



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ACATLÁN**

**“PRUEBAS DE RESISTENCIA Y PERMEABILIDAD DE RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN PARA SU UTILIZACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN DE OBRAS COMPLEMENTARIAS, OPERACIÓN Y CLAUSURA DE RELLENOS SANITARIOS EN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO.”**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO CIVIL**

P R E S E N T A :

**HÉCTOR GERMÁN LÓPEZ ANDRACA**

ASESOR:

**M. EN I. CLAUDIA LIZETT RIVERA VALDOVINOS**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## **INTEGRACIÓN DE JURADO PARA EXAMEN PROFESIONAL**

### **JURADO ASIGNADO**

**Presidente: Mtra. María Eugenia Canut Díaz Velarde**

**Vocal: Mtra. María Andrea Suárez García**

**Secretario: Mtra. Claudia Lizett Rivera Valdovinos**

**Suplente 1: Dr. Raúl Pineda Olmedo**

**Suplente 2: Mtro. Oscar Callejas Moreno**

## **AGRADECIMIENTOS.**

A mi mamá, papá y Adrián, que siempre han apoyado mis decisiones, mis anhelos y me motivan a seguir siempre adelante. Son unos guerreros, esto es para ustedes.

A mis abuelitos Felisa y Germán, a mis padrinos Isabel y Daniel, que me han enseñado que se puede tener más de un papá y una mamá. De verdad gracias por quererme, por siempre procurar mi bienestar, por enseñarme, por educarme. Sin ustedes no hubiera llegado ni a la mitad del camino, creo que no hay palabras para agradecer todo lo que han hecho por mí. Esto es gracias a ustedes.

A ti Lori, por haber llegado, por el apoyo, por la paciencia, por el amor incondicional, por tus enojos, por tus sonrisas, por la complicidad, por estar y ser tan bonita, por ser mi motor, básicamente por ser la mejor novia que existe, te amo con toda el alma. Esto también es gracias a ti y para ti.

A mis tíos Lalo, José Luis, Sergio, Gerardo y Gilberto por su cariño, apoyo incondicional y por los buenos momentos, son increíbles. A mis demás tíos y a todos mis primos (somos tantos que es difícil mencionarlos uno por uno), gracias por ser parte esencial de mi vida.

A ti One, por siempre recibirme con una sonrisa, por siempre apoyarme, por siempre estar al pendiente, por toda la paciencia. De verdad gracias por todo, conocerte ha sido una bendición. A usted Don Mario por las charlas y las sonrisas, por toda su amabilidad.

A Gabriel, gracias por darme la oportunidad de conocerte y de ser tu amigo, por tus consejos, por tu apoyo, por todo, sencillamente eres el mejor, sin ti sabes que esto no sería posible. A Daniel, por ser parte fundamental de este trabajo y de mi vida, gracias por todas las risas y todo el apoyo, por tu amistad siempre incondicional, eres grande. A Víctor por siempre tener ese comentario acertado, por tu confianza, de verdad que soy afortunado por ser tu amigo. A Diego por enseñarme que a pesar de

todo, la amistad es lo más importante. A César, a mi “padrino” Héctor, a Alan Johann, a Alan, a Yeuriel (que también es parte importante de este trabajo), a Jorge, a Jaime, a Canek, a Adrián Vázquez, a Gerardo y Anahí, porque ustedes me han enseñado que no tengo amigos, tengo familia. Doy gracias por la fortuna de haberlos conocido.

A Alejandro, a Farid, a Sergio, a Adrián y a David, porque los buenos amigos son para siempre.

A Lil, a Cari, a Mariana, a Natali, a Aurora, a Anahí, son las mejores amigas que existen.

A mi asesora, Maestra Liz, de verdad gracias por todo, sin su paciencia, su guía, su amistad, sin su apoyo, no hubiera llegado a ningún lado; como ya sabe, es brillante, una excelente profesora y una excelente mentora. Espero este trabajo sea digno de todo esto. La quiero mucho.

Al Maestro Callejas, por su paciencia y apoyo incondicional, por sus observaciones y su disposición siempre que lo necesitaba, de verdad gracias, este logro también es gracias a usted.

A mis sinodales, Mtra. Canut Díaz, Dr. Raúl Pineda, Mtra. Andrea Suárez, por su increíble apoyo, comprensión y por el seguimiento dado a mi tesis.

A la UNAM y a todos mis profesores por formarme y compartir sus conocimientos de manera excepcional.

A Concretos Reciclados y al relleno sanitario de Tlalnepantla de Baz por todas las facilidades brindadas para la realización de este trabajo.

## ÍNDICE GENERAL.

Índice de tablas.....	III
Índice de figuras.....	V
Introducción.....	XI
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES.....	1
1.1. Problemática de los Residuos de la Construcción y Demolición (RC&D).....	3
1.2. Oportunidades de aprovechamiento de los RC&D en rellenos sanitarios.....	10
CAPÍTULO 2. PRUEBAS DE LABORATORIO PRELIMINARES Y ELABORACIÓN DE LOS ESPECÍMENES DE CONCRETO HIDRÁULICO....	13
2.1. Pruebas de laboratorio preliminares.....	24
2.1.1. Determinación de propiedades de los agregados reciclados.....	24
2.1.2. Determinación de propiedades de los agregados reciclados.....	43
2.2. Elaboración de los especímenes de concreto hidráulico.....	55
2.2.1. Descimbrado y curado de los especímenes.....	65
CAPÍTULO 3. PRUEBAS DE RESISTENCIA DE LOS CILINDROS DE CONCRETO HIDRÁULICO Y PRUEBA DE PERMEABILIDAD.....	67
3.1. Resultados del ensaye de resistencia a compresión simple de los cilindros de concreto hidráulico de diversas mezclas.....	69
a) Mezcla 100% agregados vírgenes.....	73
b) Mezcla 100% agregados reciclados.....	79
c) Mezcla 15% agregados reciclados y 85% agregados vírgenes.....	86
d) Mezcla 30% agregados reciclados y 70% agregados vírgenes.....	92
e) Mezcla 45% agregados reciclados y 55% agregados vírgenes.....	98
f) Mezcla 60% agregados reciclados y 40% agregados vírgenes.....	105

g) Mezcla 75% agregados reciclados y 25% agregados vírgenes.....	111
h) Mezcla 90% agregados reciclados y 10% agregados vírgenes.....	118
3.2. Ensaye de permeabilidad en diferentes mezclas de tepetate con arena reciclada.....	125
a) Permeabilidad del tepetate.....	135
b) Permeabilidad de la mezcla de 75% de tepetate con 25% de arena reciclada.....	136
c) Permeabilidad de la mezcla de 50% de tepetate con 50% de arena reciclada.....	137
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	140
4.1. Conclusiones y recomendaciones acerca de las pruebas de resistencia a compresión simple de los cilindros de diversas mezclas de concreto.....	142
4.2. Conclusiones y recomendaciones acerca de las pruebas de permeabilidad.....	145
4.3. Conclusiones generales.....	147
BIBLIOGRAFÍA.....	148
REFERENCIAS ELECTRÓNICAS.....	151

## ÍNDICE DE TABLAS

### CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Tabla 1.1	Instrumentos regulatorios de la normatividad aplicable para los Residuos de la Construcción y Demolición (RC&D).
Tabla 1.2	Toneladas de RC&D generadas por subsectores de la Industria de la Construcción.
Tabla 1.3	Toneladas de RC&D generadas, desglosadas en subproductos.

### CAPÍTULO 2. PRUEBAS DE LABORATORIO PRELIMINARES Y ELABORACIÓN DE LOS ESPECÍMENES DE CONCRETO HIDRÁULICO.

Tabla 2.1	Proporcionamientos típicos de mezclas de concreto.
Tabla 2.2	Resultados obtenidos del cribado de la grava reciclada.
Tabla 2.3	Requisitos de granulometría para los agregados gruesos (ASTM C 33).
Tabla 2.4	Resultados obtenidos del cribado de la arena reciclada.
Tabla 2.5	Resultados obtenidos del cribado de la grava virgen.
Tabla 2.6	Resultados obtenidos del cribado de la arena reciclada.
Tabla 2.7	Revenimientos para diferentes tipos de construcción.
Tabla 2.8	Tolerancias en el revenimiento especificado.
Tabla 2.9	Revenimientos obtenidos de cada mezcla realizada.



### CAPÍTULO 3. RESULTADO DE LAS PRUEBAS DE RESISTENCIA Y PERMEABILIDAD.

Tabla 3.1 Factores de corrección de la resistencia de acuerdo con la esbeltez.

Tabla 3.2 Viscosidades del agua de 10° a 30°C y relaciones  $\mu_T/\mu_{20}$  .

### CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Tabla 4.1 Resultados de la prueba de resistencia a compresión simple de los cilindros de diversas mezclas de concreto.

Tabla 4.2 Resultados de las pruebas de permeabilidad.

Tabla 4.3 Coeficiente de permeabilidad K [cm/s] (Escala logarítmica).

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

- Figura 1.1 Marco jurídico vigente de Residuos de Manejo Especial.
- Figura 1.2 Uso de arena y grava recicladas dentro de Rellenos Sanitarios.

### CAPÍTULO 2. PRUEBAS DE LABORATORIO PRELIMINARES Y ELABORACIÓN DE LOS ESPECÍMENES DE CONCRETO HIDRÁULICO.

- Figura 2.1 Entrada Concretos Reciclados S.A. de C.V.
- Figura 2.2 Agregados reciclados, Concretos Reciclados S.A. de C.V.
- Figura 2.3 Carga y acarreo de agregados reciclado, Concretos Reciclados S.A. de C.V
- Figura 2.4 Arena y grava vírgenes, Casa de materiales delegación Iztapalapa.
- Figura 2.5 Banco de tepetate del Relleno Sanitario de Tlalnepantla de Baz.
- Figura 2.6 Material encostalado.
- Figura 2.7 Equipo para prueba de granulometría.
- Figura 2.8 Muestra representativa de grava reciclada en la charola.
- Figura 2.9 Muestra dividida en cuatro partes en cruz sobre la charola.
- Figura 2.10 Muestra después de desechar los cuartos opuestos.
- Figura 2.11 Muestra bien mezclada.
- Figura 2.12 Determinación del peso de la muestra.
- Figura 2.13 Cribas acomodadas en orden descendente de abertura.
- Figura 2.14 Depósito de la muestra sobre las cribas.
- Figura 2.15 Cribas sobre máquina agitadora.

- Figura 2.16 Gráfica de los límites granulométricos para una grava TMA 1", presentando los límites superior e inferior, así como la gráfica de la grava reciclada que se utilizó para realizar las mezclas de concreto.
- Figura 2.17 Gráfica de los límites granulométricos de la arena reciclada.
- Figura 2.18 Contenedor, marco de enrase y varilla para obtener peso volumétrico.
- Figura 2.19 Peso de la muestra más el sartén sin secar.
- Figura 2.20 Secando la muestra en la parrilla eléctrica.
- Figura 2.21 Comprobando si aún hay humedad con el vidrio de reloj.
- Figura 2.22 Secado superficial de la grava.
- Figura 2.23 Verificación del desmoronamiento.
- Figura 2.24 Gráfica de los límites granulométricos para una grava TMA 1", presentando los límites superior e inferior, así como la gráfica de la grava virgen que se utilizó para realizar las mezclas de concreto.
- Figura 2.25 Gráfica de los límites granulométricos de la arena virgen.
- Figura 2.26 Aceitado y limpiado de los moldes.
- Figura 2.27 Moldes cilíndricos limpios y aceitados.
- Figura 2.28 Pesado de los materiales para elaborar las mezclas.
- Figura 2.29 Charola humedecida y materiales ya pesados.
- Figura 2.30 Mezcla homogénea de agregado fino y cemento.
- Figura 2.31 Vertido del agua sobre la muestra.
- Figura 2.32 Prueba de revenimiento.
- Figura 2.33 Determinación del revenimiento.
- Figura 2.34 Llenado de los moldes con la mezcla de concreto.

- Figura 2.35 Cilindros protegidos contra la evaporación del agua.
- Figura 2.36 Cilindros protegidos y etiquetados en el patio de prácticas del Laboratorio de Resistencia de Materiales de la FES Acatlán, UNAM.
- Figura 2.37 Descimbrado de los especímenes.
- Figura 2.38 Cuarto húmedo de los laboratorios de Ingeniería de la FES Acatlán, UNAM.
- Figura 2.39 Especímenes almacenados en el cuarto húmedo.

### CAPÍTULO 3. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE RESISTENCIA Y PRUEBA DE PERMEABILIDAD.

- Figura 3.1 Cilindros perdiendo el exceso de humedad antes de obtener su masa.
- Figura 3.2 Determinación de altura y diámetros de los cilindros.
- Figura 3.3 Cilindros colocándose en el centro del molde con almohadillas de neopreno.
- Figura 3.4 Cilindro perfectamente centrado sobre el marco de carga.
- Figura 3.5 Gráfica carga-deformación del cilindro a-1 proporcionada por la computadora del marco de carga.
- Figura 3.6 Gráfica carga-deformación del cilindro a-2 proporcionada por la computadora del marco de carga.
- Figura 3.7 Gráfica carga-deformación del cilindro a-3 proporcionada por la computadora del marco de carga.
- Figura 3.8 Cilindro de la mezcla elaborada en su totalidad por agregados vírgenes después de fallar.
- Figura 3.9 Gráfica carga-deformación del cilindro b-1 proporcionada por la computadora del marco de carga.
- Figura 3.10 Gráfica carga-deformación del cilindro b-2 proporcionada por la computadora del marco de carga.

- Figura 3.11 Gráfica carga-deformación del cilindro b-3 proporcionada por la computadora del marco de carga.
- Figura 3.12 Cilindro de mezcla elaborada en su totalidad por agregados reciclados antes y después de la prueba.
- Figura 3.13 Cilindro elaborado únicamente de materiales vírgenes, donde se puede observar un mejor acabado en relación con un cilindro elaborado únicamente de materiales reciclados como el de la figura 3.12.
- Figura 3.14 Gráfica carga-deformación del cilindro c-1 proporcionada por la computadora del marco de carga.
- Figura 3.15 Gráfica carga-deformación del cilindro c-2 proporcionada por la computadora del marco de carga.
- Figura 3.16 Gráfica carga-deformación del cilindro c-3 proporcionada por la computadora del marco de carga.
- Figura 3.17 Cilindro de mezcla elaborada de 15% agregados reciclados y 85% agregados vírgenes antes y después de fallar.
- Figura 3.18 Gráfica carga-deformación del cilindro d-1 proporcionada por la computadora del marco de carga.
- Figura 3.19 Gráfica carga-deformación del cilindro d-2 proporcionada por la computadora del marco de carga.
- Figura 3.20 Gráfica carga-deformación del cilindro d-3 proporcionada por la computadora del marco de carga.
- Figura 3.21 Cilindro de la mezcla elaborada de 30% agregados reciclados y 70% agregados vírgenes después de fallar.
- Figura 3.22 Gráfica carga-deformación del cilindro e-1 proporcionada por la computadora del marco de carga.
- Figura 3.23 Gráfica carga-deformación del cilindro e-2 proporcionada por la computadora del marco de carga.
- Figura 3.24 Gráfica carga-deformación del cilindro e-3 proporcionada por la computadora del marco de carga.
- Figura 3.25 Cilindro de la mezcla elaborada de 45% agregados reciclados y 55% agregados vírgenes después de fallar.

- Figura 3.26 Gráfica carga-deformación del cilindro f-1 proporcionada por la computadora del marco de carga.
- Figura 3.27 Gráfica carga-deformación del cilindro f-2 proporcionada por la computadora del marco de carga.
- Figura 3.28 Gráfica carga-deformación del cilindro f-3 proporcionada por la computadora del marco de carga.
- Figura 3.29 Cilindro de la mezcla elaborada de 60% agregados reciclados y 40% agregados vírgenes después de fallar.
- Figura 3.30 Gráfica carga-deformación del cilindro g-1 proporcionada por la computadora del marco de carga.
- Figura 3.31 Gráfica carga-deformación del cilindro g-2 proporcionada por la computadora del marco de carga.
- Figura 3.32 Gráfica carga-deformación del cilindro g-3 proporcionada por la computadora del marco de carga.
- Figura 3.33 Cilindro de la mezcla elaborada de 75% agregados reciclados y 25% agregados vírgenes después de fallar.
- Figura 3.34 Gráfica carga-deformación del cilindro h-1 proporcionada por la computadora del marco de carga.
- Figura 3.35 Gráfica carga-deformación del cilindro h-2 proporcionada por la computadora del marco de carga.
- Figura 3.36 Gráfica carga-deformación del cilindro h-3 proporcionada por la computadora del marco de carga.
- Figura 3.37 Cilindro de la mezcla elaborada de 90% agregados reciclados y 10% agregados vírgenes después de fallar.
- Figura 3.38 Dispositivo empleado por Henry Darcy para determinar la permeabilidad en los suelos.
- Figura 3.39 Funcionamiento de un permeámetro de carga variable.
- Figura 3.40 Equipo utilizado en la prueba de permeabilidad.
- Figura 3.41 Compactación por capas de la muestra de tepetate con el pisón.
- Figura 3.42 Permeámetro lleno con la muestra.

- Figura 3.43 Instalación del permeámetro.
- Figura 3.44 Determinación de la temperatura del agua que se utilizó en la prueba.
- Figura 3.45 Muestra saturada.
- Figura 3.46 Preparación de la mezcla.
- Figura 3.47 Permeámetro instalado, muestra saturándose.

## **INTRODUCCIÓN.**

El presente trabajo responde a la necesidad de encontrar alternativas de reúso para los Residuos de la Construcción y Demolición que se generan en gran cantidad diariamente en la Zona Metropolitana del Valle de México.

Estos residuos se reciclan como arena y grava que pueden ser utilizadas de diversas maneras de acuerdo a la legislación y normatividad del país. De acuerdo a esta normatividad, se presentará una alternativa de reúso de éstos residuos dentro de Rellenos Sanitarios en la Zona Metropolitana del Valle de México (que es dónde se realizó la investigación, recolección de muestras y la experimentación) mediante pruebas de resistencia aplicadas a concretos elaborados con dicha arena y grava reciclada, y arena y grava virgen; así como pruebas de permeabilidad aplicadas a mezclas de material de cobertura utilizado en un relleno sanitario de dicha zona con arena reciclada.

La tesis se encuentra dividida en 4 capítulos que son: antecedentes, dónde se define el marco teórico que sustenta el trabajo; pruebas de laboratorio preliminares y elaboración de los especímenes de concreto hidráulico, dónde se explican las pruebas de laboratorio realizadas para conocer las características de los materiales utilizados para la elaboración del concreto y dicha elaboración; pruebas de resistencia de los cilindros de concreto hidráulico y prueba de permeabilidad, dónde se explica en que consiste cada y prueba y los resultados obtenidos; el último capítulo presenta las conclusiones y recomendaciones derivadas de los resultados obtenidos.

### **Objetivo General.**

Determinar la factibilidad de reutilización de los RC&D mediante pruebas de laboratorio en obras complementarias, operación y clausura de rellenos sanitarios en la Zona Metropolitana del Valle de México.



### ***Objetivos Particulares.***

- Determinar la resistencia de mezclas de concreto elaboradas con agregados vírgenes y agregados reciclados provenientes de los RC&D y verificar su factibilidad de uso en el caso particular de una obra complementaria de rellenos sanitarios, canales de evacuación pluvial.
- Determinar la permeabilidad del material empleado en la cobertura de celdas del Relleno Sanitario de Tlalnepantla de Baz, Estado de México, así como la permeabilidad de este material mezclado con arena reciclada y verificar su factibilidad de uso como material de cobertura.

### **Justificación.**

De acuerdo con un estudio realizado por la división de Ingeniería de Residuos del Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción de la Universidad Jaume I, Castellón, España; denominado: “Aprovechamiento de residuos inertes para la construcción, explotación y clausura de rellenos sanitarios,” los RC&D reciclados como gravas y arenas pueden ser utilizados en las siguientes obras dentro de un relleno sanitario:

- En las chimeneas de biogás.
- En las capas de clausura.
- En las capas de drenaje de la celda.
- En la conformación de taludes.
- En las capas de cobertura.
- En los canales de evacuación pluvial.

## **Alcances.**

Debido a lo amplio de las aplicaciones, en concreto éste trabajo tiene como propósito demostrar que también se pueden utilizar los RC&D reciclados como gravas y arenas en los rellenos sanitarios de la Zona Metropolitana del Valle de México en las capas de cobertura y en la construcción de canales de evacuación pluviales.

## **Metodología.**

El desarrollo de la tesis se realizará considerando las siguientes etapas:

***Recopilación y análisis de información.*** En esta etapa se recopilará la información necesaria para establecer la base teórica que sustentará la investigación. Apoyándose en literatura, artículos científicos, información en línea de páginas especializadas en el tema, legislación aplicable, etc.

***Obtención de los materiales para realizar las pruebas.*** Se obtendrán grava y arena reciclada, así como materiales vírgenes (grava, arena y tepetate).

***Realización de pruebas de laboratorio preliminares.*** Se realizarán las pruebas de laboratorio correspondientes para conocer las propiedades de los materiales proporcionados.

***Realización de pruebas de resistencia y permeabilidad.*** Se realizarán pruebas de resistencia al concreto elaborado en diversas proporciones mezclando agregados vírgenes y reciclados, y pruebas de permeabilidad mezclando tepetate y arena reciclada.

---

***Análisis de resultados y desarrollo de conclusiones.*** Se analizarán los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio y se formularán las conclusiones y recomendaciones.

**Metas.**

- Obtener una resistencia adecuada del concreto elaborado con materiales vírgenes y reciclados para la construcción de canales de evacuación pluvial de un Relleno Sanitario en la Zona Metropolitana del Valle de México.
- Obtener una permeabilidad aceptable para poder utilizar la arena reciclada como parte del material de cobertura de las celdas en un Relleno Sanitario en la Zona Metropolitana del Valle de México.

**CAPÍTULO 1.**  
**ANTECEDENTES.**

---

## **CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES.**

### **1.1. Problemática de los Residuos de la Construcción y Demolición (RC&D).**

A pesar de todos los esfuerzos que se realizan actualmente para una adecuada gestión de los residuos generados en nuestro país, aún representan un gran problema ambiental. Dentro de este problema destacan los Residuos de la Construcción y Demolición.

En México se definen a los Residuos de la Construcción y Demolición (RC&D) como los materiales, productos o subproductos generados durante las actividades de excavación, demolición, ampliación, remodelación, modificación o construcción tanto pública como privada. Estos residuos están constituidos generalmente por un conjunto de fragmentos o restos de tabiques, piedras, tierra, concreto, morteros, madera, alambre, resina, plásticos, yeso, cal, cerámica, tejados, pisos y varillas, entre otros, cuya composición puede variar ampliamente dependiendo del tipo de proyecto, la obra y etapa de construcción (NADF-007-RNAT-2004). De acuerdo con el Plan de Manejo de Residuos de la Construcción y Demolición realizado por la Cámara Nacional de la Industria de la Construcción (CMIC) publicado en el 2013, una caracterización más general de los RC&D es: 39 % material de excavación, 24% escombros, 25 % concreto y 12 % otros.

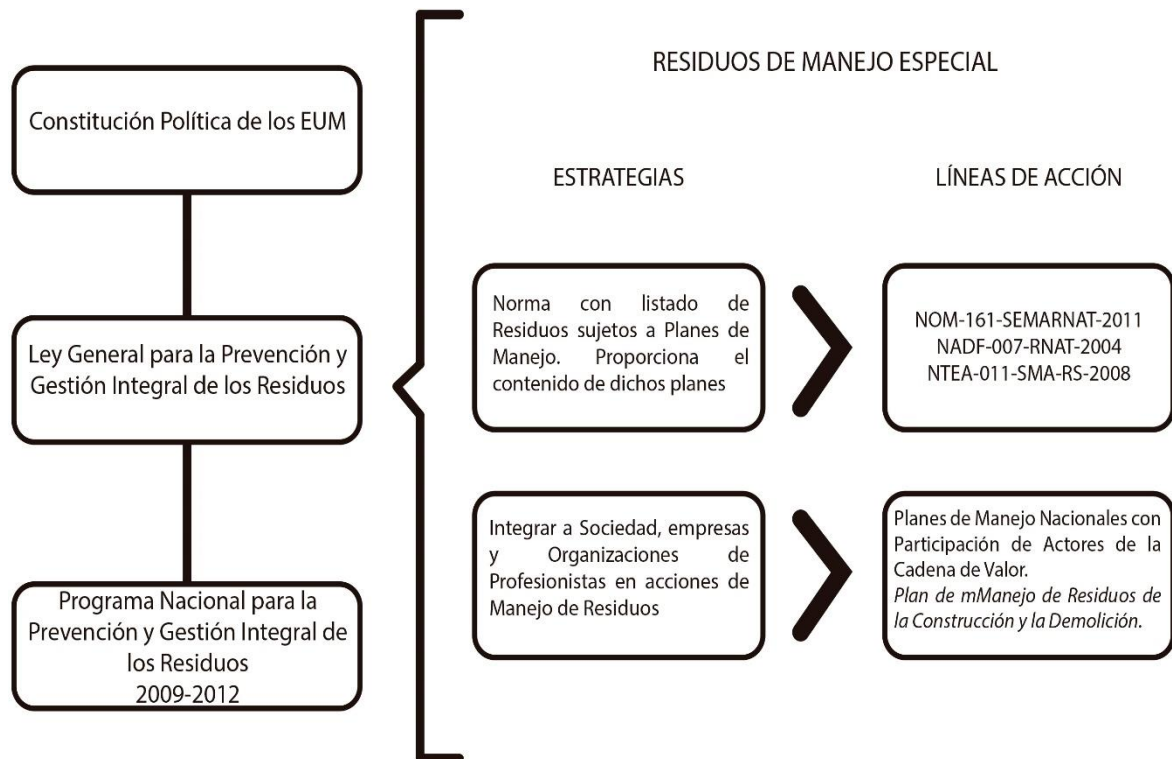
Cabe mencionar, que los RC&D pertenecen a los Residuos de Manejo Especial (RME) que son los generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos ni como Residuos Sólidos Urbanos (RSU), o que son producidos por grandes generadores de RSU (LGPGIR).

Un grave problema que representan los R&D es su disposición final inadecuada en sitios no autorizados como barrancas o cauces de agua, lo cual implica efectos que van desde la atracción de dichos sitios para el vertido de otros tipos de residuos (que en el mejor de los casos son residuos sólidos urbanos y en el peor de ellos residuos peligrosos) hasta la ocupación de terrenos rellenos con

cascajo. Esta última circunstancia provoca que la mancha urbana continúe su crecimiento, aún en sitios en que de acuerdo con la Ley Ambiental y programas de ordenamiento ecológicos se encuentra prohibida. (Rivera Mera, 2007).

Para combatir el problema de los RC&D existen leyes, reglamentos y normas que regulan el marco jurídico cuyo objetivo es determinar el manejo integral de éstos. A continuación se muestra un esquema del marco jurídico vigente de Residuos de Manejo Especial, recordando que los RC&D son parte de éstos.

Figura 1.1 Marco jurídico vigente de Residuos de Manejo Especial.



Fuente: Adaptado del Plan de Manejo de RC&D, CMIC 2013.

La siguiente tabla explica los instrumentos regulatorios de la normatividad aplicable para los RC&D (CMIC, 2013).

Tabla 1.1. Instrumentos regulatorios de la normatividad aplicable para los RC&D.

<b>INSTRUMENTO REGULATORIO</b>	<b>RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>
<b>Ley General del Equilibrio Ecológico y de la Protección al Ambiente (LGEEPA)</b>	El Estado posee la facultad de regular la gestión de los RME
<b>Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)</b>	Define a los RC&D y responsabiliza a los estados y municipios la gestión de los mismos.
<b>Reglamento LGPGIR</b>	Regula los Planes de Manejo para la reutilización y reciclaje de los RC&D.
<b>Ley de Residuos Sólidos del Estado de México y D.F.</b>	Establecen acciones de gestión de los RC&D, con fines de valorización.
<b>Reglamento de Construcción del Distrito Federal</b>	Propuesta de Establecer el manejo de los RC&D y condicionar las Licencias de Construcción a la Ley de Arrendamientos Urbanos.
<b>Normas Ambiental D.F. y Edo. de México. (NADF-007-RNAT-2004 y NTEA-011-SMA-RS-2008)</b>	Clasifican a los RC&D, obliga al reúso y reciclaje.
<b>NOM-161-SEMARNAT-2011</b>	Enlista los Residuos de Manejo Especial sujetos a Plan de Manejo y establece el contenido de éstos.

---

<b>NMX-AA-164-SCFI-2013</b>	Establece los materiales peligrosos incluidos en los RC&D
<hr/>	
<b>Ley Federal de Responsabilidad Ambiental (LFRA)</b>	Restitución del Estado Natural Base, relacionado con las acciones de Gestión de los RC&D: generación, minimización, separación, traslado, tratamiento (reciclaje y/o valorización) y disposición final.

---

Fuente: Adaptado del Plan de Manejo de RC&D, CMIC 2013.

Para que exista un manejo integral de los residuos debe haber una gestión adecuada de ellos, lo cual involucra normas y acciones de tipo operativas, financieras, de planeación, administrativas, sociales, educativas, de monitoreo, de supervisión y evaluación; desde su generación hasta su disposición final (LRSDF, 2003).

De acuerdo con la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal, el *manejo integral de los residuos* es el “conjunto de acciones que involucran la identificación, caracterización, clasificación, etiquetado, marcado, envasado, empaçado, selección, acopio, almacenamiento, transporte, transferencia, tratamiento y, en su caso, disposición final de los residuos sólidos”.

Sin embargo, según Rivera Mera (2007) dentro del manejo integral de los Residuos de la Construcción y Demolición se pueden identificar al menos las siguientes etapas:

- Generación
- Almacenamiento
- Recolección y transporte
- Reúso y reciclaje
- Tratamiento
- Disposición final.



- 
- Generación: se refiere a la acción de producir residuos sólidos a través de procesos productivos o de consumo (LRSDF, 2003).
  - Almacenamiento: El depósito temporal de los residuos sólidos en contenedores previos a su recolección, tratamiento o disposición final (LRSDF, 2003).
  - Recolección: La acción de recibir los residuos sólidos de sus generadores y trasladarlos a las instalaciones para su transferencia, tratamiento o disposición final (LRSDF, 2003).
  - Transporte: El transporte es la etapa del sistema de manejo integral de residuos sólidos en la cual, los residuos que han sido recolectados previamente, son conducidos a un destino específico (Gutiérrez, 2005).
  - Reutilización: El empleo de un residuo sólido sin que medie un proceso de transformación (LRSDF, 2003).
  - Reciclaje: Transformación de los residuos a través de distintos procesos que permiten restituir su valor económico, evitando así su disposición final, siempre y cuando esta restitución favorezca un ahorro de energía y materias primas sin perjuicio para la salud, los ecosistemas o sus elementos (LGPGIR, 2003).
  - Tratamiento: Los procedimientos: físicos, químicos, biológicos o térmicos, mediante los cuales se modifican las características de los residuos sólidos y se reduce su volumen o peligrosidad.
  - Disposición Final: La acción de depositar o confinar permanentemente residuos sólidos en sitios o instalaciones cuyas características prevean afectaciones a la salud de la población y a los ecosistemas y sus elementos.

Tomando el primer punto (generación), con base en un estudio realizado para el Plan de Manejo de los RC&D 2013 por parte de la CMIC en el 2011 la Generación Anual Estimada fue de seis millones de toneladas, lo que significa una generación diaria de cerca de 17,000 toneladas. A continuación se anexan dos tablas desprendidas de este estudio, una con el peso que generan los subsectores de la Industria de la Construcción y la otra con la constitución de los seis millones de toneladas anuales generadas de RC&D.

Tabla 1.2. Toneladas de RC&amp;D generadas por subsectores de la Industria de la Construcción.

<b>SUBSECTOR</b>	<b>TONELADAS GENERADAS</b>	<b>PORCENTAJE</b>
HABITACIONAL	3,938,664.00	65.00%
COMERCIAL	985,236.00	16.00%
INDUSTRIAL	511,587.00	8.00%
OTROS	621,711.00	10.00%
<b>TOTAL ANUAL</b>	<b>6,057,198.00</b>	<b>100.00%</b>

Fuente: Adaptado del Plan de Manejo de RC&D, CMIC 2013.

Tabla 1.3. Toneladas de RC&amp;D generadas, desglosadas en subproductos.

<b>Subproducto</b>	<b>Porcentaje promedio</b>	<b>TONELADAS</b>
Material de Excavación	39.16%	2,371,999.00
Concreto	24.38%	1,476,745.00
Block/Tabique	23.33%	1,413,144.00
Panel de Yeso/Cemento	4.05%	245,317.00
Madera	1.52%	92,069.00
Cerámica	0.85%	51,486.00
Plástico	0.78%	47,246.00
Piedra	0.62%	37,555.00
RSU*	4.49%	271,968.00
Varilla	0.48%	29,075.00
Asfalto	0.25%	15,143.00
Lámina	0.09%	5,451.00
<b>Totales</b>	<b>100.00%</b>	<b>6,057,198.00</b>

Fuente: Adaptado del Plan de Manejo de RC&D, CMIC 2013.

---

*\*Si bien dentro de la obra se generan Residuos Sólidos Urbanos (RSU) como parte de las actividades que se realizan, éstos no se consideran parte de los RC&D, por lo que no deberán mezclarse. Por lo tanto, al total de 6,057,198 toneladas (t) le restaremos las 271,968 t de RSU, esto da un total de 5,785,230 t, aproximadamente las 6 millones de toneladas de las que habla el estudio.*

La CMIC considera en su estudio un comportamiento de crecimiento de la industria de la construcción de 5.0% como promedio anual (2014-2018); con una generación estimada de RC&D de 9.9 millones de toneladas para el año 2018 (27,000 Ton/día aproximadamente).

Esto implica la necesidad de crear un plan eficaz para manejar adecuadamente los RC&D, además de encontrar diversas maneras de aprovechar tal cantidad de residuos ya que se estima que sólo el 4% de los RC&D que se generan, son aprovechados (3% reciclados como gravas y arenas, y 1% reúso). (CMIC, 2013).

El reciclaje de los RC&D residuos de la construcción disminuye impactos ambientales, a continuación se muestran algunos (Rivera Valdovinos, 2007):

- “Prolongación de la vida útil de los espacios de disposición final: Al reducirse la cantidad de RC&D dispuestos en los rellenos sanitarios, la vida útil de estos lugares se incrementará, garantizando con ello, que el vertido de residuos sólidos urbanos se deposite en los espacios que quedaron disponibles.
- Reúso de RC&D: Estos residuos al ser reciclados no quedan como desechos, sino que se incorporan de nuevo al ciclo de la industria de la construcción, ya que pueden ser aprovechados en diversas actividades constructivas como por ejemplo, material de cubierta en rellenos sanitarios, construcción de caminos secundarios, firmes en construcciones pequeñas, etc.; que a su vez beneficiarán económicamente a todas aquellas empresas que decidan consumirlos, al ser más baratos que los agregados vírgenes. Por otro lado, al hacer la comparativa entre impactos ambientales negativos

producidos durante el proceso de explotación de agregados vírgenes y el proceso para la elaboración de agregados reciclados, éstos últimos poseen un número significativamente menor que los primeros, haciendo más factible su uso en el aspecto ambiental.

- Conservación de bancos de materiales: Al sustituir a los agregados vírgenes por los reciclados, se resguardan los espacios naturales (bancos de materiales) por la reducción en la explotación de recursos minerales, lo que propicia que la flora, la fauna, las condiciones del suelo, del agua y del aire se preserven para el bienestar del ambiente.”

Considerando lo anterior, el presente trabajo se encargará sólo de un punto dentro del manejo integral de los RC&D, el reciclaje, proponiendo la utilización de éstos residuos en algunas obras dentro de rellenos sanitarios, demostrando mediante pruebas y resultados las ventajas de la propuesta.

## **1.2. Oportunidades de aprovechamiento de los RC&D en rellenos sanitarios.**

Por otra parte, el relleno sanitario es una técnica de disposición final de los residuos sólidos en el suelo que no causa molestia ni peligro para la salud o la seguridad pública; tampoco perjudica el ambiente durante su operación ni después de su clausura. Esta técnica utiliza principios de ingeniería para confinar la basura en un área lo más estrecha posible, cubriéndola con capas de tierra diariamente y compactándola para reducir su volumen. Además, prevé los problemas que puedan causar los líquidos y gases producidos por efecto de la descomposición de la materia orgánica (Organización Panamericana de la Salud, 2007).

Hace poco menos de un siglo, en Estados Unidos, surgió el relleno sanitario como resultado de las experiencias, de compactación y cobertura de los residuos con equipo pesado; desde entonces, se emplea este término para aludir al sitio en el cual los residuos son primero depositados y luego cubiertos al final de cada día de operación. En la actualidad, el relleno sanitario moderno se refiere a una

instalación diseñada y operada como una obra de saneamiento básico, que cuenta con elementos de control lo suficientemente seguros y cuyo éxito radica en la adecuada selección del sitio, en su diseño y, por supuesto, en su óptima operación y control (Organización Panamericana de la Salud, 2007).

Dentro de la óptima operación y control deben construirse obras que complementen el Relleno Sanitario (Proyecto Ejecutivo del Relleno Sanitario Metropolitano Poniente, Picachos, 1999):

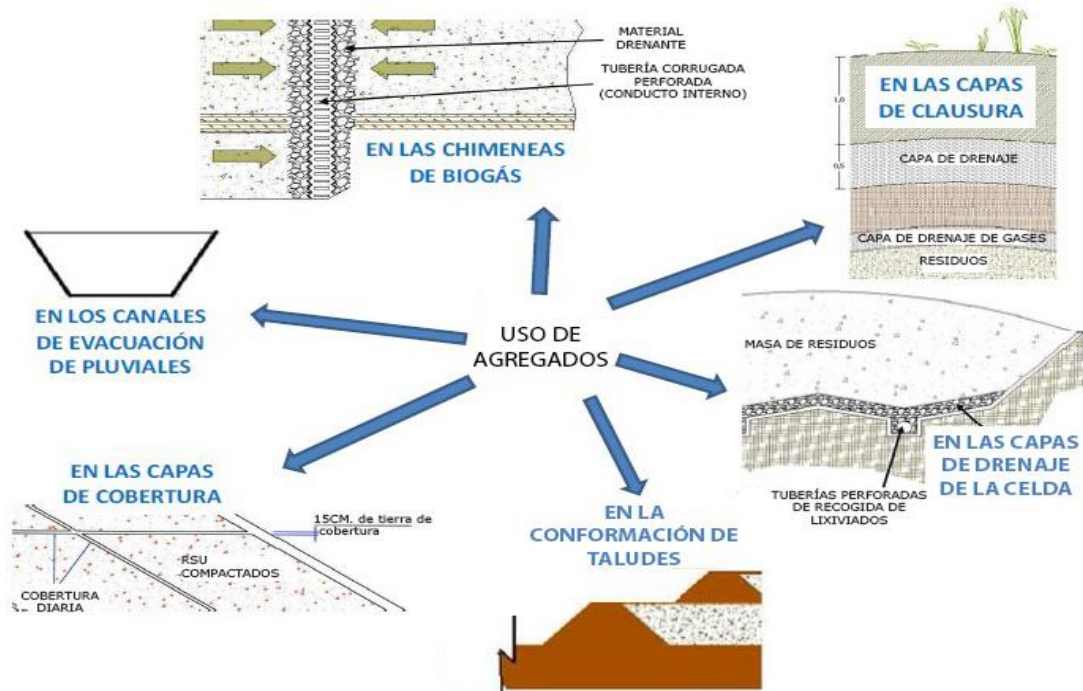
- Obras hidráulicas de encausamiento y/o desvío de aguas pluviales.
- Caminos.
- Camino de acceso principal.
- Camino principal del relleno.
- Caminos internos de operación.
- Obras complementarias y de control.
- Caseta de control de ingreso y vigilancia.
- Báscula y caseta de control de pesaje.
- Oficinas administrativas.
- Estacionamiento.
- Taller y cobertizo de maquinaria.

Y retomando lo establecido en el estudio realizado por la división de Ingeniería de Residuos del Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción de la Universidad Jaume I, Castellón, España; denominado: “Aprovechamiento de residuos inertes para la construcción, explotación y clausura de rellenos sanitarios,” los RC&D reciclados como gravas y arenas pueden ser utilizados en las siguientes obras dentro de un relleno sanitario:

- En las chimeneas de biogás.
- En las capas de clausura.
- En las capas de drenaje de la celda.
- En la conformación de taludes.

- En las capas de cobertura.
- En los canales de evacuación pluvial.

Figura 1.2. Uso de arena y grava recicladas dentro de Rellenos Sanitarios.



Fuente: Adaptado de “Aprovechamiento de residuos inertes para la construcción, explotación y clausura de rellenos sanitarios.” División de Ingeniería de Residuos del Depto. de Ingeniería Mecánica y Construcción de la Universidad Jaime I, Castellón, España.

**CAPÍTULO 2.**  
**PRUEBAS DE LABORATORIO**  
**PRELIMINARES Y ELABORACIÓN**  
**DE LOS ESPECÍMENES DE**  
**CONCRETO HIDRÁULICO.**

## CAPÍTULO 2. PRUEBAS DE LABORATORIO PRELIMINARES Y ELABORACIÓN DE LOS ESPECÍMENES DE CONCRETO HIDRÁULICO.

Con la finalidad de utilizar agregados reciclados en capas de clausura, en capas de drenaje de celda, en la conformación de taludes, en capas de cobertura y en la construcción de canales de evacuación pluvial de rellenos sanitarios; se realizarán pruebas de resistencia al concreto elaborado en diversas proporciones mezclando agregados vírgenes y reciclados, y pruebas de permeabilidad mezclando tepetate y arena reciclada y con ello verificar su posible uso. Pero antes de realizar las pruebas de resistencia y permeabilidad se procedió a realizar algunas pruebas preliminares de laboratorio para establecer las características de los materiales con los que se realizarán dichas mezclas de concreto; estas pruebas preliminares son: granulometría, peso volumétrico, contenido de humedad y absorción.



Figura 2.1. Entrada Concretos Reciclados S.A. de C.V.  
Fuente: Elaborado por el autor.

Para la elaboración de todas las pruebas de laboratorio fue necesario solicitar a Concretos Reciclados S.A. de C.V. grava y arena reciclada. La recicladora proporcionó un metro cúbico ( $m^3$ ) de arena reciclada de tamaño máximo nominal 4.75 mm (No. 4) y un metro cúbico ( $m^3$ ) de grava reciclada de



tamaño máximo nominal 19.05 mm (3/4”). Estos tamaños serán verificados con la prueba de granulometría.



Figura 2.2. Agregados reciclados, Concretos Reciclados S.A. de C.V.  
Fuente: Elaborado por el autor.



Figura 2.3. Carga y acarreo de agregados reciclado, Concretos Reciclados S.A. de C.V.  
Fuente: Elaborado por el autor.

Para las pruebas mencionadas anteriormente también será necesario utilizar arena, grava y tepetate vírgenes.

La arena y grava vírgenes fueron compradas en una casa de materiales cercana a Concretos Reciclados en la delegación Iztapalapa, adquiriéndose 4 botes de arena y 4 de grava.

Por otra parte, el tepetate fue donado por el Relleno Sanitario del municipio de Tlalnepantla de Baz, Estado de México, que es operado por Proactiva Medio Ambiente, S.A. de C.V.

El material adquirido fue encostalado y almacenado en los Laboratorios de Ingeniería Civil de la Facultad de Estudios Superiores (FES) Acatlán de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).



Figura 2.4. Arena y grava vírgenes, Casa de materiales delegación Iztapalapa.  
Fuente: Elaborado por el autor.



Figura 2.5. Banco de tepetate del Relleno Sanitario de Tlalnepantla de Baz.  
Fuente: Elaborado por el autor.



Figura 2.6. Material encostalado.  
Fuente: Elaborado por el autor.

Para definir cómo se comportarán los agregados reciclados en la mezcla de concreto para la construcción de canales de evacuación pluvial en rellenos sanitarios, se realizaron pruebas de compresión axial en cilindros de concreto hidráulico, elaborados con materiales vírgenes y reciclados con el objetivo de determinar su resistencia.

La NADF-007-RNAT-2004 establece que puede usarse por lo menos 25% de agregados reciclados de la mezcla total de concreto, por lo que para las pruebas de este trabajo se distribuirán los porcentajes de material virgen y reciclado en las mezclas de concreto de la siguiente manera:

- 100% agregados vírgenes.
- 15% agregados reciclados y 85% agregados vírgenes.
- 30% agregados reciclados y 70% agregados vírgenes.
- 45% agregados reciclados y 55% agregados vírgenes.
- 60% agregados reciclados y 40% agregados vírgenes.
- 75% agregados reciclados y 25% agregados vírgenes.
- 90% agregados reciclados y 10% agregados vírgenes.
- 100% agregados reciclados.

Para obtener resultados representativos se elaborarán 3 cilindros por cada variación de porcentaje de agregados vírgenes y agregados reciclados.

➤ **Proporcionamiento teórico de la mezcla.**

Debido a la naturaleza de la construcción (canales de evacuación pluvial en rellenos sanitarios), la resistencia mínima que se requiere es de  $100 \text{ kg/cm}^2$ . Es una resistencia baja, además de que se está considerando variar la cantidad de agregados reciclados con agregados vírgenes que estarán presentes en las mezclas de concreto, por lo que el diseño de la mezcla se elaborará con base en el Manual del Constructor de CEMEX Concretos. De acuerdo con este manual, el proporcionamiento de mezclas de concreto recomendadas en obras pequeñas de resistencia  $f'c = 100 \text{ kg/cm}^2$  (banquetas, firmes, muros y pisos), para una grava de tamaño máximo nominal de 19.05mm (3/4") y una arena de 4.75 mm (No. 4), que son los tamaños máximos nominales proporcionados por Concretos Reciclados S.A de C.V., para un metro cúbico de mezcla es como se muestra en la tabla 2.1:

Tabla 2.1. Proporcionamientos típicos de mezclas de concreto.

<b>Resistencia a la compresión (<math>f'c</math> [<math>\text{kg/cm}^2</math>])</b>	<b>100</b>	<b>150</b>	<b>200</b>	<b>250</b>	<b>300</b>
Cemento (kg)	265	310	350	390	450
Grava 3/4" (kg)	1000	1000	1000	1000	1000
Arena no. 4 (kg)	900	860	825	790	740
Agua (lts)	205	205	205	205	205

Fuente: Manual del Constructor, CEMEX Concretos.

Para la elaboración de los cilindros de concreto simple para pruebas de compresión axial se debe considerar un tamaño de 150 x 300 mm o 100 x 200 mm, cuando así se especifique. (ASTM C31). Para las pruebas realizadas en este trabajo se utilizaron cilindros de 150 x 300 mm. Una vez establecido esto, se procede a obtener el volumen del cilindro:

$$\text{Área} = \frac{\pi D^2}{4}, \text{ donde } D \text{ es diámetro.}$$

$$\text{Área} = \frac{\pi (0.15\text{m})^2}{4} = 0.0177 \text{ m}^2$$

$$\text{Volumen} = \text{Área} \times \text{Altura.}$$

$$\text{Vol} = (0.0177 \text{ m}^2)(0.3\text{m}) = 0.0053 \text{ m}^3$$

Considerando que se elaborarán tres cilindros por cada variación, se calcula el volumen total para éstos:

$$\text{Vol de 3 cilindros} = (0.0053)(3) = 0.0159 \text{ m}^3$$

Adicional a esto y de acuerdo con el Manual de Prácticas del Laboratorio de Resistencia de Materiales I de la FES Acatlán, se prevé un 10% de desperdicio, por lo cual se obtiene un volumen total por cada tres cilindros de:

$$\text{Vol total} = (0.0159)(1.10) = 0.0175 \text{ m}^3$$

Recordando el proporcionamiento típico de mezclas de concreto establecido en el Manual de Cemex Concretos, para una resistencia  $f'c = 100 \text{ kg/cm}^2$  por cada metro cúbico se necesitan: 265 kg de cemento, 1000 kg de grava, 900 kg de arena y 205 lts de agua. Una vez establecido esto y considerando el volumen total obtenido de  $0.0175 \text{ m}^3$ , se realiza una relación para obtener la cantidad de cemento, grava, arena y agua que se necesita para dicho volumen:

Ejemplo Cemento:

$$\frac{265 \text{ kg}}{x} \leftrightarrow \frac{1 \text{ m}^3}{0.0175 \text{ m}^3}$$
$$x = \frac{(265 \text{ kg})(0.0175 \text{ m}^3)}{1 \text{ m}^3} = 4.636 \text{ kg}$$

Esto se realiza para cada elemento de la mezcla, por lo tanto para la elaboración de tres cilindros se necesita:

Cemento (kg)	4.636
Grava (kg)	17.495
Arena (kg)	15.745
Agua (lts)	3.586

Estas cantidades son las que se utilizarán para los cilindros elaborados únicamente con material virgen y para los elaborados sólo con material reciclado. Para las variaciones de porcentajes de material virgen y reciclado se obtuvieron los siguientes datos:

Para los tres cilindros con 15% de agregados  
reciclados y 85% de agregados vírgenes:

Cemento (kg)	4.636
Grava virgen (kg)	14.871
Grava reciclada* (kg)	2.624*
Arena virgen (kg)	13.383
Arena reciclada* (kg)	2.362*
Agua (lts)	3.586

\*Para obtener la cantidad de material reciclado se tomaron los 17.5 kg y los 15.75 kg que se necesitan de grava y arena respectivamente, se calcula el 15% para determinar la cantidad de material reciclado y con el 85% se determina la cantidad de los agregados vírgenes. Este mismo procedimiento se realiza en todas las variaciones de porcentaje como se muestra a continuación:

Para los tres cilindros con 30% de agregados  
reciclados y 70% de agregados vírgenes:

Cemento (kg)	4.636
Grava virgen(kg)	12.246
Grava reciclada (kg)	5.248
Arena virgen (kg)	11.022
Arena reciclada (kg)	4.724
Agua (lts)	3.586

Para los tres cilindros con 45% de agregados  
reciclados y 55% de agregados vírgenes:

Cemento (kg)	4.636
Grava virgen (kg)	9.622
Grava reciclada (kg)	7.873
Arena virgen (kg)	8.660
Arena reciclada (kg)	7.085
Agua (lts)	3.586

Para los tres cilindros con 60% de agregados  
reciclados y 40% de agregaos vírgenes:

Cemento (kg)	4.636
Grava virgen(kg)	6.998
Grava reciclada (kg)	10.497
Arena virgen (kg)	6.298
Arena reciclada (kg)	9.477
Agua (lts)	3.586

Para los tres cilindros con 75% de agregados  
reciclados y 25% de agregados vírgenes:

Cemento (kg)	4.636
Grava virgen(kg)	4.374
Grava reciclada (kg)	13.121
Arena virgen(kg)	3.936
Arena reciclada (kg)	11.809
Agua (lts)	3.586

Para los tres cilindros con 90% de agregados  
reciclados y 10% de agregados vírgenes:

Cemento (kg)	4.636
Grava virgen(kg)	1.749
Grava reciclada (kg)	15.745
Arena virgen(kg)	1.575
Arena reciclada (kg)	14.171
Agua (lts)	3.586

El total del material que se utilizará para la elaboración de los 24 cilindros es de:

Cemento (kg)	<b>37.089</b>
Grava virgen(kg)	<b>67.355</b>
Grava reciclada (kg)	<b>72.603</b>
Arena virgen(kg)	<b>60.619</b>
Arena reciclada (kg)	<b>65.343</b>
Agua (lts)	<b>28.691</b>



## **2.1. Pruebas de laboratorio preliminares.**

Aunque ya está determinada la dosificación teórica, que aparece en la tabla 2.1 del Manual del Constructor de CEMEX Concretos, es importante conocer las propiedades de los materiales reciclados que se utilizarán en la elaboración de las mezclas de concreto. Las pruebas de laboratorio preliminares fueron realizadas en los Laboratorios de ingeniería de la FES Acatlán con el apoyo del Programa de Ingeniería Civil de esta institución.

### **2.1.1. Determinación de propiedades de los agregados reciclados.**

#### **a) Granulometría de la grava reciclada.**

El análisis granulométrico de los agregados pétreos tiene por objeto separar y conocer los porcentajes en que se encuentra cada tamaño de fragmento de roca en una muestra. Es ampliamente recomendable que los materiales reúnan una gama amplia de tamaños para que la cantidad de espacios entre los granos de agregados en una mezcla, sea lo más reducida posible, ya que estos espacios serán llenados por el cemento, que es el material más caro de la mezcla y por ende aumentaría los costos y reduciría la eficiencia del concreto a elaborar. (Álvarez, Constantini & Gómez, 2013).

Para realizar esta prueba se necesita el siguiente equipo:

Charola.

Cribas (Mallas o tamices) de los siguientes tamaños: 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8" y #4.

Máquina agitadora.

Báscula.

Cucharón.

Pala.

Brocha.

Los cuáles son proporcionados por el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la FES Acatlán, UNAM.



Figura 2.7. Equipo para prueba de granulometría.

Fuente: Manual de Prácticas del Laboratorio de Resistencia de Materiales I, FES Acatlán, UNAM, 2013.

El material a probar es la grava reciclada.

Desarrollo:

Se tomó una muestra de grava reciclada representativa del total proporcionado por Concretos Reciclados S.A. de C.V.



Figura 2.8. Muestra representativa de grava reciclada en la charola.

Fuente: Elaborado por el autor.

Una vez que el material se encuentra en la charola, se realizará el método del cuarteo:

Primeramente se aplana con la pala ligeramente la pila y se divide en cuatro partes en cruz.



Figura 2.9. Muestra dividida en cuatro partes en cruz sobre la charola.

Fuente: Elaborado por el autor.

Ya que se tiene el material cuarteado se desechan los cuartos opuestos y se mezclan bien los otros dos.



Figura 2.10. Muestra después de desechar los cuartos opuestos.

Fuente: Elaborado por el autor.



Figura 2.11. Muestra bien mezclada.

Fuente: Elaborado por el autor.

La muestra obtenida se pesa en la báscula.



Figura 2.12. Determinación del peso de la muestra.

Fuente: Manual de Prácticas del Laboratorio de Resistencia de Materiales I, FES Acatlán, 2013.

La muestra será depositada sobre las cribas, que fueron previamente acomodadas en orden descendente de abertura, colocándose de la siguiente manera: 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", #4.



Figura 2.13. Cribas acomodadas en orden descendente de abertura.

Fuente: Elaborado por el autor.



Figura 2.14. Depósito de la muestra sobre las cribas.

Fuente: Elaborado por el autor.

Se tapan bien las cribas y se procede a agitar mediante la máquina agitadora, que tiene un ciclo automático aproximadamente de cinco minutos.



Figura 2.15. Cribas sobre máquina agitadora.

Fuente: Elaborado por el autor.

Terminado el ciclo de la máquina agitadora, se procede a determinar el peso retenido en cada criba así como el porcentaje que es retenido y que pasa a través de cada criba

Los resultados obtenidos son presentados en la tabla 2.2:

La muestra tuvo un peso de 1662.9 g.

Tabla 2.2. Resultados obtenidos del cribado de la grava reciclada.

TAMAÑO DE LA MALLA	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
1 1/2" (37.5mm)	0	0	0	100
1" (25 mm)	76.5	4.600	4.600	95.400
3/4" (19 mm)	492.8	29.635	34.235	65.765
1/2" (12.5 mm)	638.6	38.403	72.638	27.362
3/8" (9.5 mm)	292.4	17.584	90.222	9.778
#4 (4.75 mm)	154.4	9.285	99.507	0.493
charola	8.2	0.493	100.000	0.000

Fuente: Elaborado por el autor.

El tamaño máximo de un agregado es el menor tamaño de malla por el cual todo el agregado debe pasar. El tamaño máximo nominal de un agregado, es el menor tamaño de malla por el cual debe pasar la mayor parte del agregado. La malla de tamaño máximo nominal, puede retener de 5% a 15% del agregado dependiendo del número de tamaño. (Manual de Prácticas de Laboratorio de Concreto. Universidad Autónoma de Chihuahua).

Tabla 2.3. Requisitos de granulometría para los agregados gruesos (ASTM C 33).

Número de Tamaño	Tamaño nominal (mallas con aberturas cuadradas)	Cantidades menores que pasan cada malla de laboratorio (aberturas cuadradas), por ciento en peso												
		(100 mm) 4 pulg	(90 mm) 3.5 pulg	(75 mm) 3 pulg	(63 mm) 2.5 pulg	(50 mm) 2 pulg	(37.5 mm) 1.5 pulg	(25.0 mm) 1 pulg	(19.0 mm) ¾ pulg	(12.5 mm) ½ pulg	(9.5 mm) 3/8 pulg	(4.75 mm) No.4	(2.36 mm) No.8	(1.18 mm) No.16
1	90 a 37.5 mm	100	90 a 100	----	25 a 60	----	0 a 15	----	0 a 5	----	----	----	----	
2	63 a 37.5 mm	----	----	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	----	0 a 5	----	----	----	----	
3	50 a 25.0 mm	----	----	----	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	----	0 a 5	----	----	----	
357	50 a 4.75 mm	----	----	----	100	95 a 100	----	35 a 70	----	10 a 30	----	0 a 5	----	
4	37.5 a 19.0 mm	----	----	----	----	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	----	0 a 5	----	----	
467	37.5 a 4.75 mm	----	----	----	----	100	95 a 100	----	35 a 70	----	10 a 30	0 a 5	----	
5	25.0 a 12.5 mm	----	----	----	----	----	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	----	----	
56	25.0 a 9.5 mm	----	----	----	----	----	100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	----	
57	25.0 a 4.75 mm	----	----	----	----	----	100	95 a 100	----	25 a 60	----	0 a 10	0 a 5	

Fuente: Manual de Prácticas de Laboratorio de Concreto. Universidad Autónoma de Chihuahua.

De acuerdo con los resultados obtenidos de las pruebas de cribado y con base en la tabla anterior, la grava reciclada que se utilizó para realizar los cilindros fue del número 56 (tamaño nominal de 25.0 a 9.5 mm) y un tamaño máximo de agregado de 1" (25 mm).

Para conocer qué tan bien o mal graduada se encuentra la grava reciclada, se graficará el porcentaje que pasa por cada criba en la gráfica de límites granulométricos como se muestra en la figura 2.16:

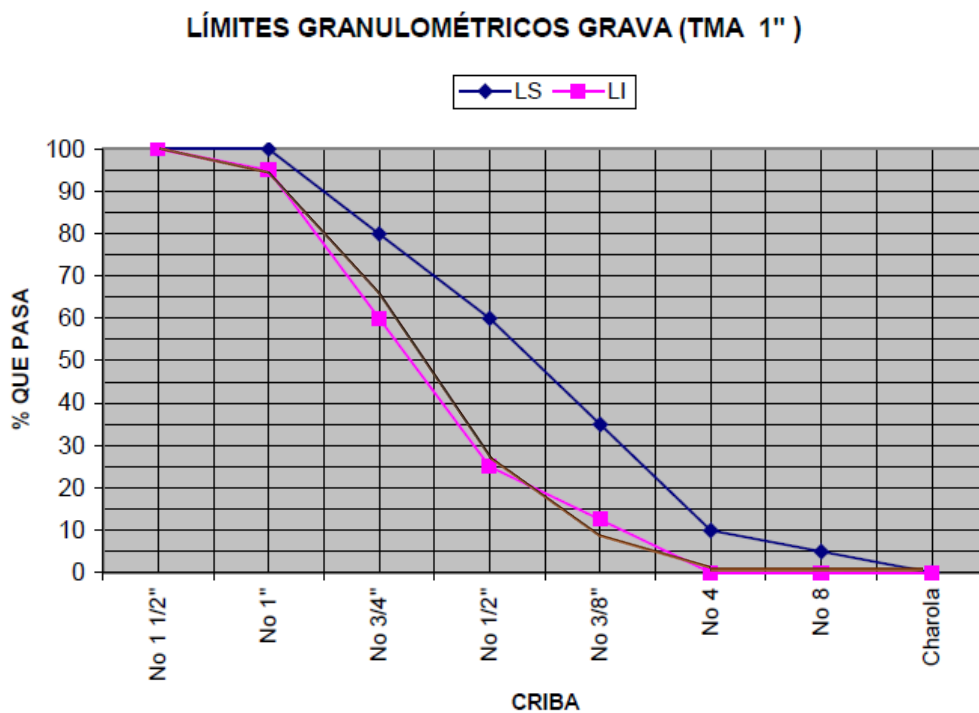


Figura 2.16. Gráfica de los límites granulométricos para una grava TMA 1", presentando los límites superior e inferior, así como la gráfica de la grava reciclada que se utilizó para realizar las mezclas de concreto.

Fuente: Manual de Prácticas del Laboratorio de Resistencia de Materiales I, FES Acatlán, UNAM, 2013.

Como se puede observar en la gráfica 2.16, la grava reciclada que se utilizó para la elaboración de los cilindros solamente sale de rango en la criba de 3/8", por lo tanto tiene una graduación aceptable.



## b) Granulometría de la arena reciclada.

Para esta prueba se siguieron los mismos pasos que se realizaron para la grava reciclada, únicamente varían los tamaños de mallas: 3/8", #4, #8, #16, #30, #50 y #100.

Los resultados obtenidos son presentados en la tabla 2.4:

La muestra tuvo un peso de 898 g

Tabla 2.4. Resultados obtenidos del cribado de la arena reciclada.

<b>TAMAÑO DE LA MALLA</b>	<b>PESO RETENIDO (g)</b>	<b>% RETENIDO</b>	<b>% RETENIDO ACUMULADO</b>	<b>% QUE PASA</b>
<b>9.52 mm (3/8")</b>	0	0	0	100.000
<b>4.75 mm (no.4)</b>	34.2	3.808	3.808	96.192
<b>2.36 mm (no.8)</b>	183.9	20.479	24.287	75.713
<b>1.18 mm (no.16)</b>	213.2	23.742	48.029	51.971
<b>0.60 mm (no.30)</b>	390.6	43.497	91.526	8.474
<b>0.30 mm (no.50)</b>	66	7.350	98.875	1.125
<b>0.15 mm (no.100)</b>	7.5	0.835	99.710	0.290
<b>Charola</b>	2.4	0.267	99.977	0.022

Fuente: Elaborado por el autor

El módulo de finura de la arena es una medida de lo grueso o fino de una arena y se calcula como la suma de los porcentajes retenidos acumulados en una serie estándar de cribas o tamices (comprendidos entre los números 8 y 100) dividido entre 100. ((Álvarez et al., 2013). A continuación se muestra la determinación del módulo de finura de la arena reciclada:

$$M_f = \frac{\sum \text{porcentajes retenidos acumulados entre la malla no. 8 y 100}}{100}$$

$$Mf = \frac{24.287 + 48.029 + 91.526 + 98.875 + 99.710}{100} = \frac{362.428}{100} = 3.62$$

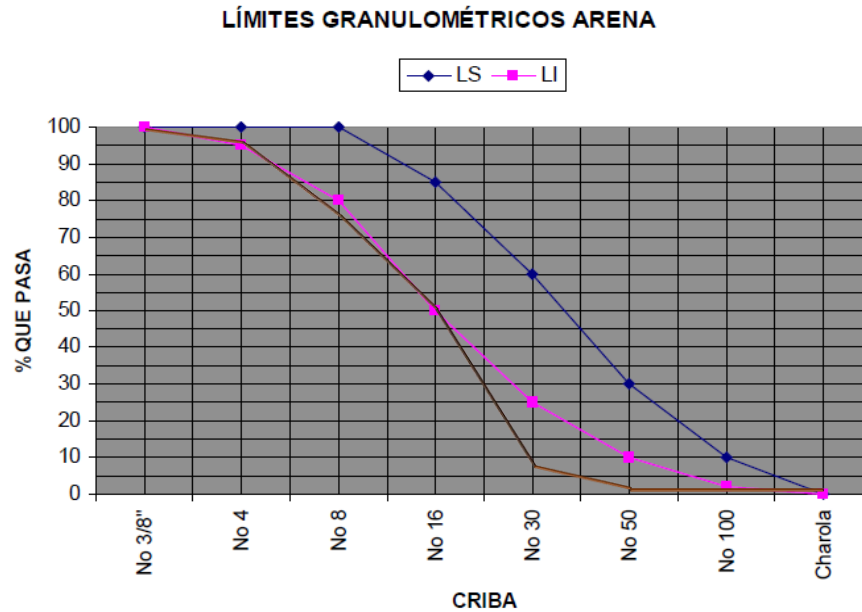


Figura 2.17. Gráfica de los límites granulométricos de la arena reciclada.

Fuente: Manual de Prácticas del Laboratorio de Resistencia de Materiales I, FES Acatlán, UNAM, 2013.

Como se puede observar en la gráfica, la arena reciclada está mal graduada, además de que, como establece el American Society for Testing Materials (ASTM), el módulo de finura no debe ser inferior a 2.3 ni superior a 3.1. No obstante, estos materiales no son de primera calidad, por lo que el control de su granulometría puede considerarse sólo como un valor de referencia.

### c) **Peso volumétrico.**

El peso volumétrico es la relación entre el peso de un material y el volumen ocupado por el mismo, expresado generalmente en kilogramos fuerza por metro cúbico. Hay dos valores para esta relación, dependiendo del grado de acomodo que se le haya dado al material durante la prueba; la denominación que se asigna es peso volumétrico suelto y peso volumétrico compactado. La utilización de uno o de otro depende de las condiciones de manejo a que se sujeten los materiales al

emplearlos. El peso volumétrico compactado se usa invariablemente para la conversión de peso a volumen en el proporcionamiento de mezclas, es decir para conocer el consumo de agregados por metro cúbico de concreto. El peso volumétrico suelto, se usa para conocer los volúmenes de materiales almacenados y que no están sujetos al acomodamiento o asentamiento provocados por el tránsito sobre ellos o por la acción del tiempo. (Álvarez et al., 2013).

Para obtener el peso volumétrico se utilizó el siguiente equipo:

Contenedor y marco de enrase.

Cucharón.

Varilla.

Báscula.



Figura 2.18. Contenedor, marco de enrase y varilla para obtener peso volumétrico.

Fuente: Manual de Prácticas del Laboratorio de Resistencia de Materiales I, FES Acatlán, UNAM, 2013.

Primeramente se obtiene el volumen interior del contenedor; que tiene 0.16 m de alto, 0.245 m de un lado y 0.246 m del otro:

$$Vol = (0.16 \text{ m})(0.245 \text{ m})(0.246 \text{ m}) = 0.0096 \text{ m}^3$$

Y tal como se hizo en la prueba de granulometría, por el método de cuarteo se obtiene una porción representativa de la muestra.

Para obtener el peso volumétrico suelto, se llena con la muestra el contenedor, con el marco de enrase colocado sobre él, hasta que la muestra esté por encima del marco de enrase; el marco de enrase se quita en forma vertical y se enrasa la superficie con la varilla sin aplicar presión a la muestra. Esta muestra no compactada se pesa y se determina el peso volumétrico suelto con la siguiente fórmula:

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$

Dónde:

$\gamma_s$  = peso volumétrico suelto en  $\text{kg/m}^3$ .

$W_s$  = Peso de la muestra suelta en kg.

$V_s$  = Volumen de la muestra en  $\text{m}^3$ .

A continuación se muestran los resultados de la grava y arena recicladas respectivamente:

- Grava Reciclada:

$$\gamma_s = \frac{15.74 \text{ kg}}{0.0096 \text{ m}^3} = 1639.583 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

- Arena reciclada:

$$\gamma_s = \frac{14.27 \text{ kg}}{0.0096 \text{ m}^3} = 1486.458 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Para obtener el peso volumétrico compactado o peso específico se realiza el casi el mismo procedimiento, la única variante es el llenado del contenedor el cuál se realiza en tres capas del mismo tamaño; cada una de estas capas será

compactada con la varilla cuidando no triturar el material, picando 25 veces en forma de espiral del centro hacia afuera.

A continuación se muestran los resultados de la grava y arena recicladas respectivamente:

- Grava Reciclada:

$$\gamma_c = \frac{23.15 \text{ kg}}{0.0096 \text{ m}^3} = 2411.458 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

- Arena reciclada:

$$\gamma_c = \frac{22.76 \text{ kg}}{0.0096 \text{ m}^3} = 2370.833 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

#### **d) Corrección del peso volumétrico por contenido de humedad.**

El valor del peso volumétrico, ya sea suelto o compactado, se debe corregir por contenido de humedad, ya que el agua que suelen contener los agregados, especialmente cuando se extraen de los bancos o almacenes a la intemperie, influye en el peso aunque no forma parte de la masa rocosa del material. Por lo tanto habrá que hacer los ajustes necesarios una vez que, por un procedimiento de secado, se conozca el porcentaje del líquido que acompaña a las muestras. (Álvarez et al., 2013).

Días previos a que Concretos Reciclados S.A. de C.V. proporcionara el material llovió bastante en la Ciudad de México, por lo que los agregados estaban muy húmedos. Para determinar éste contenido de humedad, se utilizará el siguiente equipo:

Parrilla eléctrica.

Vidrio de reloj.

Sartén.

Cucharón.

Báscula.

Primeramente se procede a tomar una muestra del material con el cucharón y pesarlo, una vez obtenido el peso de la muestra se pone a secar en la parrilla eléctrica; para comprobar que el material está completamente seco se colocará el vidrio de reloj sobre la muestra, si ya no se empaña el vidrio se habrá conseguido eliminar el agua de los agregados.



Figura 2.19. Peso de la muestra más el sartén sin secar.

Fuente: Elaborado por el autor.



Figura 2.20. Secando la muestra en la parrilla eléctrica.

Fuente: Elaborado por el autor.

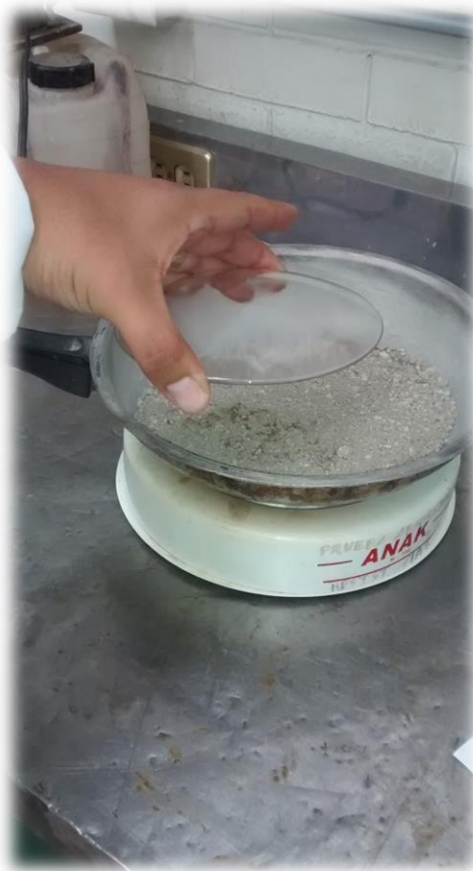


Figura 2.21. Comprobando si aún hay humedad con el vidrio de reloj.

Fuente: Elaborado por el autor.

Seco el material, se vuelve a pesar y el contenido de humedad se calcula con la siguiente fórmula:

$$H = \frac{\text{Peso humedo} - \text{peso seco}}{\text{Peso seco}} \times 100$$

Contenido de humedad arena reciclada.

Peso sartén = 685.6 g

Peso sartén + arena reciclada húmeda= 1047.2 g

Peso sartén + arena reciclada seca = 1002.9 g

**H = 13.962%**

Contenido de humedad grava reciclada.

Peso sartén = 685.1g

Peso sartén + grava reciclada húmeda= 1047.4 g

Peso sartén + grava reciclada seca = 1039.2 g

**H = 2.316%**

Con los contenidos de humedad se calcula el peso volumétrico (suelto y compacto) corregido:

- Grava reciclada:

$$\gamma'_s = \gamma_s - \gamma_s H = 1639.583 - (1639.583 \times 0.023) = \mathbf{1601.873 \text{ kg/m}^3}$$

$$\gamma'_c = \gamma_c - \gamma_c H = 2411.458 - (2411.458 \times 0.023) = \mathbf{2355.994 \text{ kg/m}^3}$$



- Arena reciclada:

$$\gamma' s = \gamma s - \gamma s H = 1486.458 - (1486.458 \times 0.1396) = \mathbf{1278.948 \text{ kg/m}^3}$$

$$\gamma' c = \gamma c - \gamma c H = 2370.833 - (2370.833 \times 0.1396) = \mathbf{2039.865 \text{ kg/m}^3}$$

Dónde:

$\gamma' s$  = peso volumétrico suelto corregido.

$\gamma' c$  = peso volumétrico compactado corregido.

$\gamma s$  = peso volumétrico suelto.

$\gamma c$  = peso volumétrico compactado.

H = Contenido de humedad.

#### **e) Absorción.**

La absorción es la cantidad de agua que puede ser atrapada en el interior de los agregados, expresada como porcentaje del peso seco de las muestras. Para su cálculo, los materiales en estado saturado y superficialmente seco (SSS) se pesan antes y después de someterlos a un proceso de secado total; la diferencia entre los dos pesos, dividida entre el peso seco y multiplicada por 100, es el porcentaje de absorción. Este es otro de los valores importantes por conocer ya que al proporcionar mezclas, se debe adicionar al agua de mezclado (la que produce la reacción química de hidratación del cemento), la cantidad que absorben los materiales, con el propósito de mantener intacta la relación agua/cemento que es determinante en la resistencia a compresión de los concretos endurecidos. Si el porcentaje de humedad en el material es menor que el de absorción, este tomará parte del agua de mezclado por lo que debe adicionarse agua. En caso de que sea mayor, el agregado aporta agua y por lo tanto deberá restarse esta aportación a la de mezclado, con el mismo propósito de mantener inalterable la relación agua/cemento del concreto. (Álvarez et al., 2013).

Para realizar la prueba de absorción se necesita el siguiente equipo:

Cono.

Báscula.

Charola.

Papel de estraza.

Cubetas.

Pisón.

El primer paso es obtener por el método de cuarteo el tamaño de la muestra de arena y grava recicladas que se desea para la prueba. Una vez obtenidas las muestras de ambos agregados, se dejarán saturar dentro de una cubeta con agua limpia por veinticuatro horas. Cumplido este tiempo, se secarán las muestras con papel de estraza hasta llevarlas a la condición SSS, en la grava esto sucede cuando desaparece su brillo superficial; en la arena cuando esta fluya libremente según la prueba de desmoronamiento que consiste en colocar el cono de desmoronamiento con la boca mayor hacia abajo sobre una superficie que no sea absorbente ni lisa, se llena el cono con la arena reciclada y se compacta con el peso del pisón dejándolo caer 25 veces sin darle mucha altura, una vez compactado se enrasa y se levanta el cono para verificar el desmoronamiento.



Figura 2.22. Secado superficial de la grava.

Fuente: Manual de Prácticas del Laboratorio de Resistencia de Materiales I, FES Acatlán, 2013.



Figura 2.23. Verificación del desmoronamiento.

Fuente: Manual de Prácticas del Laboratorio de Resistencia de Materiales I, FES Acatlán, 2013.

Después de dejar ambos agregados en estado SSS se pesan y se procede a secarlos en la parrilla eléctrica tal cómo se hizo en la prueba del contenido de humedad. El porcentaje de absorción se obtendrá mediante la siguiente fórmula:

$$ABS = \frac{\text{peso superficialmente seco y saturado} - \text{peso seco}}{\text{peso seco}} \times 100$$

Absorción arena reciclada.

Peso sartén = 685.6 g

Peso sartén + arena reciclada SSS = 1060.3 g

Peso sartén + arena reciclada seca = 1032.7 g

**ABS = 7.952%**

Absorción grava reciclada.

Peso sartén = 685.6 g

Peso sartén + grava reciclada SSS = 1050.4 g

Peso sartén + grava reciclada seca = 1035.2 g

**ABS = 4.34%**

### **2.1.2. Determinación de propiedades de los agregados vírgenes.**

Se realizaron exactamente los mismos procedimientos utilizados en los agregados reciclados para obtener los resultados de las pruebas, por lo que para los agregados vírgenes sólo serán presentados los resultados de dichas pruebas; con esto se podrán emitir comparaciones entre ambos tipos de agregados así como ajustes para las proporciones de los elementos de las mezclas de concreto a realizar.

#### **a) Granulometría de la grava virgen.**

Los resultados obtenidos del cribado de la grava virgen son presentados en tabla 2.5:

La muestra tuvo un peso de 1459.2 g.

Tabla 2.5. Resultados obtenidos del cribado de la grava virgen.

<b>TAMAÑO DE LA MALLA</b>	<b>PESO RETENIDO (g)</b>	<b>% RETENIDO</b>	<b>% RETENIDO ACUMULADO</b>	<b>% QUE PASA</b>
<b>1 1/2" (37.5mm)</b>	0	0	0	100
<b>1" (25 mm)</b>	36.5	2.501	2.501	97.499
<b>3/4" (19 mm)</b>	358.8	24.589	27.090	72.910
<b>1/2" (12.5 mm)</b>	390.7	26.775	53.865	46.135
<b>3/8" (9.5 mm)</b>	335.8	23.013	76.878	23.122
<b>#4 (4.75 mm)</b>	322.8	22.122	98.999	1.001
<b>charola</b>	14.6	1.001	100.000	0.000

Fuente: Elaborado por el autor.

De acuerdo con la tabla 2.3, la grava virgen que utilizaremos para realizar los cilindros se ajusta mayormente al número 56 (tamaño nominal de 25.0 a 9.5 mm) ya que únicamente la malla de 1/2" y la de 3/8" se salen de rango por muy poco (la malla de 1/2" debería estar en un rango de 10 a 40 y la malla de 3/8" en un rango de 0 a 15); y un tamaño máximo de agregado de 1" (25 mm).

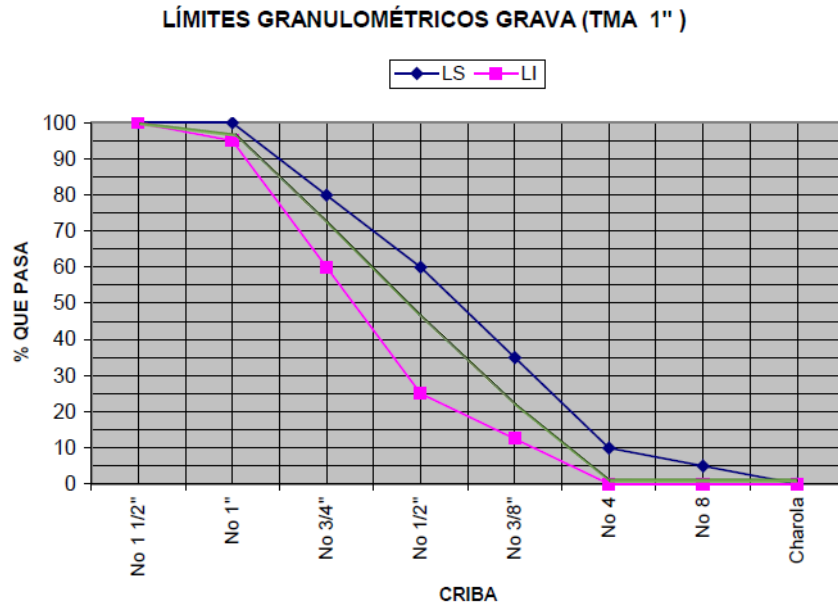


Figura 2.24. Gráfica de los límites granulométricos para una grava TMA 1", presentando los límites superior e inferior, así como la gráfica de la grava virgen que se utilizó para realizar las mezclas de concreto.

Fuente: Manual de Prácticas del Laboratorio de Resistencia de Materiales I, FES Acatlán, 2013.

Como se puede observar en la gráfica anterior, la grava virgen que se utilizará para elaborar las mezclas de concreto es una grava perfectamente graduada.

### **b) Granulometría de la arena virgen.**

Los resultados obtenidos del cribado de la arena virgen son presentados en la tabla 2.6:

El peso de la muestra es de 936.5 g

Tabla 2.6. Resultados obtenidos del cribado de la arena reciclada.

<b>TAMAÑO DE LA MALLA</b>	<b>PESO RETENIDO (g)</b>	<b>% RETENIDO</b>	<b>% RETENIDO ACUMULADO</b>	<b>% QUE PASA</b>
<b>9.52 mm (3/8")</b>	0	0	0	100
<b>4.75 mm (no.4)</b>	33.1	3.534	3.534	96.466
<b>2.36 mm (no.8)</b>	123.4	13.177	16.711	83.289
<b>1.18 mm (no.16)</b>	165.7	17.694	34.405	65.595
<b>0.60 mm (no.30)</b>	250.8	26.781	61.185	38.815
<b>0.30 mm (no.50)</b>	164.1	17.523	78.708	21.292
<b>0.15 mm (no.100)</b>	118.9	12.696	91.404	8.596
<b>Charola</b>	80.5	8.596	100.000	0.000

Fuente: Elaborado por el autor

El módulo de finura de la arena virgen es:  $16.711 + 34.405 + 61.185 + 78.708 + 91.404 = 282.413$ . Esto se divide entre 100 como se muestra a continuación.

$$Mf = \frac{282.413}{100} = 2.82$$

Como se puede observar, a diferencia de la arena reciclada, el módulo de finura de la arena virgen está dentro de los límites aceptados por el ASTM.

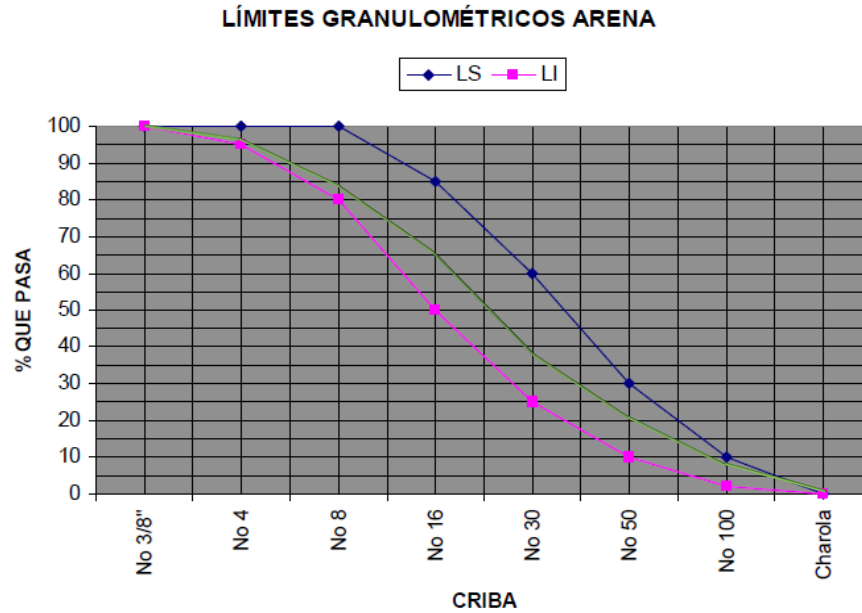


Figura 2.25. Gráfica de los límites granulométricos de la arena virgen.

Fuente: Manual de Prácticas del Laboratorio de Resistencia de Materiales I, FES Acatlán, 2013.

Así mismo, en la gráfica se observa que es una arena perfectamente graduada.

### c) *Peso volumétrico.*

Los resultados del peso volumétrico suelto de los agregados vírgenes se presentan a continuación:

- Grava virgen:

$$\gamma_s = \frac{14.02 \text{ kg}}{0.0096 \text{ m}^3} = 1460.418 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

- Arena virgen:

$$\gamma_s = \frac{12.88 \text{ kg}}{0.0096 \text{ m}^3} = 1341.667 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$



Peso volumétrico compactado o peso específico:

- Grava virgen:

$$\gamma_c = \frac{26.14 \text{ kg}}{0.0096 \text{ m}^3} = 2722.917 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

- Arena virgen:

$$\gamma_c = \frac{22.86 \text{ kg}}{0.0096 \text{ m}^3} = 2381.25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

**d) Corrección del peso volumétrico por contenido de humedad.**

A continuación se muestran los resultados obtenidos de la prueba de contenido de humedad tanto para arena como para grava vírgenes:

Contenido de humedad de arena virgen.

Peso sartén = 685.1 g

Peso sartén + arena virgen húmeda = 877.8 g

Peso sartén + arena virgen seca = 870.9 g

**H = 3.714 %**

Contenido de humedad grava virgen.

Peso sartén = 685.2 g

Peso sartén + grava virgen húmeda = 956.9 g

Peso sartén + grava virgen seca = 956.2 g

**H = 0.258 %**

Correcciones:

- Grava virgen:

$$\gamma's = \gamma_s - \gamma_s H = 1460.418 - (1460.418 \times 0.00258) = \mathbf{1456.650 \text{ kg/m}^3}$$

$$\gamma'c = \gamma_c - \gamma_c H = 2722.917 - (2722.917 \times 0.00258) = \mathbf{2715.892 \text{ kg/m}^3}$$

- Arena virgen:

$$\gamma's = \gamma_s - \gamma_s H = 1341.667 - (1341.667 \times 0.037) = \mathbf{1292.025 \text{ kg/m}^3}$$

$$\gamma'c = \gamma_c - \gamma_c H = 2381.25 - (2381.25 \times 0.037) = \mathbf{2293.144 \text{ kg/m}^3}$$

**e) Absorción.**

A continuación se muestran los resultados obtenidos de la prueba de absorción tanto para arena como para grava vírgenes:

Absorción de arena virgen.

Peso sartén = 685.1 g

Peso sartén + arena virgen SSS = 952.3 g

Peso sartén + arena virgen seca = 938.7 g

**H = 5.363 %**

Absorción de grava virgen.

Peso sartén = 685.2 g

Peso sartén + grava virgen SSS = 1056.9 g

Peso sartén + grava virgen seca = 1040.5 g

**H = 4.616 %**

De acuerdo con los resultados obtenidos se tiene un excelente material virgen, tanto grava como arena; sin embargo, el material reciclado tiene unas cuantas deficiencias en cuanto a granulometría, específicamente la arena, pero debido a que se trata de un material reciclado y que no se conoce mucho sobre su comportamiento se utilizará la dosificación teórica y se reportará su comportamiento.

➤ **Ajuste de las dosificaciones por contenido de humedad y absorción.**

El primer ajuste que se realizó al proporcionamiento teórico de las mezclas será por absorción y contenido de humedad, recordando que si el porcentaje de humedad en el material es menor que el de absorción, este tomará parte del agua de mezclado por lo que debe adicionarse agua; en caso de que sea mayor, el agregado aporta agua y por lo tanto deberá restarse esta aportación a la de mezclado, con el propósito de mantener inalterable la relación agua/cemento del concreto. (Álvarez et al., 2013).

Como ejemplo se realizará el ajuste para la mezcla que contiene 15% de material reciclado y 85% de material virgen:

El contenido de humedad de la grava virgen es de .258% y su absorción es de 4.616%, evidentemente la absorción es mayor y por lo tanto tomará parte del agua de mezclado por lo que hay que adicionarle agua.

Para determinar cuánta agua debe adicionarse por parte de la grava virgen primeramente se resta el contenido de humedad de la absorción:

$$0.04616 - 0.00258 = 0.0436$$

Luego se multiplica este porcentaje por el peso de la grava virgen que se utilizará en esta mezcla, con esto se obtendrá la cantidad de agua que debe adicionarse por parte de la grava virgen:

$$0.0436 \times 14.871 = 0.648$$

Así se obtendrá para la arena virgen, la grava reciclada y la arena reciclada:

- Arena virgen:

$$0.0536 - 0.0371 = 0.0165$$

$$0.0165 \times 13.383 = 0.221$$

- Grava reciclada:

$$0.0434 - 0.0232 = 0.020$$

$$0.020 \times 2.624 = 0.053$$

- Arena reciclada:

La arena reciclada es el único agregado en el que el contenido de humedad es mayor a su absorción, recordando que cuando el material fue proporcionado estuvo lloviendo muy fuerte y el material se encontraba sobresaturado:

$$0.0795 - 0.1396 = -0.060$$

$$-0.060 \times 2.362 = -0.142$$

Al final se suman estas cantidades y se suman los resultados de los productos y se suman o restan a la cantidad de agua de la siguiente manera:

$$3.586 - 0.142 + 0.053 + 0.221 + 0.648 = 4.366$$

Por lo que la mezcla que tiene 15% de agregados reciclados y 85% de agregados vírgenes quedará al final como se muestra a continuación:

		Arena virgen	Arena reciclada
Cemento (kg)	4.636	0.016	0.060
Grava virgen (kg)	14.871	0.221	0.142
Grava reciclada (kg)	2.624	Grava virgen	Grava reciclada
Arena virgen (kg)	13.383	0.044	0.020
Arena reciclada (kg)	2.362	0.648	0.053
Agua (Its)	<b>3.586</b>		
Agua ajustada (Its)	<u>4.366</u>	<b>0.869</b>	<b>-0.089</b>

Los números en negritas indican las cantidades que se suman y restan para obtener la cantidad de agua que se utilizará finalmente que es la que se encuentra subrayada, los números que están debajo de donde se indica de qué agregado se trata son los porcentajes de absorción y contenido de humedad expresados con punto decimal; el número que aparece debajo de éste es el producto de dicho porcentaje por el peso del material que se utilizará en esta mezcla. De este modo se muestran los resultados de todas las mezclas:

100% agregados vírgenes:

		Arena
Cemento (kg)	4.636	0.016
Grava virgen(kg)	17.495	0.260
Arena virgen (kg)	15.745	Grava
Agua (Its)	<b>3.586</b>	0.044
Agua Ajustada (Its)	<u>4.608</u>	0.762
		<b>1.022</b>

100% agregados reciclados:

		Arena reciclada
Cemento (kg)	4.636	0.060
Grava reciclada (kg)	17.495	0.946
Arena reciclada (kg)	15.745	Grava Reciclada
Agua (Its)	<b>3.586</b>	0.020
Agua ajustada (Its)	<u>2.994</u>	0.354
		<b>-0.592</b>

30% agregados reciclados – 70% agregados vírgenes:

		Arena	Arena reciclada
Cemento (kg)	4.636	0.016	0.060
Grava virgen (kg)	12.246	0.182	0.284
Grava reciclada (kg)	5.248	Grava	Grava reciclada
Arena virgen (kg)	11.022	0.044	0.020
Arena reciclada (kg)	4.724	0.534	0.106
Agua (Its)	<b>3.586</b>		
Agua ajustada (Its)	<u>4.124</u>	<b>0.715</b>	<b>-0.178</b>

45% agregados reciclados – 55% agregados vírgenes:

		Arena	Arena reciclada
Cemento (kg)	4.636	0.016	0.060
Grava virgen (kg)	9.622	0.143	0.426
Grava reciclada (kg)	7.873	Grava	Grava reciclada
Arena virgen (kg)	8.660	0.044	0.020
Arena reciclada (kg)	7.085	0.419	0.159
Agua (Its)	<b>3.586</b>		
Agua ajustada (Its)	<u>3.882</u>	<b>0.562</b>	<b>-0.266</b>

60% agregados reciclados – 40% agregados vírgenes:

		Arena	Arena reciclada
Cemento (kg)	4.636	0.016	0.060
Grava virgen (kg)	6.998	0.104	0.568
Grava reciclada (kg)	10.497	Grava	Grava reciclada
Arena virgen (kg)	6.298	0.044	0.020
Arena reciclada (kg)	9.447	0.305	0.212
Agua (Its)	<b>3.586</b>		
Agua ajustada (Its)	<u>3.640</u>	<b>0.409</b>	<b>-0.355</b>

75% agregados reciclados – 25% agregados vírgenes:

		Arena	Arena reciclada
Cemento (kg)	4.636	0.016	0.060
Grava virgen (kg)	4.374	0.065	0.710
Grava reciclada (kg)	13.121	Grava	Grava reciclada
Arena virgen (kg)	3.936	0.044	0.020
Arena reciclada (kg)	11.809	0.191	0.266
Agua (Its)	<b>3.586</b>		
Agua ajustada (Its)	<u>3.398</u>	<b>0.256</b>	<b>-0.444</b>

90% agregados reciclados – 10% agregados vírgenes:

		Arena	Arena reciclada
Cemento (kg)	4.636	0.016	0.060
Grava virgen (kg)	1.749	0.026	0.852
Grava reciclada (kg)	15.745	Grava	Grava reciclada
Arena virgen (kg)	1.575	0.044	0.020
Arena reciclada (kg)	14.171	0.076	0.319
Agua (Its)	<b>3.586</b>		
Agua ajustada (Its)	<u>3.156</u>	<b>0.102</b>	<b>-0.533</b>

## 2.2. Elaboración de los especímenes de concreto hidráulico.

Existen dos maneras de preparar la mezcla de concreto hidráulico: el mezclado mecánico que se hace mediante revolvedora y el mezclado a mano que es el que se ocupó en el presente trabajo.

En el mezclado a mano se mezcla el cemento y el agregado fino hasta lograr obtener una combinación uniforme. Después se añade el agregado grueso previo al agua para mezclar toda la revoltura a fin de conseguir una distribución homogénea con la consistencia deseada. Para evaluar esta consistencia se utiliza la prueba de revenimiento, que es precisamente la medida de esta consistencia (Álvarez et al., 2013).

En la tabla 2.7 se pueden observar los revenimientos especificados para algunos tipos de obra.



Tabla 2.7. Revenimientos para diferentes tipos de construcción.

TIPOS DE CONSTRUCCIÓN	REVENIMIENTO EN cm.	
	Máximo	Mínimo
Muros de cimentación y zapatas reforzadas	8	2
Zapatas, campanas y muros de subestructura	8	2
Vigas y muros reforzados	10	2
Columnas para edificios	10	2
Pavimentos y losas	8	2
Concreto masivo	5	2

Fuente: Manual de Prácticas del Laboratorio de Resistencia de Materiales I, FES Acatlán, UNAM, 2013.

El revenimiento que deberán tener las mezclas de este trabajo será máximo de 8 cm y mínimo de 2 cm.

Para realizar las mezclas se utilizó el siguiente equipo:

Palas.

Charola grande.

Cono para prueba de revenimiento.

Moldes cilíndricos de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura.

Varilla lisa de 15.9 mm de diámetro y 600 mm de longitud con punta semiesférica.

Báscula.

Botes o cubetas.

Cuchara y cucharón.

Flexómetro.

Brocha.

Cepillo de alambre.

Aceite requemado.

Martillo de goma.

Probeta de plástico de 2 litros.

Antes de elaborar la mezcla se procedió a limpiar los moldes cilíndricos con el cepillo de alambre para eliminar residuos de pruebas anteriores, además de aceitarlos con aceite requemado para evitar que la mezcla se adhiera a ellos. También deben ser sellados y ajustados con los tornillos y tuercas que tienen para evitar pérdidas de la mezcla de concreto cuando esta sea vaciada en ellos.



Figura 2.26. Aceitado y limpiado de los moldes.

Fuente: Elaborado por el autor.



Figura 2.27. Moldes cilíndricos limpios y aceitados.

Fuente: Elaborado por el autor.

Una vez que los cilindros se encuentran limpios y aceitados, se procede a pesar la grava virgen y reciclada, la arena virgen y reciclada, y el cemento, de acuerdo con la cantidad que fue determinada previamente para las diferentes mezclas.



Figura 2.28. Pesado de los materiales para elaborar las mezclas.

Fuente: Elaborado por el autor.

Como se mencionó anteriormente, el mezclado se realizó a mano. El primer paso para realizar la mezcla a mano es humedecer la charola, cuidando que esta humedad no quite o aporte agua a la mezcla.



Figura 2.29. Charola humedecida y materiales ya pesados.

Fuente: Elaborado por el autor.

Ya en la charola humedecida se mezcla la arena y el cemento hasta obtener una mezcla homogénea, esto se observa cuando no se distinguen grumos de cemento.



Figura 2.30. Mezcla homogénea de agregado fino y cemento.

Fuente: Elaborado por el autor.

Con este material revuelto se forma una pila cónica donde se coloca la grava y se revuelve con la mezcla previa. El agua es medida con la probeta de plástico de 2 litros y se vierte poco a poco cuidando que no se derrame mientras se mezcla todo.



Figura 2.31. Vertido del agua sobre la muestra.

Fuente: Elaborado por el autor.

Se debe mezclar, una vez más, hasta que se aprecie una mezcla homogénea.

Ya que se tiene la mezcla homogénea de concreto se procede a determinar el revenimiento, esta prueba se realiza con el cono de revenimiento, una placa metálica y la varilla de compactación. Primeramente se humedecen el cono, la placa y la varilla, después de esto se coloca la placa y sobre ella el cono, el cono se llena con la mezcla en tres capas, cada una de un tercio del volumen del cono; cada capa será compactada con 25 penetraciones, la primer capa se compacta con la varilla inclinada para compactar las orillas y siguiendo una espiral hacia el centro del cono, la siguiente capa se compacta igualmente que la anterior sólo que en cada golpe de la varilla se debe penetrar 2 centímetros de la capa anterior, por último, la tercer capa se compacta igual que la segunda pero debe rebasar el borde superior del cono. En el caso de que durante la compactación de esta última capa, el concreto quede por debajo del borde superior del cono, podrá agregar un poco de muestra y continuar compactando hasta completar el número de golpes especificado, de preferencia agregar muestra de concreto después de los primeros 10 golpes y en caso de ser necesario después del golpe número 20 (Álvarez et al., 2013).



Figura 2.32. Prueba de revenimiento.

Fuente: Elaborado por el autor.

Utilizando la varilla de compactación se enrasa el concreto apoyándose en el borde superior del cono, una vez enrasado se limpia el exceso de concreto alrededor del cono en su parte baja. Se procede a levantar el cono de manera suave para permitir que el concreto se asiente de forma natural en un tiempo de  $5 \pm 2$  segundos. Para llenar el cono y levantarlo se dispone de un tiempo de dos y medio minutos como máximo. Después de levantar el cono, se coloca de cabeza y se pone la varilla horizontalmente sobre el borde del cono y en dirección de la altura promedio de la base superior en el concreto asentado; se mide verticalmente con el flexómetro la diferencia de alturas que existan entre la parte baja de la varilla y la porción central de la superficie del concreto asentado. Esta es la medida del revenimiento y debe anotarse con aproximación de 1.0 cm (en la tabla 2.8 se pueden observar las tolerancias en el revenimiento especificado). El valor del revenimiento debe determinarse en un tiempo no mayor de quince minutos, contados a partir del momento en que se termina la mezcla (Álvarez et al., 2013).

Tabla 2.8. Tolerancias en el revenimiento especificado.

<b>REVENIMIENTO ESPECIFICADO</b> <b>( cm )</b>	<b>TOLERANCIA</b> <b>( cm )</b>
Menos de 5.0	$\pm 1.5$
De 5.0 a 10.0	$\pm 2.5$
Más de 10.0	$\pm 3.5$

Fuente: Manual de Prácticas del Laboratorio de Resistencia de Materiales I, FES Acatlán, UNAM, 2013.



Figura 2.33. Determinación del revenimiento.

Fuente: Manual de Prácticas del Laboratorio de Resistencia de Materiales I, FES Acatlán, UNAM, 2013.

Los resultados de los revenimientos de las mezclas realizadas en este trabajo se muestran en la tabla 2.9, la tabla está ordenada conforme se fueron realizando las mezclas. En algunos casos la cantidad de agua teórica fue insuficiente para obtener la homogeneidad requerida y por tanto el revenimiento requerido, por lo que fue necesario agregar un poco más de agua. La cantidad total de agua que fue utilizada en cada mezcla se muestra en el siguiente capítulo junto con los resultados de la resistencia de cada cilindro.

Tabla 2.9. Revenimientos obtenidos de cada mezcla realizada.

<b>MEZCLA</b>	<b>Revenimiento (cm)</b>
100% agregados vírgenes.	2.3
100 % agregados reciclados	3.7
15% agregados reciclados y 85% agregados vírgenes.	3.4

---

30% agregados reciclados y 70% agregados vírgenes.	4.9
45% agregados reciclados y 55% agregados vírgenes.	6.5
60% agregados reciclados y 40% agregados vírgenes.	5.1
75% agregados reciclados y 25% agregados vírgenes.	9.4*
90% agregados reciclados y 10% agregados vírgenes.	10.2*

---

Fuente: Elaborado por el autor.

\*Aunque estos últimos valores son mayores que los 8 centímetros máximos se debe tomar en cuenta la tolerancia de 2.5 cm mencionada en la tabla 2.8. Por lo tanto los revenimientos obtenidos están dentro de los límites aceptados.

Determinado el revenimiento es momento de moldear los especímenes de concreto de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura. Estos especímenes serán moldeados en los cilindros de acero que fueron previamente limpiados, aceitados, sellados y ajustados. Los moldes se colocan en una superficie plana y se procede a llenarlos en tres capas de 100 mm, estas capas se compactan con 25 golpes de la varilla en forma de espiral de adentro hacia afuera y en la segunda y tercera capa la varilla debe penetrar dos centímetros la capa anterior, como en la prueba del revenimiento. Entre capa y capa se puede golpear con el martillo de goma de 10 a 15 veces el molde de manera distribuida, esto para evitar oquedades. Ya que están llenos los moldes se enrasan con la varilla para obtener una superficie plana.





Figura 2.34. Llenado de los moldes con la mezcla de concreto.

Fuente: Elaborado por el autor.

Por último se etiquetan los cilindros y se protegen inmediatamente después de elaborarlos colocando una bolsa de plástico perfectamente sujeta con una liga, para evitar la evaporación del agua.



Figura 2.35. Cilindros protegidos contra la evaporación del agua.

Fuente: Elaborado por el autor.



Figura 2.36. Cilindros protegidos y etiquetados en el patio de prácticas del laboratorio del Laboratorio de Resistencia de Materiales de la FES Acatlán, UNAM.

Fuente: Elaborado por el autor.

### 2.2.1. Descimbrado y curado de los especímenes.

Los especímenes deben de ser descimbrados no antes de 20 ni después de 48 horas de su elaboración, los especímenes elaborados fueron descimbrados a las 24 horas de que fueron realizados y para su curado fueron almacenados en el cuarto húmedo de los Laboratorios de Ingeniería de la FES Acatlán, UNAM, donde se procuró que tuvieran una temperatura de  $23 \pm 3^\circ \text{C}$  y una humedad relativa mínima de 95% durante los 28 días que estuvieron ahí para alcanzar su resistencia normal.



Figura 2.37. Descimbrado de los especímenes.

Fuente: Elaborado por el autor.



Figura 2.38. Cuarto húmedo de los laboratorios de Ingeniería de la FES Acatlán, UNAM.  
Fuente: Elaborado por el autor.



Figura 2.39. Especímenes almacenados en el cuarto húmedo.  
Fuente: Elaborado por el autor.

**CAPÍTULO 3.**  
**PRUEBAS DE RESISTENCIA DE**  
**LOS CILINDROS DE CONCRETO**  
**HIDRÁULICO Y PRUEBA DE**  
**PERMEABILIDAD.**

## **CAPÍTULO 3. PRUEBAS DE RESISTENCIA DE LOS CILINDROS DE CONCRETO HIDRÁULICO Y PRUEBA DE PERMEABILIDAD.**

En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión que se realizaron a los cilindros de concreto hidráulico elaborados con las mezclas de agregados vírgenes y reciclados expuestas en el capítulo anterior, así como los resultados de las pruebas de permeabilidad al tepetate mezclado con arena reciclada en diversas proporciones.

### **3.1. Resultados del ensaye de resistencia a compresión simple de los cilindros de concreto hidráulico de diversas mezclas.**

Retomando el capítulo anterior, se hicieron ocho mezclas distintas con diferentes proporciones de agregados vírgenes y reciclados, de cada mezcla se elaboraron tres cilindros, por lo que se probaron veinticuatro cilindros en total. Tal como se establece en la NMX-C-083-ONNCCE-2002, los cilindros fueron curados durante veintiocho días para obtener su resistencia normal en el cuarto húmedo de los Laboratorios de Ingeniería de la FES Acatlán, UNAM, donde se garantizó que tuvieran una temperatura de  $23 \pm 3^\circ \text{C}$  y una humedad relativa mínima de 95%. Transcurridos los veintiocho días, los cilindros se retiraron del cuarto húmedo para realizar el ensaye de resistencia a compresión simple (este debe realizarse lo antes posible después de retirar los especímenes del cuarto húmedo). Esta es una prueba relativamente sencilla que mide una de las características fundamentales del material y cuyo resultado se correlaciona con propiedades mecánicas importantes como sus módulos elásticos E (o módulo de Young; está asociado directamente con los cambios de longitud que experimenta material cuando está sometido a la acción de tensiones de tracción o de compresión. Por esa razón se le llama también módulo elástico longitudinal) y G (o módulo elástico transversal; está asociado con el cambio de forma que experimenta un material bajo la acción

de esfuerzos cortantes. No implica cambios de volumen, tan solo de forma. También se le llama módulo elástico tangencial y módulo elástico cortante), así como con la resistencia de elementos estructurales de distintos tipos, sujetos a diversas sollicitaciones como flexión, tensión, cortante y torsión. Debido a que estos cilindros se fabrican en moldes metálicos apoyados en su cara inferior y libres en la superior, es necesario dar un acabado manual a los extremos del espécimen para asegurar que la presión quede uniformemente distribuida y la dirección de la carga paralela al eje del cilindro; a esta operación se le llama cabeceo. (Álvarez et al., 2013). Para el cabeceo de los especímenes elaborados se utilizaron dos moldes con almohadillas de neopreno (ASTM C1231).

Antes de realizar el ensaye se determinaron el diámetro y altura de cada cilindro, así como su masa. Se toman tres medidas del diámetro y tres de la altura con la finalidad de obtener un promedio, este promedio sirve para ajustar dichas dimensiones debido a que los moldes pudieron haber tenido algunas irregularidades en sus medidas. Si la relación de esbeltez es menor a 1.8, se debe corregir utilizando la tabla 3.1. Si la relación de esbeltez es mayor a 2.1, el espécimen debe recortarse. Los cilindros también deben perder el exceso de humedad antes de probarlos.



Figura 3.1. Cilindros perdiendo el exceso de humedad antes de obtener su masa.

Fuente: Elaborado por el autor.

Tabla 3.1. Factores de corrección de la resistencia de acuerdo con la esbeltez.

Relación de altura/diámetro del espécimen	Factor de corrección de la resistencia
2.0	1.00
1.75	0.99
1.50	0.97
1.25	0.94
1.0	0.91

Fuente: Manual de Prácticas del Laboratorio de Resistencia de Materiales I, FES Acatlán, UNAM, 2013.



Figura 3.2. Determinación de la altura y diámetro de los cilindros.

Fuente: Elaborado por el autor.

Los cilindros fueron probados en el marco de carga del Laboratorio de Resistencia de Materiales de la FES Acatlán, UNAM. Estos se colocan sobre el centro de los moldes con almohadillas de neopreno y estos moldes a su vez sobre

el centro de la superficie donde se aplica la carga, como se muestra en la figura 3.3 y 3.4.



Figura 3.3. Cilindro colocándose en el centro del molde con almohadillas de neopreno.

Fuente: Elaborado por el autor.



Figura 3.4. Cilindro perfectamente centrado sobre el marco de carga.

Fuente: Elaborado por el autor.



Una vez que el cilindro se encuentra en el centro del marco de carga, se procede a comenzar con el ensaye de resistencia a compresión simple. La computadora del marco de carga da resultados aproximados de la resistencia que alcanza el cilindro durante la prueba, pero para obtener el real es necesario determinar el cociente de la carga máxima que resiste el cilindro entre el área de la cara del cilindro dónde se aplica la carga (calculada del promedio de los diámetros obtenidos de las mediciones previas):

$$f'c = \frac{\text{Carga máxima que resiste el cilindro [kg]}}{\text{Área de la cara del cilindro dónde se aplica la carga [cm}^2\text{]}}$$

A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada cilindro de todas las proporciones.

**a) Mezcla 100% agregados vírgenes.**

Esta mezcla se elaboró con la siguiente proporción teórica, ya con el ajuste correspondiente:

Cemento (kg)	4.636
Grava virgen(kg)	17.495
Arena virgen (kg)	15.745
Agua Ajustada (Its)	4.608

➤ **Cilindro a-1**

Las dimensiones y peso del cilindro a-1 fueron las siguientes:

	Diámetro (cm)	Altura (cm)
	15	30.3
	15.1	30.3
	15.1	30.5
Promedio:	15.067	30.367
Relación de esbeltez:		2.015
Masa:	11.08 kg	
Área (cm <sup>2</sup> ):	178.289	

Datos proporcionados por la computadora del marco de carga:

MUESTRA:	01
TIEMPO DE LA PRUEBA, min:	2.32
*DIÁMETRO, cm:	15.0
*ÁREA, cm <sup>2</sup> :	176.7
ULTIMA, kg:	51200
**ULTIMO, kg/cm <sup>2</sup> :	290

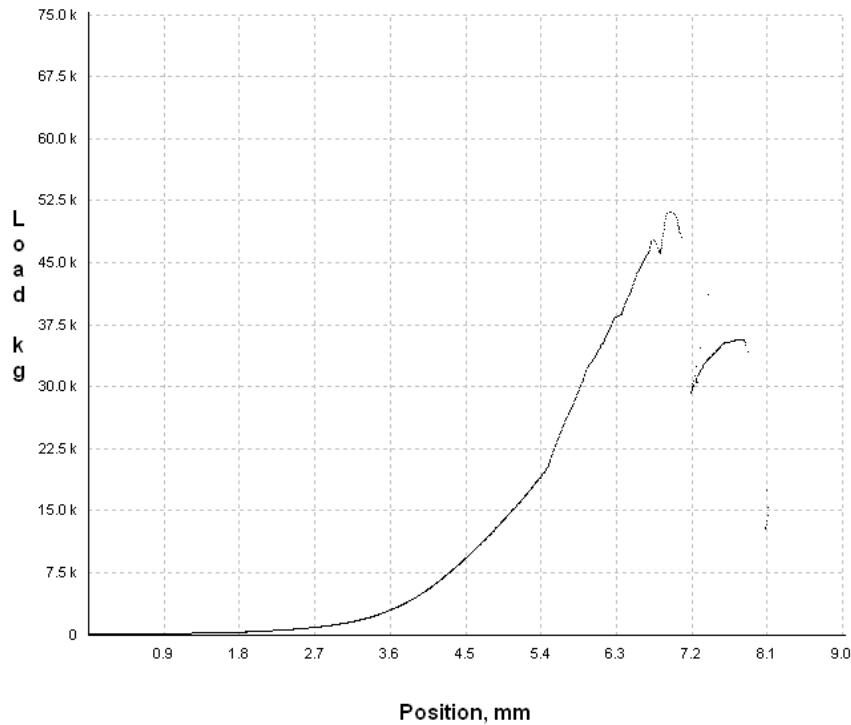
\*Diámetro y área teóricos.

\*\*f'c aproximado.

El f'c real del cilindro a-1 es el siguiente:

$$f'c = \frac{51200}{178.289} = 287.174 \text{ kg/cm}^2$$

Figura 3.5. Gráfica carga-deformación del cilindro a-1 proporcionada por la computadora del marco de carga.



➤ **Cilindro a-2**

Las dimensiones y peso del cilindro a-2 fueron las siguientes:

	Diámetro (cm)	Altura (cm)
	15	30.5
	15	30.3
	15.1	30.2
Promedio:	15.033	30.333
Relación de esbeltez:		2.018
Masa:	10.97 kg	
Área (cm <sup>2</sup> ):	177.501	

Datos proporcionados por la computadora del marco de carga:

MUESTRA:	02
TIEMPO DE LA PRUEBA, min:	2.38
*DIÁMETRO, cm:	15.0
*ÁREA, cm <sup>2</sup> :	176.7
ULTIMA, kg:	49800
**ULTIMO, kg/cm <sup>2</sup> :	282

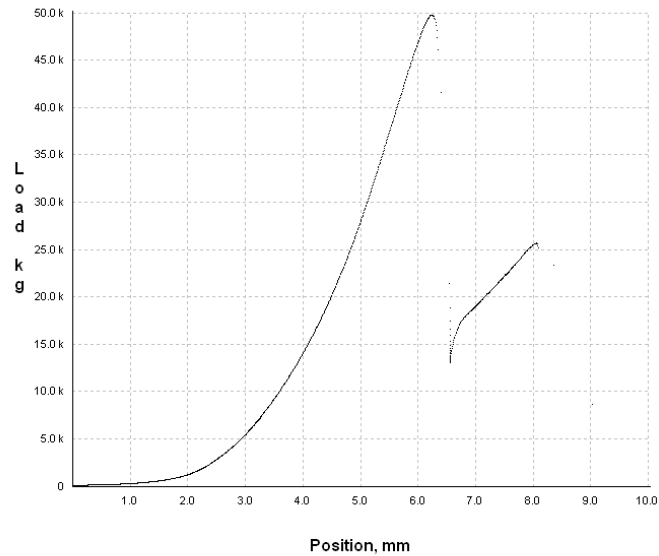
\*Diámetro y área teóricos.

\*\*f'c aproximado.

El f'c real del cilindro a-2 es el siguiente:

$$f'c = \frac{49800}{177.501} = 280.562 \text{ kg/cm}^2$$

Figura 3.6. Gráfica carga-deformación del cilindro a-2 proporcionada por la computadora del marco de carga.



➤ **Cilindro a-3**

Las dimensiones y peso del cilindro a-3 fueron las siguientes:

	Diámetro (cm)	Altura (cm)
	15	30.5
	14.9	30.1
	15.2	30.3
Promedio:	15.033	30.300
Relación de esbeltez:		2.016
Masa:	10.82 kg	
Área (cm <sup>2</sup> ):	177.501	

Datos proporcionados por la computadora del marco de carga:

MUESTRA:	03
TIEMPO DE LA PRUEBA, min:	2.46
*DIÁMETRO, cm:	15.0
*ÁREA, cm <sup>2</sup> :	176.7
ULTIMA, kg:	47300
**ULTIMO, kg/cm <sup>2</sup> :	268

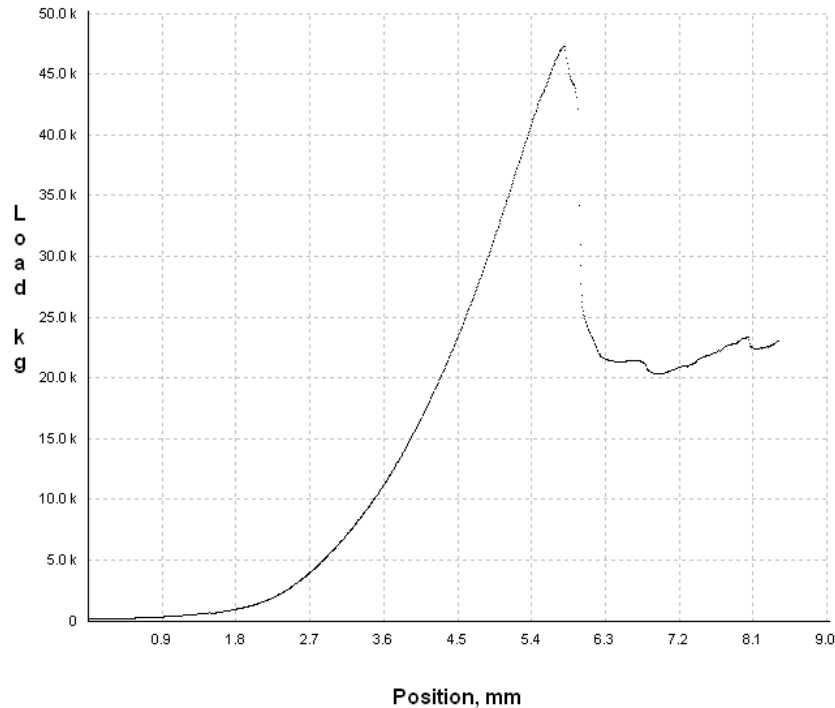
\*Diámetro y área teóricos.

\*\*f'c aproximado.

El f'c real del cilindro a-3 es el siguiente:

$$f'c = \frac{47300}{177.501} = 266.478 \text{ kg/cm}^2$$

Figura 3.7. Gráfica carga-deformación del cilindro a-3 proporcionada por la computadora del marco de carga.



Los cilindros a-2 y a-3 trabajaron mejor que el cilindro a-1, ya que su carga de fue más uniforme, como puede ser observado en sus respectivas gráficas.

El promedio de  $f'c$  de esta mezcla es:

$$f'c = \frac{\sum f'c \text{ resultante de los tres cilindros}}{3} = 278.071 \text{ kg/cm}^2$$

El resultado fue muy alto para lo esperado, esto puede atribuirse a que quizá hubo un error al momento de pesar el cemento agregándose más de lo requerido (aproximadamente 300 gramos más); adicional a que los agregados vírgenes utilizados son de una excelente calidad.



Figura 3.8. Cilindro de la mezcla elaborada en su totalidad por agregados vírgenes después de fallar.

Fuente: Elaborado por el autor.

***b) Mezcla 100% agregados reciclados.***

La proporción teórica es la siguiente:

*Cemento (kg)	4.636
Grava reciclada (kg)	17.495
Arena reciclada (kg)	15.745
*Agua ajustada (lts)	2.994

\*Elaborada la mezcla se procedió a realizar la prueba de revenimiento, donde se obtuvo un resultado de cero, por lo que se tuvo que agregar agua a la mezcla. Para conservar las propiedades de la mezcla, se respetará la proporción agua/cemento teórica del Manual del Constructor de Cemex Concretos para un concreto  $f'c = 100 \text{ kg/cm}^2$ , que es la siguiente:

$$\frac{\text{Agua}}{\text{Cemento}} = \frac{205}{265} = 0.774$$

Se probó con varias cantidades de agua y cemento respetando la relación recién establecida, hasta obtener un revenimiento de 3.7 cm, que está dentro de los parámetros aceptados en la tabla 2.9. La relación de agua y de cemento agregada fue la siguiente:

$$\frac{\text{Agua}}{\text{Cemento}} = \frac{0.506}{0.654} = 0.774$$

Por lo que la dosificación práctica fue de:

*Cemento (kg)	5.290
Grava reciclada (kg)	17.495
Arena reciclada (kg)	15.745
*Agua ajustada (lts)	3.500

➤ **Cilindro b-1**

Las dimensiones y peso del cilindro a-1 fueron las siguientes:

	Diámetro (cm)	Altura (cm)
	15	30.7
	14.9	30.4
	15.2	30.5
Promedio:	15.033	30.533
Relación de esbeltez:		2.031
Masa: 10.95 kg		
Área (cm <sup>2</sup> ):	177.501	



Datos proporcionados por la computadora del marco de carga:

MUESTRA:	04
TIEMPO DE LA PRUEBA, min:	1.78
*DIÁMETRO, cm:	15.0
*ÁREA, cm <sup>2</sup> :	176.7
ULTIMA, kg:	22300
**ULTIMO, kg/cm <sup>2</sup> :	126

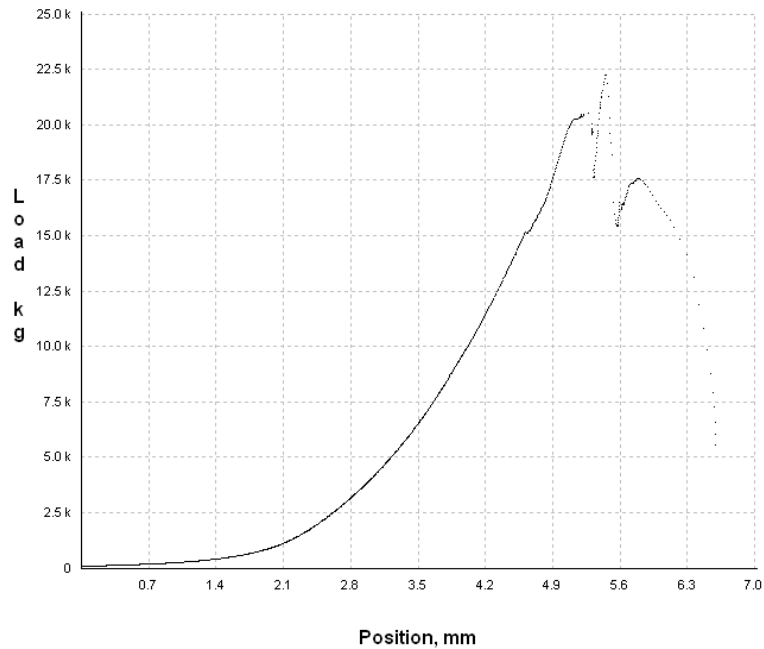
\*Diámetro y área teóricos.

\*\*f'c aproximado.

El f'c real del cilindro b-1 es el siguiente:

$$f'c = \frac{22300}{177.501} = 125.633 \text{ kg/cm}^2$$

Figura 3.9. Gráfica carga-deformación del cilindro b-1 proporcionada por la computadora del marco de carga.



➤ **Cilindro b-2**

Las dimensiones y peso del cilindro b-2 fueron las siguientes:

	Diámetro (cm)	Altura (cm)
	15.1	30.5
	15.1	30.4
	15.1	30.5
Promedio:	15.100	30.467
Relación de esbeltez:		2.018
Masa: 10.87 kg		
Área (cm <sup>2</sup> ):		179.079

Datos proporcionados por la computadora del marco de carga:

MUESTRA:	05
TIEMPO DE LA PRUEBA, min:	2.63
*DIÁMETRO, cm:	15.0
*ÁREA, cm <sup>2</sup> :	176.7
ULTIMA, kg:	19520
**ULTIMO, kg/cm <sup>2</sup> :	110.5

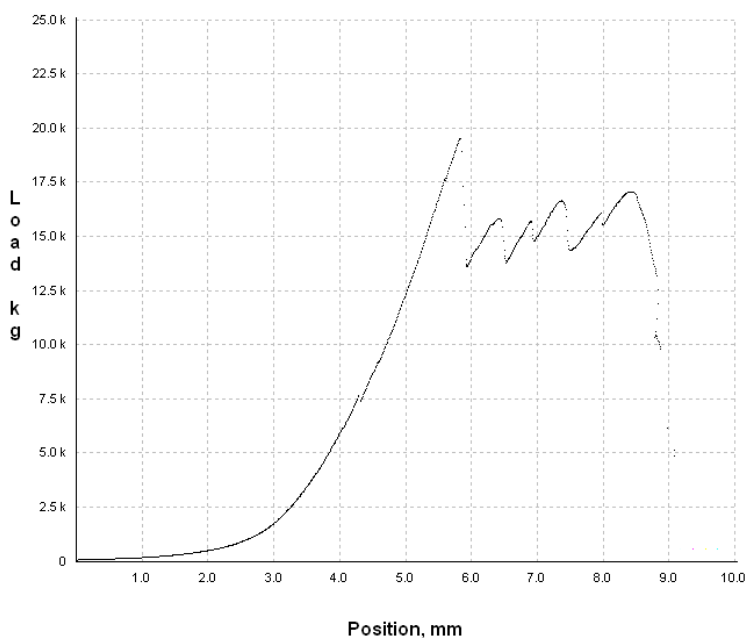
\*Diámetro y área teóricos.

\*\*f'c aproximado.

El f'c real del cilindro b-2 es el siguiente:

$$f'c = \frac{19520}{179.079} = 109.002 \text{ kg/cm}^2$$

Figura 3.10. Gráfica carga-deformación del cilindro b-2 proporcionada por la computadora del marco de carga.



### ➤ Cilindro b-3

Las dimensiones y peso del cilindro b-3 fueron las siguientes:

	Diámetro (cm)	Altura (cm)
	15	30.6
	15.1	30.6
	15.2	30.7
Promedio:	15.100	30.633
Relación de esbeltez:		2.029
Masa:	10.96 kg	
Área (cm <sup>2</sup> ):	179.079	

Datos proporcionados por la computadora del marco de carga:

MUESTRA:	06
TIEMPO DE LA PRUEBA, min:	3.92
DIÁMETRO, cm:	15.0
ÁREA, cm <sup>2</sup> :	176.7
ULTIMA, kg:	16780
ULTIMO, kg/cm <sup>2</sup> :	94.9

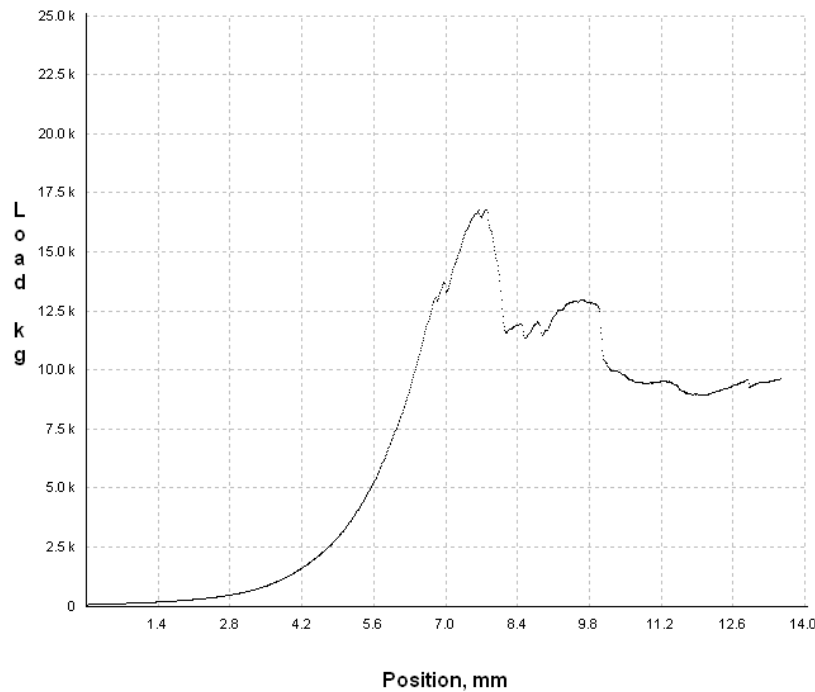
\*Diámetro y área teóricos.

\*\*f'c aproximado.

El f'c real del cilindro b-3 es el siguiente:

$$f'c = \frac{16780}{179.079} = 93.702 \text{ kg/cm}^2$$

Figura 3.11. Gráfica carga-deformación del cilindro b-3 proporcionada por la computadora del marco de carga.



Los tres cilindros tuvieron un comportamiento muy similar. En las tres gráficas, aunque es más evidente en la fig. 3.10 y en la fig 3.11 de los cilindros b-2 y b-3; la carga se incrementa en reiteradas ocasiones hasta llegar a la falla total.

El promedio de  $f'c$  de esta mezcla es el siguiente:

$$f'c = \frac{\sum f'c \text{ resultante de los tres cilindros}}{3} = 109.446 \text{ kg/cm}^2$$

El promedio de  $f'c$  de esta mezcla es un poco mayor al esperado que corresponde a  $100 \text{ kg/cm}^2$ ; es un excelente resultado ya que es la mezcla elaborada únicamente de agregados reciclados, aunque con respecto a la primera mezcla es 2.5 veces menor su  $f'c$ . También es importante mencionar que el acabado no es tan uniforme como un cilindro elaborado en su totalidad con agregados vírgenes, como se puede observar en la figura 3.12.



Figura 3.12. Cilindro de la mezcla elaborada en su totalidad por agregados reciclados antes y después de la prueba.

Fuente: Elaborado por el autor.



Figura 3.13. Cilindro elaborado únicamente de materiales vírgenes, donde se puede observar un mejor acabado en relación con un cilindro elaborado únicamente de materiales reciclados, como el de la figura 3.12.

Fuente: Elaborado por el autor.

***c) Mezcla 15% agregados reciclados y 85% agregados vírgenes.***

Esta mezcla se elaboró con la siguiente proporción teórica:

Cemento (kg)	4.636
Grava (kg)	14.871
Grava reciclada (kg)	2.624
Arena (kg)	13.383
Arena reciclada (kg)	2.362
Agua ajustada (lts)	4.366

➤ **Cilindro c-1**

Las dimensiones y peso del cilindro c-1 fueron las siguientes:

	Diámetro (cm)	Altura (cm)
	14.9	30.5
	14.8	30.5
	14.9	30.2
Promedio:	14.867	30.400
Relación de esbeltez:		2.045
Masa: 10.71 kg		
Área (cm <sup>2</sup> ):	173.587	

Datos proporcionados por la computadora del marco de carga:

MUESTRA:	07
TIEMPO DE LA PRUEBA, min:	2.67
*DIÁMETRO, cm:	15.0
*ÁREA, cm <sup>2</sup> :	176.7
ULTIMA, kg:	44100
**ULTIMO, kg/cm <sup>2</sup> :	250

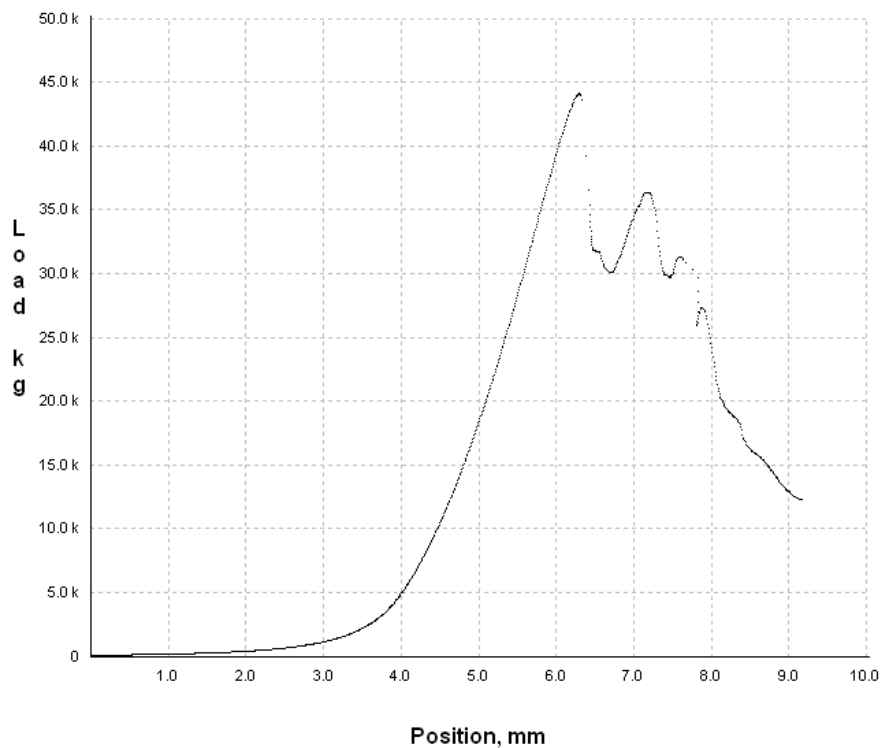
\*Diámetro y área teóricos.

\*\*f'c aproximado.

El f'c real del cilindro c-1 es el siguiente:

$$f'c = \frac{44100}{173.587} = 254.051 \text{ kg/cm}^2$$

Figura 3.14. Gráfica carga-deformación del cilindro c-1 proporcionada por la computadora del marco de carga.



➤ **Cilindro c-2**

Las dimensiones y peso del cilindro c-2 fueron las siguientes:

	Diámetro (cm)	Altura (cm)
	14.8	30.3
	14.9	30.1
	15	30.1
Promedio:	14.900	30.167
Relación de esbeltez:		2.025
Masa:	10.67 kg	
Área (cm <sup>2</sup> ):	174.366	



Datos proporcionados por la computadora del marco de carga:

MUESTRA:	08
TIEMPO DE LA PRUEBA, min:	2.51
*DIÁMETRO, cm:	15.0
*ÁREA, cm <sup>2</sup> :	176.7
ULTIMA, kg:	43000
**ULTIMO, kg/cm <sup>2</sup> :	243

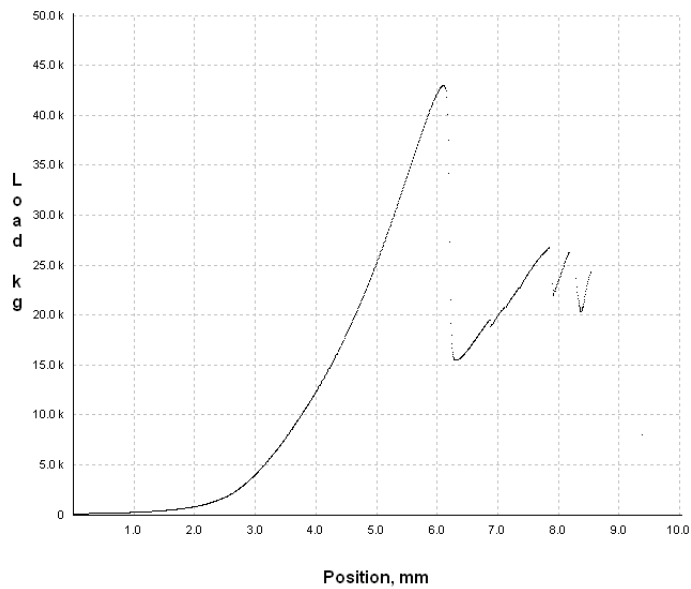
\*Diámetro y área teóricos.

\*\*f'c aproximado.

El f'c real del cilindro c-2 es el siguiente:

$$f'c = \frac{43000}{174.366} = 246.607 \text{ kg/cm}^2$$

Figura 3.15. Gráfica carga-deformación del cilindro c-2 proporcionada por la computadora del marco de carga.



➤ **Cilindro c-3**

Las dimensiones y peso del cilindro c-3 fueron las siguientes:

	Diámetro (cm)	Altura (cm)
	15.2	30.3
	15.3	30.4
	15.2	30.6
Promedio:	15.233	30.433
Relación de esbeltez:		1.998
Masa: 11.03 kg		
Área (cm <sup>2</sup> ):	182.255	

Datos proporcionados por la computadora del marco de carga:

MUESTRA:	09
TIEMPO DE LA PRUEBA, min:	2.22
*DIÁMETRO, cm:	15.0
*ÁREA, cm <sup>2</sup> :	176.7
ULTIMA, kg:	44800
**ULTIMO, kg/cm <sup>2</sup> :	253

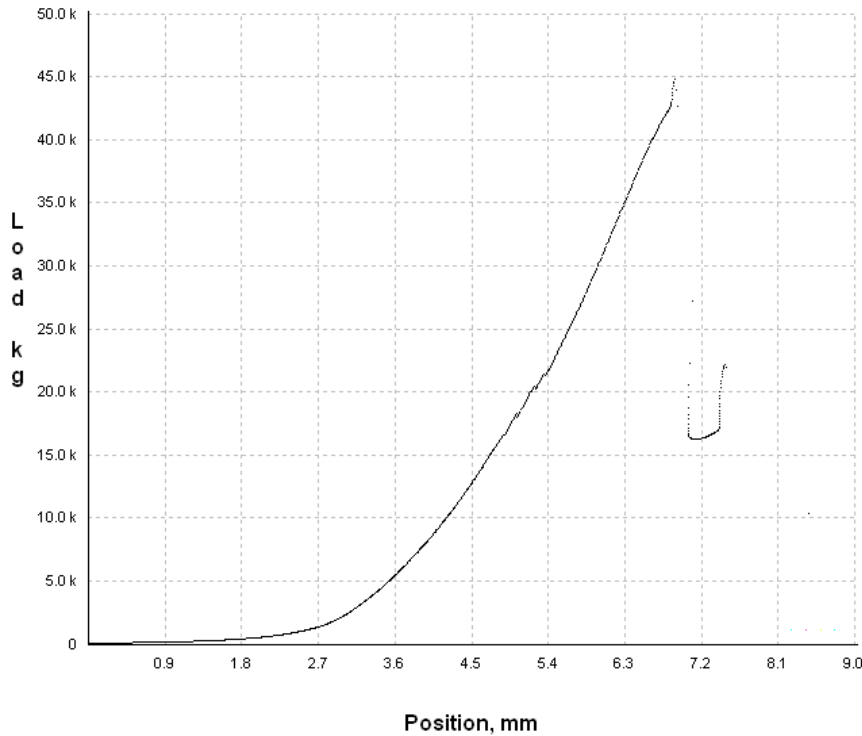
\*Diámetro y área teóricos.

\*\*f'c aproximado.

El f'c real del cilindro c-3 es el siguiente:

$$f'c = \frac{44800}{182.255} = 245.809 \text{ kg/cm}^2$$

Figura 3.16. Gráfica carga-deformación del cilindro c-3 proporcionada por la computadora del marco de carga.



De esta mezcla los cilindros c-1 y c-2 trabajaron mejor, en las gráficas se observa que tomaron la carga uniformemente, no así el cilindro c-3.

El promedio de  $f'_c$  de esta mezcla es:

$$f'_c = \frac{\sum f'_c \text{ resultante de los tres cilindros}}{3} = 248.823 \text{ kg/cm}^2$$

De acuerdo con los resultados esta mezcla fue excelente. Tuvo un promedio de  $f'_c$  mucho mayor al esperado, más cercano a un  $f'_c$  de  $250 \text{ kg/cm}^2$  que ya es considerado un concreto estructural. Una vez más se atribuye a las excelentes condiciones de los agregados vírgenes utilizados para la elaboración de la mezcla.



Figura 3.17. Cilindro de la mezcla elaborada de 15% agregados reciclados y 85% agregados vírgenes antes y después de fallar.

Fuente: Elaborado por el autor.

***d) Mezcla 30% agregados reciclados y 70% agregados vírgenes.***

Esta mezcla se elaboró con la siguiente proporción teórica:

Cemento (kg)	4.636
Grava virgen (kg)	12.246
Grava reciclada (kg)	5.248
Arena virgen (kg)	11.022
Arena reciclada (kg)	4.724
Agua ajustada(lts)	4.124

➤ **Cilindro d-1**

Las dimensiones y peso del cilindro d-1 fueron las siguientes:

	Diámetro (cm)	Altura (cm)
	15.3	30.5
	15	30.5
	15.2	30.2
Promedio:	15.167	30.400
Relación de esbeltez:		2.004
Masa: 11.02 kg		
Área (cm <sup>2</sup> ):	180.663	

Datos proporcionados por la computadora del marco de carga:

MUESTRA:	01
TIEMPO DE LA PRUEBA, min:	2.07
*DIÁMETRO, cm:	15.0
*ÁREA, cm <sup>2</sup> :	176.7
ULTIMA, kg:	39300
**ULTIMO, kg/cm <sup>2</sup> :	222

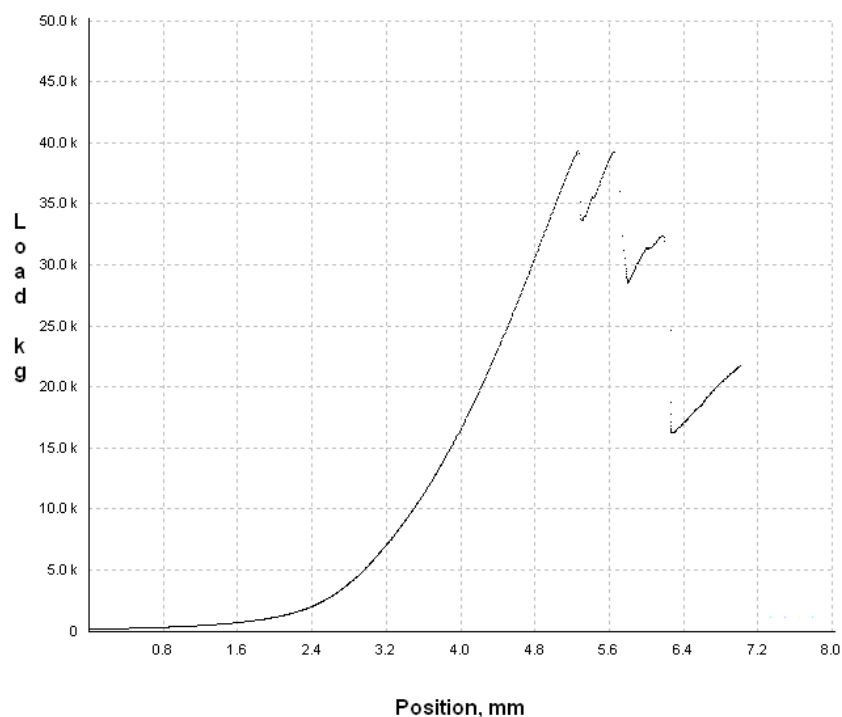
\*Diámetro y área teóricos.

\*\*f'c aproximado.

El f'c real del cilindro d-1 es el siguiente:

$$f'c = \frac{39300}{180.663} = 217.532 \text{ kg/cm}^2$$

Figura 3.18. Gráfica carga-deformación del cilindro d-1 proporcionada por la computadora del marco de carga.



➤ **Cilindro d-2**

Las dimensiones y peso del cilindro d-2 fueron las siguientes:

	Diámetro (cm)	Altura (cm)
	15.2	30.3
	15.2	30.4
	15.2	30.5
Promedio:	15.200	30.400
Relación de esbeltez:		2.000
Masa:	11.08 kg	
Área (cm <sup>2</sup> ):	181.458	

Datos proporcionados por la computadora del marco de carga:

MUESTRA:	02
TIEMPO DE LA PRUEBA, min:	2.59
*DIÁMETRO, cm:	15.0
*ÁREA, cm <sup>2</sup> :	176.7
ULTIMA, kg:	40300
**ULTIMO, kg/cm <sup>2</sup> :	228

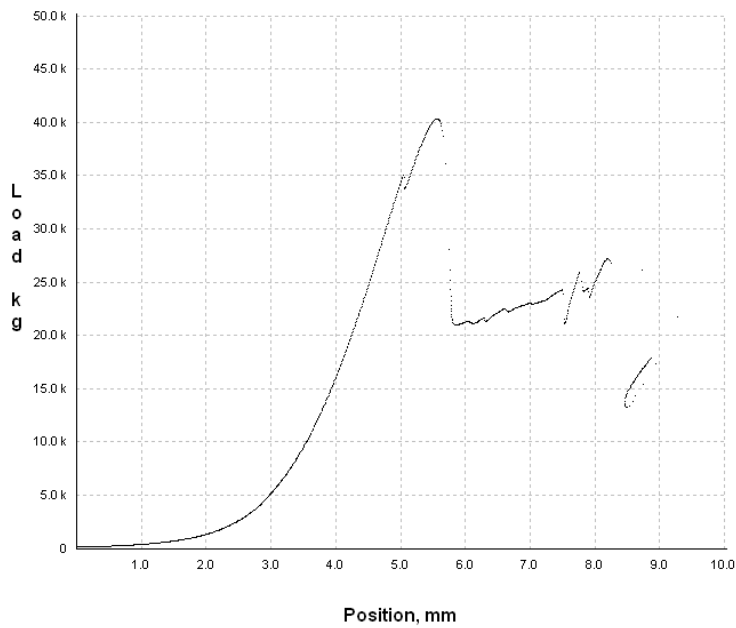
\*Diámetro y área teóricos.

\*\*f'c aproximado.

El f'c real del cilindro d-2 es el siguiente:

$$f'c = \frac{40300}{181.458} = 222.089 \text{ kg/cm}^2$$

Figura 3.19. Gráfica carga-deformación del cilindro d-2 proporcionada por la computadora del marco de carga.



➤ **Cilindro d-3**

Las dimensiones y peso del cilindro d-3 fueron las siguientes:

	Diámetro (cm)	Altura (cm)
	15.2	30.5
	15.1	30.5
	15	30.5
Promedio:	15.100	30.500
Relación de esbeltez:		2.020
Masa:	11.07 kg	
Área (cm <sup>2</sup> ):	179.079	

Datos proporcionados por la computadora del marco de carga:

MUESTRA:	03
TIEMPO DE LA PRUEBA, min:	2.41
*DIÁMETRO, cm:	15.0
*ÁREA, cm <sup>2</sup> :	176.7
ULTIMA, kg:	41600
**ULTIMO, kg/cm <sup>2</sup> :	236

\*Diámetro y área teóricos.

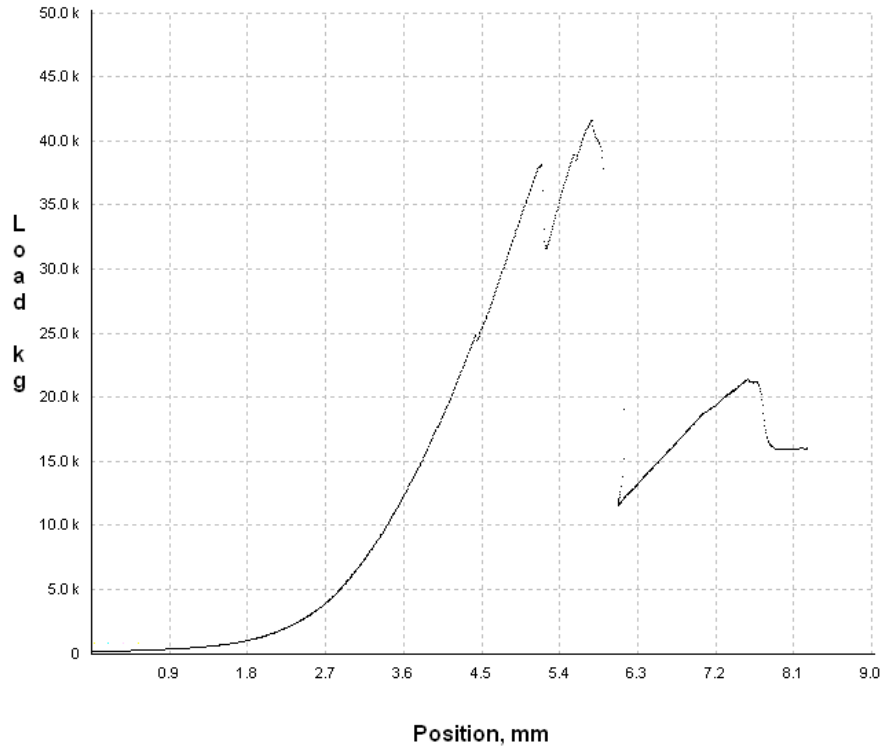
\*\*f'c aproximado.

El f'c real del cilindro d-3 es el siguiente:

$$f'c = \frac{41600}{179.079} = 232.300 \text{ kg/cm}^2$$



Figura 3.20. Gráfica carga-deformación del cilindro d-3 proporcionada por la computadora del marco de carga.



En esta mezcla los cilindros trabajaron muy bien con comportamientos similares; como se puede observar en las gráficas, todos tomaron la carga de manera uniforme.

El promedio de  $f'c$  de esta mezcla fue:

$$f'c = \frac{\sum f'c \text{ resultante de los tres cilindros}}{3} = 223.974 \text{ kg/cm}^2$$

Nuevamente se obtuvo un  $f'c$  mayor al esperado.



Figura 3.21. Cilindro de la mezcla elaborada de 30% agregados reciclados y 70% agregados vírgenes después de fallar.

Fuente: Elaborado por el autor.

***e) Mezcla 45% agregados reciclados y 55% agregados vírgenes.***

La proporción teórica es la siguiente:

Cemento (kg)	4.636
Grava virgen (kg)	9.622
Grava reciclada (kg)	7.873
Arena virgen (kg)	8.660
Arena reciclada (kg)	7.085
Agua ajustada (lts)	3.882

Tal como sucedió en la mezcla que fue elaborada solamente con agregados reciclados, el revenimiento que se obtuvo con la dosificación teórica fue de cero, por lo que se volvió a agregar agua y cemento, manteniendo la proporción agua/cemento de 0.774. Se agregaron en total 600 mililitros de agua y 0.775 gramos de cemento:

$$\frac{\text{Agua}}{\text{Cemento}} = \frac{0.600}{0.775} = 0.774$$

Por lo que la dosificación práctica fue:

Cemento (kg)	5.411
Grava virgen (kg)	9.622
Grava reciclada (kg)	7.873
Arena virgen (kg)	8.660
Arena reciclada (kg)	7.085
Agua ajustada (lts)	4.482

➤ **Cilindro e-1**

Las dimensiones y peso del cilindro e-1 fueron las siguientes:

	Diámetro (cm)	Altura (cm)
	15.2	30.7
	15.3	30.6
	15.3	30.6
Promedio:	15.267	30.633
Relación de esbeltez:		2.007
Masa:	11.16 kg	
Área (cm <sup>2</sup> ):	183.054	

Datos proporcionados por la computadora del marco de carga:

MUESTRA:	04
TIEMPO DE LA PRUEBA, min:	2.14
*DIÁMETRO, cm:	15.0
*ÁREA, cm <sup>2</sup> :	176.7
ULTIMA, kg:	33800
**ULTIMO, kg/cm <sup>2</sup> :	191.1

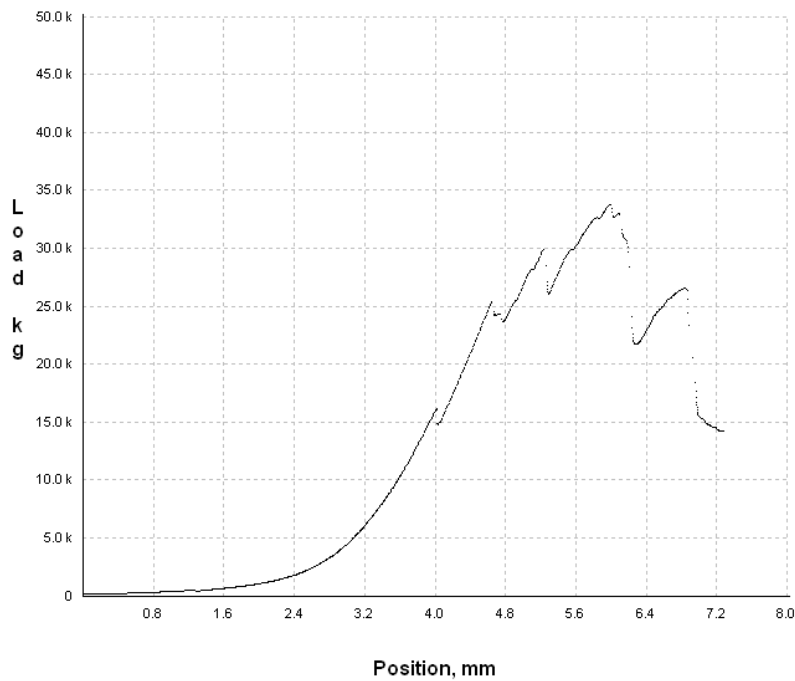
\*Diámetro y área teóricos.

\*\*f'c aproximado.

El f'c real del cilindro e-1 es el siguiente:

$$f'c = \frac{33800}{183.054} = 184.645 \text{ kg/cm}^2$$

Figura 3.22. Gráfica carga-deformación del cilindro e-1 proporcionada por la computadora del marco de carga.



➤ **Cilindro e-2**

Las dimensiones y peso del cilindro e-2 fueron las siguientes:

	Diámetro (cm)	Altura (cm)
	15.2	30.7
	15.1	30.6
	15	30.6
Promedio:	15.100	30.633
Relación de esbeltez:		2.029
Masa: 11.11 kg		
Área (cm <sup>2</sup> ):		179.079

Datos proporcionados por la computadora del marco de carga:

MUESTRA:	05
TIEMPO DE LA PRUEBA, min:	1.981
*DIÁMETRO, cm:	15.0
*ÁREA, cm <sup>2</sup> :	176.7
ULTIMA, kg:	36200
**ULTIMO, kg/cm <sup>2</sup> :	205

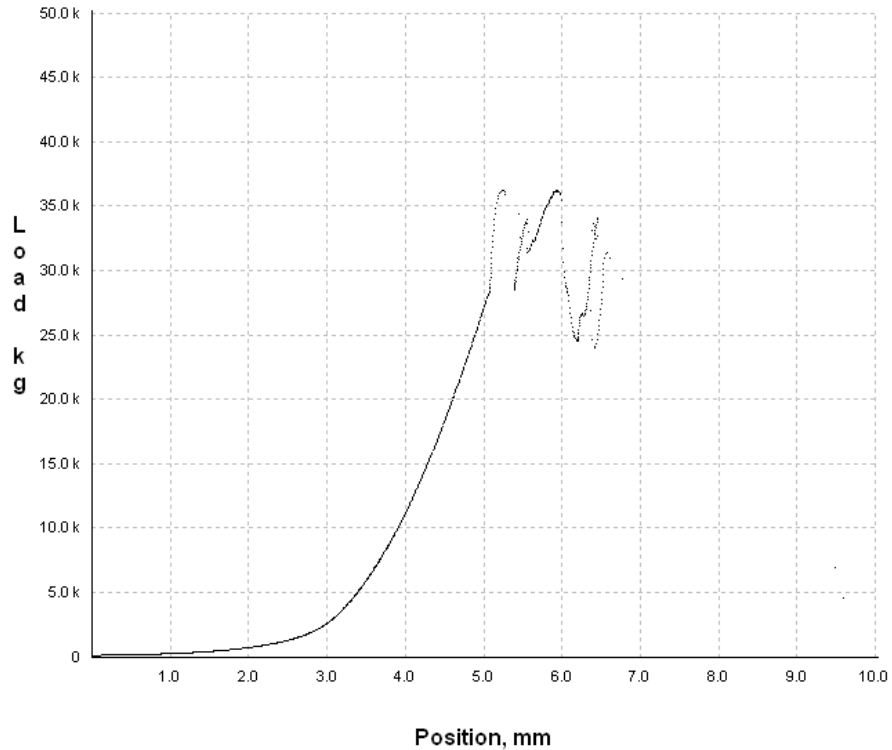
\*Diámetro y área teóricos.

\*\*f'c aproximado.

El f'c real del cilindro e-2 es el siguiente:

$$f'c = \frac{36200}{179.0792} = 202.146 \text{ kg/cm}^2$$

Figura 3.23. Gráfica carga-deformación del cilindro e-2 proporcionada por la computadora del marco de carga.



➤ **Cilindro e-3**

Las dimensiones y peso del cilindro e-3 fueron las siguientes:

	Diámetro (cm)	Altura (cm)
	15.1	30.4
	15.2	30.4
	15.2	30.4
Promedio:	15.167	30.400
Relación de esbeltez:		2.004
Masa: 11.11 kg		
Área (cm <sup>2</sup> ):	180.663	

Datos proporcionados por la computadora del marco de carga:

MUESTRA:	06
TIEMPO DE LA PRUEBA, min:	1.617
*DIÁMETRO, cm:	15.0
*ÁREA, cm <sup>2</sup> :	176.7
ULTIMA, kg:	40500
**ULTIMO, kg/cm <sup>2</sup> :	229

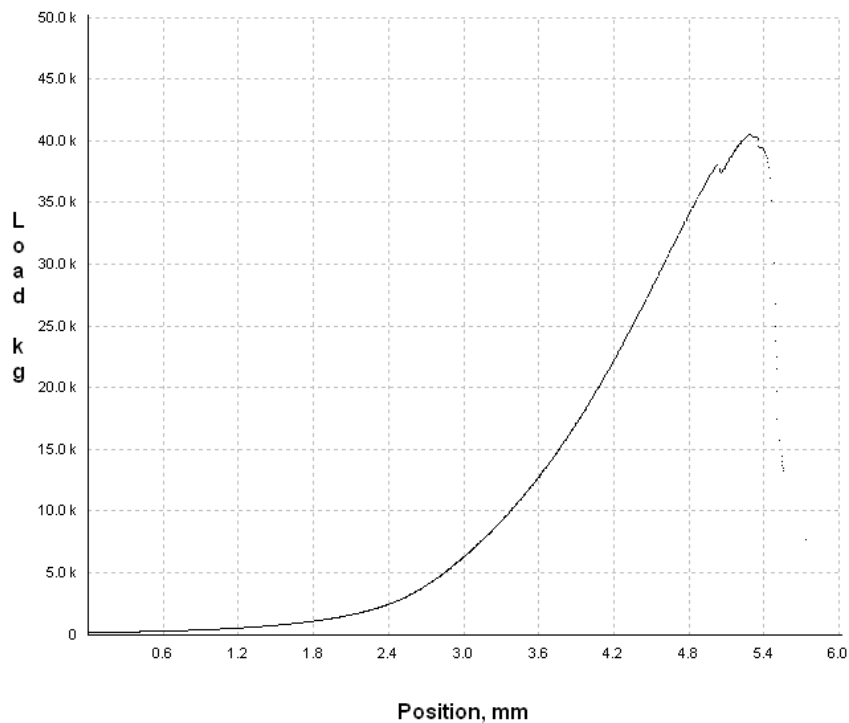
\*Diámetro y área teóricos.

\*\*f'c aproximado.

El f'c real del cilindro e-3 es el siguiente:

$$f'c = \frac{40500}{180.663} = 224.174 \text{ kg/cm}^2$$

Figura 3.24. Gráfica carga-deformación del cilindro e-3 proporcionada por la computadora del marco de carga.



A esta mezcla le hizo falta homogeneidad, como se puede observar en las gráficas. El único cilindro que se comportó con más uniformidad fue el tercero.

El promedio de  $f'c$  de esta mezcla es:

$$f'c = \frac{\sum f'c \text{ resultante de los tres cilindros}}{3} = 203.655 \text{ kg/cm}^2$$

Nuevamente se obtuvo un  $f'c$  mayor al esperado.



Figura 3.25. Cilindro de la mezcla elaborada de 45% agregados reciclados y 55% agregados vírgenes después de fallar.

Fuente: Elaborado por el autor.



**f) Mezcla 60% agregados reciclados y 40% agregados vírgenes.**

La proporción teórica es la siguiente:

Cemento (kg)	4.636
Grava virgen (kg)	6.998
Grava reciclada (kg)	10.497
Arena virgen (kg)	6.298
Arena reciclada (kg)	9.447
Agua ajustada (lts)	3.640

Se comenzó a notar la tendencia que mientras más agregados reciclados tiene la mezcla, más agua se tenía que agregar. El revenimiento que se obtuvo con la dosificación teórica fue de un centímetro, por lo que se volvió a agregar agua y cemento, manteniendo la proporción agua/cemento de 0.774. Se agregaron en total 900 mililitros de agua y 1.163 Kilogramos de cemento:

$$\frac{\text{Agua}}{\text{Cemento}} = \frac{0.900}{1.163} = 0.774$$

Por lo que la dosificación práctica fue:

Cemento (kg)	5.799
Grava virgen (kg)	9.622
Grava reciclada (kg)	7.873
Arena virgen (kg)	8.660
Arena reciclada (kg)	7.085
Agua ajustada (lts)	4.540

➤ **Cilindro f-1**

Las dimensiones y peso del cilindro f-1 fueron las siguientes:

	Diámetro (cm)	Altura (cm)
	15.1	30.4
	15.2	30.4
	15.2	30.4
Promedio:	15.167	30.400
Relación de esbeltez:		2.004
Masa:	10.75 kg	
Área (cm <sup>2</sup> ):	180.663	

Datos proporcionados por la computadora del marco de carga:

MUESTRA:	07
TIEMPO DE LA PRUEBA, min:	5.36
*DIÁMETRO, cm:	15.0
*ÁREA, cm <sup>2</sup> :	176.7
ULTIMA, kg:	28700
**ULTIMO, kg/cm <sup>2</sup> :	162.3

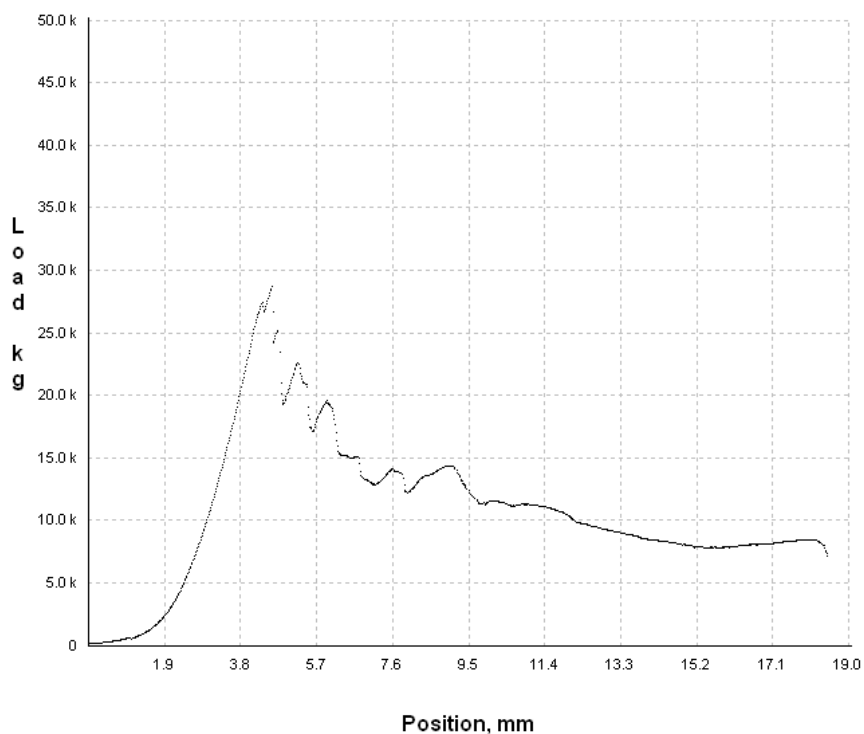
\*Diámetro y área teóricos.

\*\*f'c aproximado.

El f'c real del cilindro f-1 es el siguiente:

$$f'c = \frac{28700}{180.663} = 158.859 \text{ kg/cm}^2$$

Figura 3.26. Gráfica carga-deformación del cilindro f-1 proporcionada por la computadora del marco de carga.



➤ **Cilindro f-2**

Las dimensiones y peso del cilindro f-2 fueron las siguientes:

	Diámetro (cm)	Altura (cm)
	15.3	30.4
	15.2	30.6
	15.1	30.7
Promedio:	15.200	30.567
Relación de esbeltez:		2.011
Masa:	11.19 kg	
Área (cm <sup>2</sup> ):	181.458	

Datos proporcionados por la computadora del marco de carga:

MUESTRA:	08
TIEMPO DE LA PRUEBA, min:	1.924
*DIÁMETRO, cm:	15.0
*ÁREA, cm <sup>2</sup> :	176.7
ULTIMA, kg:	32700
**ULTIMO, kg/cm <sup>2</sup> :	185.3

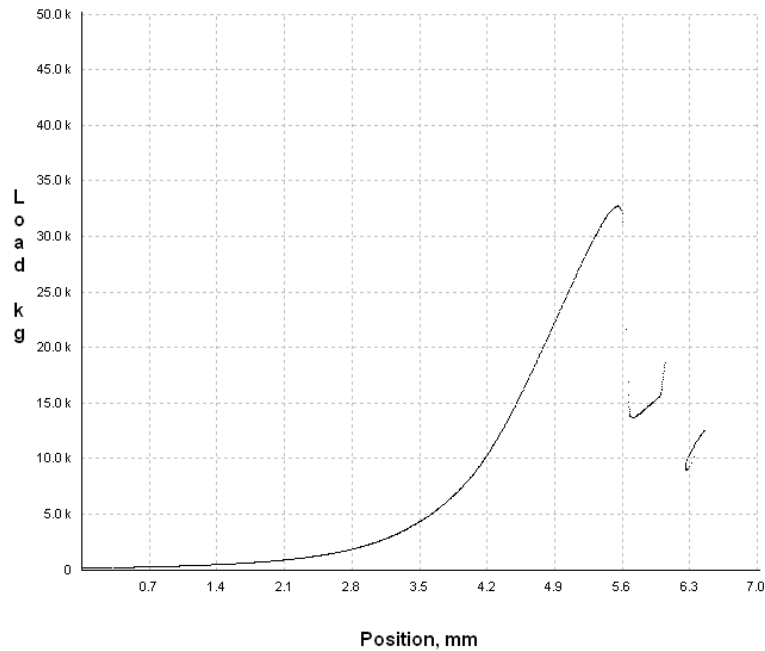
\*Diámetro y área teóricos.

\*\*f'c aproximado.

El f'c real del cilindro f-2 es el siguiente:

$$f'c = \frac{32700}{181.458} = 180.207 \text{ kg/cm}^2$$

Figura 3.27. Gráfica carga-deformación del cilindro f-2 proporcionada por la computadora del marco de carga.



➤ **Cilindro f-3**

Las dimensiones y peso del cilindro f-3 fueron las siguientes:

	Diámetro (cm)	Altura (cm)
	14.9	30.1
	15.1	30
	15.3	30
Promedio:	15.100	30.033
Relación de esbeltez:		1.989
Masa:	10.63 kg	
Área (cm <sup>2</sup> ):	179.079	

Datos proporcionados por la computadora del marco de carga:

MUESTRA:	09
TIEMPO DE LA PRUEBA, min:	1.949
*DIÁMETRO, cm:	15.0
*ÁREA, cm <sup>2</sup> :	176.7
ULTIMA, kg:	27000
**ULTIMO, kg/cm <sup>2</sup> :	152.9

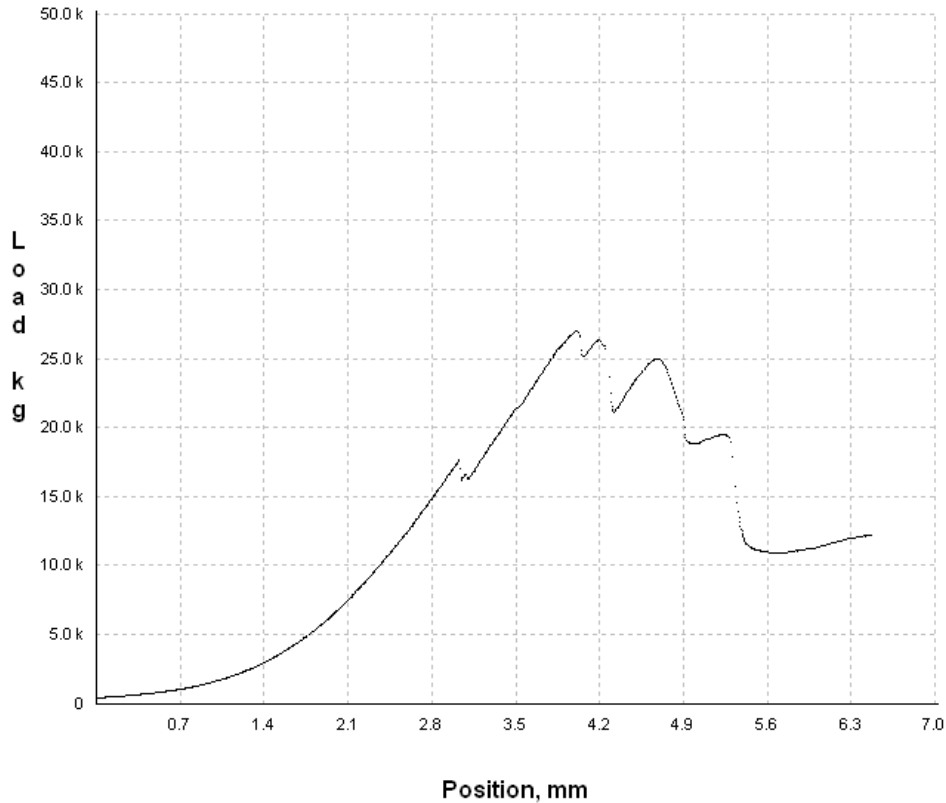
\*Diámetro y área teóricos.

\*\*f'c aproximado.

El f'c real del cilindro f-3 es el siguiente:

$$f'c = \frac{27000}{179.079} = 150.772 \text{ kg/cm}^2$$

Figura 3.28. Gráfica carga-deformación del cilindro f-3 proporcionada por la computadora del marco de carga.



Aunque la resistencia de los tres cilindros fue muy similar, su comportamiento fue muy diferente, como se puede observar en las gráficas. El primer cilindro trató de tomar carga varias veces antes de fallar por completo; el segundo fue el que tuvo un comportamiento más uniforme, mientras que el tercero el más inconsistente.

El promedio de  $f'_c$  de esta mezcla es:

$$f'_c = \frac{\sum f'_c \text{ resultante de los tres cilindros}}{3} = 163.279 \text{ kg/cm}^2$$

Nuevamente se obtuvo un  $f'_c$  mayor al esperado.



Figura 3.29. Cilindro de la mezcla elaborada de 60% agregados reciclados y 40% agregados vírgenes después de fallar.

Fuente: Elaborado por el autor.

***g) Mezcla 75% agregados reciclados y 25% agregados vírgenes.***

La proporción teórica es la siguiente:

Cemento (kg)	4.636
Grava virgen (kg)	4.374
Grava reciclada (kg)	13.121
Arena virgen (kg)	3.936
Arena reciclada (kg)	11.809
Agua ajustada (lts)	3.398

El revenimiento que se obtuvo con la dosificación teórica fue de cero, por lo que se volvió a agregar agua y cemento, manteniendo la proporción agua/cemento de 0.774. Se agregaron en total 1.1 litros de agua y 1.422 Kilogramos de cemento:

$$\frac{\text{Agua}}{\text{Cemento}} = \frac{1.100}{1.422} = 0.774$$

Por lo que la dosificación práctica fue:

Cemento (kg)	6.058
Grava virgen (kg)	9.622
Grava reciclada (kg)	7.873
Arena virgen (kg)	8.660
Arena reciclada (kg)	7.085
Agua ajustada (lts)	4.498

➤ **Cilindro g-1**

Las dimensiones y peso del cilindro g-1 fueron las siguientes:

	Diámetro (cm)	Altura (cm)
	15	30
	14.9	29.9
	14.9	29.9
Promedio:	14.933	29.933
Relación de esbeltez:		2.004
Masa: 10.21 kg		
Área (cm <sup>2</sup> ):	175.147	



Datos proporcionados por la computadora del marco de carga:

MUESTRA:	10
TIEMPO DE LA PRUEBA, min:	2.5
*DIÁMETRO, cm:	15.0
*ÁREA, cm <sup>2</sup> :	176.7
ULTIMA, kg:	22600
**ULTIMO, kg/cm <sup>2</sup> :	127.8

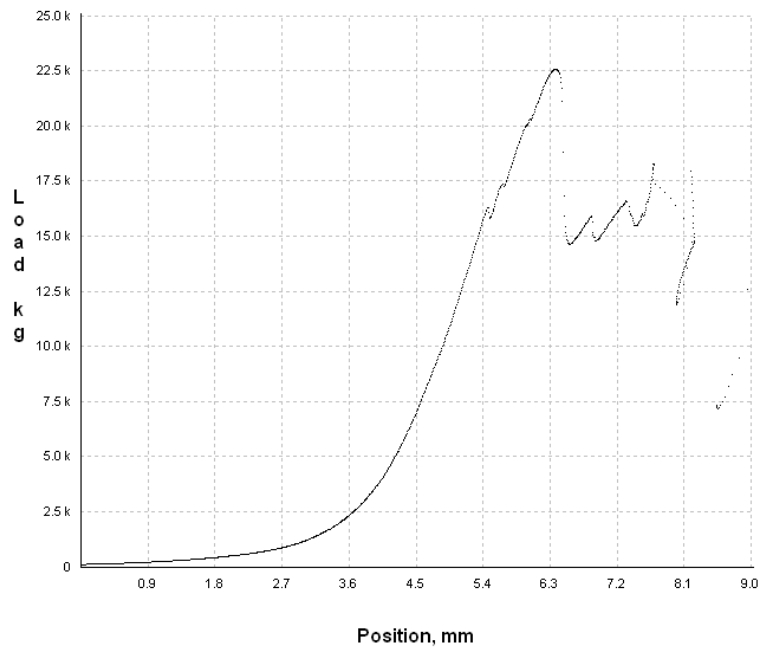
\*Diámetro y área teóricos.

\*\*f'c aproximado.

El f'c real del cilindro g-1 es el siguiente:

$$f'c = \frac{22600}{175.147} = 129.034 \text{ kg/cm}^2$$

Figura 3.30. Gráfica carga-deformación del cilindro g-1 proporcionada por la computadora del marco de carga.



➤ **Cilindro g-2**

Las dimensiones y peso del cilindro g-2 fueron las siguientes:

	Diámetro (cm)	Altura (cm)
	14.9	29.9
	15.1	30.1
	15.1	30.1
Promedio:	15.033	30.033
Relación de esbeltez:		1.998
Masa: 10.48 kg		
Área (cm <sup>2</sup> ):		177.501

Datos proporcionados por la computadora del marco de carga:

MUESTRA:	11
TIEMPO DE LA PRUEBA, min:	2.13
*DIÁMETRO, cm:	15.0
*ÁREA, cm <sup>2</sup> :	176.7
ULTIMA, kg:	22500
**ULTIMO, kg/cm <sup>2</sup> :	127.6

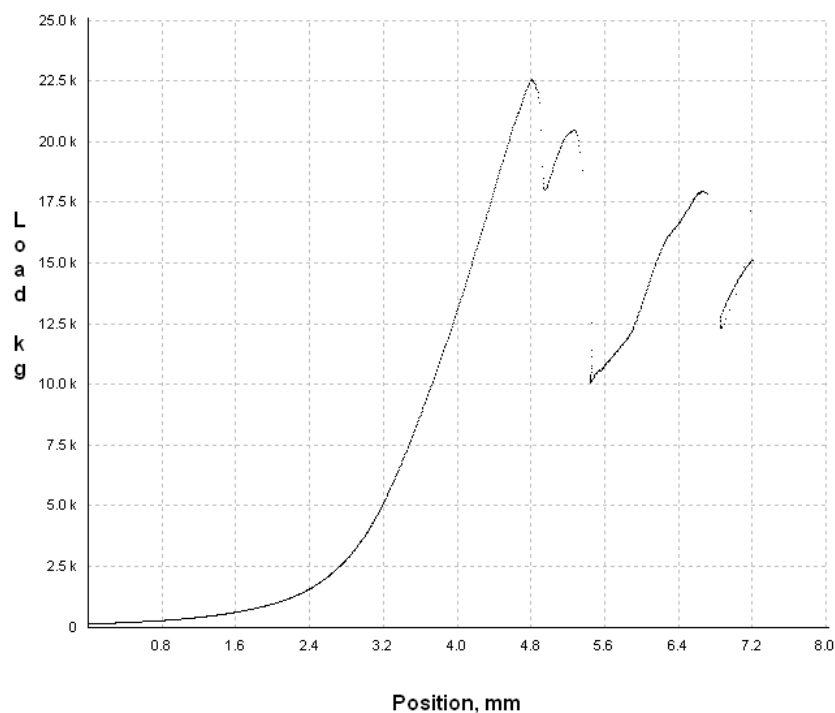
\*Diámetro y área teóricos.

\*\*f'c aproximado.

El f'c real del cilindro g-2 es el siguiente:

$$f'c = \frac{22500}{177.501} = 126.760 \text{ kg/cm}^2$$

Figura 3.31. Gráfica carga-deformación del cilindro g-2 proporcionada por la computadora del marco de carga.



➤ **Cilindro g-3**

Las dimensiones y peso del cilindro g-3 fueron las siguientes:

	Diámetro (cm)	Altura (cm)
	14.9	30.4
	15.2	30.2
	15.1	30.2
Promedio:	15.067	30.267
Relación de esbeltez:		2.009
Masa:	10.50 kg	
Área (cm <sup>2</sup> ):	178.289	

Datos proporcionados por la computadora del marco de carga:

MUESTRA:	12
TIEMPO DE LA PRUEBA, min:	2.23
*DIÁMETRO, cm:	15.0
*ÁREA, cm <sup>2</sup> :	176.7
ULTIMA, kg:	20800
**ULTIMO, kg/cm <sup>2</sup> :	117.8

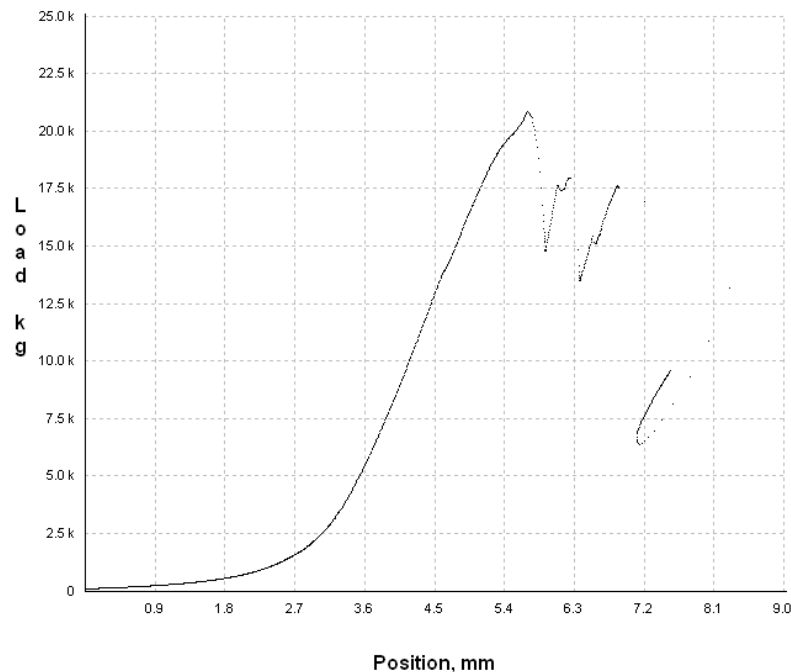
\*Diámetro y área teóricos.

\*\*f'c aproximado.

El f'c real del cilindro g-3 es el siguiente:

$$f'c = \frac{20800}{178.289} = 116.665 \text{ kg/cm}^2$$

Figura 3.32. Gráfica carga-deformación del cilindro g-3 proporcionada por la computadora del marco de carga.



Esta mezcla es un claro ejemplo de homogeneidad ya que los tres cilindros se comportaron de manera casi idéntica, muy uniforme, como se puede observar en las gráficas.

El promedio de  $f'c$  de esta mezcla es:

$$f'c = \frac{\sum f'c \text{ resultante de los tres cilindros}}{3} = 124.153 \text{ kg/cm}^2$$

Nuevamente se obtuvo un  $f'c$  mayor al esperado.



Figura 3.33. Cilindro de la mezcla elaborada de 75% agregados reciclados y 25% agregados vírgenes después de fallar.

Fuente: Elaborado por el autor.

***h) Mezcla 90% agregados reciclados y 10% agregados vírgenes.***

La proporción teórica es la siguiente:

Cemento (kg)	4.636
Grava virgen (kg)	1.749
Grava reciclada (kg)	15.745
Arena virgen (kg)	1.575
Arena reciclada (kg)	14.171
Agua ajustada (lts)	3.156

El revenimiento que se obtuvo con la dosificación teórica fue de un centímetro, por lo que se volvió a agregar agua y cemento, manteniendo la proporción agua/cemento de 0.774. Se agregaron en total 1.5 litros de agua y 1.939 Kilogramos de cemento:

$$\frac{\text{Agua}}{\text{Cemento}} = \frac{1.500}{1.939} = 0.774$$

Por lo que la dosificación práctica fue:

Cemento (kg)	6.575
Grava virgen (kg)	9.622
Grava reciclada (kg)	7.873
Arena virgen (kg)	8.660
Arena reciclada (kg)	7.085
Agua ajustada (lts)	4.656

➤ **Cilindro h-1**

Las dimensiones y peso del cilindro h-1 fueron las siguientes:

	Diámetro (cm)	Altura (cm)
	15.3	29.6
	15.2	29.6
	15	29.6
Promedio:	15.167	29.600
Relación de esbeltez:		1.952
Masa: 10.43 kg		
Área (cm <sup>2</sup> ):	180.663	

Datos proporcionados por la computadora del marco de carga:

MUESTRA:	13
TIEMPO DE LA PRUEBA, min:	2.38
*DIÁMETRO, cm:	15.0
*ÁREA, cm <sup>2</sup> :	176.7
ULTIMA, kg:	14770
**ULTIMO, kg/cm <sup>2</sup> :	83.6

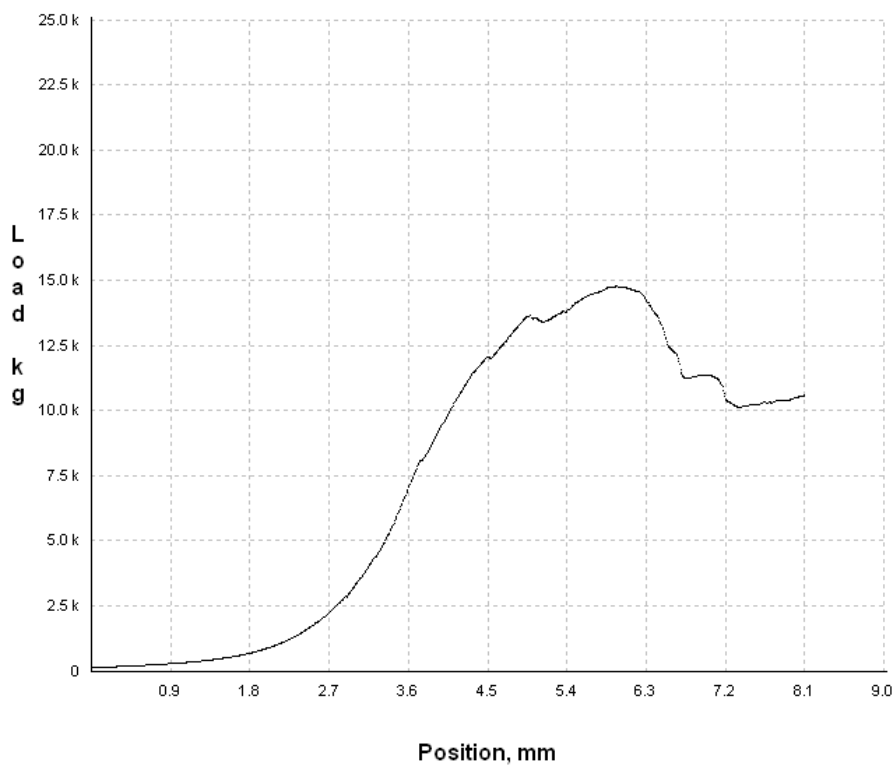
\*Diámetro y área teóricos.

\*\*f'c aproximado.

El f'c real del cilindro h-1 es el siguiente:

$$f'c = \frac{14770}{180.663} = 81.754 \text{ kg/cm}^2$$

Figura 3.34. Gráfica carga-deformación del cilindro h-1 proporcionada por la computadora del marco de carga.



➤ **Cilindro h-2**

Las dimensiones y peso del cilindro h-2 fueron las siguientes:

	Diámetro (cm)	Altura (cm)
	14.9	30
	15	30.2
	15.1	29.9
Promedio:	15.000	30.033
Relación de esbeltez:		2.002
Masa:	10.47 kg	
Área (cm <sup>2</sup> ):	176.715	



Datos proporcionados por la computadora del marco de carga:

MUESTRA:	14
TIEMPO DE LA PRUEBA, min:	2.07
*DIÁMETRO, cm:	15.0
*ÁREA, cm <sup>2</sup> :	176.7
ULTIMA, kg:	17100
**ULTIMO, kg/cm <sup>2</sup> :	96.8

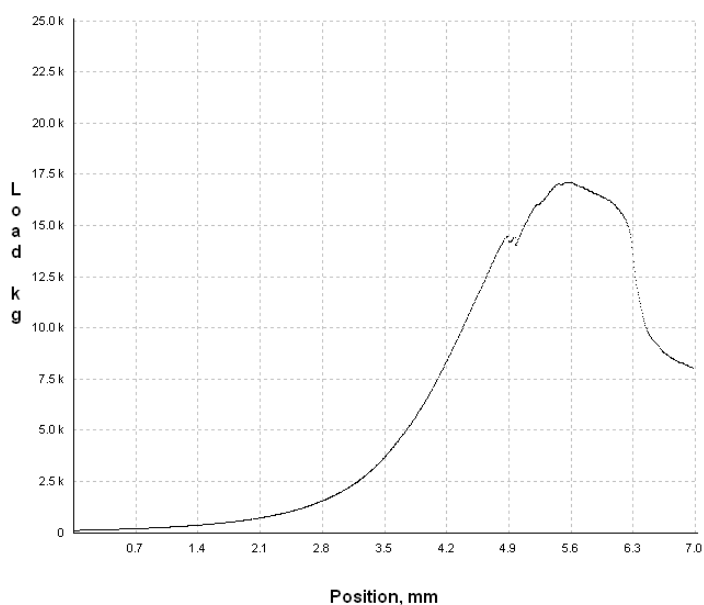
\*Diámetro y área teóricos.

\*\*f'c aproximado.

El f'c real del cilindro h-2 es el siguiente:

$$f'c = \frac{17100}{176.715} = 96.766 \text{ kg/cm}^2$$

Figura 3.35. Gráfica carga-deformación del cilindro h-2 proporcionada por la computadora del marco de carga.



➤ **Cilindro h-3**

Las dimensiones y peso del cilindro h-3 fueron las siguientes:

	Diámetro (cm)	Altura (cm)
	15.1	29.9
	15	30
	15.1	30.1
Promedio:	15.067	30.000
Relación de esbeltez:		1.991
Masa:	10.50 kg	
Área (cm <sup>2</sup> ):	178.289	

Datos proporcionados por la computadora del marco de carga:

MUESTRA:	15
TIEMPO DE LA PRUEBA, min:	2.48
*DIÁMETRO, cm:	15.0
*ÁREA, cm <sup>2</sup> :	176.7
ULTIMA, kg:	16530
**ULTIMO, kg/cm <sup>2</sup> :	93.6

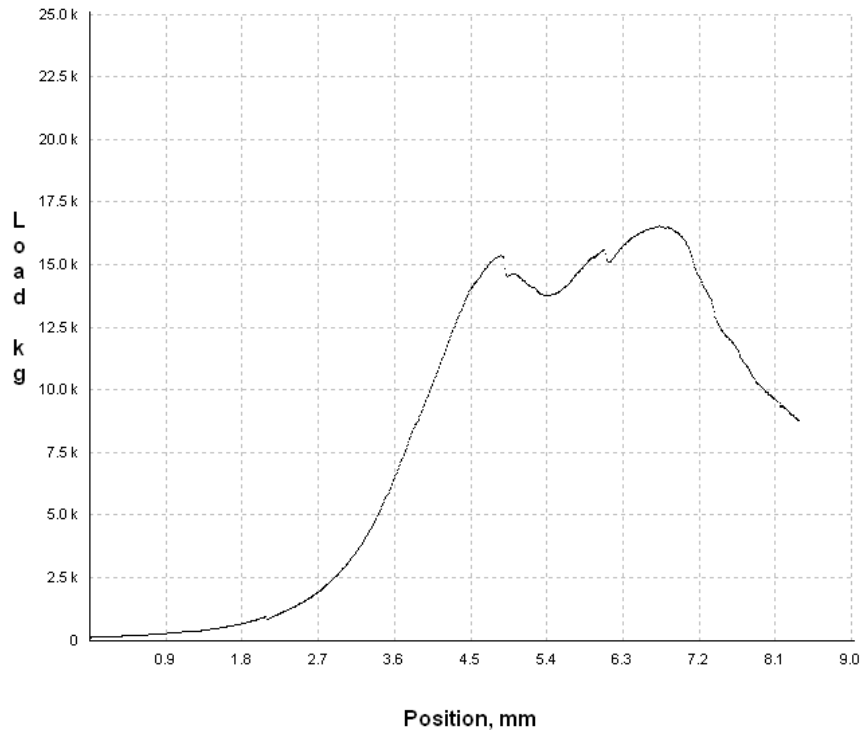
\*Diámetro y área teóricos.

\*\*f'c aproximado.

El f'c real del cilindro g-3 es el siguiente:

$$f'c = \frac{16530}{178.289} = 92.715 \text{ kg/cm}^2$$

Figura 3.36. Gráfica carga-deformación del cilindro h-3 proporcionada por la computadora del marco de carga.



Como se puede observar en las gráficas, los tres cilindros se comportaron de manera muy similar.

El promedio de  $f'c$  de esta mezcla es:

$$f'c = \frac{\sum f'c \text{ resultante de los tres cilindros}}{3} = 90.412 \text{ kg/cm}^2$$

Esta es la única mezcla dónde no se alcanzó un  $f'c$  mayor al esperado, de hecho estuvo por debajo, ya que se esperaba mínimo un  $f'c$  de  $100 \text{ kg/cm}^2$  y el promedio de la mezcla fue de  $90.412 \text{ kg/cm}^2$ .

Revisando la bitácora de la elaboración de las mezclas, se encontró el motivo por el cuál no se alcanzó el resultado esperado: en lugar de agregar el cemento extra para obtener el revenimiento deseado que requería esta mezcla se agregó el que necesitaba la mezcla g; por lo que en vez de tener 6.575 kg de cemento la mezcla se elaboró con 6.058 kg. Esto provocó que la relación agua/cemento se alterara y que se obtuviera una mezcla con exceso de agua, por ende una mezcla con menor resistencia.



Figura 3.37. Cilindro de la mezcla elaborada de 90% agregados reciclados y 10% agregados vírgenes después de fallar.

Fuente: Elaborado por el autor.

### **3.2. Ensaye de permeabilidad en diferentes mezclas de tepetate con arena reciclada.**

Las pruebas de permeabilidad se realizaron para conocer qué tan viable es mezclar el tepetate con arena reciclada para utilizar esta mezcla como material de cobertura y clausura en las celdas de un relleno sanitario. La permeabilidad en el material de cobertura es muy importante debido a que este tiene las siguientes funciones: controlar la fauna nociva, reducir la emisión de biogás, mitigar los malos olores y evitar incendios, así como también disminuir la entrada de agua ("Proyecto ejecutivo del relleno sanitario," 1999).

Por otro lado, la NOM-083-SEMARNAT-2003 establece que: se debe controlar la dispersión de materiales ligeros, la fauna nociva y la infiltración pluvial. Los residuos deben ser cubiertos en forma continua y dentro de un lapso menor a 24 horas posteriores a su depósito. Y que en la clausura la cobertura debe aislar los residuos, minimizar la infiltración de líquidos en las celdas, controlar el flujo del biogás generado, minimizar la erosión y brindar un drenaje adecuado.

Una vez más, citando el Proyecto ejecutivo del Relleno Sanitario Metropolitano Poniente "Picachos":

"Pruebas experimentales realizadas en diversos rellenos sanitarios de los E.U.A. han demostrado que una capa de 15 cm de material arenoso compactado al 95% proctor cumple con estos requisitos. La aplicación diaria de la cubierta reduce la atracción de los residuos sobre las aves y los roedores en busca de alimento y es esencial para mantener una buena apariencia del relleno sanitario.

Muchos tipos de suelos cuando están debidamente compactados muestran baja permeabilidad, no se contraen y pueden ser usados para controlar el agua que pudiera entrar al relleno e incrementar el volumen de lixiviado.

El control de la emanación de gases es también una función esencial de material de cubierta. Los gases pueden ser bloqueados o ventilados a través del material de cubierta. Un suelo permeable que no retenga mucha agua puede servir como un buen material para ventilar los gases.

El cubrir los residuos también protege contra el fuego. Casi todos los suelos son incombustibles por lo que la cubierta y los taludes de cada una de las celdas del relleno ayudan a confinar el fuego, dentro de ésta.”

La permeabilidad es la capacidad de un cuerpo (que en este caso es el tepetate como material de cobertura sobre celdas de rellenos sanitarios) para permitir a través de él el paso de un fluido. Dicha propiedad se determina mediante la imposición de un gradiente hidráulico en una sección del cuerpo, y a lo largo de una trayectoria determinada. (Franch, J., n.d.).

A mediados del siglo XIX, Henry Darcy realizó una serie de ensayos en un dispositivo como el que se muestra en la figura 2.37 y estableció que el flujo de agua a través de los suelos está regida por la siguiente ecuación (Padilla, 2013):

$$Q = k i A$$

En dónde:

Q: gasto que pasa a través del suelo.

k: coeficiente de permeabilidad.

i: gradiente hidráulico,  $i = H / L$ .

A: área de la sección transversal de la muestra de suelo.

Esta ecuación es válida únicamente para el caso de tener flujo laminar, el cual es función del tamaño de las partículas sólidas, de la relación de vacíos y entre otros de la viscosidad. (Padilla, 2013).

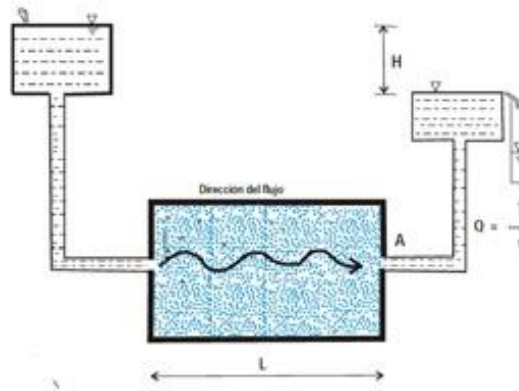


Figura 3.38. Dispositivo empleado por Henry Darcy para determinar la permeabilidad en los suelos. Fuente: Manual de Prácticas del Laboratorio de Comportamiento de Suelos, FES Acatlán, UNAM, 2013.

De la ecuación de continuidad:

$$Q = v A$$

y

$$v = k i$$

En dónde:

v: velocidad del flujo

i: gradiente hidráulico.

A partir de esto se puede deducir que el gradiente hidráulico es adimensional, por lo que las unidades de k son unidades de velocidad, y corresponde a la velocidad con que pasa el agua a través del suelo. (Padilla, 2013).

Existen varios procedimientos para determinar la permeabilidad de los suelos: directos e indirectos.

Los directos son llamados así porque se basan en pruebas cuyo objetivo fundamental es la medición de tal coeficiente, estas pruebas se realizan con

permeámetros de carga constante, permeámetros de carga variable y pruebas directas de los suelos in situ.

Los indirectos son los que proporcionan el coeficiente en forma secundaria, por pruebas y técnicas que primariamente persiguen otros fines, estos son: cálculo a partir de la curva granulométrica, cálculo a partir de la prueba de consolidación y cálculo con la prueba horizontal de capilaridad. (Juárez, 2005).

Para determinar la permeabilidad del tepetate que se utiliza para cubrir las celdas en el Relleno Sanitario de Tlalnepantla de Baz, así como la permeabilidad de este tepetate mezclado con arena reciclada, se realizaron pruebas de permeabilidad con un permeámetro de carga variable, esto dentro del Laboratorio de Suelos de la FES Acatlán, UNAM.

En el permeámetro de carga variable se determina el volumen de agua que atraviesa la muestra de suelo y el tiempo; la carga hidráulica cambia con respecto al tiempo, inicialmente se tiene una carga hidráulica  $h_1$ , al paso de tiempo la carga hidráulica será  $h_2$ .

La permeabilidad se determinará con la siguiente expresión (Padilla, 2013):

$$k = \frac{a L}{A t} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

Dónde:

k: coeficiente de permeabilidad. (cm/s)

a: área transversal del tubo alimentador. (cm<sup>2</sup>)

L: longitud de la muestra de suelo. (cm)

A: área transversal de la muestra. (cm<sup>2</sup>)

$h_1$  : altura inicial. (cm)

$h_2$  : altura final. (cm)

t: tiempo que se necesita para bajar de  $h_1$  a  $h_2$ . (s)



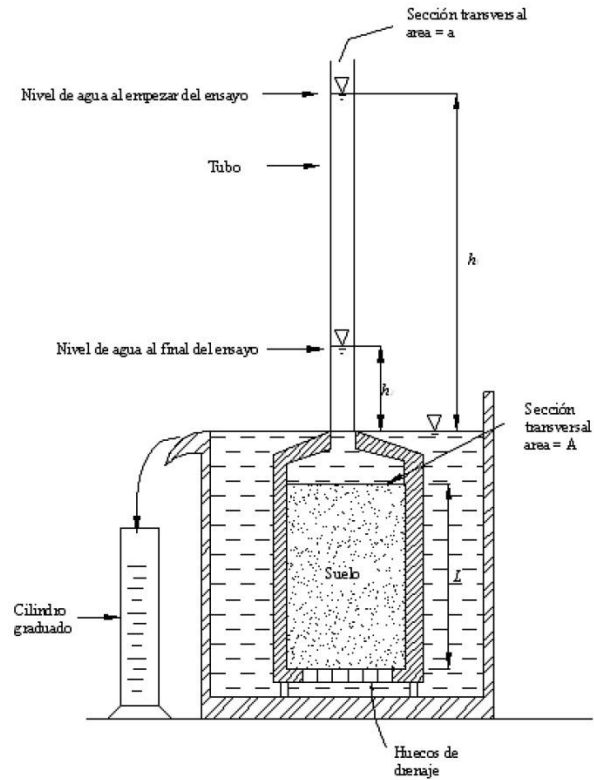


Figura 3.39. Funcionamiento de un permeámetro de carga variable.

Fuente: Publicación en línea.

Para realizar la prueba se utilizó el siguiente equipo:

Permeámetro de carga variable.

Flexómetro.

Vernier.

Termómetro.

Pisón.

Báscula.

Papel filtro y piedras porosas.

Brocha.

Cucharón



Figura 3.40. Equipo utilizado en la prueba de permeabilidad.

Fuente: Elaborado por el autor.

Primeramente se determina el peso y las dimensiones del permeámetro, esto para posteriormente conocer el peso de la muestra de tepetate que se utilizó en la prueba (al final se pesa el permeámetro con la muestra y la diferencia de esto con el peso del permeámetro será el peso de la muestra), así como el área transversal de esta muestra. El peso de la muestra de tepetate que se colocó en el permeámetro fue de 900 gramos y el diámetro del permeámetro de 7.61 cm. Con este diámetro posteriormente se calculará el área transversal de la muestra y a partir del peso se pudo proporcionar la cantidad de arena reciclada que se mezclará con el tepetate en las pruebas siguientes.

Una vez que se tiene el peso de la muestra se coloca dentro del permeámetro (antes de colocarlo se debe poner la piedra porosa con papel filtro para no obstruir el paso del agua hacia el permeámetro por partículas de la muestra, igualmente al final del llenado se debe colocar otra piedra porosa con papel filtro sobre la muestra), aplicando un esfuerzo para obtener la compactación aproximada que tendrá cuando sea colocado como material de cobertura sobre la celda. Para esto se emplea el pisón; se llena el permeámetro en capas de aproximadamente dos centímetros y se compactan con golpes del pisón en forma de espiral y de afuera hacia adentro, esto para obtener una buena compactación de la muestra.



Figura 3.41. Compactación por capas de la muestra de tepetate con el pisón.

Fuente: Elaborado por el autor.

Ya que la muestra se encuentra compactada, se pesa el permeámetro con la muestra, cómo se explicó anteriormente, para determinar el peso de la muestra con la que se llenó el permeámetro. Después de esto se instala el permeámetro.



Figura 3.42. Permeámetro lleno con la muestra.

Fuente: Elaborado por el autor.



Figura 3.43. Instalación del permeámetro.

Fuente: Elaborado por el autor.

Instalado el permeámetro se hace pasar agua a través de él para saturar la muestra, esto para que el agua que absorba el material no influya en la determinación de la permeabilidad. Se debe tomar la temperatura del agua con la que se realiza la prueba para posteriormente corregir la permeabilidad obtenida

debido a la viscosidad, que es función de la temperatura, empleando los valores de la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Viscosidades del agua de 10° a 30°C y relaciones  $\mu_T/\mu_{20}$ .

**VISCOSIDADES DEL AGUA DE 10° a 30° C**  
**Y RELACIONES  $\frac{\mu_T}{\mu_{20}}$**

GRADOS	$\mu_T$	$\frac{\mu_T}{\mu_{20}}$
10.0° C	1.3077	1.30119
11.0° C	1.2713	1.26497
12.0° C	1.2363	1.23014
13.0° C	1.2028	1.19681
14.0° C	1.1709	1.16507
15.0° C	1.1404	1.13472
16.0° C	1.1111	1.10557
17.0° C	1.0828	1.07741
18.0° C	1.0559	1.05064
19.0° C	1.0299	1.02477
20.0° C	1.0050	1.00000
20.2° C	1.0000	0.99502
21.0° C	0.9810	0.97611
22.0° C	0.9579	0.95313
23.0° C	0.9358	0.93114
24.0° C	0.9142	0.90965
25.0° C	0.8937	0.88925
26.0° C	0.8737	0.86935
27.0° C	0.8545	0.85024
28.0° C	0.8360	0.83184
29.0° C	0.8180	0.81397
30.0° C	0.8007	0.79671

$\mu_T$  = VISCOSIDAD DEL AGUA A T° C

$\mu_{20}$  = VISCOSIDAD DEL AGUA A 20° C

Fuente: Comisión Nacional del Agua. Mecánica de suelos: Instructivo para ensaye de suelos.

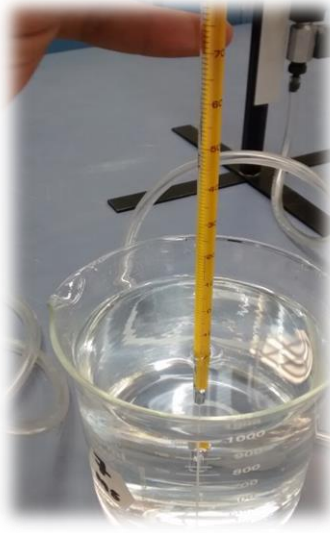


Figura 3.44. Determinación de la temperatura del agua que se utilizó en la prueba.

Fuente: Elaborado por el autor.



Figura 3.45. Muestra saturada.

Fuente: Elaborado por el autor.

Una vez que la muestra se encuentra saturada, se procede a obtener  $h_1$ ,  $h_2$  y el tiempo que tardó el agua en fluir entre las dos cargas hidráulicas.

**a) Permeabilidad del tepetate.**

Siguiendo el procedimiento establecido previamente, primero se determinó la permeabilidad del tepetate proporcionado por el Relleno Sanitario de Tlalnepantla de Baz, que es utilizado como material de cobertura para las celdas del mismo.

Como ya se comentó, para calcular el coeficiente de permeabilidad (k) se utilizó la siguiente expresión:

$$k = \frac{a L}{A t} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

Ambas áreas fueron las mismas para todas las pruebas, ya que se utilizaron el mismo permeámetro y el mismo tubo alimentador.

El área transversal del tubo alimentador se determinó a partir del diámetro interior de éste, que es igual a  $d = 0.15$  cm.

$$a = \frac{\pi d^2}{4} = 0.017671459 \text{ cm}^2 **$$

\*\*Se utilizaron varios decimales debido a que son cantidades muy pequeñas y se requiere de resultados muy exactos.

El área transversal de la muestra fue la misma que el área interior del permeámetro, debido a que la muestra toma la forma de éste; y se determinó a partir del diámetro interior del permeámetro que es igual a  $d = 7.61$  cm.

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = 45.484057 \text{ cm}^2 **$$

El peso de la muestra de tepetate que se colocó dentro del permeámetro fue de 900 gramos y la longitud de esta fue de 14.3 cm.

El tubo del permeámetro dónde se tomaron las medidas de h1 y h2 midió 100 cm, como se observa en la figura 2.42. h1 fue igual a 65 cm y h2 a 35 cm; y el tiempo que transcurrió para que llegara de h1 a h2 fue de 14 minutos con 48 segundos. Fue necesario calcular el tiempo en segundos:

$$t = \left[ \frac{(14 \text{ min})60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \right] + 48 \text{ s} = 888 \text{ s}$$

Ya que se tuvieron todas las variables se procede a aplicar la ecuación:

$$k = \frac{a L}{A t} \ln \frac{h1}{h2} = \frac{(0.017671459 \text{ cm}^2) (14.3 \text{ cm})}{45.484057 \text{ cm}^2 (888 \text{ s})} \left[ \ln \frac{65}{35} \right] = 3.87306 \times 10^{-6} \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

**b) Permeabilidad de la mezcla de 75% de tepetate con 25% de arena reciclada.**

Conociendo la cantidad de muestra presente en el permeámetro, que fue de 900 gramos, se pudo determinar la cantidad de arena reciclada y tepetate con la que se elaboró la mezcla.

Para determinar la cantidad de arena reciclada de esta mezcla se realizó la siguiente relación:

$$\frac{900 \text{ gr}}{x} \leftrightarrow \frac{100\%}{25\%}$$

$$x = \frac{(25)900}{100} = 225 \text{ gr}$$

Por lo tanto la cantidad de tepetate presente en la mezcla fue:

$$900 - 225 = 675 \text{ gr}$$



Se preparó la mezcla y se realizó el mismo procedimiento para determinar la permeabilidad que para la prueba anterior.

Como ya se estableció previamente, las dos áreas requeridas para aplicar la fórmula fueron las mismas. A continuación se presentan los resultados de esta prueba:

$$L = 12.533 \text{ cm}$$

$$h_1 = 85 \text{ cm}$$

$$h_2 = 35 \text{ cm}$$

$$t = 712 \text{ s}$$

Se procedió a aplicar la ecuación:

$$\begin{aligned} k &= \frac{a L}{A t} \ln \frac{h_1}{h_2} = \frac{(0.017671459 \text{ cm}^2) (12.533 \text{ cm})}{45.484057 \text{ cm}^2 (712 \text{ s})} \left[ \ln \frac{85}{35} \right] = \\ &= 6.06837 \times 10^{-6} \frac{\text{cm}}{\text{s}} \end{aligned}$$

**c) Permeabilidad de la mezcla de 50% de tepetate con 50% de arena reciclada.**

En esta mezcla fue muy sencillo obtener la cantidad de tepetate y arena reciclada presentes, ya que la mitad de 900 gramos es 450 gramos, por lo que la mezcla fue realizada con 450 gramos de arena reciclada y 450 gramos de tepetate.



Figura 3.46. Preparación de la mezcla.

Fuente: Elaborado por el autor.

Se realizó el mismo procedimiento que la muestra anterior, para determinar la permeabilidad de este espécimen.



Figura 3.47. Permeámetro instalado, muestra saturándose.

Fuente: Elaborado por el autor.

Como ya se estableció previamente, las dos áreas requeridas para aplicar la fórmula fueron las mismas. A continuación se presentan los resultados de esta prueba:

$$L = 12.333 \text{ cm}$$

$$h_1 = 85 \text{ cm}$$

$$h_2 = 25 \text{ cm}$$

$$t = 342 \text{ s}$$

Se procedió a aplicar la ecuación:

$$\begin{aligned} k &= \frac{a L}{A t} \ln \frac{h_1}{h_2} = \frac{(0.017671459 \text{ cm}^2) (12.333 \text{ cm})}{45.484057 \text{ cm}^2 (342 \text{ s})} \left[ \ln \frac{85}{25} \right] = \\ &= 1.71463 \times 10^{-5} \frac{\text{cm}}{\text{s}} \end{aligned}$$

La temperatura del agua en las tres pruebas fue de 20°C, por lo que no fue necesario hacer ningún tipo de ajuste por viscosidad, ya que la relación  $\mu_T/\mu_{20}$  para 20°C es igual a 1. Como puede observarse en la tabla 2.10 del capítulo anterior.

**CAPÍTULO 4.**  
**CONCLUSIONES Y**  
**RECOMENDACIONES.**

## CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

### 4.1. Conclusiones y recomendaciones acerca de las pruebas de resistencia a compresión simple de los cilindros de diversas mezclas de concreto.

En general los cilindros se comportaron de manera extraordinaria, con resultados por arriba de lo esperado. A continuación se presenta un resumen con las características del material utilizado para la elaboración de las mezclas y los resultados de las pruebas de resistencia:

- **Agregados reciclados.**

Módulo de finura del agregado fino.	3.62
Tamaño máximo del agregado grueso.	1"
Peso específico del agregado fino.	2039.865 kg/m <sup>3</sup>
Peso específico del agregado grueso.	2355.994 kg/m <sup>3</sup>
Absorción del agregado fino.	7.952%
Absorción del agregado grueso.	4.34%
Humedad del agregado fino.	13.962%
Humedad del agregado grueso.	2.316%
Peso volumétrico del agregado fino.	1278.948 kg/m <sup>3</sup>
Peso volumétrico del agregado grueso.	1601.873 kg/m <sup>3</sup>

- **Agregados vírgenes.**

Módulo de finura del agregado fino.	2.82
Tamaño máximo del agregado grueso.	1"
Peso específico del agregado fino.	2293.144 kg/m <sup>3</sup>
Peso específico del agregado grueso.	2715.892 kg/m <sup>3</sup>
Absorción del agregado fino.	5.363 %
Absorción del agregado grueso.	4.616 %
Humedad del agregado fino.	3.714 %
Humedad del agregado grueso.	0.258 %

Peso volumétrico del agregado fino.	1292.025 kg/m <sup>3</sup>
Peso volumétrico del agregado grueso.	1456.650 kg/m <sup>3</sup>

Tabla 4.1 Resultados de la prueba de resistencia a compresión simple de los cilindros de diversas mezclas de concreto.

<b>ESPECÍMENES</b>	<b>f'c (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Promedio f'c</b>
<b>100% Agregados vírgenes</b>		
<b>a1</b>	287.174	278.071
<b>a2</b>	280.562	
<b>a3</b>	266.478	
<b>100% Agregados reciclados</b>		
<b>b1</b>	125.633	109.446
<b>b2</b>	109.002	
<b>b3</b>	93.702	
<b>85 % Agregados vírgenes - 15 % Agregados reciclados</b>		
<b>c1</b>	254.051	248.823
<b>c2</b>	246.607	
<b>c3</b>	245.809	
<b>70% Agregados vírgenes - 30% Agregados reciclados</b>		
<b>d1</b>	217.532	223.974
<b>d2</b>	222.089	
<b>d3</b>	232.300	
<b>55% Agregados vírgenes- 45% agregados reciclados</b>		
<b>e1</b>	184.645	203.655
<b>e2</b>	202.146	
<b>e3</b>	224.174	

<b>40% Agregados vírgenes - 60% Agregados reciclados</b>		
<b>f1</b>	158.859	163.279
<b>f2</b>	180.207	
<b>f3</b>	150.772	
<b>25% Agregados vírgenes - 75% Agregados reciclados</b>		
<b>g1</b>	129.034	124.153
<b>g2</b>	126.760	
<b>g3</b>	116.665	
<b>10% Agregados vírgenes - 90% Agregados reciclados</b>		
<b>h1</b>	81.754	90.412
<b>h2</b>	96.766	
<b>h3</b>	92.715	

Fuente: Elaborado por el autor.

Si se considera que el objetivo fue obtener un  $f'c$  de  $100 \text{ kg/cm}^2$ , siete de las ocho mezclas dieron como resultado un  $f'c$  mayor al esperado, únicamente la mezcla elaborada con 90% agregados reciclados y 10% de agregados vírgenes trabajo 9.588% por debajo de lo perseguido debido a un error en la cantidad de agua utilizada en la elaboración de la mezcla (como se explica en el capítulo 3). Sin embargo, se puede concluir que se obtuvieron resultados favorables.

Con base en lo anterior, se propone el uso de agregados reciclados para la construcción de losas y castillos considerados en el proyecto ejecutivo de un relleno sanitario (utilizando la mezcla que se ajuste al  $f'c$  requerido en dicho proyecto) como pueden ser: casetas de vigilancia, oficinas, cobertizos para maquinaria, bodegas y almacenes para materiales, sanitarios, etc. Incluso la mezcla elaborada con 85% agregados vírgenes y 15% agregados reciclados podría utilizarse como concreto estructural. Para el caso de los canales de evacuación pluvial expuestos en este trabajo se podría hacer uso de la mezcla elaborada con 25% agregados vírgenes y 75% agregados reciclados, ya que cumple con un  $f'c$  mayor al esperado en todas sus muestras.

Para que pudiera establecerse en algún marco normativo el uso de estos agregados como se propone en el párrafo anterior, se recomienda llevar a cabo más pruebas con las proporciones y características de los materiales que se utilizaron para elaborar las mezclas en el presente trabajo.

#### **4.2. Conclusiones y recomendaciones acerca de las pruebas de permeabilidad.**

Retomando del capítulo 2, las pruebas de permeabilidad se realizaron para conocer la variación de la velocidad del agua en mezclas de tepetate y arena reciclada con la finalidad de utilizar dicha mezcla como material de cobertura y clausura en las celdas de un relleno sanitario. La permeabilidad en el material de cobertura es muy importante debido a que este tiene las siguientes funciones: controlar la fauna nociva, reducir la emisión de biogás, mitigar los malos olores y evitar incendios, así como también disminuir la entrada de agua (“Proyecto ejecutivo del relleno sanitario,” 1999).

Se realizaron tres pruebas de permeabilidad en diferentes mezclas de tepetate y arena reciclada. A continuación se muestra un resumen de los resultados:

Tabla 4.2 Resultados de las pruebas de permeabilidad.

<b>Mezcla</b>	<b>Permeabilidad (cm/s)</b>
100% tepetate	<b><math>3.87306 \times 10^{-6}</math></b>
75% tepetate – 25% arena reciclada	<b><math>6.06837 \times 10^{-6}</math></b>
50% tepetate – 50% arena reciclada	<b><math>1.71463 \times 10^{-5}</math></b>

Fuente: Elaborado por el autor.



A continuación se muestra los coeficientes de permeabilidad y su relación con el drenaje:

Tabla 4.3. Coeficiente de permeabilidad k [cm/s] (Escala logarítmica).

k (cm/s)	10 <sup>2</sup>	10 <sup>1</sup>	10	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-9</sup>
Drenaje	Bueno						Malo		Prácticamente impermeable			

Fuente: Adaptado de “Instructivo para ensaye de suelos.”

De acuerdo con la tabla 4.3, el tepetate es prácticamente impermeable, igualmente la mezcla de 75% de tepetate con 25% de arena reciclada, entre ambos resultados hay una diferencia de  $2.19531 \times 10^{-6}$ . Existe una marcada diferencia cuando se agrega más arena reciclada (aunque sigue existiendo un mal drenaje).

Entre la permeabilidad de la mezcla de 100% tepetate y la mezcla de 50% de tepetate y 50% de arena reciclada hay una diferencia de  $1.32732 \times 10^{-5}$ .

Por lo anterior, se puede concluir que la mezcla de 75% tepetate y 25% arena reciclada es ideal para utilizarse como material de cobertura, es prácticamente impermeable y se cumple con la finalidad del material de cobertura (control de fauna nociva, reducir la emisión de biogás, mitigar los malos olores, evitar incendios y disminuir la entrada de agua); incluso la mezcla 50%-50% puede funcionar en rellenos dónde la cantidad de RSU recibida no sea tan grande (de acuerdo con las categorías de los sitios de disposición final que establece la NOM-083-SEMARNAT-2003, un tipo C que recibe de 10 a menos de 50 ton/día o un tipo D menor a 10 ton/día), ya que no se generaría mucho biogás y el drenaje de agua que permite la mezcla es muy bajo ( $1.71463 \times 10^{-5}$  cm/s).

Una vez más, aunque se obtuvieron resultados aceptables (una mezcla fue prácticamente impermeable y la otra tiene una permeabilidad muy baja), se recomienda continuar con las pruebas para obtener resultados más detallados.

### **4.3. Conclusiones generales.**

El paradigma de los Residuos de la Construcción y Demolición ha cambiado, en lugar de considerarse un problema se está considerando como un área de oportunidades debido a las muchas aplicaciones que tienen.

En este trabajo únicamente se abordaron dos puntos de sus aplicaciones en rellenos sanitarios, pero existen más aplicaciones que se pueden estudiar tanto en sitios de disposición final como en construcciones de otros ámbitos (un ejemplo es su utilización en la construcción de banquetas, ciclistas, caminos, estacionamientos, etc.), por lo que se exhorta a seguir investigando para poder incrementar el aprovechamiento de los RC&D y reducir sus impactos ambientales adversos.

## **BIBLIOGRAFÍA.**

- ❖ Álvarez, L., Constantini, H. & Gómez, M. (2013). MANUAL DE PRÁCTICAS, LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES I. Naucalpan, México. UNAM, FES Acatlán.
  
- ❖ ASTM-C- 31-1998 Making and curing concrete test specimens in the field.
  
- ❖ Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. (Ed.). (2013) PLAN DE MANEJO DE RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN Y LA DEMOLICIÓN. México.
  
- ❖ CEMEX, Concretos. (Ed.). (2015) MANUAL DEL CONSTRUCTOR. México.
  
- ❖ CONAGUA, INE. (Ed.) (1990). MECÁNICA DE SUELOS: INSTRUCTIVO PARA ENSAYE DE SUELOS. México.
  
- ❖ Consorcio Ambiental y de Servicios S.A. de C.V. (Ed.). (1999). PROYECTO EJECUTIVO DEL RELLENO SANITARIO METROPOLITANO PONIENTE "PICACHOS". México.
  
- ❖ González, O. & Robles, F. (2005). ASPECTOS FUNDAMENTALES DEL CONCRETO REFORZADO. México. Limusa.
  
- ❖ Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. (Ed.). (2006). EL CONCRETO EN LA OBRA, PROBLEMAS Y SOLUCIONES: PRUEBAS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO (pp. 19-22). México.
  
- ❖ Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. (Ed.). (2011). EL

CONCRETO EN LA OBRA, PROBLEMAS Y SOLUCIONES: ELABORACIÓN Y CURADO DE ESPECÍMENES EN EL LABORATORIO (pp. 67-71). México.

- ❖ Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. (Ed.). (2011). EL CONCRETO EN LA OBRA, PROBLEMAS Y SOLUCIONES: ELABORACIÓN Y CURADO EN OBRA DE ESPECÍMENES DE CONCRETO (pp. 67-71). México.
- ❖ Juárez, E. & Rico, A. (2005) MECÁNICA DE SUELOS I: FUNDAMENTOS DE LA MECÁNICA DE SUELOS. México. Limusa.
- ❖ Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal (LRSDF).
- ❖ Ley Federal de Responsabilidad Ambiental (LFRA).
- ❖ Ley General del Equilibrio Ecológico y de la Protección al Ambiente (LGEEPA).
- ❖ Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR).
- ❖ Norma ambiental para el Distrito Federal (NADF-007-RNAT-2004), que establece la clasificación y especificaciones de manejo de residuos de la construcción en el Distrito Federal.
- ❖ Norma ambiental para el Estado de México (NTEA-011-SMA-RS-2008), que establece la clasificación y especificaciones de manejo de residuos de la construcción en el Estado de México.
- ❖ Norma Mexicana NMX - C - 160 - ONNCCE - 2004."Elaboración y curado en obra de especímenes de concreto".

- ❖ Norma Mexicana NMX-AA-164-SCFI-2013. "Edificación Sustentable - Criterios y requerimientos ambientales mínimos.
- ❖ Norma Mexicana NMX-C-159-0NNCCE-2004. Industria de la Construcción-Concreto-Elaboración y Curado de Especímenes en el Laboratorio.
- ❖ Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.
- ❖ Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011 Que establece los criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo; el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo.
- ❖ Padilla Correa, J.V. (2013) MANUAL DE PRÁCTICAS, COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS. Naucalpan, México. UNAM, FES Acatlán.
- ❖ Polanco Rodríguez, A. (2012). Manual de Prácticas de Laboratorio de Concreto. UACH. Chihuahua, México. Facultad de Ingeniería.
- ❖ Programa para la Prevención y Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial del Estado de México.
- ❖ Reglamento de Construcción del Distrito Federal.

- ❖ Reglamento LGPGIR.
- ❖ Rivera Mera, C.J. (2007). ANÁLISIS DE IMPACTO AMBIENTAL POR LA INADECUADA DISPOSICIÓN DE RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN EN EL VALLE DE MÉXICO Y PROPUESTAS DE SOLUCIÓN. México D.F. UNAM, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. Facultad de Ingeniería.
- ❖ Rivera Valdovinos, C.L. (2008). ANÁLISIS AMBIENTAL PARA EL MERCADO DE LOS RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO. México D.F. UNAM, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. Facultad de Ingeniería.

## **REFERENCIAS ELECTRÓNICAS.**

- ❖ Concretos Reciclados; Febrero 2015;  
<http://www.concretosreciclados.com.mx>
- ❖ Franch, J. (n.d.). PERMEABILIDAD DE LOS SUELOS: CONCEPTOS Y DETERMINACIÓN( "IN SITU" Y EN EL LABORATORIO).  
GEOSUPPORT: estudios geotécnicos en los ámbitos de la edificación y la ingeniería civil. Ingeniería geológica, Sabadell / Barcelona - Valencia - Cáceres. Obtenida el 15 de abril de 2015.  
<http://www.estudiosgeotecnicos.info/index.php/permeabilidad-de-los-suelos/>
- ❖ Organización Panamericana de la Salud. (2007). UNIDAD 3. EL RELLENO SANITARIO. Obtenidaa el 23 de febrero de 2015.  
[http://www.bvsde.paho.org/cursoa\\_rsm/e/unidad3.html](http://www.bvsde.paho.org/cursoa_rsm/e/unidad3.html)