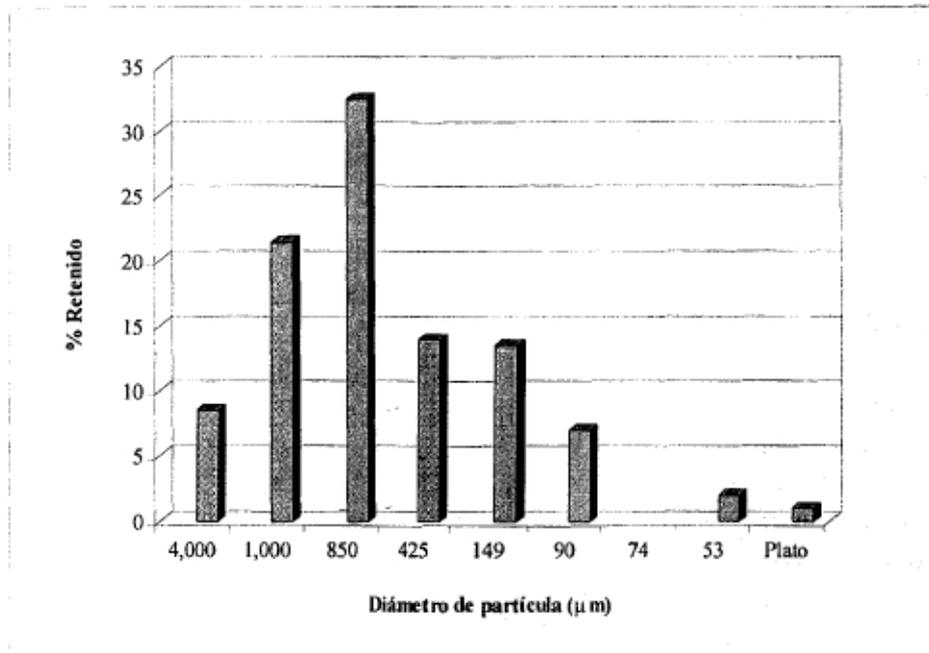


Figura 5.2. Análisis granulométrico del agregado.

Como puede observarse en la figura anterior, la granulometría del agregado difiere de la del residuo, por lo que es probable que esta diferencia provoque algunos cambios en las propiedades de los bloques fabricados, sobre todo por la existencia de un alto porcentaje de residuo retenido con un diámetro de partícula igual o mayor a los 4 mm.

#### Límites de Atterberg.

Se sometió al residuo a una determinación de los límites de consistencia, y los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5.5. Límites de consistencia del residuo.

Límite	Valor (%)
Límite líquido	22.3
Límite plástico	16.9
Índice plástico	5.4
Contracción lineal	5.8

De la tabla se observa que el porcentaje de contracción lineal es muy alto, por lo que puede ser posible que al momento de integrar el residuo, los bloques pudieran tener una ligera variación en volumen al estar en contacto con la humedad del ambiente. Esto sería necesario considerarlo cuando se lleva un registro de las medidas de los bloques realizados.

El límite líquido y el límite plástico representan la longitud que el compuesto tendrá al ser sometido a diferentes humedades. Los valores de estos límites son relativamente normales en comparación de otros compuestos utilizados en la industria de la construcción. En conjunto, los límites de atterberg muestran el comportamiento que el compuesto tendrá al ser sometido a diferentes humedades.

## 5.2. EXPERIMENTOS DE LA INTEGRACIÓN DEL RESIDUO EN LA PRODUCCIÓN DE BLOQUES.

Para poder tener una referencia para comparar los resultados en las pruebas de los bloques, era necesario contar con un blanco, esto es, un bloque fabricado únicamente con arena, cemento y agua. La mezcla básica a utilizar se calculó considerando que cada bloque pesará aproximadamente 11 kg, y por lote se consideró la obtención de 4 bloques; así, la proporción de componentes en la mezcla se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 5.6. Composición básica de un bloque.

Material	% en peso	Cantidad
Arena	84,5	44 kg
Cemento	10	5.2 kg
Agua	5.5	2.88 L

Es importante recalcar que en esta mezcla básica no se consideró la utilización de ningún otro agregado para fomentar la resistencia o mejorar las características del bloque. Es por esta razón que el contenido de cemento utilizado es ligeramente mayor al valor recomendado por los fabricantes de bloques (7-8 % en peso).

También es importante mencionar que la cantidad de agua es meramente un parámetro, ya que el contenido real de agua que se requiere para la mezcla varía según las condiciones atmosféricas, por lo que en ocasiones se puede requerir más o menos agua para que la mezcla quede con la consistencia necesaria.

En la siguiente figura se puede apreciar un aspecto de la bloquera utilizada para fabricar los bloques



Figura 5.3. Equipo utilizado para fabricar los bloques.

#### 5.2.1. Experimento de Sustitución de cemento.

A continuación se presenta una tabla con las cantidades utilizadas de cada material en cada uno de los niveles del experimento de sustitución de cemento. De cada uno de los niveles se realizaron 2 corridas, obteniendo 8 bloques de cada uno de los niveles, esto es, 4 bloques por cada corrida.

Tabla 5.7. Experimento de sustitución de cemento.

% Cemento Sustituido	0	5	15	25	35	50	65	75
Arena (kg)	44	44	44	44	44	44	44	44
Cemento (kg)	5.2	4.94	4.42	3.9	3.38	2.6	1.82	1.3
Residuo (kg)	0	0.29	0.89	1.49	2.09	2.98	3.88	4.47
Agua (L)	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9

Al igual que en el experimento anterior, a continuación se presenta una tabla con los datos referentes a las corridas del experimento de sustitución de cemento. Es importante mencionar que la variación en el número de bloques obtenidos de cada corrida se debe principalmente a errores en el transporte de los bloques de la bloquera a la tarima en donde se dejaban reposar.

Tabla 5.8. Datos de las corridas realizadas para el experimento de sustitución de cemento.

Corrida	% de sustitución de cemento	Fecha de realización	# Bloques obtenidos
3	50	Feb. 3, 99	2
4	15	Feb. 3, 99	5
5	15	Feb. 3, 99	4
6	0	Feb. 4, 99	2
6	0	Feb. 4, 99	4
7	35	Feb. 4, 99	4
8	35	Feb. 4, 99	4
9	25	Feb. 10, 99	4
10	25	Feb. 10, 99	4
11	5	Feb. 10, 99	4
12	5	Feb. 10, 99	4
13	65	Feb. 10, 99	4
14	65	Feb. 10, 99	4
15	75	Feb. 10, 99	4
16	75	Feb. 10, 99	4
17	50	Feb. 10, 99	4
18	0	Feb. 11, 99	0
19	0	Mar. 3, 99	0
20	5	Mar. 3, 99	3
21	15	Mar. 3, 99	4
22	25	Mar. 3, 99	4
23	35	Mar. 3, 99	4
24	50	Mar. 3, 99	4
25	5	Mar. 17, 99	4
26	15	Mar. 17, 99	4
27	25	Mar. 17, 99	4
28	35	Mar. 17, 99	4
29	50	Mar. 17, 99	4
30	65	Mar. 17, 99	4
31	75	Mar. 17, 99	4

### 5.2.2. Experimento de Sustitución de Arena.

En la siguiente tabla se muestran las cantidades utilizadas de cada material para cada uno de los niveles del experimento de sustitución de arena.

Tabla 5.9. Experimento de sustitución de arena.

% Arena Sustituída	0	25	50	75
Arena (kg)	44	33	22	11
Cemento (kg)	5.2	5.2	5.2	5.2
Residuo (kg)	0	12.63	25.26	37.89
Agua (L)	2.9	3.4	5.4	5.6

Es muy importante notar que en las pruebas de sustitución de arena, la cantidad de agua utilizada para que la mezcla quedara con la consistencia requerida, era mayor. También, es muy importante hacer la observación de que la mezcla seca, en el momento de revolverla, presentaba una resistencia mayor porque era más pesada que las mezclas de sustitución de cemento, lo cual sería muy importante tener en cuenta en caso de que el experimento se fuera a realizar en una bloquera cuya alimentación fuera proveída por una revolvedora industrial, en la que quizá se necesitaría una mayor potencia para lograr la consistencia requerida en la mezcla.

En la siguiente tabla se muestran los datos referentes a las corridas realizadas para el experimento de sustitución de arena. El blanco para las corridas es el mismo que el realizado para las corridas del experimento de sustitución de cemento, que corresponde a las corridas 6, 6, 18 y 19.

Tabla 5.10. Datos de las corridas realizadas para el experimento de sustitución de arena.

Corrida	% de sustitución de arena	Fecha de realización	# Bloques obtenidos
A	25	Feb. 11, 99	4
C	75	Feb. 12, 99	6
D	75	Feb. 12, 99	2
B	50	Feb. 12, 99	4
E	50	Feb. 12, 99	4
F	25	Feb. 12, 99	4
G	25	Mar. 17, 99	4
H	50	Mar. 17, 99	4

### 5.2.3. Observaciones sobre Mezclado y Curado.

El mezclado de los materiales se realizó en una carretilla con la ayuda de una pala de mezclado. El procedimiento que se siguió era el siguiente: se pesaban los materiales y se colocaba primero la arena, después se le iba agregando lentamente el cemento y finalmente se agregaba el residuo. Se mezclaban estos materiales hasta que se tenía una mezcla homogénea, lo cual era relativamente sencillo de observar, ya que cuando el cemento no estaba bien mezclado, se alcanzaban a apreciar algunas manchas del color del cemento en la mezcla.

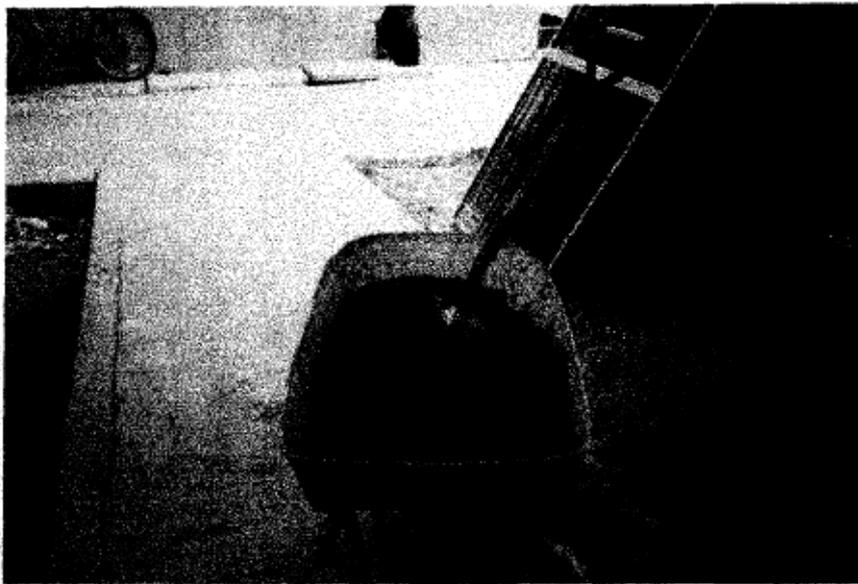


Figura 5.4. Mezclado de los materiales.

Una vez que los materiales secos estaban bien mezclados, se iba agregando poco a poco el agua, mientras se seguía revolviendo con ayuda de la pala, hasta tener la mezcla con la consistencia requerida. Este procedimiento se obtuvo de un manual para hacer bloques en una bloquera de la localidad.

Posteriormente, la mezcla era alimentada a la bloquera, vibrando al alimentar para que el material no se apelmazara en la parte superior, y finalmente, vibrando durante 10 segundos, de tal forma que la humedad de la mezcla no se fuera hasta el fondo del molde, ya que de ser así, los bloques quedaban muy húmedos en su parte inferior, y muy secos en la superior, lo cual hacía que al desmoldarlos fueran más fáciles de fracturar.

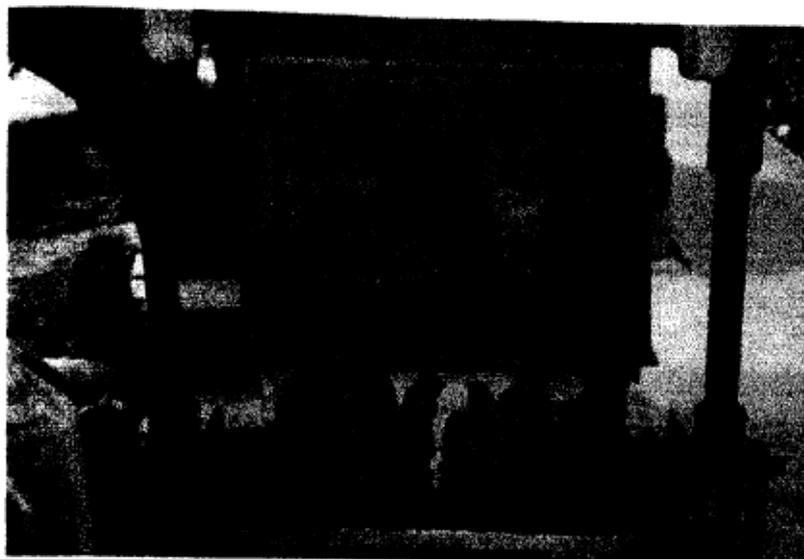


Figura 5.5. Alimentación de la mezcla en la bloquera.

Una vez que se terminaba cada bloque, se dejaba reposar un poco en la bloquera (aproximadamente 5 minutos) con el fin de evitar que se desmoronara fácilmente al ser transportado hacia la tarima en donde se dejaba secar, y durante los 3 días siguientes a su fabricación, se regaba 3 veces al día, con el fin de ayudar a obtener un mejor curado. A continuación se muestra una imagen de los bloques en reposo en la bloquera.



Figura 5.6. Aspecto de los bloques húmedos

Pasados los 3 días en los cuales se tenía que regar, se esperaba a que pasaran 2 semanas desde su fecha de fabricación para poder someterlo a las pruebas de calidad requeridas. Este tiempo de espera se trató de mantener constante en aproximadamente 14 días, aunque hubo unos bloques a los cuales las pruebas de calidad se les realizaron a los 13 días de haberse fabricado y otros que pasaron hasta 15 días o más, en reposo.

Como observación se puede mencionar que los colores en los bloques obtenidos variaron en el experimento de sustitución de cemento, siendo más claros los que tenían menos cantidad de residuo y más oscuros, de un color gris - verdoso cuando estaban aún húmedos, aquellos que tenían un contenido mayor de residuo.

Otra observación muy importante que hay que tomar en cuenta es que los bloques que tenían un 50% y 75% de sustitución de arena, presentaban una característica especial: al momento de marcarlos con el número de corrida asignada, con una pintura de aerosol, absorbían la mayor parte de la pintura, por lo que era necesario pintarlos de 3 a 4 veces para que la marca pudiera ser visible.

Otra característica importante de los bloques fabricados en el experimento de sustitución de arena, es que el residuo utilizado presentaba algunas partículas de tamaño mayor que no fueron removidas al momento de hacer la mezcla, por lo que en algunos bloques se podían apreciar estas piedras, generando algunos huecos en la matriz del bloque obtenido.

Además, los bloques con un 65% y 75% de sustitución de cemento y los bloques del experimento de sustitución de arena, al día siguiente de haberse fabricado amanecieron cubiertos por una especie de escarcha blanca, salitre, probablemente debido a la cantidad de sales de aluminio y calcio existentes en el residuo.



Figura 5.7. Aspecto de los bloques fabricados.

### 5.3. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CALIDAD.

Las pruebas de calidad se realizaron a los bloques con una edad promedio de 14 días. Estas pruebas se llevaron a cabo en los Laboratorios del Departamento de Ing. Civil del ITESM, Campus Monterrey.

#### 5.3.1. Peso de los bloques.

El procedimiento para llevar a cabo esta prueba se muestra en la siguiente figura.

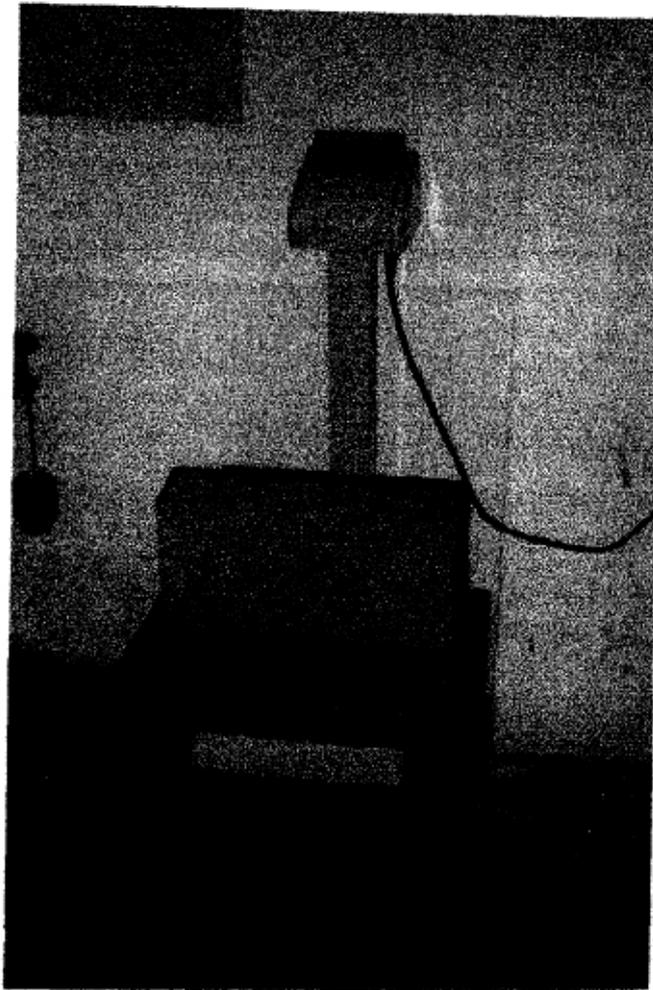


Figura 5.8. Peso de los bloques.

Originalmente, se realizaron las pruebas de peso del bloque y se obtuvo que, en ambos experimentos, sustitución de cemento y arena, conforme aumentaba el porcentaje de residuo en la mezcla, el peso de los bloques disminuía. Se supuso que esto sucedía debido a que la sustitución se había hecho considerando el peso de los materiales sin considerar el contenido de humedad de los mismos.

Es muy importante mencionar que el contenido de humedad del residuo, tal como se tiene apilado en la empresa, es de 0.1293 gramos de agua por gramo de residuo, y considerando que la humedad del cemento y de la arena es de 0.0058 y 0.0083 respectivamente, se consideró necesario repetir las pruebas, añadiendo lo que correspondería al material en peso seco, para que la sustitución, que es en peso, fuera equivalente.

Por esta razón, se procedió a repetir las pruebas, y probar si esta era la razón por la cual el peso de los bloques disminuía. En la siguiente tabla se muestran los pesos de los bloques para cada nivel del experimento de sustitución de cemento en las últimas pruebas realizadas.

Tabla 5.11. Pesos de los bloques del experimento de sustitución de cemento.

Porcentaje de sustitución	Peso promedio del bloque (kg)	Desviación Estándar
0	10.170	0.1521
5	10.103	0.0306
15	10.223	0.0379
25	10.220	0.0346
35	10.110	0.0624
50	10.160	0.1808
65	10.130	0.0643
75	10.103	0.1443

En la figura siguiente, es más fácil apreciar el comportamiento de los pesos de los bloques fabricados con una sustitución de cemento.

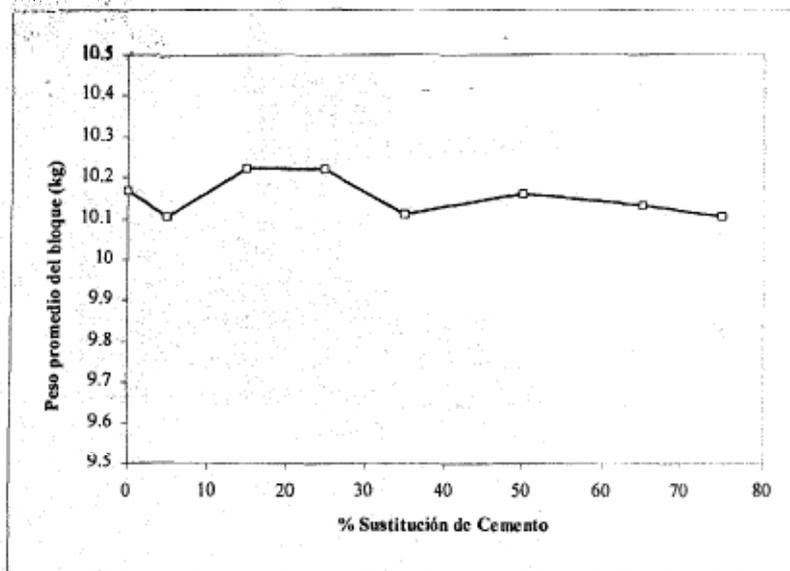


Figura 5.9. Distribución de los pesos de los bloques para el experimento de sustitución de cemento.

Como se puede observar en la figura anterior, los valores de desviación estándar son relativamente pequeños, por lo que se concluye que las variaciones en los pesos de los bloques fabricados se deben más que todo a errores en la fabricación de los mismos, como puede ser el hecho de los diferentes tamaños que pueden tener, y no precisamente a la integración del residuo en la mezcla para la fabricación de los mismos.

De igual forma, los pesos de los bloques obtenidos finalmente para el experimento de sustitución de arena, se muestran reportados en la siguiente tabla:

Tabla 5.12. Pesos de los bloques del experimento de sustitución de arena.

Porcentaje de sustitución	Peso promedio del bloque (kg)	Desviación Estándar
25	10.1600	0.0173
50	9.5533	0.1563
75	8.2475	0.005

En la siguiente figura se muestra de forma gráfica la distribución de los pesos de los bloques obtenidos para el experimento de sustitución de arena, mostrando nuevamente el peso del bloque con un 0% de sustitución como referencia para los demás bloques. Como se puede apreciar, los valores obtenidos presentan una desviación estándar muy baja.

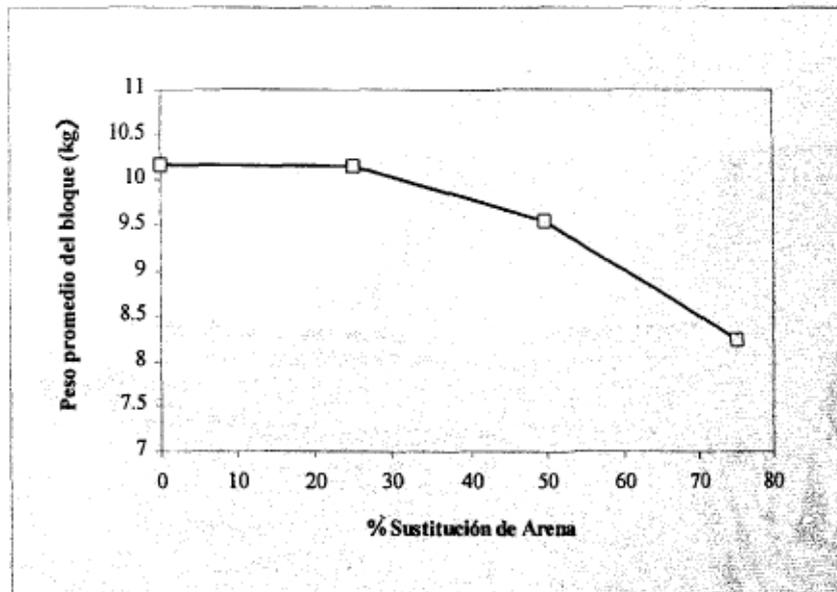


Figura 5.10. Distribución de los pesos de los bloques para el experimento de sustitución de arena.

La figura anterior muestra una disminución en el peso del bloque obtenido conforme el porcentaje de arena sustituida aumenta en forma considerable. Se considera que la razón por la cual el peso del bloque disminuye puede estar relacionada con la formación de la matriz del bloque, ya que el residuo cuenta con una granulometría tal que contiene muchas partículas de tamaño grande, mismas que al ser utilizadas en el bloque, generan huecos que disminuyen el peso total del bloque.

Para comprobar esta teoría, se obtuvo la densidad de un bloque de cada nivel del experimento de sustitución de arena.

Tabla 5.13. Densidad de los bloques del experimento de sustitución de arena.

% de Sustitución	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
0	1,612.3
25	1,532.7
50	1,472.9
75	1,244.1

Como se observa en los valores de la tabla anterior, la densidad de los bloques disminuye al aumentar el contenido de residuo en ellos, por lo que se confirma la teoría propuesta, ya que al ser menos densos, los bloques pesaran menos si el volumen se mantiene constante.

### 5.3.2. Absorción de Agua.

En las siguientes figuras se muestran las dos etapas de esta prueba: el momento en que los bloques se sumergen en agua, y el momento de dejarlos secando en la estufa.

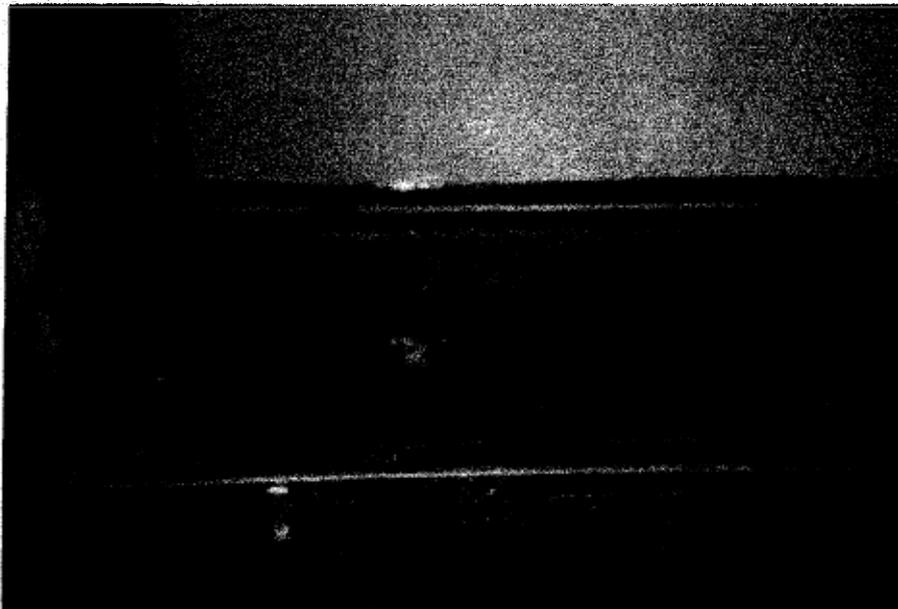


Figura 5.11. Aspecto de los bloques en la pila de agua.



Figura 5.12. Secado de los bloques.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos de la prueba de Absorción de Agua para los bloques realizados en el experimento de sustitución de cemento. El valor reportado es un promedio de los valores obtenidos en las pruebas de 3 bloques (Ver Apéndice C).

Tabla 5.14. Resultados de la prueba de absorción de agua para el experimento de sustitución de cemento.

Porcentaje de sustitución	Absorción promedio de agua (L/m <sup>3</sup> )	Desviación Estándar
0	80.8336	2.602
5	83.7500	1.250
15	100.4167	6.885
25	97.5000	2.165
35	92.0833	5.271
50	97.0833	1.909
65	100.8333	2.887
75	99.1667	5.052

En la siguiente figura se puede apreciar la distribución de la absorción de agua para los distintos bloques fabricados en el experimento de sustitución de cemento.

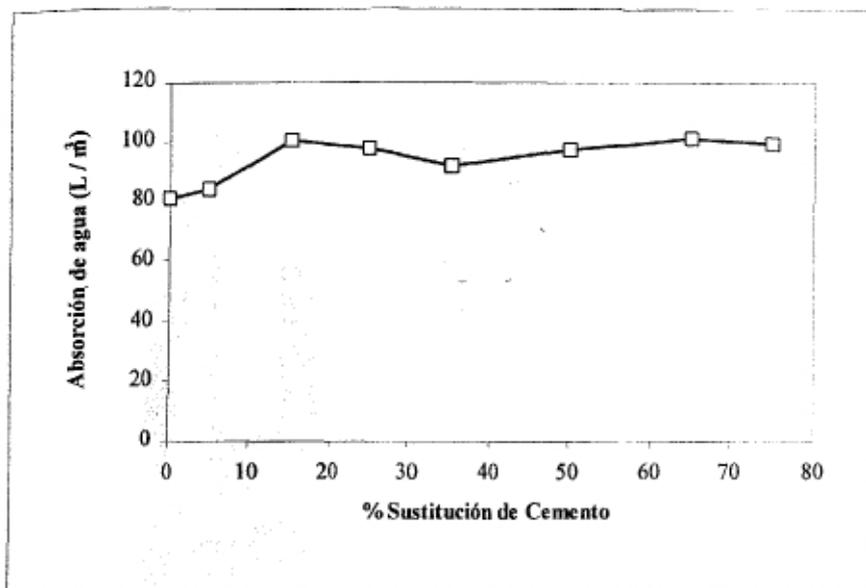


Figura 5.13. Resultados de la prueba de absorción de agua para el experimento de sustitución de cemento.

De la figura anterior se puede concluir que conforme el porcentaje de residuo se incrementa en la mezcla utilizada para fabricar el bloque, la capacidad de absorción aumenta ligeramente, debido quizá a la matriz que se forma al utilizar el residuo, ya que, al igual que en el caso del peso de los bloques, es posible que se generen huecos debido a las partículas grandes de residuo, y estos huecos tienden a acumular más agua al ser sumergidos los bloques.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para la prueba de absorción de agua en el experimento de sustitución de arena.

Tabla 5.15. Resultados de la prueba de absorción de agua para el experimento de sustitución de arena.

Porcentaje de sustitución	Absorción promedio de agua (L/m <sup>3</sup> )	Desviación Estándar
25	125.417	0.722
50	156.666	3.146
75	-	-

En la siguiente figura, se muestran de forma gráfica estos resultados. Es importante aclarar que la prueba no se pudo realizar para los bloques con un 75% de sustitución, debido a que algunos de estos bloques se despedazaban al intentar cargarlos. Además, tenían una consistencia muy polvosa, misma que al momento de ponerlos en contacto con agua, hacía que se deshicieran fácilmente.

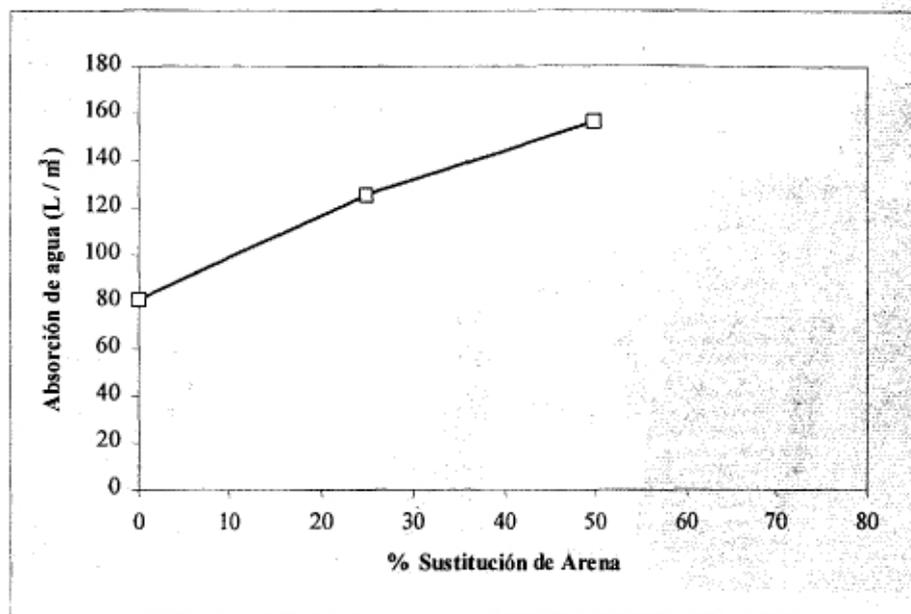


Figura 5.14. Resultados de la prueba de absorción de agua para el experimento de sustitución de arena.

Una observación peculiar en esta prueba fue el hecho de que los bloques al momento de salir de la estufa tenían un olor un tanto desagradable y muy penetrante, como si fuera una mezcla *de ácido con hule quemado*, debido quizá al azufre presente o a la calcinación de algunos de los componentes de la mezcla con que el bloque fue fabricado.

Además, en este experimento es más notorio el aumento en la capacidad de absorción de agua, ya que al sustituir arena, la cantidad de residuo utilizada es mayor, por lo que el volumen que ocupan los huecos generados por su integración es mayor, y tiende a acumular más agua al realizar esta prueba. Esta teoría también se comprueba al observar la densidad de los bloques con distintos porcentajes de arena.

### 5.3.3. Resistencia a la compresión.

El procedimiento para llevar a cabo estas pruebas se presenta en las siguientes figuras. En la primera de ellas se muestra la máquina universal, equipo utilizado para medir la resistencia a la compresión de los bloques obtenidos. Posteriormente, se muestra un aspecto de las fracturas que presentan los bloques al ser sometidos a una fuerza externa con el fin de medir el máximo esfuerzo que éstos pueden soportar.



Figura 5.15 Máquina universal.



Figura 5.16. Fractura de los bloques después de  
Figura 5.16. Fractura de los bloques después de  
ser sometidos a la prueba.

Los resultados obtenidos para esta prueba en el experimento de sustitución de cemento se muestran a continuación.

Tabla 5.16. Resultados de la prueba de resistencia a la compresión para el experimento de sustitución de cemento

Porcentaje de sustitución	Esfuerzo promedio máximo soportado (kg/cm <sup>2</sup> )	Desviación Estándar
0	62	2.632
5	53	4.716
15	48	4.759
25	38	0.426
35	28	1.620
50	23	2.587
65	14	0.569
75	11	0.968

Y en la siguiente figura se muestran estos resultados de forma gráfica.

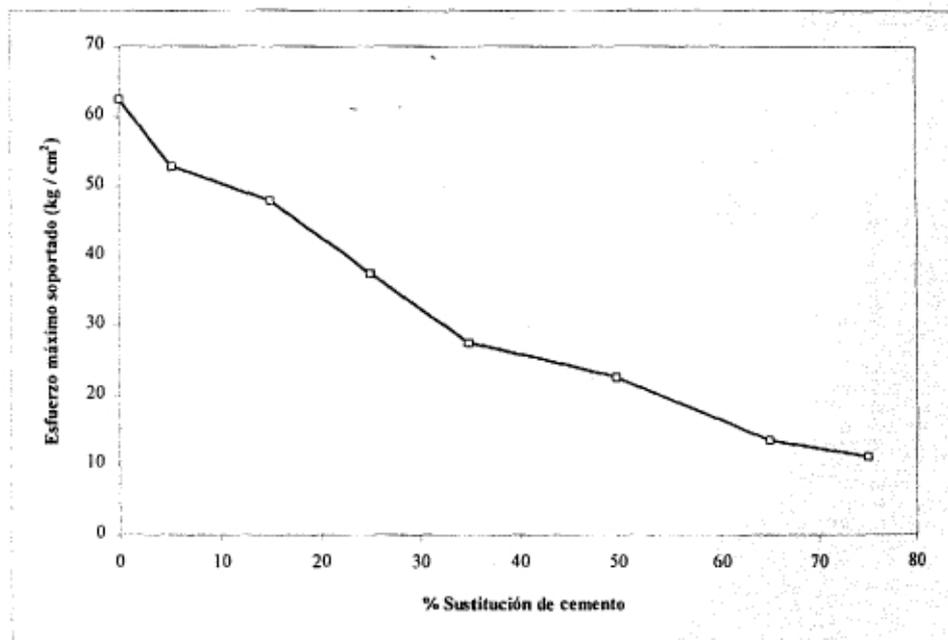


Figura 5.17. Resultados de la prueba de Resistencia a la compresión para el experimento de sustitución de cemento.

Los resultados mostrados son los obtenidos después de 3 pruebas. Estas pruebas se realizaron debido a que en la prueba inicial no se observaba una tendencia definida en la resistencia de los bloques con respecto al porcentaje de sustitución de cemento.

De la gráfica anterior se observa que conforme aumenta la cantidad de residuo integrado en la mezcla para la fabricación de bloques, la resistencia a la compresión de los mismos disminuye; esto se debe muy probablemente al hecho de que al ir sustituyendo el cemento con residuo, la cantidad total de CaO presente en la mezcla disminuye, y ya que este compuesto es el que da el poder aglomerante a los bloques fabricados, al ser menos, la resistencia de estos disminuye considerablemente.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para la prueba de resistencia a la compresión en el experimento de sustitución de arena.

Tabla 5.17. Resultados de la prueba de resistencia a la compresión para el experimento de sustitución de arena.

Porcentaje de sustitución	Esfuerzo promedio máximo soportado (kg/cm <sup>2</sup> )	Desviación Estándar
25	47	2.393
50	23	3.035
75	12	2.807

Estos resultados se aprecian de forma gráfica en la siguiente figura:

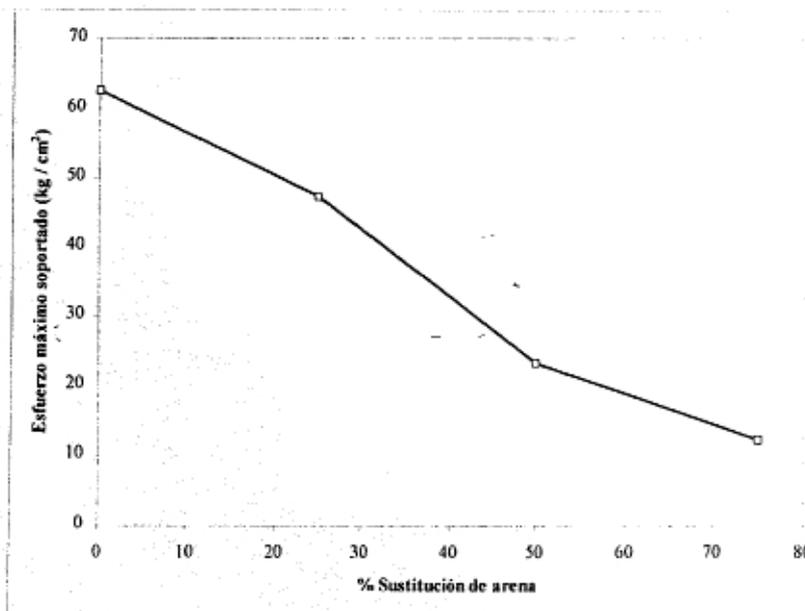


Figura 5.18. Resultados de la prueba de Resistencia a la compresión para el experimento de sustitución de arena.

Al igual que en el experimento de sustitución de cemento, en la figura anterior también se observa que conforme la cantidad de arena sustituida por residuo aumenta, la resistencia de los bloques disminuye.

En este caso, este comportamiento no se debe en gran medida a la capacidad de aglomeración de los componentes, si no más bien a que la arena es el agregado que le da la consistencia a los bloques, y al sustituirlo con el residuo, esta consistencia se pierde, debido a que la consistencia del residuo es totalmente diferente a la de la arena, como ya se comprobó anteriormente; esta última es de una consistencia más fina, mientras que el residuo presenta diámetros de partícula, por lo que la mezcla no se lleva a cabo de forma totalmente homogénea.

#### 5.3.4. Lixiviado.

Se realizaron los lixiviados de todas las corridas realizadas para ambos experimentos de sustitución, cemento y arena. Las muestras analizadas eran obtenidas cuando se llevaban a cabo las pruebas de resistencia a la compresión, al momento de desmoronarse el bloque, se tomaban algunos trozos y se guardaban en bolsas herméticas. Posteriormente, estas muestras se molieron y se tomaron inicialmente 5 g., para determinar el pH y así poder saber que reactivo de extracción se iba a utilizar.

Las muestras analizadas correspondientes al experimento de sustitución de cemento, así como el pH que se obtuvo al poner la muestra en contacto con agua (pH 1) y el pH que se obtuvo cuando la muestra fue puesta en contacto con HCl 1.0 N, y calentado a 50°C (pH 2), se muestran en la Tabla 5.18.

Tabla 5.18. pH de las muestras resultantes del experimento de sustitución de cemento.

Porcentaje de sustitución	pH 1	pH 2
0	10	2
5	10	3
15	10	3
25	10	2
35	10	3
50	10	2
65	10	3
75	10	2

Debido a que los valores para pH 2, son todos menores a 5, el reactivo a utilizar será el reactivo de extracción # 1. Por otro lado, los valores de pH para las muestras analizadas del experimento de sustitución de arena se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5.19. pH de las muestras resultantes del experimento de sustitución de arena.

Porcentaje de sustitución	pH 1	pH 2
25	10	3
50	10	3
75	10	2

Al igual que en el caso del experimento de sustitución de cemento, los valores para el pH 2 son menores a 5, por lo que en estas muestras también se utilizará el reactivo de extracción # 1.

Siguiendo con el análisis, se tomaron 100 g. de material por cada muestra, y se llevó a cabo la extracción, utilizando 2 L de reactivo. El líquido resultante, conteniendo reactivo de extracción y material lixiviado de las muestras, se refrigeró hasta que se tuvieron listos todos los análisis.

Se mandaron analizar de forma cualitativa, mediante un barrido electrónico, dos muestras: la del blanco, y la del 50% de sustitución de cemento. La que mostró un mayor número de elementos presentes fue esta última. El análisis se realizó considerando los siguientes elementos: Li, Be, B, Na, Mg, Al, Si, P, S, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Sr, Mo, Pd, Ag, Cd, Sn, Sb, Ba, Ta, W, Pt, Hg, Tl, Pb y Bi.

Los elementos principalmente encontrados en ambas corridas, así como el valor de su concentración aproximada por cada kilogramo de bloque, se muestran en la tabla 5.23. Es muy importante mencionar que estas concentraciones son preliminares y tienen aproximadamente un 20% de error.

Tabla 5.20. Elementos encontrados en el análisis cualitativo.

Porcentaje de sustitución	Na (g / kg)	Mg (g / kg)	Si (g / kg)	Sr (g / kg)	Ba (g / kg)
0 %	132.06	0.244	0.422	-	-
50 %	141.62	0.426	0.356	1.106	0.0362

Con base en estos elementos, las muestras se analizaron por Espectrofotometría de plasma, únicamente para el Estroncio (Sr), ya que fue el elemento presente en mayor cantidad. El Sodio (Na) no se consideró relevante, ya que el reactivo de extracción está preparado con NaOH, y de ahí la alta concentración preliminar que se obtiene. Los demás elementos presentan concentraciones muy bajas como para ser considerados relevantes.

Los resultados arrojados por este análisis, para las corridas correspondientes al experimento de sustitución de cemento, son los siguientes:

Tabla 5.21. Concentraciones para las muestras del experimento de sustitución de cemento.

Porcentaje de sustitución	Sr (g Sr lixiviado / kg bloque)
0 %	0.0332
5 %	0.8956
15 %	1.2516
25 %	1.6084
35 %	1.9172
50 %	2.2448
65 %	2.6912
75 %	2.7500

Como puede observarse en la tabla anterior, la cantidad de estroncio por kilogramo de bloque aumenta conforme aumenta la cantidad de residuo integrado en el bloque. El aumento en la cantidad de Sr presente en los bloques aumenta levemente en este punto, debido a que el cemento solamente representa el 10% de la composición de los bloques.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para este mismo análisis, para el caso del experimento de sustitución de arena:

Tabla 5.22. Concentraciones para las muestras del experimento de sustitución de arena.

Porcentaje de sustitución	Sr (g Sr lixiviado / kg bloque)
25 %	3.2444
50 %	4.1040
75 %	4.3000

Como puede observarse en la tabla anterior, la cantidad de residuo presente en los bloques es mayor a la cantidad presente en los bloques en los que se sustituye cemento; esto se debe a que la arena representa el 84.5% del peso de un bloque al momento de su fabricación. Sin embargo, es importante notar que la cantidad presente en los bloques obtenidos de este experimento, correspondientes al nivel de un 25% de sustitución, contienen poco más del doble de Sr que los bloques provenientes de la prueba de 15% de sustitución de cemento.

Es importante comentar que aunque no existe un parámetro toxicológico para el Sr, si existe una dosis de referencia (RfD) reportada, con un valor de  $6 \times 10^{-1}$  mg/kg/día, y bajo el supuesto que se diera el caso de que un niño rascara los bloques y se llevara las manos a la boca, considerando que el peso promedio de un niño es de 30 kg, se necesitarían tomar 18 mg/día de estroncio, lo cual equivaldría a 5.55 g. de bloques al día, por lo que no se considera que esto represente un riesgo para la salud humana.

## 5.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

Una vez que se han obtenido los resultados de todos los experimentos y pruebas realizadas, se procederá a discutir sobre los mismos, con el fin de saber si la alternativa propuesta es técnicamente factible e ir haciendo un preludeo sobre las conclusiones obtenidas en este trabajo.

### 5.4.1. Caracterización del residuo.

De los Análisis Físicos realizados al residuo se observa que la cantidad de metales presentes en el residuo, tales como el residuo, pudo haber contribuido en cierta forma al cambio en las propiedades de los bloques obtenidos, como es el caso del estroncio, que según los resultados obtenidos, pudo haber sustituido al calcio en la reacción de fraguado, y de esta forma, no afectó significativamente la resistencia a la compresión de los bloques.

La densidad del residuo fue importante, ya que por el valor que se obtuvo, éste pudo ser considerado un agregado de tipo normal, sin que la técnica para mezclar los componentes tuviera que diferir de la que se sigue normalmente para los agregados de tipo normal.

La característica física que si fue un factor decisivo, es la distribución granulométrica que el residuo presenta. El residuo se tiene dividido, según su tamaño, en dos grandes zonas: la primera es aquella con tamaño de partículas menores a la malla 5, y la otra está en el tamaño de partícula que se retiene en la malla 40, aunque si presenta un cierto porcentaje intermedio entre ambas mallas, teniendo un 2% que pasa la malla 100. Esto es importante ya que al momento de hacer la mezcla de los componentes, se tendrán algunas partículas de tamaño mayor que pueden afectar las características de los bloques fabricados.

### 5.4.2. Experimentos de la integración del residuo en la producción de bloques.

En el caso de los experimentos realizados no se tiene ninguna observación en particular, salvo las que mencionaron anteriormente sobre el mezclado y curado, sobre todo de la característica que presentaban los bloques con alto contenido de residuo, ya fuera para el experimento de sustitución de cemento y arena, que tenían una especie de salitre que los recubría.

### 5.4.3. Pruebas de calidad en bloques.

Con referencia al peso de los bloques, se observa que el peso de los bloques fabricados con el cálculo del lodo en base seca, para el experimento de sustitución de cemento, suele ser constante, con una variación ligera al cambiar el porcentaje de residuo utilizado en su fabricación, pero en general, este valor del peso está dentro de los valores normales de peso de bloques de este tamaño (normalmente pesan entre 10 y 11 kilogramos, según sean los compuestos con que están construidos).

Sin embargo, para el caso del experimento de sustitución de arena, si se observa una variación más notoria en el peso de los bloques con diferente porcentaje de arena sustituida. Esto se debe quizá a la fragilidad de la matriz formada, sobre todo para los porcentajes de 50 y 75% de sustitución, ya que como se mencionó anteriormente, el residuo presenta algunas partículas de tamaño mayor que no pueden ser totalmente mezcladas, y al fabricarse los bloques en el molde, estas partículas generan huecos en la matriz del bloque, mismos que se cree, le restan peso al producto final.

Para la prueba de absorción de agua, se sabe que el valor máximo de absorción de agua para los bloques de construcción de este tipo (Huecos, RBH 40) [4] es de  $290 \text{ L/m}^3$ , y según se observa en las gráficas, todos los bloques fabricados en los diferentes niveles del experimento de sustitución de cemento, están por debajo de este valor, siendo el valor más alto reportado de  $100.4 \pm 6.9 \text{ L/m}^3$  correspondiente al nivel de 15% de sustitución de cemento.

Por otro lado, para el experimento de sustitución de arena, el valor máximo registrado de absorción de agua para los bloques, es de  $156.66 \pm 3.146 \text{ L/m}^3$ , correspondiente al experimento de 50% de sustitución de arena.

En la prueba de resistencia a la compresión, el valor mínimo de resistencia aceptado por la norma [4] para este tipo de bloques, es de  $40 \text{ kg/cm}^2$ . De los bloques obtenidos del experimento de sustitución de cemento se observa que aquellos bloques con un 5% hasta un 15% de sustitución de cemento, cumplen con este valor. Nuevamente, se hace hincapié en que el valor de resistencia a la compresión se vería incrementado si se utilizara algún otro aditivo en la mezcla, tal como granito o sello, pero así, sin aditivo alguno que realce este valor, los porcentajes más bajos de sustitución si cumplen con el valor especificado.

Entonces, se puede afirmar que el porcentaje de sustitución de cemento que ofrece una mayor integración del residuo y que resulta en bloques que cumplen con las características deseadas, es el de 15% de sustitución de cemento, con  $48 \pm 4.8 \text{ Kg/cm}^2$ .

Para el experimento de sustitución de arena, sin embargo, se obtuvieron resultados un poco más satisfactorios en cuanto a utilización del residuo se refiere, ya que el porcentaje de sustitución menor que se probó, de 25%, cumple con este valor, pasando de los  $40 \text{ Kg/cm}^2$  de resistencia y llegando hasta un valor de  $47 \text{ kg/cm}^2$ .

Correspondiente a la prueba de lixiviado, se observa que ningún elemento extraído en el análisis muestra valores que conviertan a los bloques en un material peligroso, además de las cantidades obtenidas en forma de lixiviados, para los elementos presentes en los bloques, no representa un riesgo ambiental o humano, significando con esto que la utilización de estos bloques es recomendada desde el punto de vista ambiental.

## 5.5. FACTIBILIDAD ECONÓMICA.

Una vez que se ha concluido del punto anterior el porcentaje factible de integración del residuo en la fabricación de bloques de construcción, se procederá a analizar económicamente la factibilidad de esta alternativa propuesta. El análisis se hará considerando que los bloques fueran construidos a nivel industrial, de forma continua, y no en forma batch y más bien artesanal, como fue que se realizaron los experimentos de esta tesis de investigación.

Con el fin de simplificar un poco este análisis, únicamente se considerará que la empresa generadora quiere deshacerse del residuo, por lo que el único gasto en que incurriría aquella empresa de la construcción que quisiera fabricar los bloques con este residuo, sería el costo de transporte del residuo hasta sus instalaciones. Para esto, se considerarán aquellas empresas que se encuentran cerca de las principales zonas de extracción de materiales pétreos, ya que es en estas zonas en donde se concentran la mayoría de las bloqueras en la zona metropolitana de Monterrey.

Además, únicamente se considerarán los compuestos utilizados para la fabricación de los bloques según esta investigación, descartándose el costo de aquellos compuestos que pudieran utilizarse como aditivos.

En la siguiente tabla se muestran los costos promedio de los componentes principales de un bloque, así como del residuo, considerando el costo de éste como el costo del transporte y tomando en cuenta la transportación de 6 toneladas por viaje; el costo para el agua es el costo que esta tiene al ser distribuida para uso industrial en la zona metropolitana de Monterrey.

Tabla 5.23. Costo de componentes básicos.

Descripción	Costo (\$)
Arena (ton.)	121.74
Cemento (ton.)	1440
Residuo (ton.)	20
Agua (m <sup>3</sup> )	6.7113

La composición básica de un bloque carente de residuo, con un peso promedio de 10.5 Kg., generado en esta investigación es la siguiente:

Tabla 5.24. Composición básica de un bloque.

Compuesto	Porcentaje en peso	Peso (kg)	Costo unitario (\$ / bloque)
Arena	84.5	8.87	1.073
Cemento	10	1.05	1.512
Agua	5.5	0.58	0.004
		TOTAL	2.589

Y de los valores de esta tabla se obtiene la siguiente tabla, que muestra la composición de un bloque con un 15% de sustitución de cemento y 10.5 kg de peso:

Tabla 5.25. Composición básica de un bloque con 15% de sustitución de cemento.

Compuesto	Porcentaje en peso	Peso (kg)	Costo unitario (\$ / bloque)
Residuo	1.5	0.264	0.003
Arena	84.5	8.92	1.073
Cemento	8.5	0.792	1.285
Agua	5.5	0.58	0.004
TOTAL			2.365

Como se puede observar después de hacer una comparación entre las tablas 5.27 y 5.28, el costo de las materias primas disminuye cuando se integra el residuo a la mezcla con la que el bloque es fabricado. Para este caso, el ahorro por bloque, con el simple hecho de incorporar el residuo en la cantidad que se indica, es de \$0.224.

Para el caso de la sustitución de arena, en la siguiente tabla se muestran las cantidades de material a utilizar por bloque, y en la última columna, el costo de cada material. En este caso, se analiza la alternativa de integrar al residuo sustituyendo la arena utilizada en la fabricación de bloques en un 25%.

Tabla 5.26. Composición básica de un bloque con 25% de sustitución de arena.

Compuesto	Porcentaje en peso	Peso (kg)	Costo unitario (\$ / bloque)
Residuo	21.1	2.215	0.044
Arena	63.4	6.657	0.805
Cemento	10	1.05	1.512
Agua	5.5	0.58	0.004
TOTAL			2.365

En la tabla anterior se muestra el valor total del costo de materias primas para fabricar un bloque en el que se integre residuo, sustituyendo en un 25% a la arena utilizada normalmente. Curiosamente se observa que el valor total es igual al que se obtiene cuando se sustituye cemento en un 15%, sin embargo, es importante aclarar que la semejanza entre estos valores es meramente aleatoria.

De las dos tablas anteriores se puede concluir que considerando únicamente estos dos compuestos, el costo de las materias primas del bloque se vería disminuido en un 8.65%, considerando como mezcla básica la mezcla en la que no se integró el residuo.

Se sabe que diariamente se generan en la empresa 40 Ton. de residuo húmedo, lo que corresponde aproximadamente a 26 Ton. de residuo seco (el residuo generado tiene un 35% de humedad) , así como también se tiene conocimiento de que en una bloquera industrial se pueden fabricar hasta 20,000 bloques cada día.

Si se considera la opción de integrar el residuo sustituyendo cemento en un 15%, para poder producir 20,000 bloques diariamente se necesitarían 5.28 Ton. de residuo seco, por lo que no se considera que esta alternativa represente una solución al problema del residuo generado, aunque el poner en práctica esta alternativa, representaría grandes ahorros para la empresa, ya que se ahorrarían \$134,400 mensualmente, o bien, \$1'612,800 anuales; siendo éstos ahorros únicamente por materia prima.

De igual forma, se puede afirmar que el poner en práctica la alternativa de sustitución de arena en un 25% brindaría una solución al problema del residuo generado, ya que para producir 20,000 bloques con arena sustituida por residuo en un 25%, se necesitarían 44.3 toneladas diarias de residuo seco, por lo que se observa que en caso de que no se tuviera residuo acumulado, no se podría dar abasto a esta producción, y quizá sería necesario fabricar menos bloques con el residuo integrado diariamente.

Similares a los obtenidos para la alternativa de sustitución de cemento, los ahorros en materia prima que representaría el fabricar 20,000 bloques al día con residuo integrado en un 25% como arena, son de \$134,400 por mes y \$1'612,800 al año.

Se espera que al utilizar agregados y disminuir la cantidad de agentes cementantes, tales como el cemento, en la mezcla, el costo de las materias primas de los bloques se vea más reducido de forma notoria, sobre todo en el caso del cemento, ya que para fines de esta investigación, la cantidad utilizada de cemento fue mayor a la que se utiliza convencionalmente.

De aquí también se observa que no existe ningún tipo de inversión en equipo, ni en operación, por lo que la implantación de esta alternativa propuesta no requiere de costo alguno, y si podría traer beneficios económicos para aquella bloquera que se decida por utilizar el residuo en las proporciones que se especifican en este trabajo.

## 6. CONCLUSIONES.

En este capítulo se muestran las conclusiones generales y particulares a las que se llegó mediante la aplicación de la metodología establecida. Durante el presente trabajo de investigación se ha buscado una integración del residuo generado por la empresa en la fabricación de bloques para construcción.

### 6.1 CONCLUSIONES GENERALES.

- Es posible la integración del residuo en la fabricación de bloques para construcción que cumplan con las características requeridas por las normas oficiales mexicanas. Esta integración se cumple cuando el residuo sustituye la cantidad de cemento utilizada en un 15%, o bien, la cantidad de arena utilizada en un 25%.
- La alternativa de integración del residuo que se propone es muy sencilla de implementar, ya que no requiere de ninguna inversión de capital, y la única inversión que requiere es la capacitación de los trabajadores que se dedican a pesar los materiales para la mezcla de los bloques.
- Esta alternativa de integración de residuo puede servir como base a aquellas empresas de un giro productivo similar que pretendan implementar programas de aprovechamiento de residuos, ya que este residuo se puede integrar no solamente a los bloques para construcción, sino a materiales de construcción diferentes, tales como lozas, adoquines, bloques sin huecos, etc.
- Esta alternativa de integración aporta beneficios económicos considerables a aquella empresa que esté dispuesta a variar la formulación de sus bloques, utilizando en esta el porcentaje de residuo indicado.

#### 6.1.1. Conclusiones Particulares.

- El incorporar el residuo en la mezcla de fabricación de los bloques si presenta efectos en las dos características de calidad más deseadas en un bloque: resistencia a la compresión y absorción de agua, ya que disminuye de forma considerable la resistencia a la compresión y por otro lado, aumenta la capacidad de absorción de agua de los bloques; sin embargo, si se utilizan los porcentajes recomendados, si se cumplen los valores especificados por las normas.

- Los resultados indican que la resistencia a la compresión para los bloques con un 15 % de cemento sustituido por residuo es de  $48.06 \text{ Kg/cm}^2$ , y el agua absorbida es de  $100.417 \text{ L/m}^3$ , valores que cumplen con los especificados por las normas oficiales mexicanas, que son  $290 \text{ L/m}^3$  para la absorción de agua y  $40 \text{ Kg/cm}^2$  para la resistencia a la compresión.
- Es posible que la disminución en el valor de la resistencia se deba a la presencia de Sr y  $\text{SO}_4$ , ya que estos compuestos pueden retardar el fraguado correcto para los bloques, además de que al sustituir cemento con residuo se disminuye la cantidad de silicatos que se están formando y que producen el gel de silicato hidratado de calcio.
- Asimismo, según los valores obtenidos para las pruebas de calidad, es posible integrar el residuo como agregado, siendo la integración en un 25% aquella que cumple con los requisitos de calidad. La resistencia a la compresión que ofrecen estos bloques son de  $47.25 \text{ Kg/cm}^2$  y el agua absorbida es de  $125.417 \text{ L/m}^3$ .
- La disminución en la resistencia a la compresión cuando el residuo se trata como un agregado, se debe principalmente a que las características físicas del residuo difieren de las características brindadas por un agregado, especialmente la granulometría.

## 6.2. RECOMENDACIONES.

- La utilización de algunos agregados, tales como el granito o el sello, pueden aumentar los valores de la resistencia a la compresión presentados por los bloques fabricados con un 25% de sustitución de cemento, por lo que sería conveniente hacer unas pruebas a nivel piloto para ver que tanto se pueden mejorar ambos valores.
- El tipo de curado utilizado para el fraguado de los bloques es muy importante y afecta enormemente los resultados obtenidos de las pruebas de calidad, por lo que se propone experimentar a nivel piloto, utilizando un curado por aspersión o vapor.
- Una recomendación muy importante es la de tamizar, o en el mejor de los casos, moler el residuo, con el fin de que el tamaño de partícula no sea muy variable, y sea mayor de la malla 5, con el fin de que no se presenten mezclas no homogéneas que puedan afectar la calidad de los bloques obtenidos.
- Finalmente, se propone la utilización del residuo húmedo y exento de  $\text{SrSO}_4$ , debido a que el residuo húmedo cuenta con un porcentaje mayor de  $\text{Ca(OH)}_2$ , mismo que podría intervenir en la reacción de formación de silicatos cálcicos, y al estar libre del  $\text{SrSO}_4$  las reacciones de fraguado no se verían afectadas por los compuestos azufrados dispersos en la mezcla, y los bloques presentarían mejores resistencias a la compresión.

# BIBLIOGRAFÍA.

1. Estadísticas del Medio Ambiente, INEGI, SEMARNAP, México, 1997.
2. "World business council for sustainable development",  
[Http://www.wbcsd.ch/coeff1.html](http://www.wbcsd.ch/coeff1.html).
3. "Programa de minimización de residuos industriales peligrosos", INE, México, 1997,  
[Http://www.ine.gob.mx/programas/prog-rip/presenta.htm](http://www.ine.gob.mx/programas/prog-rip/presenta.htm).
4. Normas de cemento.
5. Freeman, H.M, "Hazardous Waste Minimization", 1990.
6. "Identifying promising pollution prevention", Journal of Environmental Engineering, V. 120, No. 3, May. 1994.
7. Schoenberger, R., "Waste management philosophy emphasizes recovery/reuse", Pollution Engineering, V. 22, No. 88, Sept. 1990.
8. Hornbostel, C., "Materiales para construcción: Tipos, usos y aplicaciones", Limusa, 1998.
9. Brantley, L., "Building Materials Technology: Structural performance and environmental impact", McGraw-Hill, 1996.
10. Manual para la fabricación de bloques.
11. "Building construction: - The history of building construction",  
[Http://www.eb.com:180/cgi-bin/g?Do...levance&config=config&firsthit=off](http://www.eb.com:180/cgi-bin/g?Do...levance&config=config&firsthit=off).
12. Bianchina, P., "Builder's guide to new materials and techniques", McGraw-Hill, 1997.
13. Anuario estadístico del Estado de Nuevo León, INEGI, 1997.
14. "Bricks rise from the ashes", New Scientist, Vol. 103, Aug. 2, 1984, p. 39.
15. US Patent, 5236655, "Process for processing last waste into blocks", Ago. 17, 1993.

16. US Patent, 5241795, "Building materials made from waste and unusual properties thereof", Sept. 7, 1993.
17. Bianchina, P., "Builder's guide to new materials and techniques", McGraw-Hill, 1997.
18. US Patent, 5405441, "Fly ash composition and proces for making articles therefrom", Apr. 11, 1995.
19. US Patent, 5346549, "Environmentally stabilized products formed from ash and papermill waste", Sept. 13, 1994.
20. US Patent, 5350451, "Building material made from waste paper and method for producing the same", Sept. 27, 1994.
21. US Patent, 5789477, "Composite building materials from recyclable waste", Aug. 4, 1998.
22. Conway, R., "Hazardous and industrial solid waste minimization practices", ASTM, 1989.
23. Derr, W., "Plan for the future with Pollution Prevention", Chemical Engineering Progress, Jan. 1993, pp. 24-29.
24. Chadha, N., "Develop multimedia Pollution Prevention strategies", Chemical Engineering Progress, Nov. 1994, pp. 32-39.
25. Blanks, R., "The technology of cement and concrete", John Wiley and Sons, USA, 1955.
26. Taylor, H., "La química de los cementos", V.1, Ed. Urmo, España, 1978.
27. CRC, "Handbook of Chemistry and Physics", 57<sup>a</sup> edición, CRC Press, 1977.

## **Apéndice A**

### **Datos de los experimentos realizados**

## EXPERIMENTOS REALIZADOS.

### Sustitución de cemento.

A continuación se muestran los experimentos realizados, en orden cronológico, considerando las dos repeticiones que se tuvieron que hacer para la verificación de la resistencia y el peso de los bloques, haciendo notar que en esta última, el peso del residuo está en base seca.

Corrida	Porcentaje de sustitución	Fecha de manufactura	Cemento (kg)	Residuo (kg)	Arena (kg)	Agua (L)	Número de bloques obtenidos
1	25	Feb. 2, 99	3.9	1.3	44	2.88	2
2	50	Feb. 3, 99	2.6	2.6	44	2.88	3
3	50	Feb. 3, 99	3.2	3.2	54	3.5	4
4	15	Feb. 3, 99	5.44	0.96	54	3.5	5.5
5	15	Feb. 3, 99	3.41	0.66	33.8	2.2	3
6	0	Feb. 4, 99	6.4	0	54	3.5	5
6	0	Feb. 4, 99	3.2	0	27	1.8	3
7	35	Feb. 4, 99	3.64	1.96	47.3	3.08	4.5
8	35	Feb. 4, 99	3.38	1.82	44	2.88	4
9	25	Feb. 10, 99	3.9	1.3	44	2.88	4.5
10	25	Feb. 10, 99	3.6	1.2	40.56	2.64	3.5
11	5	Feb. 10, 99	4.94	0.26	44	2.88	4
12	5	Feb. 10, 99	4.94	0.26	44	2.88	4
13	65	Feb. 10, 99	1.82	3.38	44	2.88	4
14	65	Feb. 10, 99	1.82	3.38	44	2.88	4
15	75	Feb. 10, 99	1.3	3.9	44	2.88	4
16	75	Feb. 10, 99	1.3	3.9	44	2.88	4
17	50	Feb. 10, 99	2.6	2.6	44	2.88	4
18	0	Feb. 10, 99	5.2	0	44	2.88	4
19	0	Mar. 3, 99	5.2	0	44	2.88	4
20	5	Mar. 3, 99	4.94	0.26	44	2.88	4
21	15	Mar. 3, 99	4.42	0.78	44	2.88	4
22	25	Mar. 3, 99	3.9	1.3	44	2.88	4
23	35	Mar. 3, 99	3.38	1.82	44	2.88	4
24	50	Mar. 3, 99	2.6	2.6	44	2.88	4
25	5	Mar. 17, 99	4.94	0.298	44	2.88	4
26	15	Mar. 17, 99	4.42	0.896	44	2.88	4
27	25	Mar. 17, 99	3.9	1.493	44	2.88	4
28	35	Mar. 17, 99	3.38	2.093	44	2.88	4
29	50	Mar. 17, 99	2.6	2.986	44	2.88	4
30	65	Mar. 17, 99	1.82	3.882	44	2.88	4
31	75	Mar. 17, 99	1.3	4.47	44	2.88	4

Compuesto	Humedad*
Residuo	0.1497
Arena	0.00828
Cemento	0.00583

\* La humedad está en gramos de agua por gramo de compuesto seco.

## EXPERIMENTOS REALIZADOS.

### Sustitución de arena.

A continuación se muestran los experimentos realizados, en orden cronológico, considerando la repetición que se tuvo que hacer para la verificación de la tendencia en el peso de los bloques, haciendo notar que en esta última, el peso del residuo está en base seca.

Corrida	Porcentaje de sustitución	Fecha de manufactura	Cemento (kg)	Residuo (kg)	Arena (kg)	Agua (L)	Número de bloques obtenidos
A	25	Feb. 11, 99	5.2	11	33	4	4
B	50	Feb. 12, 99	4.7	20	20	5	4
C	75	Feb. 12, 99	5.2	33	11	5.6	6
D	75	Feb. 12, 99	2.4	15.21	5.07	2.5	2
E	50	Feb. 12, 99	4.7	20	20	5.1	4
F	25	Feb. 12, 99	5.2	11	33	4.1	4
G	0	Mar. 17, 99	5.2	12.634	33	5	4
H	35	Mar. 17, 99	5.2	25.268	22	5.5	4

## **Apéndice B**

### **Resultados de las pruebas de calidad realizadas**

**PESO DE LOS BLOQUES.**

**Sustitución de cemento.**

pm - Promedio

s - Desv. Std.

Corrida	Porcentaje de sustitución	Fecha de manufactura del bloque	Fecha de realización de la prueba	Peso promedio (kg)	pm	p - pm	(p - pm) <sup>2</sup>	n	s
6	0	Feb. 4, 99	Feb. 17, 99	11.02	10.5633	0.4567	0.2085	6	0.3422
6	0	Feb. 4, 99	Feb. 17, 99	10.4		-0.1633	0.0267		
6	0	Feb. 4, 99	Feb. 17, 99	10.39		-0.1733	0.0300		
18	0	Feb. 11, 99	Feb. 25, 99	10.98		0.4167	0.1736		
18	0	Feb. 11, 99	Feb. 25, 99	10.33		-0.2333	0.0544		
18	0	Feb. 11, 99	Feb. 25, 99	10.26		-0.3033	0.0920		
11	5	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	10.25	10.5883	-0.3383	0.1145	6	0.4088
11	5	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	10.5		-0.0883	0.0078		
11	5	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	11.21		0.6217	0.3865		
12	5	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	10.32		-0.2683	0.0720		
12	5	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	10.98		0.3917	0.1534		
12	5	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	10.27		-0.3183	0.1013		
4	15	Feb. 3, 99	Feb. 17, 99	9.98	10.3217	-0.3417	0.1167	6	0.3236
4	15	Feb. 3, 99	Feb. 17, 99	10.43		0.1083	0.0117		
4	15	Feb. 3, 99	Feb. 17, 99	10.9		0.5783	0.3345		
5	15	Feb. 3, 99	Feb. 17, 99	10.28		-0.0417	0.0017		
5	15	Feb. 3, 99	Feb. 17, 99	10.25		-0.0717	0.0051		
5	15	Feb. 3, 99	Feb. 17, 99	10.09		-0.2317	0.0537		
9	25	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	10	10.0767	-0.0767	0.0059	6	0.2754
9	25	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	9.85		-0.2267	0.0514		
9	25	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	9.67		-0.4067	0.1654		
10	25	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	10.61		0.5333	0.2844		
10	25	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	10.27		0.1933	0.0374		
10	25	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	10.06		-0.0167	0.0003		

**PESO DE LOS BLOQUES.**

*Continuación.*

Corrida	Porcentaje de sustitución	Fecha de manufactura del bloque	Fecha de realización de la prueba	Peso promedio (kg)	pm	p - pm	(p - pm) <sup>2</sup>	n	s
7	35	Feb. 4, 99	Feb. 17, 99	9.85	10.2317	-0.3817	0.1457	6	0.4046
7	35	Feb. 4, 99	Feb. 17, 99	10.84		0.6083	0.3701		
7	35	Feb. 4, 99	Feb. 17, 99	9.82		-0.4117	0.1695		
8	35	Feb. 4, 99	Feb. 17, 99	10.36		0.1283	0.0165		
8	35	Feb. 4, 99	Feb. 17, 99	10.5		0.2683	0.0720		
8	35	Feb. 4, 99	Feb. 17, 99	10.02		-0.2117	0.0448		
3	50	Feb. 3, 99	Feb. 17, 99	10.17	10.1183	0.0517	0.0027	6	0.1169
3	50	Feb. 3, 99	Feb. 17, 99	10.28		0.1617	0.0261		
3	50	Feb. 3, 99	Feb. 17, 99	10.07		-0.0483	0.0023		
17	50	Feb. 10, 99	Feb. 25, 99	9.99		-0.1283	0.0165		
17	50	Feb. 10, 99	Feb. 25, 99	10		-0.1183	0.0140		
17	50	Feb. 10, 99	Feb. 25, 99	10.2		0.0817	0.0067		
13	65	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	9.83	9.7883	0.0417	0.0017	6	0.0950
13	65	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	9.86		0.0717	0.0051		
13	65	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	9.74		-0.0483	0.0023		
14	65	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	9.84		0.0517	0.0027		
14	65	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	9.61		-0.1783	0.0318		
14	65	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	9.85		0.0617	0.0038		
15	75	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	9.49	9.7000	-0.2100	0.0441	6	0.2164
15	75	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	9.58		-0.1200	0.0144		
15	75	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	9.48		-0.2200	0.0484		
16	75	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	9.66		-0.0400	0.0016		
16	75	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	10		0.3000	0.0900		
16	75	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	9.99		0.2900	0.0841		

**PESO DE LOS BLOQUES. REPETICIÓN DE LAS PRUEBAS.**

Esta repetición se hizo con el fin de verificar la resistencia a la compresión de los bloques.

**Sustitución de cemento.**

Corrida	Porcentaje de sustitución	Fecha de manufactura del bloque	Fecha de realización de la prueba	Peso promedio (kg)	pm	p - pm	(p - pm) <sup>2</sup>	n	s
19	0	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	10.32	10.1700	0.1500	0.0225	3	0.1521
19	0	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	10.16		-0.0100	0.0001		
19	0	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	10.03		-0.1400	0.0196		
20	5	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	10.14	10.1867	-0.0467	0.0022	3	0.0931
20	5	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	10.19		0.0033	0.0000		
20	5	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	10.23		0.0433	0.0019		
21	15	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	10.58	10.5233	0.0567	0.0032	3	0.1651
21	15	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	10.56		0.0367	0.0013		
21	15	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	10.43		-0.0933	0.0087		
22	25	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	10.12	10.0133	0.1067	0.0114	3	0.2266
22	25	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	9.85		-0.1633	0.0267		
22	25	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	10.07		0.0567	0.0032		
23	35	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	9.95	9.9600	-0.0100	0.0001	3	0.3088
23	35	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	9.79		-0.1700	0.0289		
23	35	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	10.14		0.1800	0.0324		
24	50	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	9.65	9.8067	-0.1567	0.0245	3	0.2542
24	50	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	10.1		0.2933	0.0860		
24	50	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	9.67		-0.1367	0.0187		

## PESO DE LOS BLOQUES. REPETICIÓN DE LAS PRUEBAS.

Esta repetición se hizo con el fin de verificar la tendencia en el peso de los bloques. La cantidad de lodo utilizada en la mezcla fue calculada en base seca.

### Sustitución de cemento.

Corrida	Porcentaje de sustitución	Fecha de manufactura del bloque	Fecha de realización de la prueba	Peso promedio (kg)	pm	p - pm	(p - pm) <sup>2</sup>	n	s
25	5	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	10.13	10.1033	0.0267	0.0007	3	0.0306
25	5	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	10.07		-0.0333	0.0011		
25	5	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	10.11		0.0067	0.0000		
26	15	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	10.25	10.2233	0.0267	0.0007	3	0.0379
26	15	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	10.24		0.0167	0.0003		
26	15	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	10.18		-0.0433	0.0019		
27	25	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	10.2	10.2200	-0.0200	0.0004	3	0.0346
27	25	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	10.2		-0.0200	0.0004		
27	25	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	10.26		0.0400	0.0016		
28	35	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	10.04	10.1100	-0.0700	0.0049	3	0.0624
28	35	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	10.16		0.0500	0.0025		
28	35	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	10.13		0.0200	0.0004		
29	50	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	10.18	10.1600	0.0200	0.0004	3	0.1808
29	50	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	10.33		0.1700	0.0289		
29	50	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	9.97		-0.1900	0.0361		
30	65	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	10.11	10.1833	-0.0733	0.0054	3	0.0643
30	65	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	10.23		0.0467	0.0022		
30	65	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	10.21		0.0267	0.0007		
31	75	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	10.27	10.1033	0.1667	0.0278	3	0.1443
31	75	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	10.02		-0.0833	0.0069		
31	75	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	10.02		-0.0833	0.0069		

**PESO DE LOS BLOQUES.**

**Sustitución de arena.**

Corrida	Porcentaje de sustitución	Fecha de manufactura del bloque	Fecha de realización de la prueba	Peso promedio (kg)	pm	p - pm	(p - pm) <sup>2</sup>	n	s
A	25	Feb. 11, 99	Feb. 25, 99	10.02	9.9683	0.0517	0.0027	6	0.1852
A	25	Feb. 11, 99	Feb. 25, 99	9.89		-0.0783	0.0061		
A	25	Feb. 11, 99	Feb. 25, 99	9.65		-0.3183	0.1013		
F	25	Feb. 12, 99	Mar. 1, 99	10.05		0.0817	0.0067		
F	25	Feb. 12, 99	Mar. 1, 99	10		0.0317	0.0010		
F	25	Feb. 12, 99	Mar. 1, 99	10.2		0.2317	0.0537		
B	50	Feb. 12, 99	Mar. 1, 99	9.33	9.3967	-0.0667	0.0044	6	0.0493
B	50	Feb. 12, 99	Mar. 1, 99	9.4		0.0033	0.0000		
B	50	Feb. 12, 99	Mar. 1, 99	9.4		0.0033	0.0000		
E	50	Feb. 12, 99	Feb. 26, 99	9.37		-0.0267	0.0007		
E	50	Feb. 12, 99	Feb. 26, 99	9.48		0.0833	0.0069		
E	50	Feb. 12, 99	Feb. 26, 99	9.4		0.0033	0.0000		
C	75	Feb. 12, 99	Feb. 26, 99	8.24	8.2475	-0.0075	0.0001	4	0.0050
C	75	Feb. 12, 99	Feb. 26, 99	8.25		0.0025	0.0000		
C	75	Feb. 12, 99	Feb. 26, 99	8.25		0.0025	0.0000		
C	75	Feb. 12, 99	Feb. 26, 99	8.25		0.0025	0.0000		

## PESO DE LOS BLOQUES. REPETICIÓN DE LAS PRUEBAS

Esta repetición se hizo con el fin de verificar la tendencia en el peso de los bloques. La cantidad de lodo utilizada en la mezcla fue calculada en base seca.

### Sustitución de arena.

Corrida	Porcentaje de sustitución	Fecha de manufactura del bloque	Fecha de realización de la prueba	Peso promedio (kg)	pm	p - pm	$(p - pm)^2$	n	s
G	25	Mar. 17. 99	Abr. 5, 99	10.17	10.1600	0.0100	0.0001	3	0.0173
G	25	Mar. 17. 99	Abr. 5, 99	10.17		0.0100	0.0001		
G	25	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	10.14		-0.0200	0.0004		
H	50	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	9.72	9.5533	0.1667	0.0278	3	0.1563
H	50	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	9.41		-0.1433	0.0205		
H	50	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	9.53		-0.0233	0.0005		

**ABSORCIÓN DE AGUA.**

**Sustitución de cemento.**

Volumen del bloque: 0.008 m<sup>3</sup>

Corrida	Porcentaje de sustitución	Fecha de manufactura del bloque	Fecha de realización de la prueba	Peso Húmedo (kg)	Peso seco (kg)	Agua Absorbida (kg)	Absorción de Agua (L/m <sup>3</sup> )	pm	p - pm	(p - pm) <sup>2</sup>	n	s
6	0	Feb. 4, 99	Feb. 17, 99	11.38	10.74	0.64	80	80.833	-0.8333	0.6944	3	2.6021
18	0	Feb. 4, 99	Feb. 17, 99	11.19	10.56	0.63	78.75		-2.0833	4.3403		
18	0	Feb. 4, 99	Feb. 17, 99	11.46	10.79	0.67	83.75		2.9167	8.5069		
11	5	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	11.55	10.87	0.68	85	83.750	1.2500	1.5625	3	1.2500
12	5	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	11.34	10.68	0.66	82.5		-1.2500	1.5625		
12	5	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	10.68	10.01	0.67	83.75		0.0000	0.0000		
4	15	Feb. 3, 99	Feb. 17, 99	10.49	9.66	0.83	103.75	100.417	3.3333	11.1111	3	6.8845
4	15	Feb. 3, 99	Feb. 17, 99	10.96	10.12	0.84	105		4.5833	21.0069		
4	15	Feb. 3, 99	Feb. 17, 99	11.36	10.62	0.74	92.5		-7.9167	62.6736		
9	25	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	10.64	9.87	0.77	96.25	97.500	-1.2500	1.5625	3	2.1651
9	25	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	10.44	9.67	0.77	96.25		-1.2500	1.5625		
9	25	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	10.27	9.47	0.8	100		2.5000	6.2500		
8	35	Feb. 4, 99	Feb. 17, 99	10.74	10.03	0.71	88.75	92.083	-3.3333	11.1111	3	5.2705
8	35	Feb. 4, 99	Feb. 17, 99	10.98	10.19	0.79	98.75		6.6667	44.4444		
8	35	Feb. 4, 99	Feb. 17, 99	10.42	9.71	0.71	88.75		-3.3333	11.1111		
17	50	Feb. 10, 99	Feb. 25, 99	10.65	9.89	0.76	95	97.083	-2.0833	4.3403	3	1.9094
17	50	Feb. 10, 99	Feb. 25, 99	10.68	9.89	0.79	98.75		1.6667	2.7778		
17	50	Feb. 10, 99	Feb. 25, 99	10.67	9.89	0.78	97.5		0.4167	0.1736		
13	65	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	10.53	9.71	0.82	102.5	100.833	1.6667	2.7778	3	2.8868
13	65	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	10.51	9.73	0.78	97.5		-3.3333	11.1111		
13	65	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	10.45	9.63	0.82	102.5		1.6667	2.7778		
15	75	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	10.26	9.42	0.84	105	99.167	5.8333	34.0278	3	5.0518
15	75	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	10.28	9.51	0.77	96.25		-2.9167	8.5069		
15	75	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	10.2	9.43	0.77	96.25		-2.9167	8.5069		



**RESISTENCIA A LA COMPRESION.**

**Sustitución de cemento.**

Corrida	Porcentaje de sustitución	Fecha de manufactura del bloque	Fecha de realización de la prueba	Esfuerzo máximo (kg/cm <sup>2</sup> )	pm	p - pm	(p - pm) <sup>2</sup>	n	s
6	0	Feb. 4, 99	Feb. 17, 99	55.36	58.4900	-3.1300	9.7969	3	2.9504
6	0	Feb. 4, 99	Feb. 17, 99	61.22		2.7300	7.4529		
6	0	Feb. 4, 99	Feb. 17, 99	58.89		0.4000	0.1600		
11	5	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	40.71	41.6267	-0.9167	0.8403	3	1.1667
11	5	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	41.23		-0.3967	0.1573		
12	5	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	42.94		1.3133	1.7248		
4	15	Feb. 3, 99	Feb. 17, 99	40.29	47.1525	-6.8625	47.0939	4	4.7087
4	15	Feb. 3, 99	Feb. 17, 99	47.91		0.7575	0.5738		
5	15	Feb. 3, 99	Feb. 17, 99	49.88		2.7275	7.4393		
5	15	Feb. 3, 99	Feb. 17, 99	50.53		3.3775	11.4075		
9	25	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	34.35	35.7025	-1.3525	1.8293	4	2.2183
10	25	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	38.31		2.6075	6.7991		
10	25	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	33.44		-2.2625	5.1189		
10	25	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	36.71		1.0075	1.0151		
7	35	Feb. 4, 99	Feb. 17, 99	20.56	19.1175	1.4425	2.0808	4	1.4950
7	35	Feb. 4, 99	Feb. 17, 99	17.52		-1.5975	2.5520		
8	35	Feb. 4, 99	Feb. 17, 99	18.18		-0.9375	0.8789		
8	35	Feb. 4, 99	Feb. 17, 99	20.21		1.0925	1.1936		

**RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.***Continuación.*

Corrida	Porcentaje de sustitución	Fecha de manufactura del bloque	Fecha de realización de la prueba	Esfuerzo máximo (kg/cm <sup>2</sup> )	pm	p - pm	(p - pm) <sup>2</sup>	n	s
3	50	Feb. 3, 99	Feb. 17, 99	42.31	41.9233	0.3867	0.1495	3	2.3935
3	50	Feb. 3, 99	Feb. 17, 99	39.36		-2.5633	6.5707		
3	50	Feb. 3, 99	Feb. 17, 99	44.1		2.1767	4.7379		
14	65	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	16.6	18.1733	-1.5733	2.4754	3	3.3040
14	65	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	15.95		-2.2233	4.9432		
14	65	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	21.97		3.7967	14.4147		
16	75	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	9.585	12.2583	-2.6733	7.1467	3	2.9112
16	75	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	11.83		-0.4283	0.1835		
16	75	Feb. 10, 99	Feb. 22, 99	15.36		3.1017	9.6203		

## RESISTENCIA A LA COMPRESION. REPETICIÓN DE LAS PRUEBAS.

Esta repetición se realizó con el propósito de verificar la tendencia en el comportamiento de la resistencia a la compresión de los bloques.

### Sustitución de cemento.

Corrida	Porcentaje de sustitución	Fecha de manufactura del bloque	Fecha de realización de la prueba	Esfuerzo maximo (kg/cm <sup>2</sup> )	pm	p - pm	(p - pm) <sup>2</sup>	n	s
19	0	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	59.700	62.5667	-2.8667	8.2178	3.0000	2.6323
19	0	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	64.875		2.3083	5.3284		
19	0	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	63.125		0.5583	0.3117		
20	5	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	56.825	55.450	1.3750	1.8906	3.0000	3.0082
20	5	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	57.525		2.0750	4.3056		
20	5	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	52.000		-3.4500	11.9025		
21	15	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	38.850	45.000	-6.1500	37.8225	3.0000	6.7520
21	15	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	52.225		7.2250	52.2006		
21	15	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	43.925		-1.0750	1.1556		
22	25	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	36.575	39.400	-2.8250	7.9806	3.0000	7.0975
22	25	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	34.150		-5.2500	27.5625		
22	25	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	47.475		8.0750	65.2056		
23	35	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	27.475	28.100	-0.6250	0.3906	3.0000	1.8199
23	35	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	30.150		2.0500	4.2025		
23	35	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	26.675		-1.4250	2.0306		
24	50	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	20.475	21.183	-0.7083	0.5017	3.0000	4.4302
24	50	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	25.925		4.7417	22.4834		
24	50	Mar. 3, 99	Mar. 18, 99	17.150		-4.0333	16.2678		

## RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN. REPETICIÓN DE LAS PRUEBAS.

Esta repetición se hizo con el fin de verificar la tendencia en el peso de los bloques. La cantidad de lodo utilizada en la mezcla fue calculada en base seca.

### Sustitución de cemento.

Corrida	Porcentaje de sustitución	Fecha de manufactura del bloque	Fecha de realización de la prueba	Esfuerzo maximo (kg/cm <sup>2</sup> )	pm	p - pm	(p - pm) <sup>2</sup>	n	s
25	5	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	52.02	52.9633	-0.9433	0.8899	3	4.7163
25	5	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	48.79		-4.1733	17.4167		
25	5	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	58.08		5.1167	26.1803		
26	15	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	48.76	48.0600	0.7000	0.4900	3	4.7588
26	15	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	42.99		-5.0700	25.7049		
26	15	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	52.43		4.3700	19.0969		
27	25	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	37.55	37.6600	-0.1100	0.0121	3	0.4258
27	25	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	38.13		0.4700	0.2209		
27	25	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	37.3		-0.3600	0.1296		
28	35	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	28.84	27.6567	1.1833	1.4003	3	1.6203
28	35	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	28.32		0.6633	0.4400		
28	35	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	25.81		-1.8467	3.4102		
29	50	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	25.6	22.7167	2.8833	8.3136	3	2.5867
29	50	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	21.95		-0.7667	0.5878		
29	50	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	20.6		-2.1167	4.4803		
30	65	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	13	13.6500	-0.6500	0.4225	3	0.5693
30	65	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	14.06		0.4100	0.1681		
30	65	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	13.89		0.2400	0.0576		
31	75	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	11.07	11.2533	-0.1833	0.0336	3	0.9681
31	75	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	12.3		1.0467	1.0955		
31	75	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	10.39		-0.8633	0.7453		

**RESISTENCIA A LA COMPRESION.****Sustitución de arena.**

Corrida	% de sustitución	Fecha de manufactura del bloque	Fecha de realización de la prueba	Esfuerzo maximo (kg/cm <sup>2</sup> )	pm	p - pm	(p - pm) <sup>2</sup>	n	s
A	25	Feb. 11, 99	Feb. 25, 99	34.05	30.2867	3.7633	14.1627	3	3.6285
F	25	Feb. 12, 99	Feb. 26, 99	26.81		-3.4767	12.0872		
F	25	Feb. 12, 99	Feb. 26, 99	30		-0.2867	0.0822		
E	30	Feb. 12, 99	Feb. 26, 99	22.22	22.7433	-0.5233	0.2739	3	0.8978
E	50	Feb. 12, 99	Feb. 26, 99	23.78		1.0367	1.0747		
E	50	Feb. 12, 99	Feb. 26, 99	22.23		-0.5133	0.2635		
C	75	Feb. 12, 99	Feb. 26, 99	14.31	12.3250	1.9850	3.9402	2	2.8072
C	75	Feb. 12, 99	Feb. 26, 99	10.34		-1.9850	3.9402		
C	75	Feb. 12, 99	Feb. 26, 99	-		-	-		

### RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN. REPETICIÓN DE LAS PRUEBAS.

Esta repetición se hizo con el fin de verificar la tendencia en el peso de los bloques. La cantidad de lodo utilizada en la mezcla fue calculada en base seca.

#### Sustitución de arena.

Corrida	Porcentaje de sustitución	Fecha de manufactura del bloque	Fecha de realización de la prueba	Esfuerzo maximo (kg/cm <sup>2</sup> )	pm	p - pm	(p - pm) <sup>2</sup>	n	s
G	25	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	44.5	47.2467	-2.7467	7.5442	3	2.3929
G	25	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	48.88		1.6333	2.6678		
G	25	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	48.36		1.1133	1.2395		
H	50	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	21.11	23.3833	-2.2733	5.1680	3	3.0351
H	50	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	22.21		-1.1733	1.3767		
H	50	Mar. 17, 99	Abr. 5, 99	26.83		3.4467	11.8795		

## **Apéndice C**

### **Descripción de las pruebas realizadas al residuo.**

## CARACTERIZACIÓN DEL RESIDUO

La composición en base seca reportada para el residuo húmedo (esto es, el que se tiene al salir del filtro rotatorio) se muestra en la siguiente tabla. Ahí se comparan los resultados obtenidos después de realizar un balance de materia a la salida del filtro, y los resultados que reportó el CIDEMAC después de un análisis de Difracción de Rayos X.

Compuesto	% Peso (Base Seca)	
	Reportado	CIDEMAC
Ca(OH) <sub>2</sub>	48.99	50
SrCO <sub>3</sub>	18.99	20
Ca(SO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 12 H <sub>2</sub> O	14.00	15
SrSO <sub>4</sub>	8.99	10
SrSO <sub>3</sub>	4.00	5
SrS	2.15	-
CaF <sub>2</sub>	0.68	-
BaS	0.06	-
Otros	1.10	-

El porcentaje en peso de calcio total es de 28.68%, y para el estroncio este valor es de 19.21%.

- Coloración.

Compuesto	Color
Ca(OH) <sub>2</sub>	Incoloro
SrCO <sub>3</sub>	Incoloro
Ca(SO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 12 H <sub>2</sub> O	Incoloro
SrSO <sub>4</sub>	Incoloro
SrSO <sub>3</sub>	Incoloro
SrS	Amarillo
CaF <sub>2</sub>	Incoloro
S	Amarillo
S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Verde azulado

De estas coloraciones [27] se puede concluir que el cambio de color en el residuo se debe muy probablemente a los cambios de estado de oxidación en los componentes azufrados del residuo. La escarcha que se observaron en los bloques se debe muy probablemente al Ca(OH)<sub>2</sub> y SrSO<sub>4</sub> que se depositaba en la superficie.

## DENSIDAD ABSOLUTA RELATIVA

### Equipo.

- Frasco volumétrico PYREX 500 mL.
- Bomba de vacío o parrilla de calor.
- Mortero y mango.
- Balanza.

### Procedimiento.

- 1) Mezclar aproximadamente 140 g de suelo seco con agua en un recipiente hasta que se forme una pasta. Remojar el suelo entre 20 y 30 minutos y dejarlo reposar hasta que alcance una temperatura de 20°C (T ambiente), lo cual se lleva aproximadamente unos 10 minutos.
- 2) Transferir la pasta al vaso mezclador eléctrico y añadir agua hasta tener 200 mL de mezcla. Batir durante 5 a 10 minutos.
- 3) Pesar el frasco volumétrico vacío. Llenar hasta la marca de 500 mL con agua destilada y deaireada sin agitar (para no introducir aire). Se puede aplicar vacío (durante 10 minutos a 1.933 psi). Cuando el nivel de agua se encuentra en la marca volumétrica (no el menisco) y el cuello se encuentra seco, pesar el frasco y registrar el peso  $W_{bw}$ .
- 4) Después de 15 a 30 minutos, transferir el suelo saturado del plato evaporador al frasco volumétrico. No deben quedar partículas de suelo en el plato. Añadir agua para completar 2/3 a 3/4 del frasco. No se debe llenar por completo ya que la eficiencia del trabajo del vacío en la deaireación se puede reducir.
- 5) Conectar el frasco a un ducto de vacío durante 30 minutos a 0.0682 Kg/cm<sup>2</sup> (P) para suelos con alta plasticidad. La humedad natural requerirá de un deaireado de 6 a 8 horas para remover el aire atrapado. Durante ese tiempo, la mezcla se debe agitar suavemente. Se observa que la reducción de la presión del aire dentro de la botella produce la ebullición del agua.
- 6) Añadir cuidadosamente agua hasta que la base del menisco se encuentre exactamente en la marca de calibración del frasco.
- 7) Pesar el frasco para obtener  $W_{bws}$ .
- 8) Vaciar el frasco en un plato evaporador y secarlo al horno. Pesar el suelo seco  $W_s$ .
- 9) Calcular  $G_s$ .
- 10) Hacer varias pruebas.

### Cálculos.

$$W_w = W_s + W_{bw} - W_{bws}$$

$$\rho_r = \frac{\alpha W_s}{W_w}$$

Algunos datos relevantes para los cálculos son los siguientes:

Tabla E.1. Variación de  $\alpha$  y  $\gamma$  del agua, según la temperatura.

Temperatura (°C)	$\alpha$	$\gamma$ agua (g/cm <sup>3</sup> )
19	1.0002	0.99843
20	1.0000	0.99823
21	0.9998	0.99802
22	0.9996	0.99780
25	0.9988	0.99707

Tabla E.2. Valor de  $G_s$  según el tipo de suelo.

Suelo	$G_s$
Arena	2.65 - 2.67
Arena limosa	2.67 - 2.70
Arcilla inorgánica	2.70 - 2.80
Suelos (micas o fierro)	2.75 - 3.00
Suelos orgánicos	1 ± 2.60

## LÍMITES DE ATTERBERG Y CONTRACCIÓN LINEAL.

### Equipo.

- Cápsula de porcelana de 12 cm de diámetro.
- Espátula de hoja de acero flexible de 7.5 cm de longitud y 2 cm de ancho con punta redonda.
- Cuentagotas.
- Copa de Casa Grande calibrada para una altura de caída de 1 cm provista de ranuras, una plana y otra curva.
- Vidrios de reloj.
- Balanza.
- Horno con termostato.
- Desecador.
- Vaso o recipiente de 500 mL.
- Placa de vidrio con dimensiones mínimas aproximadas de 40 x 40 x 0.6 cm de espesor.
- Moldes de lámina galvanizada No. 16 de 2 x 2 cm y 10 cm de longitud.
- Calibrador con vernier de tipo Máuser.
- Grasa grafitada.

Para hacer estos experimentos se utilizan 350 g de material previamente cribado por la malla 40. La muestra se coloca en un recipiente y se le agrega agua para que tome el aspecto de material saturado (durante 24 hr) y procurar minimizar la pérdida de agua por evaporación.

## Límite Líquido

### Procedimiento.

- 1) Se toma la porción de 350 g, se le coloca en la cápsula de porcelana y se homogeneiza la humedad con la espátula.
- 2) Se coloca en la copa de Casa Grande (previamente calibrada) y se expande el material de tal forma que una vez extendido tenga un espesor de 8 a 10 mm.
- 3) Se efectúa una ranura en la parte central del material que contiene la copa, como se muestra en la siguiente figura.

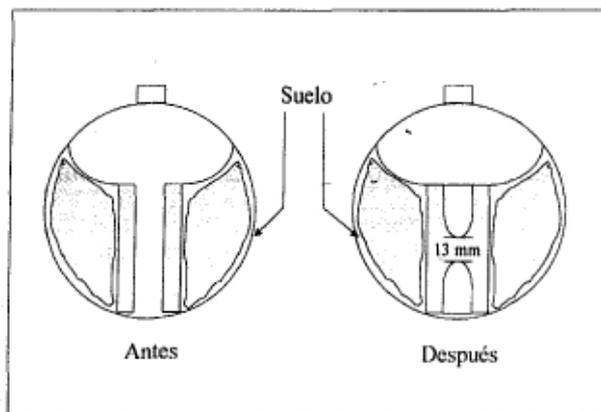


Figura E.1. Aspecto de la Copa de Casa Grande.

- 4) Se acciona la manivela del aparato para hacer caer la copa (2 golpes/s) y se registra el número de golpes necesarios para lograr que los bordes inferiores de la ranura se pongan en contacto en una longitud de 13 mm (como se muestra en la Figura X).
- 5) Después, con la espátula se toman 10 g de material de la porción cerrada de la ranura y se colocan en un vidrio de reloj para determinar su contenido de agua.
- 6) La muestra se regresa a la cápsula de mezclado.
- 7) En seguida, se agrega agua con la pizeta al material contenido en la cápsula, se homogeneiza con la espátula (puntos 2 al 6) para obtener 4 series de valores, incrementando o disminuyendo la cantidad de agua para que se tengan 2 puntos antes y 2 después de los 25 golpes. Para consistencias menores de 10 golpes es difícil identificar el momento de cierre de la ranura en la longitud especificada, por otra parte, para más de 35 golpes, se dificulta la ejecución de la prueba.

- 8) Se dibujan los puntos correspondientes a cada determinación en un papel semilog cuyas abscisas representan en escala log el número de golpes, y las ordenadas en escala aritmética, los respectivos contenidos de agua. A continuación se traza la línea recta que pase lo más cerca posible de cuando menos 3 de los puntos obtenidos; la línea así trazada se denomina curva de fluidez, cuya ordenada correspondiente a 25 golpes se reporta como el límite líquido (LL) del suelo, expresado como contenido de agua en porcentaje.

$$LL = W_w (N / 25)^{0.121} \quad 20 < N < 30 \text{ golpes}$$

donde  $W_w$  es el contenido de humedad al número de golpes  $N$  obtenido en el ensayo.

### **Límite Plástico.**

Es el mínimo contenido de agua de la fracción que pasa la malla 40 para que se puedan formar con ella cilindros de 3 mm sin que se rompan.

### Procedimiento.

- 1) Se toma una muestra del material y se le da forma de una pequeña esfera (aproximadamente 12 mm de diámetro).
- 2) Se rola la esfera con los dedos sobre la placa de vidrio hasta formar un cilindro cuyo diámetro sea aproximado a 3 mm. La velocidad de rolado debe ser de 60 a 80 ciclos por minuto.
- 3) Si al alcanzar los 3 mm el cilindro no se rompe en varias secciones simultáneas, su humedad es superior al límite plástico (LP).
- 4) Se repiten los pasos del 1 al 3 hasta formar un cilindro que se rompa en varios segmentos al alcanzar los 3 mm de diámetro. El diámetro se verifica con el vernier.
- 5) En seguida se colocan en un vidrio todos los fragmentos en que se haya dividido el cilindro y se determina la humedad. Esa humedad será el LP:

Los suelos con los que no se pueden formar cilindros de 3 mm de diámetro con ningún contenido de agua, se consideran como no plásticos.

### **Índice Plástico.**

El Índice plástico se representa como IP, y se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$IP = LL - LP$$

## **Contracción Lineal.**

Es la reducción en la mayor dimensión de un espécimen de forma prismática rectangular (material que sobrepase la malla 40) cuando su humedad disminuye desde la de LL hasta la del límite de contracción.

- 1) Se agrega a la muestra agua o material menos húmedo tomado de la porción preparada, hasta lograr que la humedad sea la correspondiente a LL, lo cual se verifica con la copa de Casa Grande y cumpliendo la condición de que la ranura se cierre en una longitud de 13 mm a 25 golpes.
- 2) Se llena el molde de prueba (el cual previamente fue engrasado). El molde se llena en 3 capas, golpeándolo hasta que no aparezcan burbujas en la superficie.
- 3) Se enrasa el material en el molde utilizando la espátula y se deja orear a la sombra hasta que cambie ligeramente su color, después se pone a secar en el horno durante 18 horas a una  $T = 105 \pm 5$  °C.
- 4) Se saca el molde del horno, se deja enfriar a temperatura ambiente. Se saca la barra del molde.
- 5) Se mide con el calibrador la longitud media de la barra del material seco y la longitud interior del molde. La contracción lineal (CL) se calcula con la siguiente fórmula:

$$CL = \frac{L_i - L_f}{L_i} \times 100$$

donde  $L_i$  es la longitud inicial (húmedo) y  $L_f$  es la longitud final (seco), ambos en cm.

## **LIXIVIADO**

Esta prueba se lleva según lo dicta la NOM-053-ECOL-1993, norma 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. Aunque el residuo ya se sabe que no es peligroso, se va a emplear el procedimiento de lixiviación dictado por esta norma, para determinar que compuestos pueden extraerse de los bloques fabricados. Esto con el fin de saber que compuestos escurrirían de los bloques en casos de lluvia o contacto con algún otro líquido.

### Reactivos.

- Agua deionizada o desmineralizada.
- Ácido clorhídrico HCl, 1.0 N.
- Ácido nítrico HNO<sub>3</sub>, 1.0 N.
- Hidróxido de sodio, NaOH, 1.0 N.
- Ácido acético glacial, CH<sub>3</sub>-COOH, grado reactivo analítico.
- Reactivos de extracción #1 y #2.

- El reactivo de extracción #1 se prepara añadiendo 5.7 mL de ácido acético glacial a 500 mL de agua dionizada o desmineralizada, posteriormente se agregan 64.3 mL de NaOH 1.0 N y se afora a un litro. El pH de este reactivo es de  $4.93 \pm 0.05$ .
- El reactivo de extracción #2 se prepara diluyendo 5.7 mL de ácido acético glacial con agua deionizada o desmineralizada en un volumen de 1 L. Cuando se prepara en forma correcta, el pH es de  $2.88 \pm 0.05$ .

### Procedimiento.

El procedimiento que se siguió para realizar las pruebas se lista a continuación. Este procedimiento se basa en el que se especifica en la NOM-053-ECOL-1993.

- 1) Pesar 5 g de muestra en un matraz Erlènmeyr o en un vaso de precipitado.
- 2) Añadir 96.5 mL de agua deionizada o desmineralizada al matraz, cubrir con un vidrio de reloj y agitar vigorosamente durante 5 minutos, usando un agitador mecánico. Medir el pH. Si el pH es menor de 5.0, usar el reactivo de extracción número 1. Si el pH es mayor a 5, añadir 3.5 mL de HCl 1.0 N, mezclar y cubrir con el vidrio de reloj. Calentar a  $50^{\circ}\text{C}$  y mantener esa temperatura por 10 minutos. Dejar la solución enfriar a temperatura ambiente y medir nuevamente el pH. Si es menor de 5.0, usar el reactivo de extracción número 1, si mayor de 5.0, usar el reactivo de extracción número 2.
- 3) Utilizar un tamaño mínimo de muestra de 100 g.
- 4) Añadir 2 L de reactivo de extracción (1 L por cada 50 g de muestra) lentamente al recipiente de extracción. Cerrar el frasco herméticamente (es recomendable que se utilice cinta de teflón para asegurar un buen sello). Coloque el recipiente en el equipo de agitación rotatorio y haga girar a  $30 \pm 2$  rpm durante  $18 \pm 2$  horas. La temperatura deberá mantenerse a  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$  durante el período de extracción.
- 5) Después de las  $18 \pm 2$  horas de extracción, separe el material en el recipiente de extracción, en sus componentes líquido y sólido, por medio de filtración a través de un filtro de fibra de vidrio nuevo; los filtros deberán tener un lavado ácido si se evalúa la movilidad de metales.

Una vez obtenido el extracto, se guarda para análisis posteriores.

## VITA

Sarynna López Meza nació en Monterrey, N.L. el 23 de septiembre de 1976. Realizó sus estudios de licenciatura en el ITESM, Campus Monterrey, obteniendo en 1996 el título de Ingeniera Química Administradora. Posteriormente trabajó como Asistente de Investigación en el Centro de Tecnología Limpia del Centro de Calidad Ambiental del ITESM, Campus Monterrey, en donde obtuvo el grado de Maestra en Ciencias. Su domicilio permanente es Priv. Roble #1416, Fracc. Los Nogales, Monclova, Coah., C.P. 25730. E-mail: sarylopez@hotmail.com.

## FE DE ERRATAS

Página	Dice	Debe decir
30	Apéndice E	Apéndice C
33	Kg	kg
38	Apéndice E	Apéndice C

38

Malla	% Retenido
4,000	
1,000	30
850	63
425	77
149	90
90	97
53	99
Plato	100

Malla	% Retenido
4,000	9
1,000	21
850	33
425	14
149	13
90	7
53	2
Plato	1

42	Corridas 18 y 19, 0 bloques	4 bloques
51	Apéndice C	Apéndice B
61	Kg	kg
66	Kg	kg
66	SO <sub>4</sub>	SO <sub>4</sub>
66	granito o sello	puzolanas (SiO <sub>2</sub> )
67	Normas de Cemento	NOM-C-10 NOM-C-36 NOM-C-37