



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

**USO DE MATERIAL RECICLADO DE TEREFTALATO DE POLIETILENO, PET, COMO  
AGREGADO FINO PARA MEZCLAS DE CONCRETO, PARA LA ELABORACIÓN DE  
ADOQUINES**

**Francisco Javier Estrada Quintanilla**

Asesorado por el Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos

Guatemala, febrero de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**USO DE MATERIAL RECICLADO DE TEREFTALATO DE POLIETILENO, PET, COMO  
AGREGADO FINO PARA MEZCLAS DE CONCRETO, PARA LA ELABORACIÓN DE  
ADOQUINES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**Francisco Javier Estrada Quintanilla**

Asesorado por el Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, FEBRERO DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Rafael Enrique Morales Ochoa
EXAMINADOR	Ing. Alejandro Castañón López
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**USO DE MATERIAL RECICLADO DE TEREFTALATO DE POLIETILENO, PET, COMO  
AGREGADO FINO PARA MEZCLAS DE CONCRETO, PARA LA ELABORACIÓN DE  
ADOQUINES**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha marzo de 2015.

**Francisco Javier Estrada Quintanilla**

Guatemala, 11 de octubre de 2016

**Ingeniero**  
**José Gabriel Ordoñez Morales**  
**Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles**  
**Escuela de Ingeniería Civil**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Universidad de San Carlos de Guatemala**

**Ingeniero Ordoñez:**

Por este medio hago de su conocimiento que he revisado el trabajo de graduación titulado **"USO DE MATERIAL RECICLADO DE TEREFTALATO DE POLIETILENO, PET, COMO AGREGADO FINO PARA MEZCLAS DE CONCRETO, PARA LA ELABORACIÓN DE ADOQUINES"**, desarrollado por el estudiante universitario Francisco Javier Estrada Quintanilla, con la asesoría del suscrito.

El trabajo en cuestión satisface los requisitos que exige la facultad, por lo cual recomiendo que se continúe con los trámites para la aprobación de la misma.

Sin otro particular, me suscribo ante usted:

Atentamente

  
**Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos**  
Colegiado 10,266

**Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos**

**Ingeniero Civil, Col. No. 10266**

**Asesor**



**USAC**  
**TRICENTENARIA**  
 Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>



Universidad de San Carlos de Guatemala  
 Guatemala, FACULTAD DE INGENIERÍA  
 08 de noviembre de 2015  
 Escuela de Ingeniería Civil

Ingeniero  
 Hugo Leonel Montenegro Franco  
 Director Escuela Ingeniería Civil  
 Facultad de Ingeniería  
 Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **USO DE MATERIAL RECICLADO DE TEREFTALATO DE POLIETILENO, PET, COMO AGREGADO FINO PARA MEZCLAS DE CONCRETO, PARA LA ELABORACIÓN DE ADOQUINES** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Francisco Javier Estrada Quintanilla quien contó con la asesoría del Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

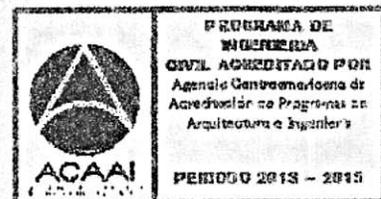
Ing. Civil José Gabriel Ordóñez Morales  
 Coordinador del Área de Materiales y  
 Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA  
 AREA DE MATERIALES Y  
 CONSTRUCCIONES CIVILES  
**USAC**

/mrrm.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





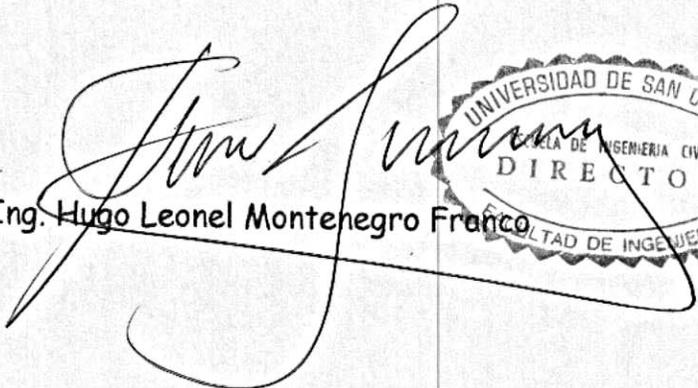
**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Escuela de Ingeniería Civil



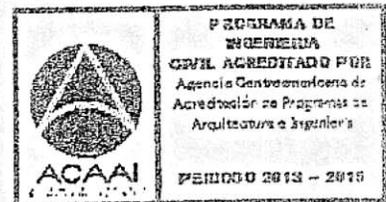
El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos y del Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles Ing. José Gabriel Ordóñez Morales, al trabajo de graduación del estudiante Francisco Javier Estrada Quintanilla, titulado **USO DE MATERIAL RECICLADO DE TEREFTALATO DE POLIETILENO, PET, COMO AGREGADO FINO PARA MEZCLAS DE CONCRETO, PARA LA ELABORACIÓN DE ADOQUINES**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

  
Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, noviembre 2016  
/mrrm.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua



Universidad de San Carlos  
de Guatemala

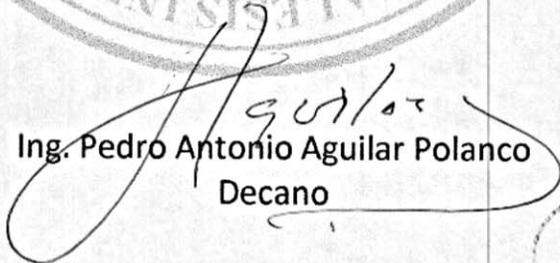


Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG. 070.2017

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **USO DE MATERIAL RECICLADO DE TEREFTALATO DE POLIETILENO, PET, COMO AGREGADO FINO PARA MEZCLAS DE CONCRETO, PARA LA ELABORACIÓN DE ADOQUINES**, presentado por el estudiante universitario: **Francisco Javier Estrada Quintanilla**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, febrero de 2017

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

**Dios**

Por estar siempre a mi lado.

**Mis padres**

Francisco Estrada y Gladys Quintanilla de Estrada, por su amor y apoyo incondicional.

**Mi hermana**

Gladys María, por ser la voz, el apoyo y la compañía más importante de mi vida. Mujer del pueblo, nacida en octubre para la faz del mundo.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Pueblo de Guatemala</b>	Por permitirme culminar la carrera universitaria con sus contribuciones al Estado.
<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por sacarme de la ignorancia social en la que me encontraba.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por ser mi casa de estudios, por llevarme a ser un profesional para Guatemala y darme tantas alegrías.
<b>Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos</b>	Por el apoyo como asesor de este trabajo de graduación y por la calidad humana demostrada en las ayudas brindadas.
<b>Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII)</b>	<p>Por la ayuda brindada en sus varias secciones:</p> <p>Al personal de la sección de Tecnología de la Madera, Ing. Fredy Contreras, Ing. Mauricio Rivera y Jesiel Enríquez, por su apertura, por su ayuda y por las facilidades brindadas.</p> <p>Al personal de la sección de Tecnología de Materiales, en especial, a Don Fabio Sánchez,</p>

por siempre brindar brindar su apoyo y conocimiento a quienes los necesitamos.

Al personal de la Sección de Metales y Materiales Manufacturados, por la accesibilidad y facilidades brindadas al elaborar los ensayos de esta investigación.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN .....	XVII
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Definición de agregados según norma ASTM C 125-88 .....	1
1.1.1. Agregado fino .....	2
1.1.2. Agregado grueso .....	2
1.2. Análisis de las características físicas de los agregados finos....	2
1.2.1. Descripción de la norma ASTM C 33 ( <i>Standard Specification for Concrete Aggregates</i> ) .....	3
1.2.1.1. Graduación .....	3
1.2.2. Características del agregado fino .....	5
1.3. Concreto.....	6
1.3.1. Definición .....	6
1.3.2. Composición .....	6
1.3.2.1. Cemento .....	7
1.3.2.2. Agua .....	8
1.3.2.3. Agregados .....	9
1.3.2.4. Aire .....	9
1.4. Pavimentos.....	10

1.4.1.	Especificaciones de adoquines de concreto para pavimentos según norma Coguanor NTG 41086 ....	11
1.4.1.1.	Adoquín de concreto .....	11
1.4.1.2.	Superficie de desgaste .....	13
1.4.1.3.	Bisel .....	13
1.4.1.4.	Espesor real .....	14
1.4.1.5.	Largo real .....	14
1.4.1.6.	Ancho real .....	14
1.4.1.7.	Área.....	14
1.4.1.8.	Lote .....	14
1.4.1.9.	Muestra .....	15
1.4.2.	Especificaciones y características.....	15
1.4.2.1.	Características geométricas .....	15
1.4.2.2.	Tolerancias.....	16
1.4.3.	Clasificación, designación y uso.....	16
1.4.3.1.	Clasificación por resistencia a flexión... ..	16
1.4.3.2.	Clasificación por módulo de ruptura del adoquín.....	16
1.4.3.3.	Clasificación por absorción.....	17
1.4.3.4.	Clasificación por resistencia a la abrasión.....	18
1.5.	Residuos plásticos de PET .....	20
1.5.1.	Antecedentes .....	20
1.5.2.	Generación de residuos plásticos en el distrito metropolitano de ciudad de Guatemala.....	21
1.5.3.	Recuperación y aprovechamiento de los plásticos .....	22
1.5.4.	Disponibilidad del material PET.....	23

1.5.5.	Tecnologías disponibles para el manejo adecuado del residuo plástico .....	24
1.5.5.1.	Reciclaje mecánico.....	24
1.5.5.2.	Reciclaje químico.....	24
1.5.5.3.	Recuperación energética.....	25
2.	TRABAJO DE CAMPO.....	27
2.1.	Materia prima de recicladora de plásticos .....	27
2.2.	Características del PET.....	29
3.	TRABAJO DE LABORATORIO.....	31
3.1.	Definición de proporciones de la mezcla de concreto en volumen.....	31
3.2.	Ensayos a la mezcla seca.....	37
3.2.1.	Método de prueba normalizada para determinar el revenimiento en el concreto elaborado con cemento hidráulico, ASTM C 143.....	37
3.2.2.	Método de prueba normalizado para determinar el peso unitario de mezclas de concreto, ASTM C 138.....	39
4.	RESULTADOS OBTENIDOS.....	41
4.1.	Ensayos a mezclas.....	41
4.2.	Ensayos a adoquines .....	42
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	47
	CONCLUSIONES .....	55
	RECOMENDACIONES.....	57

BIBLIOGRAFÍA.....59  
ANEXOS.....61  
APÉNDICE .....73

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Partes fundamentales de la máquina del equipode abrasión de Böhme .....	19
2.	Material reciclado de PET, triturado en hojuela.....	28
3.	Muestra de mezcla seca para adoquines patrón sin agregado de material reciclado de PET .....	32
4.	Máquina vibro compactadora para fabricación de adoquines del Centro de investigaciones de ingeniería.....	34
5.	Muestra de adoquines con mezcla patrón.....	34
6.	Muestra de ensayo de revenimiento .....	38
7.	Muestra del procedimiento de ensayo de peso unitario del concreto .....	40
8.	Gráfica de resultados de ensayo de resistencia a flexión en adoquines.....	48
9.	Gráfica de resultados de ensayo de porcentaje de absorción de agua para adoquines.....	49
10.	Gráfica de resultados de ensayo de resistencia a la abrasión por el método de Böhme para adoquines .....	50

### TABLAS

I.	Límites de la granulometría para agregado fino según especificaciones de la norma ASTM C 33.....	4
II.	Rangos de clasificación de la arena según el módulo de finura. Norma ASTM C 33.....	5

III.	Características geométricas de los adoquines de concreto según norma Coguanor NTG 41086 .....	15
IV.	Clases de adoquines según norma Coguanor NTG 41087 h1 .....	17
V.	Absorción en porcentaje de masa de los adoquines según norma Coguanor NTG 41086.....	17
VI.	Resistencia a la abrasión.....	19
VII.	Generación de residuos plásticos domiciliarios en Guatemala.....	21
VIII.	Propiedades del tereftalato de polietileno .....	29
IX.	Proporcionamiento de mezcla patrón para adoquines fabricados en instalaciones del Centro de investigaciones de ingeniería. Identificación de la mezcla: A .....	33
X.	Proporcionamiento de mezcla con 10 % de agregado de material triturado de PET reciclado para adoquines fabricados en instalaciones del Centro de investigaciones de ingeniería. Identificación de la mezcla: B .....	35
XI.	Proporcionamiento de mezcla con 20 % de agregado de material triturado de PET reciclado para adoquines fabricados en instalaciones del Centro de Investigaciones de Ingeniería. Identificación de la mezcla: C .....	36
XII.	Proporcionamiento de mezcla con 25 % de agregado de material triturado de PET reciclado para adoquines fabricados en instalaciones del Centro de investigaciones de ingeniería. Identificación de la mezcla: D .....	36
XIII.	Resultados ensayo de revenimiento .....	41
XIV.	Resultados de ensayo de peso unitario .....	42
XV.	Resultados de los ensayos de resistencia a flexión realizados a los adoquines .....	42
XVI.	Resultados de los ensayos de absorción realizados a los adoquines ..	44

XVII.	Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión en cubos extraídos de los adoquines.....	45
XVIII.	Resultados de los ensayos de resistencia a la abrasión en cubos extraídos de los adoquines .....	45
XIX.	Porcentajes de alivianamiento de adoquines según tipo de mezcla con agregado de PET reciclado .....	52
XX.	Comparativa de costo de materiales para 1 adoquín .....	52



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>cm</b>	Centímetro
<b>Kg</b>	Kilogramo
<b>±</b>	Más menos
<b>Mpa</b>	Mega Pascales
<b>≤</b>	Menor o igual que
<b>m</b>	Metro
<b>μ</b>	Micro o millonésimo ( $10^{-6}$ )
<b>mm</b>	Milímetro
<b>%</b>	Por ciento



## GLOSARIO

<b>ASTM</b>	<i>American society for testing materials</i> (Sociedad americana para el ensayo de materiales).
<b>Coguanor</b>	Comisión guatemalteca de normas
<b>NTG</b>	Norma técnica guatemalteca
<b>Agregado</b>	Son materiales sujetos a tratamientos de disgregación, tamizado, trituración o lavado, o materiales producidos por expansión, calcinación o fusión excipiente, que se mezclan con cemento portland y agua para formar concreto hidráulico.
<b>Concreto</b>	Mezcla dosificada, compuesta de agregados (fino y grueso), cemento, agua, aire y aditivos.
<b>Delaminación</b>	Proceso por el cual diferentes capas de material se separan.
<b>Fraguado</b>	Reacción química exotérmica que determina el paulatino endurecimiento de la mezcla de concreto.
<b>Máquina de los Ángeles</b>	Máquina que consta de un tambor giratorio desarrollada para determinar la resistencia de los agregados a la abrasión.

**PET**

Tereftalato de polietileno, politereftalato de etileno, polietilentereftalato o polietileno tereftalato. El PET es un polímero que se obtiene mediante una reacción de poli condensación entre el ácido tereftálico y el etilenglicol. Pertenece al grupo de materiales sintéticos denominados poliésteres.

**Pellet**

Es una pequeña porción de material aglomerado o comprimido, término usado para diferentes materiales.

## RESUMEN

La acumulación de los materiales plásticos en los vertederos trae consecuencias negativas concretas dado que son productos no degradables. Por cuestiones de índole económica se han adoptado alternativas que permitan la reutilización de esos materiales cuando ha finalizado su periodo de vida útil.

Entre la diversidad de características de los plásticos (PET incluido) está su alta resistencia mecánica y química, baja corrosión, bajo costo y versatilidad. Por esta razón, se pueden utilizar en diversos campos, que van desde el envase y embalaje hasta la ingeniería, construcción, medicina o agricultura.

Este trabajo de graduación aborda el uso de material triturado de PET reciclado en mezclas de concreto para fabricar adoquines, con lo cual se pretende minimizar el impacto ocasionado por estos desechos en el medio ambiente.

El material triturado de PET reciclado se adquirió en una reconocida recicladora de plásticos para utilizar un material homogéneo. Luego, se añadió a una mezcla de concreto diseñada con base en la resistencia esperada. Los adoquines fueron fabricados en una máquina mecánica que fue puesta en funcionamiento para esta investigación. Posteriormente, se realizaron ensayos para medir las características de los adoquines.

Los ensayos experimentales se llevaron a cabo con base en especificaciones de la Comisión Guatemalteca de Normas (Coguanor), aplicables a adoquines de concreto. Los ensayos se realizaron en el Centro de

Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala (CII USAC).

Se pensó que el material de PET podía ser un buen agregado para la mezcla de concreto para fabricar adoquines y llevar este tipo de mezcla a producción. Sin embargo, el análisis de los resultados demostró que la mezcla de concreto con este material no posee, según normas, las características para aumentar o siquiera mantener los requerimientos para los adoquines de concreto sin este agregado.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Utilizar material reciclado de tereftalato de polietileno, PET, como agregado en la fabricación de adoquines de concreto.

### **Específicos**

1. Recomendar una mezcla de concreto con el porcentaje en volumen de agregado de PET que permita mantener las propiedades físico-mecánicas de los adoquines bajo la norma Coguanor NTG 41086.
2. Reducir la contaminación ambiental producida por las botellas de PET por medio de su uso en este tipo de materiales de construcción.
3. Hacer un análisis de costos de las proporciones utilizadas en los adoquines para determinar la viabilidad de producción.



## INTRODUCCIÓN

La masiva producción de envases de plástico para envasado y embotellado y las dificultades para reciclarlas una vez se completó su ciclo de vida, constituye uno de los mayores problemas ambientales en todo el mundo. La búsqueda de nuevos usos para este material inducen investigaciones como la presente.

Este informe incluye el análisis del material triturado de PET reciclado como agregado en mezclas de concreto para la fabricación de adoquines. El documento incluye una breve explicación de los procesos de reciclaje de PET y de la situación del PET en Guatemala.

La investigación describe, los diseños de mezcla utilizados, los procedimientos empleados en todo el proceso de fabricación de los adoquines y la realización de los ensayos respectivos según las normas Coguanor. Abarca los resultados obtenidos y el análisis de resultados del comportamiento de los adoquines con el agregado de material reciclado de PET.



# 1. MARCO TEÓRICO

A continuación, se presenta el marco teórico donde se tratan los temas de los agregados del concreto, el concreto, los pavimentos, las especificaciones y características de los adoquines de concreto e información del tereftalato de polietileno.

## 1.1. Definición de agregados según norma ASTM C 125-88

El agregado es un material granular, como arena, grava, piedra triturada o escorias metálicas que unido a un medio cementante forma cemento hidráulico, concreto o mortero.

De acuerdo con el origen de los agregados, se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Agregados naturales: provienen de la explotación de fuentes naturales, como depósitos de arrastres fluviales (arenas de río) o de glaciares (canto rodado) y de canteras de diversas rocas y rocas naturales. Se pueden aprovechar en su granulación natural o triturándolos mecánicamente, según sea el caso, de acuerdo con las especificaciones requeridas.
- Agregados artificiales: se obtienen a partir de productos y procesos industriales, como arcillas expandidas, escorias de alto horno, clinker, limaduras de hierro y otros. Por lo general son más ligeros o pesados que los ordinarios.

### **1.1.1. Agregado fino**

Es el material que pasa a partir del tamiz # 4 hasta el tamiz # 100, y puede ser clasificada como arena natural, de canto rodado, manufacturada o una combinación.

### **1.1.2. Agregado grueso**

Conocido en el medio como piedrín, es la roca, material granular o agregado mineral. Es el material cuyas partículas quedan retenidas en el tamiz # 4. Estos materiales no deben ser demasiado porosos ni de formas muy alargadas. Las formas planas o angulosas en el material dificultan y complican el amasado y la colocación del concreto, ya que impide la adherencia adecuada y la uniformidad consistente. En cambio, si el agregado es triturado, sí cumple con los requisitos para lograr una mejor mezcla con partículas bien acomodadas y se consigue una adherencia óptima del concreto.

## **1.2. Análisis de las características físicas de los agregados finos**

Para realizar el análisis del agregado fino, se necesita conocer la densidad o peso específico para determinar al momento del diseño si se desea un concreto de baja o alta densidad. Cuando un material es débil, poroso y de alta absorción, el material posee una baja densidad y es necesario hacer correcciones en las dosificaciones del material.

Otro aspecto importante, es determinar la porosidad del agregado, que no es más que el espacio no ocupado por materia sólida en la partícula del elemento. Esta es una de las más importantes características físicas del

agregado por la influencia en sus otras propiedades. Puede influir en la estabilidad química, resistencia a la abrasión, resistencias mecánicas, propiedades elásticas, gravedad específica, absorción y permeabilidad.

El peso unitario representa el peso que ocupa el agregado fino por unidad de volumen conocido.

La medida de volumen expresado en porcentaje de los espacios entre las partículas del agregado se llama porcentaje de vacíos.

Y, por último, se requiere el conocimiento de la cantidad de agua superficial o humedad retenida por la partícula, ya que influye en la mayor o menor cantidad de agua necesaria para la mezcla de un concreto.

### **1.2.1. Descripción de la norma ASTM C 33 (*Standard Specification for Concrete Aggregates*)**

Esta especificación define los requisitos para la clasificación y la calidad de agregado fino y grueso (que no sea ligero o un agregado muy pesado) para su uso en el concreto, por lo que se considera adecuada para determinar si el material es satisfactorio y apto en la utilización como agregado de un concreto para obra civil.

#### **1.2.1.1. Graduación**

Según la norma ASTM C 33, el agregado fino se clasificará dentro de los límites siguientes:

Tabla I. **Límites de la granulometría para agregado fino según especificaciones de la norma ASTM C 33**

<b>Tamiz (Especificación ASTM E 11)</b>	<b>Porcentaje que pasa (Arena natural)</b>
9,5 mm (3/8")	100
4,75 mm (No. 4)	95-100
2,36 mm (No. 8)	80-100
1,18 mm (No. 16)	50-85
600 µm (No. 30)	25-60
300 µm (No. 50)	10-30
150 µm (No. 100)	0-10

Fuente: Norma ASTM C 33.

El agregado fino no podrá tener más del 45 % de material que pasa por cualquier tamiz y retenido en el tamiz consecutivo siguiente de las indicadas en la tabla 1, y su módulo de finura no será inferior a 2,3 ni superior a 3,1. Si existe una variación de más de 0,20 del valor asumido al seleccionar las proporciones del concreto deberá rechazarse a menos que se realicen ajustes adecuados para compensar la diferencia de graduación.

Tabla II. **Rangos de clasificación de la arena según el módulo de finura. Norma ASTM C 33**

<b>Clasificación de la arena</b>	<b>Módulo de finura</b>
Gruesa	2,9-3,2
Media	2,2-2,9
Fina	1,5-2,2
Muy fina	1,5

Fuente: Norma ASTM C 33.

### **1.2.2. Características del agregado fino**

Las características corresponden a las propiedades físicas del agregado fino que influirán en:

Tipo de obra a construir: esto se refiere a los siguientes aspectos:

- Resistencia
- Durabilidad
- Economía

Tipo de concreto a fabricar: dependiendo del elemento estructural y se necesita controlar:

- Dureza
- Resistencia
- Graduación
- Durabilidad

- Limpieza
- Tenacidad

### **1.3. Concreto**

A continuación, se explican la definición y composición del concreto.

#### **1.3.1. Definición**

El concreto es una roca artificial que se obtiene mediante una mezcla cuidadosamente proporcionada de arena, grava, piedra triturada u otros agregados unidos en una masa rocosa por medio de una pasta de cemento denominada aglutinante y agua.

En ocasiones, uno o más aditivos se agregan para cambiar ciertas características del concreto, tales como la ductilidad, la durabilidad y el tiempo de fraguado.

Igual que la mayoría de materiales pétreos, el concreto tiene una alta resistencia a la compresión y una muy baja resistencia a la tensión.

#### **1.3.2. Composición**

Seguidamente se explicará la composición del concreto.

### 1.3.2.1. Cemento

El cemento posee propiedades adhesivas y cohesivas. Dichas características lo capacitan para aglutinar los agregados para formar el concreto.

Los concretos hechos con cemento portland normal alcanzan sus resistencias de diseño después de 28 días y después continúan ganando resistencia a un menor ritmo.

Existen otros tipos especiales de cemento portland, esto es, porque el proceso químico que ocurre durante el fraguado del concreto genera calor ocasionando que el concreto se expanda durante su hidratación y, al enfriarse, se contraiga con lo cual, con frecuencia se agrieta severamente.

El concreto puede usarse en lugares donde queda expuesto a varios cloruros o sulfatos. Tales situaciones se presentan en las construcciones marinas.

La *American society for testing materials* (ASTM) clasifica los cementos Portland en cinco diferentes tipos:

- Tipo I. Es el cemento normal usado en la mayoría de las construcciones siendo éste de uso general.
- Tipo II. Cemento modificado que tiene menor calor de hidratación que el tipo I y que puede resistir alguna exposición al ataque de sulfatos.

- Tipo III. Un cemento de fraguado rápido que produce en las primeras horas un concreto con una resistencia aproximadamente doble a las del cemento tipo I. este cemento produce calor de hidratación muy alto.
- Tipo IV. Es un cemento de bajo calor que produce un concreto que disipa muy lentamente el calor. Se usa en estructuras de concreto de gran tamaño.
- Tipo V. usado para concretos que se expondrán a altas concentraciones de sulfatos.

Si el cemento requerido no se encuentra entre los cinco tipos mencionados, existen alternativas con respecto a los aditivos que modifican las propiedades del cemento tipo I a las condiciones deseadas.

### **1.3.2.2. Agua**

Los cementos, por ser hidráulicos, tienen la capacidad de fraguar y endurecer con el agua. El agua es el elemento que hidrata las partículas de cemento y lo vuelve un elemento aglutinante.

El agua empleada en el mezclado del concreto debe estar limpia y libre de cantidades perjudiciales de aceites, ácidos, álcalis, sales, materia orgánica u otras sustancias nocivas para el concreto.

Casi cualquier agua natural potable sin sabor, incolora e inodora, se puede utilizar como agua de mezclado en la elaboración de concreto. Cuando las impurezas en el agua son excesivas, pueden afectar no solo el tiempo de fraguado, la resistencia de concreto y la estabilidad volumétrica, sino pueden provocar eflorescencia o corrosión en el refuerzo cuando se trabaje con un

concreto armado. Siempre que sea posible, debe evitarse el agua con alta concentraciones de sólidos disueltos.

Las sales u otras sustancias nocivas que provengan del agregado o de los aditivos, deben sumarse a la cantidad que puede contener el agua de mezclado. Estas cantidades adicionales deben tomarse en cuenta al hacer la evaluación relacionada con la aceptabilidad del total de impurezas que pueda resultar nocivo para el concreto.

### **1.3.2.3. Agregados**

Los agregados en el concreto ocupan aproximadamente  $\frac{3}{4}$  partes de su volumen. Como el costo es menor que el del cemento, es deseable usar la mayor cantidad de ellos que sea posible. Se emplean agregados finos, como, arena y agregados gruesos, como grava (usualmente triturada).

Los agregados son todos los materiales que tienen una propia resistencia, no perturban ni afectan el proceso de endurecimiento del cemento hidráulico.

Dichos materiales deben ser fuertes, durables y limpios. Si se encuentra en ellos polvo u otras partículas, pueden interferir en la adherencia entre la pasta de cemento y los agregados. La resistencia de los agregados tiene un efecto importante en la resistencia del concreto, y las propiedades de los agregados afectan considerablemente la durabilidad del mismo

### **1.3.2.4. Aire**

El aire es un elemento del concreto que debe de tomarse en cuenta, ya que cuando el concreto se encuentra en el proceso de mezclado queda aire

atrapado en la masa. Este aire es liberado de la pasta por medio de la compactación a que es sometida después de su colocación.

#### **1.4. Pavimentos**

Se llama pavimento al conjunto de capas de material seleccionado que reciben en forma directa las cargas del tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada, proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe funcionar eficientemente. Las condiciones necesarias para un adecuado funcionamiento son anchura, trazo horizontal y vertical, resistencia adecuada a las cargas para evitar las fallas y los agrietamientos, además de una adherencia adecuada entre el vehículo y el pavimento aún en condiciones húmedas. Deberá presentar una resistencia adecuada a los esfuerzos destructivos del tránsito, de la intemperie y del agua. Debe tener una adecuada visibilidad y contar con un paisaje agradable para no provocar fatigas.

Un pavimento se puede definir también como un sistema de revestimiento que conforma el suelo transitable de cualquier espacio construido. Los pavimentos se apoyan sobre elementos estructurales sensiblemente horizontales, como los terrenos estabilizados, soleras, losas y forjados. Las principales funciones que desempeñan son el aislamiento y la ornamentación, pero al mismo tiempo, deben resistir las abrasiones y los punzonamientos (esfuerzos cortantes) producidos por el paso de personas o vehículos, la caída de objetos y la compresión de los elementos que se apoyan. Además, muchos pavimentos tienen que ser inmunes a la acción de agentes químicos, como agua, aceites, sales o ácidos, a las agresiones de seres vivos e incluso a la propia luz solar.

Los pavimentos continuos, extendidos en grandes superficies, suelen fabricarse con piedras artificiales como morteros hidráulicos, hormigones o gravas asfaltadas. Entre los más comunes se encuentran los recubrimientos asfálticos de carreteras y autopistas o los pavimentos industriales de concreto. Los revestimientos de suelos discontinuos o modulares, por el contrario, abarcan toda la gama conocida de materiales, desde la piedra natural y artificial hasta los diversos plásticos, pasando por maderas, telas, metales y otros. Los entarimados, los adoquinados, los suelos de baldosas, etc.

#### **1.4.1. Especificaciones de adoquines de concreto para pavimentos según norma Coguanor NTG 41086**

La norma Coguanor NTG 41086 tiene por objeto establecer las características y especificaciones que deben cumplir los adoquines de concreto de cemento hidráulico empleados para tráfico vehicular y peatonal.

##### **1.4.1.1. Adoquín de concreto**

El adoquín de concreto es el elemento compacto de concreto, prefabricado, con la forma de prisma recto, cuyas bases pueden ser polígonos, que permiten conformar superficies completas, como componente de un pavimento articulado, estos pueden ser bicapa o mono capa.

- Materiales
  - Cemento hidráulico. El cemento utilizado en la fabricación de los adoquines de concreto debe cumplir con las especificaciones establecidas en la norma NTG 41095.

- Agregados. Los agregados finos y gruesos utilizados en la fabricación de los adoquines deben cumplir con lo establecido en la norma NTG 41007 y el porcentaje de desgaste en los agregados gruesos. No debe ser mayor de 40 % en el ensayo de abrasión de la Máquina de los Ángeles, cuando se realice de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM C131 (cuando aplique de acuerdo al tamaño máximo del agregado utilizado).
  - El tamaño máximo del agregado grueso no debe exceder 1/5 del espesor nominal del adoquín.
  - Agua. El agua empleada en la elaboración de adoquines debe cumplir con lo establecido en la norma NTG 41073 (ASTM C 1602).
  - Aditivos. Los aditivos que se utilicen en la elaboración de adoquines deben cumplir con lo establecido en la norma NTG 41047 (ASTM C 494).
  - Pigmentos. Los pigmentos colorantes que se utilicen en la elaboración de adoquines deben cumplir con lo establecido en la norma ASTM C 979.
- Acabado
    - Condiciones generales. Todos los adoquines deben estar sanos y libres de fisuras y otros defectos que interfieran con el proceso de colocación, o que perjudiquen significativamente el comportamiento y estabilidad del pavimento.
    - Textura. En el caso de adoquines fabricados con una textura superficial especial, ésta debe ser descrita por el fabricante y examinarse de acuerdo con la verificación.

- Color. Según el criterio del fabricante, puede colorearse la capa superficial o toda la unidad y debe verificarse que no haya diferencias significativas en el color respecto a cualquier muestra facilitada por el fabricante y aprobada por el comprador.
- Delaminación. En caso de adoquines bicapa, cuando se examinen de acuerdo con la verificación, no debe existir separación entre las dos capas.
- Verificación. Se deben colocar las muestras al nivel del suelo, formando una superficie aproximadamente cuadrada, disponiendo adecuadamente los adoquines en planta, después de examinar cada uno de los adoquines por separado para apreciar si existen delaminaciones. En condiciones normales y a la luz del día, un observador debe situarse de pie a una distancia de 2 m, de cada lado del cuadrado y registrar cualquier adoquín que muestre grietas o exfoliaciones, y se compara la textura y el color con las muestras facilitadas por el fabricante.

#### **1.4.1.2. Superficie de desgaste**

Es la cara superior del adoquín la cual soporta directamente el tránsito vehicular y peatonal.

#### **1.4.1.3. Bisel**

Borde inclinado de la cara expuesta de un adoquín.

#### **1.4.1.4. Espesor real**

Es igual al espesor medido del espécimen perpendicular a la cara de desgaste e igual a la distancia entre la cara de desgaste y la cara de apoyo.

#### **1.4.1.5. Largo real**

Es igual a la dimensión de la prolongación del eje mayor del rectángulo inscrito hasta donde intercepta las caras del espécimen.

#### **1.4.1.6. Ancho real**

Es igual a la dimensión de la prolongación del eje menor del rectángulo inscrito hasta donde intercepta las caras del espécimen.

#### **1.4.1.7. Área**

Es la medida que resulta de la multiplicación del largo por el ancho del adoquín.

#### **1.4.1.8. Lote**

Es el conjunto de adoquines que se fabrican bajo condiciones de producción uniformes y se somete a inspección como un conjunto unitario.

#### 1.4.1.9. Muestra

Es el conjunto de adoquines tomado de un lote que sirve para obtener la información necesaria que permita apreciar una o más características de este lote.

#### 1.4.2. Especificaciones y características

A continuación se presentan las especificaciones y características de los adoquines de concreto para pavimentos según norma Coguanor NTG 41086:

##### 1.4.2.1. Características geométricas

Largo y ancho real: el largo y ancho real de los adoquines de concreto para pavimentos, no debe ser mayor de 250 mm, ni menor de 50 mm.

Tabla III. **Características geométricas de los adoquines de concreto según norma Coguanor NTG 41086**

<b>Características Geométricas</b>	
Espesor	$\geq 60$ mm
Relación (largo real/ancho nominal)	$\leq 2,5$
Relación ( largo real / espesor)	$\leq 4$

Fuente: Norma Coguanor NTG 41086.

#### **1.4.2.2. Tolerancias**

Las medidas del espesor real promedio tomadas para cada espécimen de la muestra no debe diferir en más de  $\pm 3$  mm del espesor especificado.

Las medidas del largo real promedio como del ancho real promedio para cada espécimen de la muestra no debe diferir del largo especificado y el ancho especificado respectivamente, en más de  $\pm 2$  mm.

#### **1.4.3. Clasificación, designación y uso**

A continuación, se presenta la clasificación, designación y uso del adoquín de concreto según norma Coguanor NTG 41086.

##### **1.4.3.1. Clasificación por resistencia a flexión**

La clasificación se realiza por la resistencia a flexión, como sigue.

- Clase A. Uso industrial y tránsito pesado. Para uso en zonas sometidas a grandes cargas de tránsito pesado como puertos, aeropuertos, patios de maniobras en zonas industriales, terminales de autobuses, calles o avenidas principales.
- Clase B. Uso en tránsito liviano. Para uso en arterias o calles secundarias con tránsito vehicular liviano
- Clase C. Uso peatonal. Para uso exclusivo de zonas peatonales, espacios públicos.

##### **1.4.3.2. Clasificación por módulo de ruptura del adoquín**

Los adoquines de concreto deben tener un módulo de ruptura promedio (3 especímenes saturados por 24 horas), como se indica en la Tabla IV.

El ensayo se debe realizar según la norma NTG 41087 h1.

Tabla IV. **Clases de adoquines según norma Coguanor NTG 41087 h1**

Clase	Espesores mínimos del adoquín (mm)	Resistencia mínima a flexión del adoquín MPa (kg/cm <sup>2</sup> )	
		Promedio de 3 adoquines	Mínimo de un adoquín individual
A	80	5,4 (55)	4,6 (46,8)
B	80	4,1 (42)	3,5 (35,7)
C	60	4,1 (42)	3,5 (35,7)

Fuente: Norma Coguanor NTG 41087 h1.

#### 1.4.3.3. Clasificación por absorción

La prueba se realizará según la norma (ASTM C140). En el momento de despacho al comprador los adoquines deben cumplir con la absorción como se indica en la tabla V.

Tabla V. **Absorción en porcentaje de masa de los adoquines según norma Coguanor NTG 41086**

Clase	Absorción en porcentaje de masa	
	Promedio de 3 adoquines	Valor máximo individual
A	≤ 7	7,7
B	≤ 9	9,9
C	≤ 9	9,9

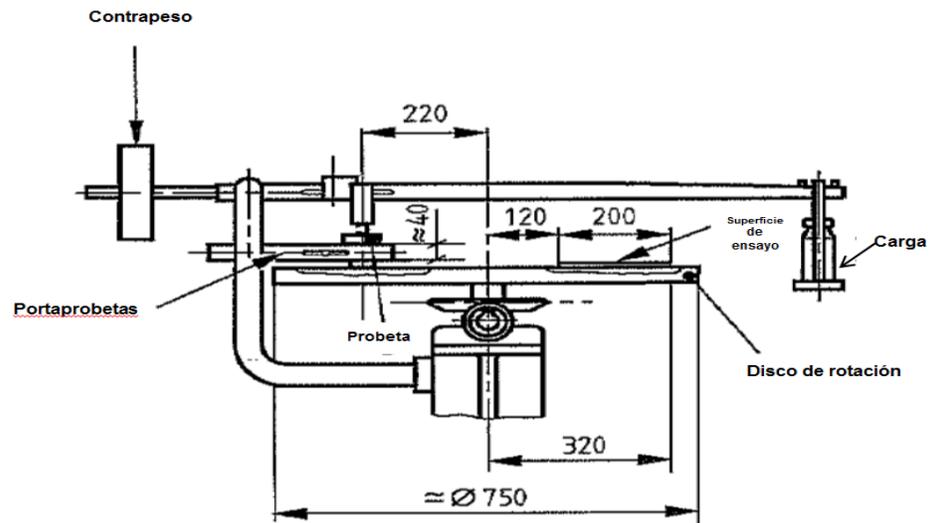
Fuente: Norma Coguanor NTG 41086.

#### **1.4.3.4. Clasificación por resistencia a la abrasión**

Para el ensayo de resistencia a la abrasión se siguen las indicaciones de la norma NTG 41087 h2, donde se explica el ensayo de Böhme:

- Ensayo de Böhme: Se cortan las probetas que son planchas cuadradas o cubos cuya longitud en la cara del desgaste debe ser de  $71 \pm 1,5$  mm. Las probetas se colocan en el equipo de ensayo de Böhme en la superficie en la que se esparce el material abrasivo, se gira el disco en 16 ciclos de 22 revoluciones y se aplica a la probeta una carga de abrasión de  $294 \pm 3$  N ( $29,98 \pm 0,31$ ) kg. El desgaste por abrasión se calcula determinando la pérdida de volumen de la probeta de ensayo. Como material abrasivo normalizado se debe utilizar aluminio fundido (carburo de silicio grano 80).

Figura 1. Partes fundamentales de la máquina del equipo de abrasión de Böhme



Fuente: Norma Coguanor NTG 41087 h2.

El valor promedio de tres especímenes sometidos a los métodos de ensayo descritos en la norma NTG 41087 h2 debe ser:

Tabla VI. Resistencia a la abrasión

Método de ensayo	Valor
Mediante arena y disco metálico ancho	$\leq 23 \text{ mm}$
Ensayo de Böhme	$\leq 20\,000 \text{ mm}^3 / 5\,000 \text{ mm}^2$

Fuente: Norma Coguanor NTG 41087 h2.

## **1.5. Residuos plásticos de PET**

A continuación se presentan los antecedentes del PET, su uso en el distrito metropolitano, su recuperación y tratamiento.

### **1.5.1. Antecedentes**

El descubrimiento del Tereftalato de Polietileno (PET) fue patentado como un polímero para fibra por J.R. Whinfield y J.T. Dickson en 1941. La producción comercial de fibra de poliéster comenzó en 1955. Desde entonces el PET ha presentado un continuo desarrollo tecnológico en el ámbito mundial, ya que este envase cumple con las funciones de proteger, contener, manipular y distribuir principalmente bebidas de una manera ligera, resistente con un alto nivel de sofisticación y la diversificación de sus posibilidades.

En particular, estos envases resultan especialmente adecuados para contener líquidos a presión, siendo el envasado de bebidas carbonatadas la principal aplicación. Además, el bajo costo de fabricación y el desarrollo de tecnologías que mejoran substancialmente las propiedades de las botellas de PET han permitido un crecimiento notable del número de sus aplicaciones. Entre ellas cabe destacar el envasado de agua mineral, aceites, bebidas, detergentes, productos de higiene corporal, productos farmacéuticos, entre otras.

### 1.5.2. Generación de residuos plásticos en el distrito metropolitano de ciudad de Guatemala

En la siguiente tabla se presenta la generación de residuos plásticos domiciliarios en Guatemala.

Tabla VII. **Generación de residuos plásticos domiciliarios en Guatemala**

	<b>Área nacional</b>	<b>Área metropolitana ciudad de Guatemala</b>
Población estimada (número de habitantes)	15 073 375 (1)	2 797 015 (1)
Tasa de generación de residuos domiciliarios (kg/hab/día)	0,3 (2)	0,542 (4)
Generación total de residuos domiciliarios (t/año)	1 650 534	553 333
Porcentaje de generación de plásticos	8,1 a 12,1 % (3)	8,1 % (4)
Volumen de generación de plásticos (t/año)	133 693 a 199 714	44 819
Porcentaje de recuperación del plásticos	No se cuenta con dato	20%

Fuente. Reporte Nacional de manejo de residuos en Guatemala. PROARCA-Centro Guatemalteco de Producción más Limpia-USAID.

(1) Instituto Nacional de Estadística, proyección para 2012.

(2) Perfil Ambiental 2006. Universidad Rafael Landívar e Instituto de Incidencia Ambiental.

(3) CEPIS-OPS.

(4) Estudio Manejo de los desechos sólidos en el área metropolitana de la Ciudad de Guatemala, JICA, 1995.

### **1.5.3. Recuperación y aprovechamiento de los plásticos**

En cuanto a la capacidad del país para el reciclaje, según la Gremial de Recicladores, es difícil estimar a ciencia cierta la capacidad real del país en éste sentido, pues existe gran cantidad de pequeños recicladores que trabajan en el mercado informal en forma poco controlada. En general, estos pequeños recolectores y productores no se encuentran registrados en el registro mercantil y trabajan muchas veces en condiciones inadecuadas y peligrosas para los trabajadores.

En general, los residuos plásticos son acopiados directamente en las plantas, en los vertederos clandestinos y en los vertederos controlados. Estos son enviados a las plantas procesadoras en donde son lavados, molidos y/o peletizados para su posterior uso en las fábricas de plástico. De manera muy amplia, esta actividad está a cargo de pequeños recolectores, en muchos casos sin empresas formales reconocidas. En el vertedero municipal de la zona 3, las personas denominadas “guajeros”, acopian los productos, los clasifican y los entregan a intermediarios quienes los venden a las fábricas.

Para el lavado, molido y/o peletizado, existen en el país empresas como Reformulados Plásticos S.A. que se dedican únicamente a ésta transformación. Existe igualmente capacidad instalada para esa transformación inicial en las plantas productoras de plástico.

Los plásticos son acopiados igualmente por recicladoras, donde los precios oscilan desde Q.10,00 por quintal para envases de gaseosa o agua pura, Q.40,00 por quintal para envases de jugo y leche (sin etiqueta, ni líquidos, ni tapón), Q.90,00 el quintal de tapón y Q.0,40 por libra de cajilla plástica. Estas empresas exportan el material o lo distribuyen a la industria nacional para su uso posterior.

#### **1.5.4. Disponibilidad del material PET**

Como se ha dicho, es difícil estimar la capacidad actual de reciclaje en el país. Existen varias acopiadoras donde se clasifican, limpian, muelen y se realiza el peletizado de los distintos tipos de plástico para su reutilización en la industria local o para su exportación para industrias fuera del país. Actualmente, en la industria se llevan a cabo las siguientes actividades para procesar el material.

- Pre proceso

Los plásticos obtenidos de la recolección son separados por clases para aumentar su valor y facilitar el proceso posterior, y son compactados para reducir los costos de transporte. En otros países, para facilitar la separación y distinción entre los plásticos existe un código internacional de identificación que otorga un número encerrado entre flechas (forma triangular) que informa a todo consumidor sobre las características del producto que maneja, ya que debe estar impreso en algún lugar visible del mismo. En Guatemala, este sello es poco utilizado, por lo que la separación se hace por experiencia de los operarios con respecto a las características del residuo.

- Proceso

Los plásticos seleccionados son molidos, lavados y convertidos en escamas o pellets, a través de molinos especializados.

- Destino final

La nueva materia prima permite, generalmente mezclada con materia prima virgen, la producción de materiales idénticos a los originales o diferentes.

Actualmente, en el país se cuenta con las siguientes tecnologías para manufactura del plástico: inyección, extrusión y roto moldeado.

### **1.5.5. Tecnologías disponibles para el manejo adecuado del residuo plástico**

Existen tres métodos diferentes de reciclaje y recuperación de los plásticos. De éstos solamente el reciclaje mecánico se lleva a cabo en el país.

#### **1.5.5.1. Reciclaje mecánico**

El reciclaje mecánico se realiza por medio de la presión y del calor con el fin de producir otros objetos con base de un material termoplástico definido. Ya que es muy importante que sea homogénea la composición del plástico, la clasificación minuciosa previa tiene un papel preponderante para el reciclaje mecánico. Los plásticos ideales son las botellas de bebida, recipientes de alimentos u otros productos de uso doméstico, film y folio de plástico, entre otros.

#### **1.5.5.2. Reciclaje químico**

El objetivo del reciclaje químico es la descomposición de los plásticos usados anteriormente, clasificados en sus componentes más sencillos (los monómeros). Estos se pueden utilizar otra vez como materia prima en la industria productora. Existen diferentes procesos para realizar el reciclaje químico: la pirólisis, la hidrogenación, la gasificación o el tratamiento con disolventes. Con el reciclaje químico, es posible tratar también polímeros termoestables y plásticos de composición compleja. Los procesos de reciclaje químico son sumamente complejos, nuevos y necesitan costos de inversión mucho más altos que el reciclaje mecánico.

### **1.5.5.3. Recuperación energética**

Debido a que los plásticos se producen a base de petróleo, tienen un valor calorífico elevado. A veces, incluso, más elevado que el carbón o de los combustibles derivados del petróleo. Los plásticos que no tienen un mercado de reciclaje, o que están demasiado contaminados para poder ser reciclados, se pueden valorar como combustible alternativo en plantas cementeras.



## 2. TRABAJO DE CAMPO

A continuación, se presentan los datos del material reciclado de PET utilizado en la investigación.

### 2.1. Materia prima de recicladora de plásticos

El reciclado de los envases de PET se consigue por dos métodos; el químico y el mecánico. Esta última es la técnica más utilizada en la actualidad porque es el de menor costo y consiste en la molienda, separación y lavado de los envases.

Con esto se consiguen escamas, que pueden ser destinadas directamente sin necesidad de hacer pellets.

Este proceso de recuperación mecánico se divide en dos fases. En la fase inicial se identifican y clasifican las botellas para lavarlas y extraerles las etiquetas. Luego, se trituran y se separan las partículas pesadas identificadas como polipropileno, polietileno de alta densidad y cloruro de polivinilo.

A continuación, se inicia la segunda fase de este proceso, en la cual se obtiene la hojuela o escama; se seca para aumentar su viscosidad, cristalizando de forma continua para obtener la transformación en nuevos elementos PET para lo cual existe una amplia gama de aplicaciones.

Figura 2. **Material reciclado de PET, triturado en hojuela**



Fuente: fotografía tomada por Francisco Estrada, 2016.

## 2.2. Características del PET

De acuerdo con la composición química del PET se han calculado sus características principales en laboratorio.

Tabla VIII. **Propiedades del tereftalato de polietileno**

Datos técnicos del Tereftalato de Polietileno (PET)		
Propiedades mecánicas a 23 °C		
Peso específico	1,39	g/cm <sup>3</sup>
Resistencia a la tracción (Fluencia / Rotura)	900	Kg/cm <sup>2</sup>
Resistencia a la flexión	1 450	Kg/cm <sup>2</sup>
Alargamiento a la rotura	15	%
Módulo de elasticidad (tracción)	37 000	Kg/cm <sup>2</sup>
Resistencia al desgaste por roce	Muy buena	

Fuente: Plásticos Mecanizables, IMC 2010.



### **3. TRABAJO DE LABORATORIO**

A continuación, se presentan la definición de proporciones de las mezclas de concreto y los ensayos a las mezclas secas.

#### **3.1. Definición de proporciones de la mezcla de concreto en volumen**

La proporción en peso de mezcla utilizada en la fabricación de adoquines en los que se practicaron las pruebas de adición de material triturado de PET reciclado es la siguiente: 1:2.56:3.53:0.47 (cemento : arena : piedrín : agua). Inicialmente, se hizo una producción de adoquines patrón (sin agregado de material triturado de PET reciclado), con la proporción indicada anteriormente. A estos se les practicó ensayos a flexión, compresión, abrasión y absorción para determinar sus características respectivamente. Luego, se hicieron otras producciones que incluyeron material triturado de PET reciclado con diferentes porcentajes del mismo, las que se estudiarán adelante para poder establecer diferencias entre las muestras.

La mezcla de concreto para los adoquines debe ser sin revenimiento. Las mezclas sin revenimiento se clasifican de esta manera debido a que poseen un revenimiento menor a 2,5 cm (1 pulg.) Dichas mezclas generan una pobre trabajabilidad si son compactadas con técnicas manuales (uso de varillas para apisonamiento). Se obtienen mejores resultados con vibradores mecánicos. El rango de mezclas trabajables puede llegar a ser ampliado por técnicas de consolidación, las cuales imparten gran energía dentro de la masa al ser consolidada.

Figura 3. **Muestra de mezcla seca para adoquines patrón sin agregado de material reciclado de PET**



Fuente: fotografía tomada por Francisco Estrada, 2016.

Debido a que una de las razones de mayor peso en este trabajo es el uso de materiales reciclados de PET, se adoptó una cantidad inicial de material triturado de PET del 10 % en volumen de la suma de los agregados grueso y fino, como cantidad base para la primera muestra. El material triturado de PET reciclado es duro y poco cohesivo después de haber sido reciclado, con textura muy similar a la de vidrio roto. Al hacer los ensayos respectivos, esto provocó que disminuyera la resistencia a compresión y a flexión en los adoquines.

Luego de ejecutar la primera muestra, se realizaron las siguientes mezclas en 20 % y 25 % de volumen de contenido de material triturado de PET reciclado. Los porcentajes en volumen de material de PET, en las mezclas de concreto fueron establecidos desde el inicio de la investigación de manera aleatoria. Esto se debió a que no se cuenta en el país con un parámetro o

norma con la que se pueda tomar una referencia en cuanto a porcentajes de agregados de PET en mezclas de concreto.

El procedimiento para la mezcla de los agregados se hizo de la siguiente manera: primero se mezcló la arena, cemento y el pedrín. Luego, se agregó el material triturado de PET reciclado (en las mezclas donde se planificó la adición de este material), hasta conseguir una apariencia homogénea de la mezcla. Para finalizar, se agregó el agua en la proporción indicada. Con esto se consiguió una mezcla seca con buena apariencia lista para la fundición en los moldes.

A continuación, se muestra la proporción de la mezcla patrón con la cual se trabajó el primer lote de adoquines.

Tabla IX. **Proporcionamiento de mezcla patrón para adoquines fabricados en instalaciones del Centro de investigaciones de ingeniería. Identificación de la mezcla: A**

<b>Material</b>	<b>Cantidad (kg)</b>	<b>Características</b>
Agregado de PET	0	Reciclado triturado
Cemento	13,005	Cemento Portland Tipo 1 PM
Arena	33,275	Lavada
Pedrín	45,95	3/8" lavada
Agua	13,53	Pura
Cantidad de adoquines por bachada: 8		

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. **Máquina vibro compactadora para fabricación de adoquines del Centro de investigaciones de ingeniería**



Fuente: fotografía tomada por Francisco Estrada, 2016.

Figura 5. **Muestra de adoquines con mezcla patrón**



Fuente: fotografía tomada por Francisco Estrada, 2016.

Concluida la primera bachada patrón, se realizaron las mezclas de concreto para la fabricación de adoquines con diferentes porcentajes de material triturado de PET reciclado.

Se realizó una bachada con 10 % en volumen de agregados de material triturado de PET reciclado. Por consiguiente, se modificaron las proporciones de arena y piedrín, manteniendo el cemento y agua en la misma proporción de la mezcla patrón.

Tabla X. **Proporcionamiento de mezcla con 10 % de agregado de material triturado de PET reciclado para adoquines fabricados en instalaciones del Centro de investigaciones de ingeniería. Identificación de la mezcla: B**

<b>Material</b>	<b>Cantidad (kg)</b>	<b>Características</b>
Agregado de PET	5,28	Reciclado triturado
Cemento	13,005	Cemento Portland Tipo 1 PM
Arena	30,03	Lavada
Piedrín	41,18	3/8" lavada
Agua	12,35	Pura
Cantidad de adoquines por bachada: 8		

Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, se realizaron dos bachadas con 20 % y 25 % en volumen de agregados de material triturado de PET reciclado. Por consiguiente, se modificaron las proporciones de arena y piedrín, manteniendo el cemento y agua en la misma proporción de la mezcla patrón.

Tabla XI. **Proporcionamiento de mezcla con 20 % de agregado de material triturado de PET reciclado para adoquines fabricados en instalaciones del Centro de Investigaciones de Ingeniería. Identificación de la mezcla: C**

<b>Material</b>	<b>Cantidad (kg)</b>	<b>Características</b>
Agregado de PET	10,567	Reciclado triturado
Cemento	13,005	Cemento Portland Tipo 1 PM
Arena	26,69	Lavada
Piedrín	36,60	3/8" lavada
Agua	11,3	Pura
Cantidad de adoquines por bachada: 8		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Proporcionamiento de mezcla con 25 % de agregado de material triturado de PET reciclado para adoquines fabricados en instalaciones del Centro de investigaciones de ingeniería. Identificación de la mezcla: D**

<b>Material</b>	<b>Cantidad (kg)</b>	<b>Características</b>
Agregado de PET	13,21	Reciclado triturado
Cemento	13,005	Cemento Portland Tipo 1 PM
Arena	25,03	Lavada
Piedrín	34,32	3/8" lavada
Agua	10,75	Pura
Cantidad de adoquines por bachada: 8		

Fuente: elaboración propia.

Concluidas las fundiciones de los adoquines con sus diferentes proporciones de material triturado de PET reciclado, se hicieron los ensayos de laboratorio de flexión, absorción, abrasión y compresión en las instalaciones del Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII) de la Facultad de Ingeniería de la

Universidad de San Carlos de Guatemala, cuyos resultados se adjuntan en el anexo de este trabajo.

### **3.2. Ensayos a la mezcla seca**

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos de revenimiento y peso unitario a las mezclas secas.

#### **3.2.1. Método de prueba normalizada para determinar el revenimiento en el concreto elaborado con cemento hidráulico, ASTM C 143**

El propósito de la prueba de revenimiento es determinar la consistencia del concreto. Para el procedimiento se humedece un molde cónico metálico y se coloca en una superficie plana rígida no absorbente y húmeda. El molde se debe sostener firmemente en el lugar durante el llenado, por el operador, quién mantendrá los pies sobre los estribos. Llenar inmediatamente el molde en tres capas, cada una de aproximadamente  $1/3$  del volumen del molde. Luego de este proceso se debe compactar cada capa con 25 golpes de la varilla de apisonamiento, distribuir uniformemente los golpes en toda la sección transversal de cada capa. Para la capa del fondo es necesario inclinar la varilla ligeramente y dar aproximadamente la mitad de los golpes cerca del perímetro, continuando con los golpes verticales en forma de espiral hacia el centro. Apisone la capa del fondo en todo su espesor. Compacte la segunda capa y la capa superior en todo su espesor, de tal manera que los golpes apenas penetren en la capa inferior.

Al llenar y compactar la capa superior, haga que el concreto exceda la capacidad del molde antes de empezar a apisonar. Si durante el compactado, la superficie del concreto queda abajo del borde superior del molde, agregue más

concreto para mantener en todo momento un exceso de concreto sobre la superficie del molde. Después de haber apisonado la capa superior empareje la superficie del concreto mediante el enrase y rodamiento de la varilla de apisonamiento. Continúe empujando el molde firmemente hacia abajo y remueva el concreto del área que rodea la base del molde para evitar la interferencia con el movimiento del concreto que se está descargando. De inmediato, retire el molde, levantándolo cuidadosamente en dirección vertical. Levante el molde a una altura de 12 pulgadas (300 mm) en  $5 \pm 2$  segundos, con un movimiento ascendente uniforme sin movimientos laterales o de torsión. La prueba se debe realizar sin interrupción desde el inicio del llenado hasta la remoción del molde, en un período de  $2 \frac{1}{2}$  minutos.

De inmediato se procede a medir el revenimiento para determinar la diferencia vertical entre la parte superior del molde y el centro original desplazado de la superficie superior del espécimen.

**Figura 6. Muestra de ensayo de revenimiento**



Fuente: fotografía tomada por Francisco Estrada, 2016.

Como se observa en la fotografía, el revenimiento es de media pulgada, un comportamiento esperado para una mezcla seca de concreto.

### **3.2.2. Método de prueba normalizado para determinar el peso unitario de mezclas de concreto, ASTM C 138**

El peso unitario o la densidad del concreto es la masa por unidad de volumen, y varían según la cantidad y densidad de los agregados, la cantidad de aire atrapado o arrastrado, y los contenidos de agua y cemento. Los concretos convencionales utilizados en estructuras, como los edificios y aceras, poseen un peso unitario en el rango de 2 250 a 2 500 kilogramos por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ). Para otros tipos de concreto, el peso unitario oscila entre 240  $\text{kg/m}^3$  de concreto ligero a 6 500  $\text{kg/m}^3$  para el concreto de alta resistencia.

El procedimiento de ensayo es el siguiente: se determina la masa de la tara vacía, se coloca el concreto en tres capas de un volumen igual, se apisona distribuidamente cada capa 25 veces y, cuando se tenga llena la tara con concreto, aplicar de 10 a 15 golpes a los costados del recipiente con un martillo de goma, se rasa la tara y se pesa. Luego el peso unitario se obtiene dividiendo el peso del material dentro del volumen del recipiente.

Figura 7. **Muestra del procedimiento de ensayo de peso unitario del concreto**



Fuente: fotografía tomada por Francisco Estrada, 2016.

## 4. RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los distintos ensayos realizados a los adoquines fabricados con las mezclas de concreto patrón y a las mezclas propuestas de concreto con adición de material triturado de PET reciclado.

### 4.1. Ensayos a mezclas

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos a las mezclas secas con las que posteriormente se elaboraron los adoquines.

Tabla XIII. **Resultados ensayo de revenimiento**

<b>Identificación de mezcla</b>	<b>Porcentaje de material de PET reciclado en volumen</b>	<b>Cemento utilizado</b>	<b>Revenimiento</b>
A	0	Cemento Portland Tipo 1 PM	1,5 cm
B	10		2,5 cm
C	20		2 cm
D	25		1,5 cm

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Resultados de ensayo de peso unitario**

Identificación de la mezcla	Porcentaje de material de PET reciclado en volumen	Cemento utilizado	Peso unitario (kg/m <sup>3</sup> )	Variación respecto al adoquín patrón A	
				Absoluta (kg/m <sup>3</sup> )	Relativa (Porcentaje)
A	0	Cemento Portland Tipo 1 PM	2 285	--	--
B	10		1 857	-428	-18,73
C	20		1 500	-785	-33,35
D	25		1 357	-928	-40,61

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2. Ensayos a adoquines

A continuación se presentan los resultados de los ensayos de flexión, absorción, compresión y abrasión llevados a cabo a los adoquines.

Tabla XV. **Resultados de los ensayos de resistencia a flexión realizados a los adoquines**

Identificación del adoquín	Porcentaje de material de PET reciclado en volumen	Peso natural del adoquín (kg)	Resistencia a la flexión (kg/cm <sup>2</sup> )	Edad en días
A2	0	10,27	45,36	28
A3	0	9,34	40,77	28
A4	0	9,12	45,73	28
A5	0	9,34	40,77	28
A6	0	10,11	44,50	28
A7	0	8,73	46,61	28
A8	0	8,96	40,77	28
<b>Promedio A</b>	<b>0</b>	<b>9,41</b>	<b>43,50</b>	<b>28</b>

Continuación de la tabla XV.

B1	10	9,02	32,63	28
B2	10	9,35	35,36	28
B3	10	8,99	34,07	28
B4	10	9,05	33,01	28
B5	10	9,34	32,54	28
B6	10	9,36	31,06	28
B8	10	8,99	32,02	28
<b>Promedio B</b>	<b>10</b>	<b>9,15</b>	<b>32,95</b>	<b>28</b>
C1	20	7,40	17,50	28
C2	20	7,54	17,70	28
C3	20	7,64	19,40	28
C4	20	7,55	18,16	28
C5	20	7,50	18,41	28
C6	20	7,65	18,16	28
C8	20	7,14	17,37	28
<b>Promedio C</b>	<b>20</b>	<b>7,48</b>	<b>18,1</b>	<b>28</b>
D2	25	7,14	17,37	28
D3	25	7,02	15,88	28
D4	25	6,97	15,74	28
D5	25	7,07	15,56	28
D6	25	7,12	14,00	28
D7	25	6,68	14,16	28
D8	25	7,03	15,04	28
<b>Promedio D</b>	<b>25</b>	<b>7,004</b>	<b>15,39</b>	<b>28</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Resultados de los ensayos de absorción realizados a los adoquines**

<b>Identificación del adoquín</b>	<b>Porcentaje de material de PET reciclado en volumen</b>	<b>Peso seco (kg)</b>	<b>Peso húmedo (kg)</b>	<b>Porcentaje de absorción de la muestra de adoquín</b>
A2	0	4,78	5,22	9,25
A3	0	4,94	5,38	8,99
A4	0	4,5	4,9	8,84
A5	0	4,96	5,4	8,79
A6	0	5,19	5,66	9,09
A7	0	4,02	4,35	8,16
A8	0	4,63	5,03	8,64
B1	10	4,66	5,07	8,8
B2	10	4,62	5	8,18
B3	10	4,57	4,96	8,53
B4	10	4,38	4,78	9,22
B5	10	4,2	4,59	9,19
B6	10	4,77	5,19	8,85
B8	10	4	4,39	9,7
C1	20	3,75	4,15	10,61
C2	20	3,8	4,25	11,79
C3	20	3,18	3,77	18,62
C4	20	3,54	4,09	15,48
C5	20	2,97	3,35	12,73
C6	20	2,98	3,36	12,79
C8	20	3,9	4,43	13,59
D2	25	3,33	3,77	13,09
D3	25	2,98	3,37	13,15
D4	25	3,22	3,65	13,42
D5	25	2,29	3,69	61,31
D6	25	3,83	4,35	13,63
D7	25	3,47	4,17	20,23
D8	25	2,46	3,89	58,29

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión en cubos extraídos de los adoquines**

Identificación del adoquín	Porcentaje de material de PET reciclado en volumen	Resistencia a la compresión Kg/cm <sup>2</sup>	Edad en días
A3	0	101,21	28
A5	0	98,45	28
A6	0	105,59	28
B2	10	86,34	28
B5	10	79,82	28
B7	10	44,31	28
C3	20	49,47	28
C6	20	36,89	28
C8	20	30,48	28
D3	25	52,11	28
D4	25	36,17	28
D8	25	28,4	28

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Resultados de los ensayos de resistencia a la abrasión en cubos extraídos de los adoquines**

Identificación del adoquín	Porcentaje de material de PET reciclado	Volumen de abrasión (mm <sup>3</sup> )	Variación respecto al adoquín patrón A	
			Absoluta (mm <sup>3</sup> )	Relativa (Porcentaje)
A1	0	20 803	--	--
B7	10	11 930	-8 873	-42,65
C7	20	8 394	-12 904	-62,03
D1	25	13 053	-7 750	-37,25

Fuente: elaboración propia.

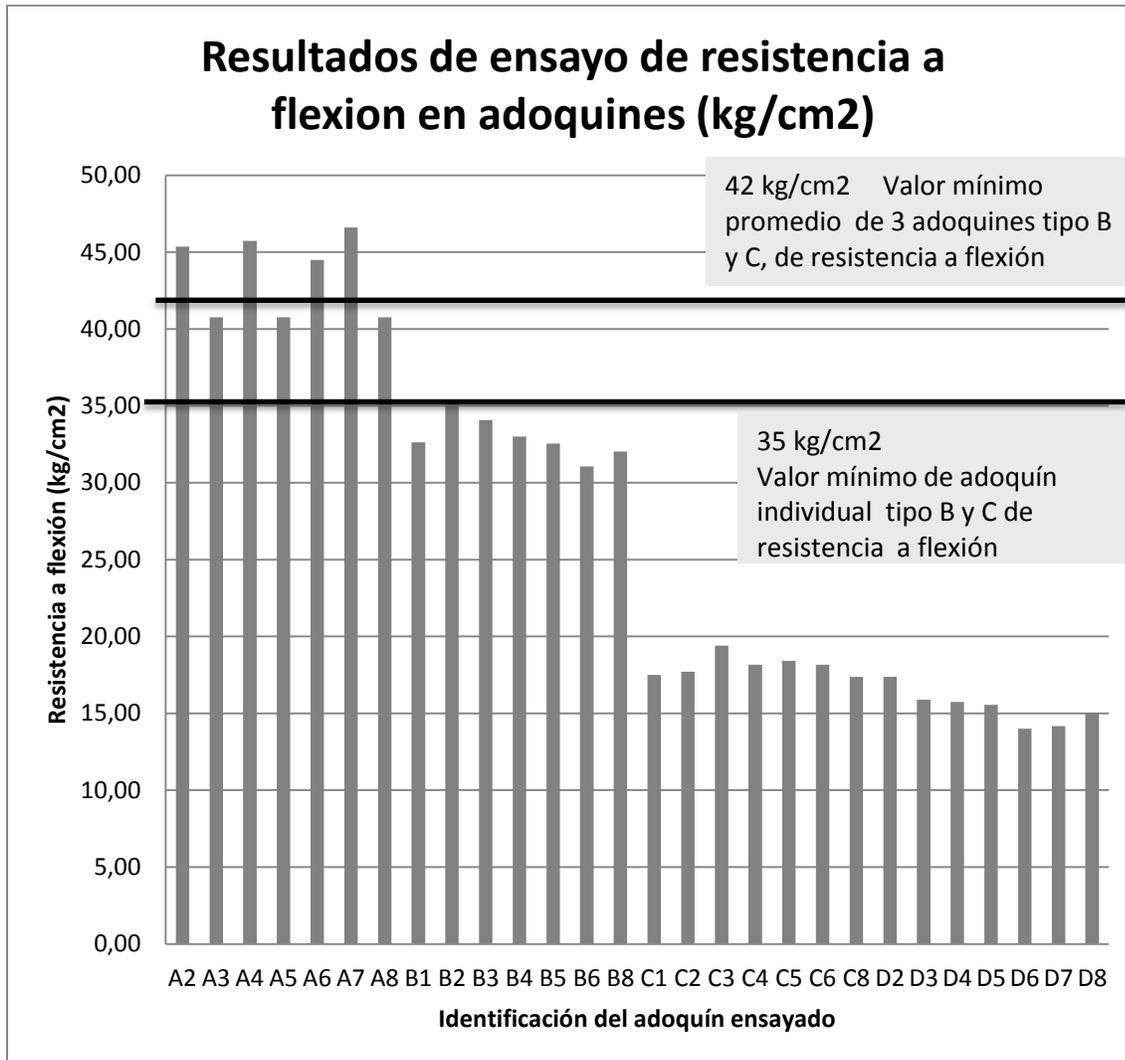


## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en las mezclas secas trabajadas en el estudio con agregado de material triturado de PET reciclado, muestran que el revenimiento fue entre 1,5 y 2,5 cm, por lo que se encuentran en los parámetros deseados de aproximadamente 1 pulgada. El revenimiento tuvo un comportamiento similar a cualquier otro tipo de mezcla sin el agregado de PET. Para el ensayo de peso unitario se puede decir que la mezcla patrón está en los parámetros buscados, cercano a los  $2\,400\text{ kg/m}^3$ , mientras que las mezclas con agregado de PET se pueden catalogar como concretos ligeros.

De acuerdo con el ensayo de resistencia a flexión, la norma Coguanor NTG 41086 menciona que la resistencia a flexión de un promedio de 3 adoquines deberá ser de 4,1 MPa ( $42\text{ Kg/cm}^2$ ) para adoquines tipo B y C. Como se observa en la Figura 8, este valor mínimo es superado por los adoquines patrón, pero es demasiado alto para los adoquines con agregado de material triturado de PET reciclado, por lo que estos adoquines no cumplen con la norma y no son aptos para los usos especificados en esta.

Figura 8. Gráfica de resultados de ensayo de resistencia a flexión en adoquines



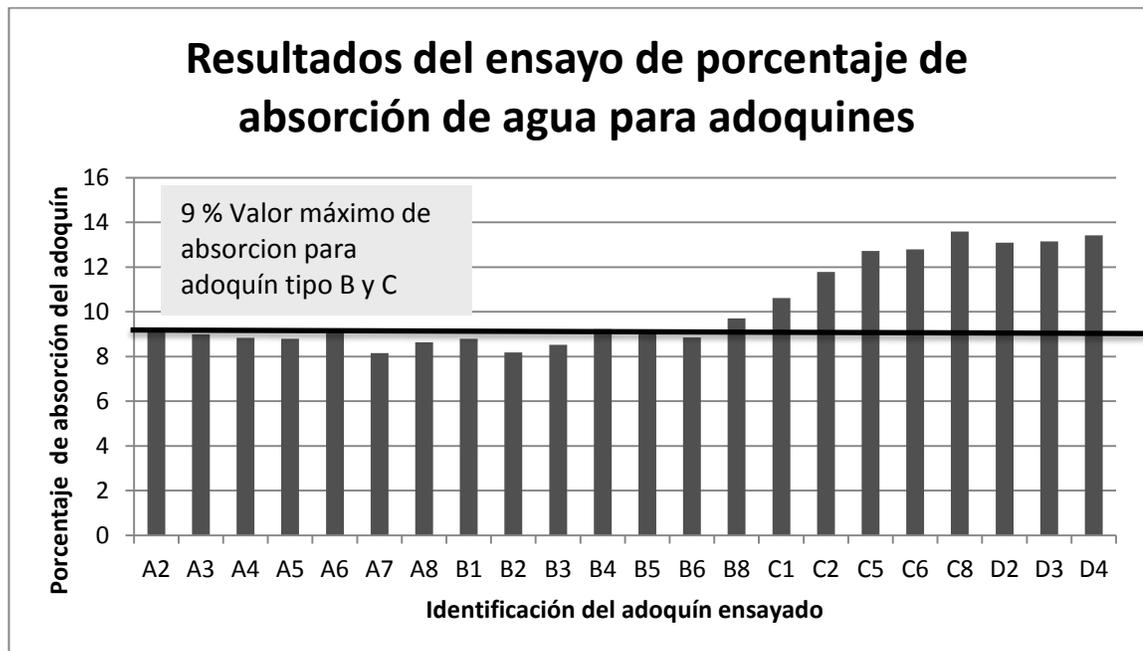
Fuente: elaboración propia.

Para el ensayo de porcentaje de absorción de agua en adoquines, la norma Coguanor NTG 41086 menciona que para adoquines tipo B y C el porcentaje de absorción debe ser menor o igual a 9 % con un valor máximo individual de 9.9 %. Como se observa en la Figura 9, este valor máximo es inferior a los resultados conseguidos por los adoquines patrón y por los adoquines del estudio elaborados con la mezcla de identificación B (con 10 %

de agregado de material triturado de PET reciclado), por lo que estos adoquines cumplen la norma. Los adoquines del estudio elaborados con las mezclas de identificación C y D (con 20 % y 25 % de material de PET), exceden el valor máximo de absorción descrito en la norma, por lo que estos adoquines no cumplen.

Observación. En algunas muestras fue muy difícil obtener una lectura apropiada de los pesos secos cuando se sacaron del horno porque se desintegraban por la fundición del material reciclado de PET. Esto provocaba una pérdida de masa y, al calcular el porcentaje de absorción, este se disparaba. Esos resultados fueron descartados para la realización de esta gráfica ya que distorsionaban la comprensión de los datos. Ver apéndice 9.

Figura 9. **Gráfica de resultados de ensayo de porcentaje de absorción de agua para adoquines**

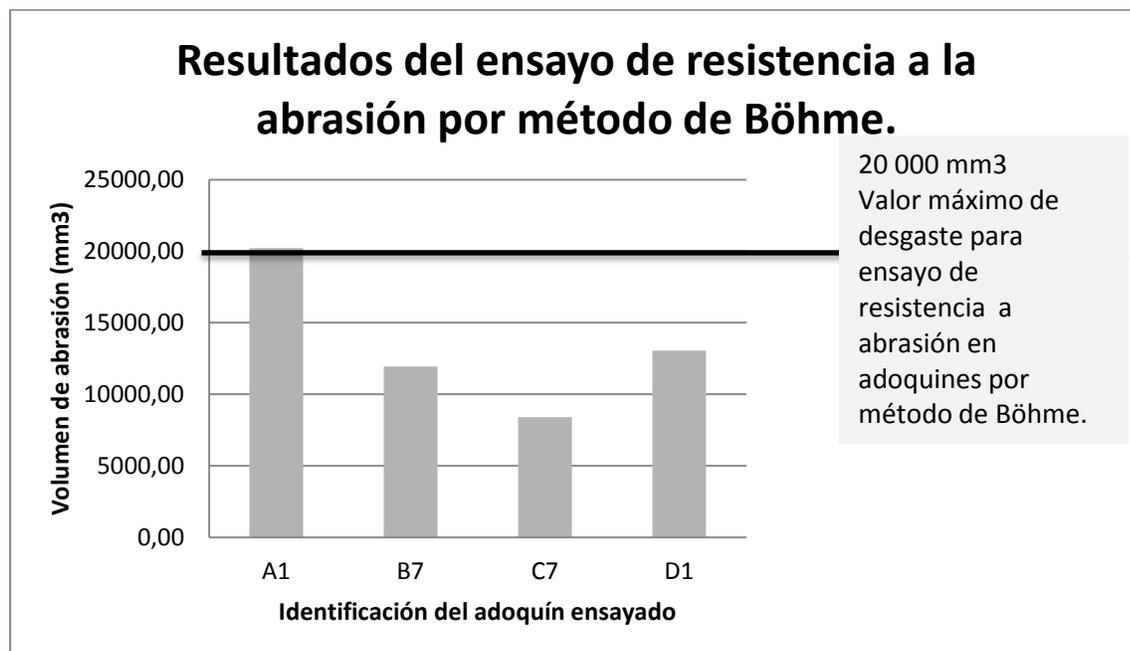


Fuente: elaboración propia.

Para el ensayo de resistencia a la abrasión por el método de Böhme se obtuvieron resultados muy importantes para la investigación. Según la norma Coguanor NTG 41086 el desgaste provocado por el ensayo debe ser menor o igual a 20 000 mm<sup>3</sup> para cualquier tipo de adoquín según la clasificación de la norma.

Como se observa en la figura 10, los valores de desgaste de los 4 adoquines ensayados cumplen con la norma, desde el adoquín patrón hasta el adoquín identificado D con 25 % de material triturado de PET reciclado. Se interpreta que la proporción con 20 % de agregado de PET fue la más eficiente en este ensayo dando como resultado 8 394 mm<sup>3</sup> de desgaste, superando por más de la mitad lo especificado en norma.

Figura 10. **Gráfica de resultados de ensayo de resistencia a la abrasión por el método de Böhme para adoquines**



Fuente: elaboración propia.

- Análisis de costos

Uno de los puntos más importantes de este proyecto fue la determinación de una mezcla de concreto con agregado de material triturado de PET reciclado que fuera viable económicamente, esto se conseguiría con dos aspectos principales:

- Alivianamiento de las unidades de adoquín. Esto representa ventajas en el transporte del material disminuyendo su costo y también contribuye en la colocación, reduciendo los esfuerzos de la mano de obra.
- Reducción de costo de producción según la proporción de agregado de PET.

Para el factor de alivianamiento de los adoquines, como se observa en la tabla XIX, el peso promedio de los adoquines patrón es de 9,50 kg y hubo disminuciones de peso de hasta 26 % con los adoquines con 25 % de agregado de material triturado de PET reciclado. Esto influiría de gran manera en los costos de transporte y en la ayuda al trabajador al manipularlos. Aunque es sabido, por los resultados anteriores, su pobre desempeño en el ensayo a flexión.

Tabla XIX. **Porcentajes de alivianamiento de adoquines según tipo de mezcla con agregado de PET reciclado**

<b>Porcentaje de PET en volumen de mezcla</b>	<b>Peso promedio de 8 adoquines (kg)</b>	<b>Porcentaje de alivianamiento</b>
0	9,50	0
10	9,16	3,57
20	7,44	21,68
25	7,00	26,31

Fuente: elaboración propia.

En el caso de la propuesta de reducción de costo de producción de adoquines por medio del agregado de PET reciclado, se hizo el siguiente cuadro comparativo tomando en cuenta los gastos en materiales de la investigación.

Tabla XX. **Comparativa de costo de materiales para 1 adoquín**

<b>Costo de materiales para 1 adoquín</b>						<b>Porcentaje de aumento respecto al adoquín patrón A</b>
<b>Cemento</b>	<b>Arena</b>	<b>Piedrín</b>	<b>PET</b>	<b>Total</b>		
A	Q1,77	Q1,03	Q1,53	Q0,00	Q4,32	-
B	Q1,77	Q0,93	Q1,37	Q0,86	Q4,92	13,85 %
C	Q1,77	Q0,82	Q1,22	Q1,72	Q5,53	27,81 %
D	Q1,77	Q0,77	Q1,14	Q2,15	Q5,83	34,80 %

Fuente: elaboración propia.

Los valores monetarios no deben tomarse como los datos principales de la tabla, si no el porcentaje de aumento del costo; ya que, las plantas de producción pueden conseguir mejores precios de sus materias primas por los volúmenes de compra. El adoquín aumenta en promedio 1,4 % de precio por cada 1 % de PET en volumen.

Además, el costo del material triturado de PET reciclado fue de USD 0,25 por kilogramo, un costo alto por la cantidad comprada.



## CONCLUSIONES

1. El uso de material triturado de PET reciclado en una mezcla de concreto para fabricar adoquines demostró no ser compatible con las solicitudes mecánicas que se le exigen a los mismos. Disminuyó su capacidad de resistencia a la flexión y aumentó su capacidad de absorción. Por ello, no se alcanzaron los valores solicitados en la norma Coguanor NTG 41086 para ninguna clase de adoquín.
2. El resultado de la resistencia a la abrasión fue prometedor, obteniendo resultados máximos con la mezcla con 20 % de agregado de PET.
3. Debido a la reducción de la resistencia a flexión y el aumento del porcentaje de absorción no se recomienda el uso de adoquines con estas proporciones de mezclas en las arterias de circulación vehicular y se debe estudiar el caso de uso peatonal en lugares específicos.
4. El uso de material triturado de PET reciclado en mezclas de concreto para fabricar adoquines tiene la finalidad de reducir los desechos en el medio ambiente, pero se necesita buscar una mejor alternativa para su uso tomando en cuenta los resultados obtenidos.
5. Se determinó que el uso de material triturado de PET reciclado aumenta el precio del adoquín 1,4 % por cada 1 % de material de PET en volumen en todas las proporciones, esto con los costos de los materiales al por menor que se trabajaron en el estudio.



## RECOMENDACIONES

1. Usar una proporción con menos de 10 % de material reciclado de PET para uso en adoquinado peatonal, en lugares como parques o senderos sin cargas vehiculares.
2. Utilizar material triturado de PET reciclado en adoquines de doble capa o similares, donde la capa superior tenga el agregado, ya que los resultados fueron satisfactorios en los ensayos de resistencia a la abrasión.
3. Continuar con la investigación enfocada en el uso de los adoquines con agregado de PET en pavimentos permeables, ya que en el proceso de elaboración y ensayos de los distintos adoquines se notaron buenas características de permeabilidad en los adoquines que contenían 20 % y 25 % de material de PET en volumen.
4. Continuar la investigación agregando otros materiales plásticos reciclados en diferentes presentaciones que muestren más porosidad o que sean tipo fibra a la mezcla de concreto para realizar adoquines.



## BIBLIOGRAFÍA

1. American Society for Testing Materials. *Annual Book of ASTM Standards. Volume 04.02*. EEUU, 1990.
2. Centro guatemalteco de producción más limpia, United States agency for international development (USAID) y Programa regional ambiental para Centroamérica (PROARCA). *Reporte nacional de manejo de residuos en Guatemala. Residuo: plásticos diversos*. Guatemala, 2004. 34 p.
3. COLOMO RUIZ, Nelson Rolando. *Ingeniería del reciclado en envases de tereftalato de polietileno (PET)*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2013. 121 p.
4. Comisión guatemalteca de normas. Coguanor. *NTG 41086 Adoquines de concreto para pavimentos. Especificaciones*. Guatemala, 2012. 21 p.
5. DE LEÓN MALDONADO, Alma. *El reciclaje en la ciudad de Guatemala*. Guatemala, CEUR, 2002. 120 p.
6. Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (IARNA), Universidad Rafael Landívar (URL) y Asociación Instituto de Incidencia Ambiental (IIA), 2006. *Perfil Ambiental de Guatemala: tendencias y reflexiones sobre la gestión ambiental*. Guatemala, 250 páginas.

7. Japan International Cooperation Agency (JICA), The study on solid waste management in Metropolitan Area of Guatemala city, final report, volumen I, II, III y IV, Guatemala, 1991.
8. LÓPEZ DÍAZ, Sergio Aroldo. *Uso de polvo de llanta como agregado fino en una mezcla de concreto para elaboración de adoquines*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2010. 82 p.
9. MORALES DE LEÓN, Edher Josymar. *Propuesta de norma guatemalteca para procedimiento de ensayo de laboratorio y clasificación de adoquines de hormigón*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2012. 130 p.
10. SANDOVAL VARGAS, María Alejandra. *Necesidad de incorporar al ordenamiento jurídico ambiental guatemalteco la regulación del sistema de depósito-reembolso para el manejo municipal de envases de polietilentereftalato (PET) y sus residuos*. Trabajo de graduación de Abogado y Notario. Facultad de ciencias políticas y sociales, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2013. 106 p.

# ANEXOS

## Anexo 1. Informes originales de los análisis realizados en el Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII), a los adoquines de concreto analizados en la investigación



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Nº 22707

O.T. No. 35735 Y 35928 INFORME No. 168-M  
INTERESADO: FRANCISCO JAVIER ESTRADA QUINTANILLA  
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION: "USO DE MATERIAL RECICLADO DE TEREFTALATO DE POLIETILENO, PET, COMO AGREGADO FINO PARA MEZCLAS DE CONCRETO, PARA LA ELABORACION DE ADOQUINES".  
ASUNTO: ENSAYO DE FLEXION Y DESGASTE EN ADOQUINES  
FECHA: 30/05/2016

### Antecedentes

El estudiante, FRANCISCO JAVIER ESTRADA QUINTANILLA, CARNE No. 2012-12800, de la carrera de Ingeniería Civil, solicito a este Centro de Investigaciones de Ingeniería que se realizara, ensayo de flexión, compresión y abrasión a 36 adoquines. Los ensayos en cuestión son parte del trabajo de tesis, TRABAJO DE GRADUACION "USO DE MATERIAL RECICLADO DE TEREFTALATO DE POLIETILENO, PET, COMO AGREGADO FINO PARA MEZCLAS DE CONCRETO, PARA ELABORACION DE ADOQUINES".

### Resultados

#### Ensayos a Flexión

##### 1. Identificación A2

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	LUZ	CARGA	%ABS	MODULO RUP
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm	kg		kg/cm2
24.5	10	22	17.7	10.265	4.78	5.222	22.3	2400	9.25	45.36

##### 2. Identificación A3

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	LUZ	CARGA	%ABS	MODULO RUP
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm	kg		kg/cm2
24.5	9.5	22	17.5	9.335	4.94	5.384	22.3	1925	8.99	40.77

##### 3. Identificación A4

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	LUZ	CARGA	%ABS	MODULO RUP
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm	kg		kg/cm2
24.5	9.2	22	17.5	9.115	4.5	4.898	22.3	2025	8.84	45.73

##### 4. Identificación A5

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	LUZ	CARGA	%ABS	MODULO RUP
Cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm	kg		kg/cm2
24.5	9.5	22	17.5	9.335	4.94	5.384	22.3	1925	8.99	40.77

FACULTAD DE INGENIERIA —USAC—  
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12  
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121  
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>



Continuación anexo 1.



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Nº 22708

O.T. No. 35735 Y 35928 INFORME No. 168-M  
INTERESADO: FRANCISCO JAVIER ESTRADA QUINTANILLA  
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION: "USO DE MATERIAL RECICLADO DE TEREFTALATO DE POLIETILENO, PET, COMO AGREGADO FINO PARA MEZCLAS DE CONCRETO, PARA LA ELABORACION DE ADOQUINES".  
ASUNTO: ENSAYO DE FLEXION Y DESGASTE EN ADOQUINES  
FECHA: 30/05/2016

5. Identificación A6

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	LUZ	CARGA	%ABS	MODULO RUP
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm	kg		kg/cm2
24.5	10.1	22	17.5	10.105	5.19	5.662	22.3	2375	9.09	44.50

6. Identificación A7

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	LUZ	CARGA	%ABS	MODULO RUP
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm	kg		kg/cm2
24.5	9	22	17.5	8.725	4.02	4.348	22.3	1975	8.16	46.61

7. Identificación A8

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	LUZ	CARGA	%ABS	MODULO RUP
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm	kg		kg/cm2
24.5	9.5	22	17.5	8.96	4.63	5.03	22.3	1925	8.64	40.77

8. Identificación B1

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	LUZ	CARGA	%ABS	MODULO RUP
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm	kg		kg/cm2
24.5	9.6	22	17.8	9.02	4.66	5.07	22.3	1600	8.80	32.63

9. Identificación B2

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	LUZ	CARGA	%ABS	MODULO RUP
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm	kg		kg/cm2
24.5	10	22	17.5	9.345	4.62	4.998	22.3	1850	8.18	35.36



Continuación anexo 1.



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Nº 22709

O.T. No. 35735 Y 35928 INFORME No. 168-M  
INTERESADO: FRANCISCO JAVIER ESTRADA QUINTANILLA  
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION: "USO DE MATERIAL RECICLADO DE TEREFTALATO DE POLIETILENO, PET, COMO AGREGADO FINO PARA MEZCLAS DE CONCRETO, PARA LA ELABORACION DE ADOQUINES".  
ASUNTO: ENSAYO DE FLEXION Y DESGASTE EN ADOQUINES  
FECHA: 30/05/2016

10. Identificación B3

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	LUZ	CARGA	%ABS	MODULO RUP
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm	kg		kg/cm2
24.5	9.4	22	17.5	8.99	4.57	4.96	22.3	1575	8.53	34.07

11. Identificación B4

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	LUZ	CARGA	%ABS	MODULO RUP
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm	kg		kg/cm2
24.5	9.7	22	17.5	9.045	4.38	4.784	22.3	1625	9.22	33.01

12. Identificación B5

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	LUZ	CARGA	%ABS	MODULO RUP
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm	kg		kg/cm2
24.5	9.8	22	17.5	9.335	4.2	4.586	22.3	1635	9.19	32.54

13. Identificación B6

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	LUZ	CARGA	%ABS	MODULO RUP
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm	kg		kg/cm2
24.5	10	22	17.5	9.36	4.77	5.192	22.3	1625	8.85	31.06



FACULTAD DE INGENIERIA —USAC—  
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12  
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121  
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Continuación anexo 1.



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Nº 22710

O.T. No. 35735 Y 35928 INFORME No. 168-M  
INTERESADO: FRANCISCO JAVIER ESTRADA QUINTANILLA  
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION: "USO DE MATERIAL RECICLADO DE TEREFTALATO DE POLIETILENO, PET, COMO AGREGADO FINO PARA MEZCLAS DE CONCRETO, PARA LA ELABORACION DE ADOQUINES".  
ASUNTO: ENSAYO DE FLEXION Y DESGASTE EN ADOQUINES  
FECHA: 30/05/2016

14. Identificación B8

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	LUZ	CARGA	%ABS	MODULO RUP
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm	kg		kg/cm2
24.5	10	22	17.5	8.99	4	4.388	22.3	1675	9.70	32.02

15. Identificación C1

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	LUZ	CARGA	%ABS	MODULO RUP
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm	kg		kg/cm2
24	9.2	22	17.5	7.4	3.75	4.148	22.3	775	10.61	17.50

16. Identificación C2

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	LUZ	CARGA	%ABS	MODULO RUP
Cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm	kg		kg/cm2
24.5	9.5	22	17.8	7.535	3.8	4.248	22.3	850	11.79	17.70

17. Identificación C3

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	LUZ	CARGA	%ABS	MODULO RUP
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm	kg		kg/cm2
24.5	9.8	22	17.5	7.64	3.18	3.772	22.3	975	18.62	19.40

18. Identificación C4

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	LUZ	CARGA	%ABS	MODULO RUP
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm	kg		kg/cm2
24.5	10	22	17.5	7.55	3.54	4.088	22.3	950	15.48	18.16



FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—  
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12  
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121  
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Continuación anexo 1.



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Nº 22711

O.T. No. 35735 y 35928 INFORME No. 168-M  
INTERESADO: FRANCISCO JAVIER ESTRADA QUINTANILLA  
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION: "USO DE MATERIAL RECICLADO DE TEREFTALATO DE POLIETILENO, PET, COMO AGREGADO FINO PARA MEZCLAS DE CONCRETO, PARA LA ELABORACION DE ADOQUINES".  
ASUNTO: ENSAYO DE FLEXION Y DESGASTE EN ADOQUINES  
FECHA: 30/05/2016

19. Identificación C5

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	LUZ	CARGA	%ABS	MODULO RUP
Cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm	kg		kg/cm2
24.5	9.8	22	17.5	7.495	2.97	3.348	22.3	925	12.73	18.41

20. Identificación C6

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	LUZ	CARGA	%ABS	MODULO RUP
Cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm	kg		kg/cm2
24.5	10	22	17.5	7.645	2.98	3.361	22.3	950	12.79	18.16

21. Identificación C8

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	LUZ	CARGA	%ABS	MODULO RUP
cm	Cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm	kg		kg/cm2
24.5	9.5	22	17.6	7.14	3.9	4.43	22.3	825	13.59	17.37

22. Identificación D2

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	LUZ	CARGA	%ABS	MODULO RUP
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm	kg		kg/cm2
24.5	9.5	22	17.6	7.14	3.9	4.43	22.3	825	13.59	17.37

23. Identificación D3

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	LUZ	CARGA	%ABS	MODULO RUP
Cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm	kg		kg/cm2
24.5	9.5	22	17.5	7.015	2.98	3.372	22.3	750	13.15	15.86



Continuación anexo 1.



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Nº 22712

O.T. No. 35735 y 35928 INFORME No. 168-M  
INTERESADO: FRANCISCO JAVIER ESTRADA QUINTANILLA  
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION: "USO DE MATERIAL RECICLADO DE TEREFALATO DE POLIETILENO, PET, COMO AGREGADO FINO PARA MEZCLAS DE CONCRETO, PARA LA ELABORACION DE ADOQUINES".  
ASUNTO: ENSAYO DE FLEXION Y DESGASTE EN ADOQUINES  
FECHA: 30/05/2016

24. Identificación D4

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	LUZ	CARGA	%ABS	MODULO RUP
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm	kg		kg/cm2
24.5	9.7	22	17.5	6.965	3.22	3.652	22.3	775	13.42	15.74

25. Identificación D5

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	LUZ	CARGA	%ABS	MODULO RUP
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm	kg		kg/cm2
24.5	9.6	22	17.5	7.07	2.29	3.694	22.3	750	61.31	15.56

26. Identificación D6

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	LUZ	CARGA	%ABS	MODULO RUP
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm	kg		kg/cm2
24.5	9.6	22	17.5	7.115	3.83	4.352	22.3	675	13.63	14.00

27. Identificación D7

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	LUZ	CARGA	%ABS	MODULO RUP
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm	kg		kg/cm2
24.5	9	22	17.5	6.675	3.47	4.172	22.3	600	20.23	14.16

28. Identificación D8

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	LUZ	CARGA	%ABS	MODULO RUP
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm	kg		kg/cm2
24.5	9.6	22	17.5	7.03	2.46	3.894	22.3	725	58.29	15.04



FACULTAD DE INGENIERIA —USAC—  
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12  
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121  
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Continuación anexo 1.



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Nº 22713

O.T. No. 35735 y 35928 INFORME No. 168-M  
INTERESADO: FRANCISCO JAVIER ESTRADA QUINTANILLA  
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION: "USO DE MATERIAL RECICLADO DE TEREFTALATO DE POLIETILENO, PET, COMO AGREGADO FINO PARA MEZCLAS DE CONCRETO, PARA LA ELABORACION DE ADOQUINES".  
ASUNTO: ENSAYO DE FLEXION Y DESGASTE EN ADOQUINES  
FECHA: 30/05/2016

**Ensayos a Compresión**

1. Identificación A3

Cubo 9.7 cm x 9.7 cm

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	AREA	CARGA	%ABS	ESFUERZO
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm2	kg		kg/cm2
24.5	9.5	22	17.5	9.335	4.94	5.384	94.09	9523	18.05	101.21

2. Identificación A5

Cubo 9.8 cm x 9.4 cm

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	AREA	CARGA	%ABS	ESFUERZO
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm2	kg		kg/cm2
24.5	10	22	17.5	10.01	4.96	5.396	92.12	9070	17.72	98.45

3. Identificación A6

Cubo 10.3 cm x 9.5 cm

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	AREA	CARGA	%ABS	ESFUERZO
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm2	kg		kg/cm2
24.5	10.1	22	17.5	10.105	5.19	5.662	97.85	10430	19.19	106.59

4. Identificación B2

Cubo 10 cm x 10.1 cm

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	AREA	CARGA	%ABS	ESFUERZO
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm2	kg		kg/cm2
24.5	10	22	17.5	9.345	4.62	4.998	101	8720	15.37	86.34

FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—  
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12  
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121  
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>



Continuación anexo 1.



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Nº 22714

O.T. No. 35735 y 35928 INFORME No. 168-M  
INTERESADO: FRANCISCO JAVIER ESTRADA QUINTANILLA  
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION: "USO DE MATERIAL RECICLADO DE TEREFTALATO DE POLIETILENO, PET, COMO AGREGADO FINO PARA MEZCLAS DE CONCRETO, PARA LA ELABORACION DE ADOQUINES".  
ASUNTO: ENSAYO DE FLEXION Y DESGASTE EN ADOQUINES  
FECHA: 30/05/2016

5. Identificación B5

Cubo 10.5 cm x 10.5 cm

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	AREA	CARGA	%ABS	ESFUERZO
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm2	kg		kg/cm2
24.5	9.8	22	17.5	9.335	4.2	4.586	110.3	8800	15.69	79.82

6. Identificación B7

Cubo 10.2 cm x 10 cm

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	AREA	CARGA	%ABS	ESFUERZO
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm2	kg		kg/cm2
24.5	10	22	17.5	8.99	4	4.388	102	4520	15.77	44.31

7. Identificación C3

Cubo 9.8 cm x 9.9 cm

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	AREA	CARGA	%ABS	ESFUERZO
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm2	kg		kg/cm2
24.5	9.8	22	17.5	7.64	3.18	3.772	97.02	4800	24.07	49.47

8. Identificación C6

Cubo 9.6 cm x 9.6 cm

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	AREA	CARGA	%ABS	ESFUERZO
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm2	kg		kg/cm2
24.5	10	22	17.5	7.645	2.98	3.361	92.16	3400	15.49	36.89



FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—  
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12  
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121  
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Continuación anexo 1.



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Nº 22715

O.T. No. 35735 y 35928 INFORME No. 168-M  
INTERESADO: FRANCISCO JAVIER ESTRADA QUINTANILLA  
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION: "USO DE MATERIAL RECICLADO DE TEREFTALATO DE POLIETILENO, PET, COMO AGREGADO FINO PARA MEZCLAS DE CONCRETO, PARA LA ELABORACION DE ADOQUINES".  
ASUNTO: ENSAYO DE FLEXION Y DESGASTE EN ADOQUINES  
FECHA: 30/05/2016

9. Identificación C8

Cubo 9.5 cm x 9.6 cm

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	AREA	CARGA	%ABS	ESFUERZO
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm2	kg		kg/cm2
24.5	9.5	22	17.6	7.14	3.9	4.43	91.2	2780	21.54	30.48

10. Identificación D3

Cubo 10.1 cm x 9.5 cm

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	AREA	CARGA	%ABS	ESFUERZO
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm2	kg		kg/cm2
24.5	9.5	22	17.5	7.015	2.98	3.372	95.95	5000	15.93	52.11

11. Identificación D4

Cubo 10 cm x 9.4 cm

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	AREA	CARGA	%ABS	ESFUERZO
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm2	kg		kg/cm2
24.5	9.7	22	17.5	6.965	3.22	3.652	94	3400	17.56	36.17

12. Identificación D8

Cubo 10 cm x 10 cm

LARGO	GROSOR	ANCHO	BASE	PESO NAT	PESO SEC	PESO HUM	AREA	CARGA	%ABS	ESFUERZO
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	cm2	kg		kg/cm2
24.5	9.6	22	17.5	7.03	2.46	3.894	100	2840	58.29	28.40



Continuación anexo 1.



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Nº 22716

O.T. No. 35735 y 35928 INFORME No. 168-M  
INTERESADO: FRANCISCO JAVIER ESTRADA QUINTANILLA  
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION: "USO DE MATERIAL RECICLADO DE  
TEREFTALATO DE POLIETILENO, PET, COMO AGREGADO FINO PARA  
MEZCLAS DE CONCRETO, PARA LA ELABORACION DE ADOQUINES".  
ASUNTO: ENSAYO DE FLEXION Y DESGASTE EN ADOQUINES  
FECHA: 30/05/2016

**Ensayos de Abrasión**

1. Identificación A1

Identificación	Inicial	Ensayado	Diferencia $\Delta$ desgaste
A1			
altura (cm)	7.000	6.572	0.429
Área (cm <sup>2</sup> )	48.50	48.50	0
volumen (cm <sup>3</sup> )	339.54	318.74	20.803

Tipo I Abrasión: 20 803 mm<sup>3</sup>

2. Identificación B7

Identificación	Inicial	Ensayado	Diferencia $\Delta$ desgaste
B7			
altura (cm)	6.784	6.521	0.262
Área (cm <sup>2</sup> )	45.51	45.51	0
volumen (cm <sup>3</sup> )	308.73	296.80	11.930

Tipo II y III Abrasión 11 930 mm<sup>3</sup>



3. Identificación C7

Identificación	Inicial	Ensayado	Diferencia $\Delta$ desgaste
C7			
altura (cm)	6.939	6.766	0.173
Área (cm <sup>2</sup> )	48.41	48.41	0
volumen (cm <sup>3</sup> )	335.95	327.56	8.394

Tipo II y III Abrasión 8 394 mm<sup>3</sup>

Continuación anexo 1.



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Nº 22717

O.T. No. 35735 y 35928 INFORME No. 168-M  
INTERESADO: FRANCISCO JAVIER ESTRADA QUINTANILLA  
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION: "USO DE MATERIAL RECICLADO DE  
TEREFTALATO DE POLIETILENO, PET, COMO AGREGADO FINO PARA  
MEZCLAS DE CONCRETO, PARA LA ELABORACION DE ADOQUINES".  
ASUNTO: ENSAYO DE FLEXION Y DESGASTE EN ADOQUINES  
FECHA: 30/05/2016

4. Identificación D1

Identificación	Inicial	Ensayado	Diferencia $\Delta$ desgaste
D1			
altura (cm)	6.786	6.525	0.261
Área (cm <sup>2</sup> )	50.04	50.04	0
volumen (cm <sup>3</sup> )	339.56	326.50	13.053

Tipo II y III Abrasión 13 053 mm<sup>3</sup>

Atentamente,

Ing. Pablo Christian De León Rodríguez  
Jefe Sección Metales y Productos Manufacturados



Vo.Bo.

Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
Director C.I.I.



/cbr

FACULTAD DE INGENIERIA —USAC—  
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12  
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121  
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: informe de resultados de ensayos a adoquines, CII, 2016.



## APÉNDICE

Apéndice 1. **Estado original de la maquina vibro compactadora donde se fabricaron los adoquines de la investigación**



Fuente: fotografía tomada por Francisco Estrada, 2016

**Apéndice 2. Estado restaurado de la maquina vibro compactadora utilizada para fabricar los adoquines de la investigación**



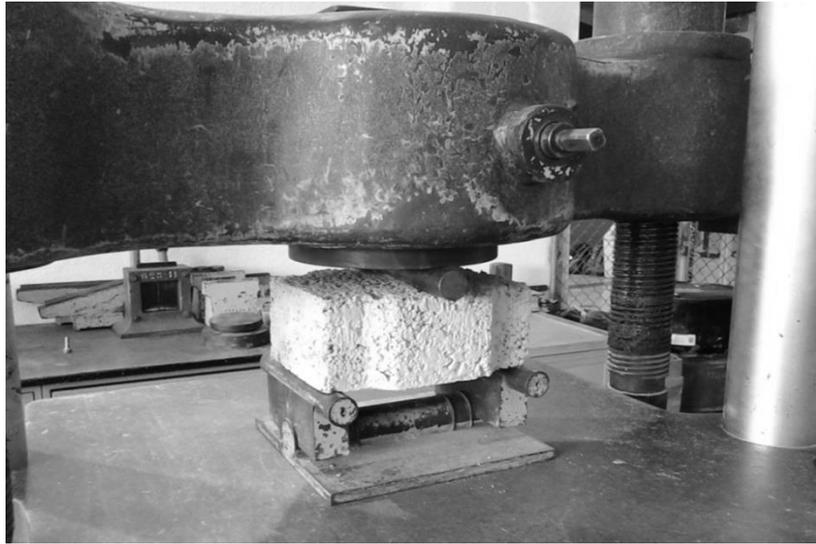
Fuente: fotografía tomada por Francisco Estrada, 2016.

**Apéndice 3. Adoquines de la investigación en fraguado**



Fuente: fotografía tomada por Francisco Estrada, 2016.

Apéndice 4. **Ensayo de flexión realizado a uno de los adoquines de la investigación**



Fuente: fotografía tomada por Francisco Estrada, 2016.

Apéndice 5. **Corte de los cubos para el ensayo de resistencia a la abrasión**



Fuente: fotografía tomada por Francisco Estrada, 2016.

**Apéndice 6. Cubos para ensayo de resistencia a abrasión**



Fuente: fotografía tomada por Francisco Estrada, 2016.

**Apéndice 7. Ensayo de resistencia a abrasión en proceso**



Fuente: fotografía tomada por Francisco Estrada, 2016.

Apéndice 8. **Muestras de adoquines luego de salir del horno en el proceso del ensayo de absorción**



Fuente: fotografía tomada por Francisco Estrada, 2016.

Apéndice 9. **Muestra de adoquín al salir del horno en el proceso del ensayo de absorción. Notar la desintegración de las partículas provocado por el efecto del calor en el material de PET**



Fuente: fotografía tomada por Francisco Estrada, 2016.

