



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

## ESTUDIO COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN MEZCLAS DE CONCRETO ELABORADAS CON MATERIALES DE RECICLAJE: PLÁSTICO Y LLANTAS

**Billy Josealberto Hernández Hernández**

Asesorado por el Ing. Oswaldo Romeo Escobar Álvarez

Guatemala, febrero de 2011

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESTUDIO COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN  
MEZCLAS DE CONCRETO ELABORADAS CON MATERIALES DE  
RECICLAJE: PLÁSTICO Y LLANTAS**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN**

**PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR**

**BILLY JOSEALBERTO HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ**

**ASESORADO POR EL ING. OSWALDO ROMEO ESCOBAR ALVAREZ  
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE**

**INGENIERO CIVIL**

**GUATEMALA, FEBRERO DE 2011**

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paíz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila
VOCAL IV	Br. Luis Pedro Ortíz de León
VOCAL V	P.A. José Alfredo Ortíz Herincx
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paíz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Joel Eduardo Guerrero Spínola
EXAMINADOR	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. José Gabriel Ordoñez Morales
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

### **ESTUDIO COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN MEZCLAS DE CONCRETO ELABORADAS CON MATERIALES DE RECICLAJE: PLÁSTICO Y LLANTAS.**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería civil, el 13 de abril de 2,010.



---

Billy Josealberto Hernández Hernández

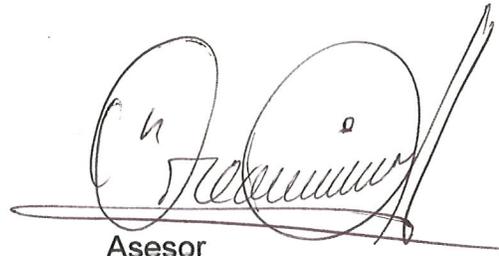
Guatemala, 28 de septiembre de 2010

Ingeniero  
Hugo Leonel Montenegro Franco  
Director de Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
USAC

Estimado Ingeniero Montenegro

Por este medio hago constar que he revisado el trabajo de graduación que tiene como título "ESTUDIO COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION EN MEZCLAS DE CONCRETO ELABORADAS CON MATERIALES DE RECICLAJE: PLASTICO Y LLANTAS", así como el artículo de trabajo de graduación respectivo, elaborados por el estudiante Billy Josealberto Hernández Hernández con número de carné 2005-11823. Habiendo cumplido con los requisitos y fines planteados, recomiendo su aprobación.

Atentamente,

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Oswaldo", written over a horizontal line. The signature is stylized and cursive.

Asesor  
Oswaldo Romeo Escobar Álvarez  
Ingeniero Civil

Guatemala, 28 de septiembre de 2010

Ingeniero  
José Gabriel Ordoñez Morales  
Coordinador del Área de Materiales y  
Construcciones Civiles  
Facultad de Ingeniería  
USAC

Estimado Ingeniero Ordoñez

Por este medio hago constar que he revisado el trabajo de graduación que tiene como título "ESTUDIO COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION EN MEZCLAS DE CONCRETO ELABORADAS CON MATERIALES DE RECICLAJE: PLASTICO Y LLANTAS", así como el artículo de trabajo de graduación respectivo, elaborados por el estudiante Billy Josealberto Hernández Hernández con número de carné 2005-11823. Habiendo cumplido con los requisitos y fines planteados, recomiendo su aprobación.

Atentamente,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Oswaldo Escobar', with a long horizontal stroke underneath.

Asesor  
Oswaldo Romeo Escobar Álvarez  
Ingeniero Civil



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
www.ingenieria-usac.edu.gt



Guatemala,  
18 de octubre de 2010

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

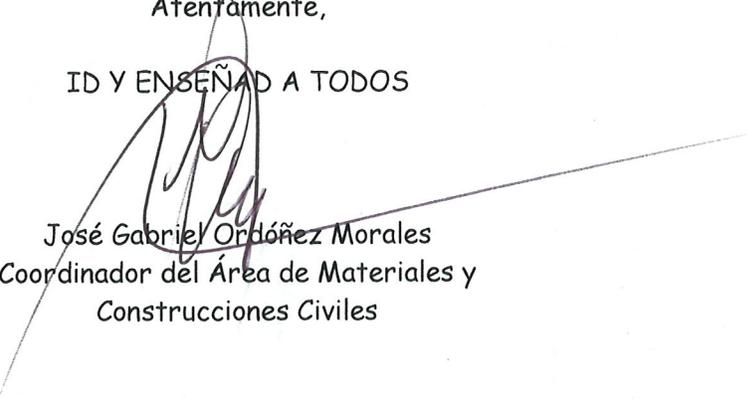
Estimado Ing. Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **ESTUDIO COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN MEZCLAS DE CONCRETO ELABORADAS CON MATERIALES DE RECICLAJE: PLASTICO Y LLANTAS**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Billy Josealberto Hernández Hernández quien contó con la asesoría del Ing. Oswaldo Romeo Escobar Álvarez.

Considero que el trabajo realizado por el estudiante Hernández Hernández, satisface los objetivos para los que fue planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

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



FACULTAD DE INGENIERIA  
AREA DE MATERIALES Y  
CONSTRUCCIONES CIVILES  
USAC

/bbdeb.

Más de **130** Años de Trabajo Académico y Mejora Continua

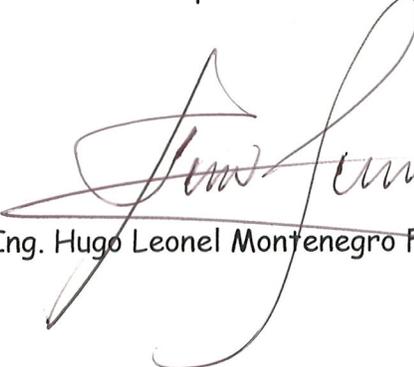




UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
www.ingenieria-usac.edu.gt



El Director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Oswaldo Romeo Escobar Álvarez y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles, Ing. José Gabriel Ordóñez Morales, al trabajo de graduación del estudiante Billy Josealberto Hernández Hernández, titulado ESTUDIO COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN MEZCLAS DE CONCRETO ELABORADAS CON MATERIALES DE RECICLAJE: PLÁSTICO Y LLANTAS da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

  
Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco

  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
DIRECTOR  
FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, febrero de 2011

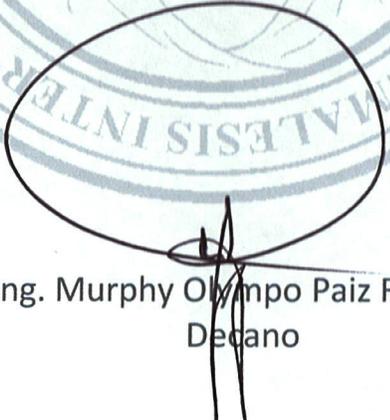
/bbdeb.



DTG. 034.2011

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: **ESTUDIO COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN MEZCLAS DE CONCRETO ELABORADAS CON MATERIALES DE RECICLAJE: PLÁSTICO Y LLANTAS**, presentado por el estudiante universitario **Billy Josealberto Hernández Hernández**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos  
Decano

Guatemala, 4 de febrero de 2011

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>DIOS</b>	El dueño de la sabiduría y la inteligencia, a quien se lo debo todo.
<b>MIS PADRES</b>	Elwin Hernández y Mirna Hernández, gracias por su paciencia, apoyo y comprensión, siempre les estaré en deuda.
<b>MIS HERMANOS</b>	Wilson y Marleny, me ayudaron siempre que lo necesité, gracias, los quiero mucho.
<b>MIS TÍAS</b>	Por su cariño y apoyo, han hecho tanto por mí, sin ustedes todo hubiera sido mucho más difícil.
<b>MIS ABUELOS</b>	Por sus consejos y su cariño, son un ejemplo a seguir.
<b>MIS SOBRINOS</b>	Por su cariño y los momentos de alegría que compartieron conmigo.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

**DIOS**

Por guardar mi camino siempre  
e iluminar mi entendimiento.

**LA FACULTAD DE INGENIERÍA  
DE LA UNIVERSIDAD DE SAN  
CARLOS DE GUATEMALA**

Por brindarme la formación  
académica y moral que me  
acompañará siempre.

**EL ING. OSWALDO ROMEO  
ESCOBAR**

Por su asesoría y colaboración  
en la realización de este trabajo.

**LINDSEY DANIELLE**

Por la motivación y el ánimo que me  
brindó durante los momentos  
difíciles.

**MIS AMIGOS**

Gracias por su amistad y su apoyo.

**EL CENTRO DE INVESTIGACIONES  
DE INGENIERÍA**

Por su colaboración en la  
realización de este estudio.



# ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>	V
<b>GLOSARIO</b>	IX
<b>RESUMEN</b>	XIII
<b>OBJETIVOS</b>	XV
<b>INTRODUCCIÓN</b>	XVII
<b>1. CONCRETO</b>	
1.1 Generalidades	1
1.2 Materiales constituyentes	3
1.2.1 Cemento	3
1.2.2 Agregado fino	5
1.2.2.1 Composición	6
1.2.2.2 Calidad	6
1.2.3 Agregado grueso	7
1.2.3.1 Composición	7
1.2.3.2 Calidad	8
1.2.4 Agua	9
1.2.4.1 Requisitos de calidad	10
1.3 Propiedades generales del concreto	11
1.3.1 Trabajabilidad	11
1.3.2 Peso unitario	12
1.3.3 Resistencia del concreto a fuerzas externas	12
<b>2. PLÁSTICO (PET)</b>	
2.1 Generalidades	15
2.2 Propiedades del PET	18

2.3	Problemas ambientales derivados de su mala disposición	19
2.4	Formas de reciclaje actuales	21
2.4.1	Reciclado en la fuente	21
2.4.2	Reciclado mecánico	21
2.4.3	Reciclado químico	21
2.5	Estadísticas de generación de este desecho	23
<b>3.</b>	<b>LLANTAS</b>	
3.1	Generalidades	25
3.2	Materiales constituyentes	25
3.3	Propiedades del material de las llantas	29
3.4	Problemas ambientales derivados de su mala disposición	30
3.5	Formas de Reciclaje Actuales	31
3.6	Estadísticas de Generación de Desechos derivados de las llantas	33
<b>4.</b>	<b>PARÁMETROS A ESTUDIAR Y NORMAS APLICABLES</b>	
4.1	Asentamiento	35
4.2	Resistencia a la compresión	37
<b>5.</b>	<b>MATERIA PRIMA, OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN</b>	
5.1	Materiales utilizados para la fabricación de la base de concreto	39
5.2	Materiales de reciclaje	40
5.2.1	Material plástico	40
5.2.2	Material de llantas	41
<b>6.</b>	<b>DESARROLLO EXPERIMENTAL</b>	
6.1	Diseño de las mezclas	43
6.2	Elaboración de las probetas para ensayo de compresión	44
6.2.1	Proporcionamiento y pesado de los materiales	44
6.2.2	Mezclado de los materiales	45
6.2.3	Moldeado de cilindros	47
6.2.4	Desencofrado	46
6.2.5	Curado	49

6.3	Procedimientos de ensayos	50
6.3.1	Ensayo de asentamiento (Slump)	50
6.3.2	Ensayo de compresión	54
6.4	Datos obtenidos	58
6.4.1	Datos del diseño de mezclas	58
6.4.2	Cantidades de materiales utilizadas	59
6.4.3	Datos obtenidos de los ensayos	60
6.4.3.1	Ensayo de asentamiento	61
6.4.3.2	Ensayo de resistencia a la compresión	61
<b>7.</b>	<b>RESULTADOS</b>	
7.1	Cálculos realizados	65
7.1.1	Cálculo de la resistencia a la compresión del concreto	65
7.1.2	Cálculo del peso específico grueso de las mezclas de concreto	66
7.1.3	Cálculo de las relaciones entre datos teóricos y datos reales	67
7.2	Resumen de resultados	69
7.3	Gráficas	73
<b>8.</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	
8.1	Ensayo de Asentamiento según la norma ASTM C-143	75
8.2	Ensayo de resistencia a compresión según la norma ASTM C-39	75
8.2.1	Comparación e interpretación de los resultados	75
8.2.2	Tipos de fallas en los especímenes ensayados	75
8.2.3	Efectos de los materiales sobre el concreto	78
	<b>CONCLUSIONES</b>	81
	<b>RECOMENDACIONES</b>	83
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	85
	<b>ANEXOS</b>	87



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1	Proceso de fabricación del cemento	4
2	Fórmula química del polietileno tereftalato	15
3	Proceso químico de fabricación del PET	16
4	Símbolo del polietileno tereftalato	16
5	Partes de una Llanta	28
6	Combustión masiva de llantas	31
7	Material de Plástico PET	41
8	Material de Llantas	42
9	Pesado de los materiales para la mezcla, en la balanza electrónica	45
10	Mezclado de los materiales en la concretera	46
11	Llenado y enrasado de las probetas	48
12	Desencofrado de probetas	49
13	Curado de las probetas	50
14	Ensayo de asentamiento, llenado del cono	52
15	Ensayo de asentamiento, apisonado de la mezcla	53
16	Ensayo de asentamiento, medición del asentamiento	53
17	Máquina marca RIEHLE	54
18	Medición de las probetas utilizando el Vernier	55
19	Pesado de las probetas	55
20	Nivelación de las probetas con el azufre	57
21	Realización del ensayo de compresión	58

22	Resistencia a compresión a los 28 días en los distintos tipos de mezclas, en comparación con la resistencia esperada.	73
23	Comportamiento en el tiempo de los distintos tipos de mezclas	74
24	Falla típica en la mezcla patrón	77
25	Falla en las mezclas con material de reciclaje.	78

## TABLAS

I	Porcentajes máximos de sustancias dañinas permitidas en el agregado fino	7
II	Porcentajes máximos de sustancias dañinas permitidas en el agregado grueso	8
III	Proporción Volumétrica de diseño de las mezclas	59
IV	Cantidad de materiales para la base de cada mezcla, dosificación volumétrica y por peso	59
V	Contenido de materiales de reciclaje en las mezclas	60
VI	Contenido de agua en las mezclas	60
VII	Resultados del ensayo de asentamiento	61
VIII	Datos obtenidos del ensayo a compresión en las probetas de 7 días de edad	62
IX	Datos obtenidos del ensayo a compresión en las probetas de 14 días de edad	62
X	Datos del ensayo a compresión en las probetas de 28 días de edad	63
XI	Resultados del ensayo a compresión en las probetas de 7 días de edad	69
XII	Resultados del ensayo a compresión en las probetas de 14 días de edad	70
XIII	Resultados del ensayo a compresión en las probetas de 28 días de edad	70
XIV	Relaciones de pesos específicos entre las mezclas	72



## GLOSARIO

- Aglomerantes:** Materiales que, en estado pastoso, tienen la propiedad de poderse moldear, de adherirse fácilmente a otros materiales, de unirlos entre sí, protegerlos, endurecerse y alcanzar resistencias mecánicas considerables.
- Álcalis:** Son óxidos, hidróxidos y carbonatos de los metales alcalinos. Actúan como bases fuertes y son muy hidrosolubles. De tacto jabonoso, pueden ser lo bastante corrosivos como para quemar la piel, al igual que los ácidos fuertes.
- Alcohólisis:** Rompimiento de una molécula debido a la acción de un alcohol,
- Aluvial:** Formación geológica de material detrítico transportado y depositado transitoria o permanentemente por una corriente de agua,
- Cantera:** Explotación minera, generalmente a cielo abierto, en la que se obtienen rocas industriales, ornamentales o áridos.
- Clinker:** Material que se forma tras calcinar caliza y arcilla a una temperatura que oscila entre 1350 y 1450 °C. se muele para fabricar el cemento portland
- Ftalatos:** Grupo de compuestos químicos principalmente empleados como plastificadores añadidos a los plásticos para incrementar su flexibilidad.

<b>Glicólisis:</b>	Secuencia de reacciones que convierte glucosa en pyruvate con la producción correspondiente de una cantidad relativamente pequeña de trifosfato de adenosina.
<b>Hidratación:</b>	Reacción en la que se produce la incorporación de agua a un compuesto.
<b>Hidrocarburos:</b>	Compuestos orgánicos formados únicamente por átomos de carbono e hidrógeno.
<b>Hidrólisis:</b>	Rompimiento de una molécula debido a la acción del agua
<b>Matriz cementante:</b>	Elemento compuesto por 2 o más materiales en el cual uno de ellos sirve como cementante o aglutinante
<b>Mica:</b>	Minerales pertenecientes a un grupo numeroso de silicatos de alúmina, hierro, calcio, magnesio y minerales alcalinos caracterizados por su fácil exfoliación en delgadas láminas flexibles, elásticas y muy brillantes,
<b>Polímero:</b>	Macromoléculas formadas por la unión de moléculas más pequeñas llamadas monómeros.
<b>Resinas:</b>	Sustancias que sufren un proceso de polimerización o secado dando lugar a productos sólidos siendo en primer lugar líquidas.
<b>Proceso solvolítico:</b>	Proceso en el cual mediante la adición de una sustancia diluyente se rompen los enlaces químicos de la sustancia a procesar, degradándola en componente más básicos.

**Sulfatos:**

Sales del ácido sulfúrico. En la naturaleza se encuentran en forma de yeso, o aljez.



## RESUMEN

El presente trabajo es un estudio de la resistencia a la compresión que alcanzaron mezclas de concreto, que contenían materiales de reciclaje, plástico de botella PET, y material de llantas. Comparando dichos resultados con los obtenidos en una mezcla de concreto tradicional.

Los materiales se procesaron, de manera que las partículas fueran lo suficientemente pequeñas para homogeneizarse con el resto de los componentes del concreto. Las concentraciones de dichos materiales, dentro del concreto, fueron las mismas, el 10% del volumen de la mezcla, con el objetivo de observar las diferencias en el comportamiento, en presencia de las mismas concentraciones, para realizar una comparación directa entre todas las mezclas. Los ensayos de asentamiento en el concreto fresco y de resistencia a la compresión en probetas cilíndricas, se llevaron a cabo bajos los lineamientos de las normas ASTM.

Los resultados de las pruebas pusieron en evidencia el hecho de que la adición de estos materiales de reciclaje, reducen el trabajo y la resistencia de las mezclas de concreto. En general, la mezcla adición con plástico PET, es más apta para ser usada eventualmente, ya que la reducción en la resistencia fue proporcional a la cantidad de plástico. El uso de las mezclas estudiadas se deberá limitar a elementos no estructurales.



# OBJETIVOS

## Generales

- 1 Determinar las características mecánicas a compresión que adquiere el concreto, al adicionarle materiales de reciclaje, en este caso, el plástico y las llantas. Asimismo, observar los cambios en el trabajo, factor que, de alguna manera, podría condicionar el uso de dichas mezclas.
- 2 Obtener beneficios tecnológicos, económicos y ambientales, por medio de los usos factibles del plástico y las llantas.

## Específicos

- 1 Evitar la degradación del medio ambiente, reduciendo la contaminación, producto de la incineración y mala disposición de este tipo de desechos (plástico y llantas).
- 2 Delimitar los posibles usos de cada tipo de concreto, si existieran, tomando en cuenta sus características especiales.

- 3 Evitar los botaderos de llantas y/o botellas plásticas a orillas de carreteras y en terrenos baldíos que forman basureros clandestinos, proporcionando una forma adecuada de reutilización de estos desechos.

## INTRODUCCIÓN

El mundo presenta un crecimiento desmedido y la actividad humana ha llegado a esparcirse indiscriminadamente en la superficie del planeta. Esta situación ha incrementado el consumo de productos y de la materia prima para su fabricación, incrementando así los desechos producidos una vez que éstos ya no son útiles. La contaminación generada ha afectado gravemente el medio ambiente, poniendo en riesgo la salud y bienestar de las personas.

En su mayoría, los desechos presentan dificultades en el momento de disponer de ellos, los productos sintéticos derivados del petróleo son, por lo general, problemáticos en este sentido, con periodos de descomposición de cientos, miles y hasta millones de años. Una medida paliativa y poco efectiva es enterrar estos desechos y la quema parecía ser la solución ideal, sin embargo, estudios recientes han revelado que contaminan la atmósfera, en consecuencia, modifican el clima.

Es, entonces, necesario descubrir nuevas formas de disponer de estos desechos, logrando, no sólo deshacerse de ellos, para evitar los problemas que tienen asociados, sino también reutilizarlos, de manera que se conviertan en fuentes de materia prima para la industria, igualando o mejorando las propiedades de los materiales no reciclados.

En este orden de ideas, surge la inquietud de darle uso a las llantas y al plástico, los cuales pertenecen al grupo de materiales derivados del petróleo que ocasionan molestias y riesgo para el medio ambiente y la salud de la población.

El concreto es un material versátil, que puede encontrarse en todo tipo de construcciones y gran parte del avance humano se debe a él. Sin embargo, este mismo avance ha creado nuevas exigencias hacia el concreto, impulsando así investigaciones con el propósito de hallar técnicas y tecnologías que permitan mezclas de concreto más adecuadas, eficientes y económicas.

El presente trabajo de investigación espera alcanzar beneficios tecnológicos y ambientales, de manera que se consiga una integración de los desechos con el concreto para crear nuevos tipos de concreto, con propiedades similares al concreto existente, pero con ventajas que promuevan su uso bajo condiciones especiales.

# 1. CONCRETO

El concreto es un material pétreo, durable y resistente; pero, dado que se trabaja en su forma líquida, puede adquirir prácticamente cualquier forma. Esta combinación de características es la razón principal por la que es un material de construcción tan popular, empleado para todo tipo de construcciones.

## 1.1 Generalidades

Ya sea que adquiera la forma de un camino de entrada amplio hacia una casa moderna, un paso vehicular semicircular frente a una residencia, o una modesta entrada delantera, el concreto proporciona solidez y permanencia a los lugares que sirven para vivienda o para tránsito de personas o vehículos. En la forma de caminos y entradas, el concreto conduce a las personas hacia su hogar, proporcionando un sendero confortable hacia la puerta. Además de servir a las necesidades diarias en escalones exteriores, entradas y caminos, el concreto también es parte del tiempo libre, al proporcionar la superficie adecuada para un patio o superficie para piezas.

El concreto de uso común, o convencional, se produce mediante la mezcla de tres componentes esenciales: cemento, agua y agregados, a los cuales, eventualmente, se incorpora un cuarto componente que, genéricamente, se designa como aditivo.

Al mezclar estos componentes y producir lo que se conoce como una “revoltura de concreto”, se introduce de manera simultánea un quinto participante: el aire. La mezcla íntima de los componentes del concreto convencional produce una masa plástica que puede ser moldeada y compactada con relativa facilidad; pero gradualmente pierde esta característica hasta que al cabo de algunas horas se torna rígida y comienza a adquirir el aspecto, comportamiento y propiedades de un cuerpo sólido, para convertirse finalmente en el material mecánicamente resistente que es el concreto endurecido.

La representación común del concreto convencional en estado fresco, lo identifica como un conjunto de fragmentos de roca, globalmente definidos como agregados, dispersos en una matriz viscosa constituida por una pasta de cemento de consistencia plástica. Esto significa que en una mezcla así hay muy poco o ningún contacto entre las partículas de los agregados, característica que tiende a permanecer en el concreto ya endurecido. Consecuentemente con ello, el comportamiento mecánico de este material y su durabilidad en servicio dependen de tres aspectos básicos:

1. Las características, composición y propiedades de la pasta de cemento, o matriz cementante, endurecida.
2. La calidad propia de los agregados, en el sentido más amplio.
3. La afinidad de la matriz cementante con los agregados y su capacidad para trabajar en conjunto.

En el primer aspecto debe contemplarse la selección de un cementante apropiado, el empleo de una relación agua/cemento conveniente y el uso eventual de un aditivo necesario, con todo lo cual debe resultar potencialmente asegurada la calidad de la matriz cementante. De la esmerada atención a estos tres aspectos básicos, depende sustancialmente la capacidad potencial del concreto, como material de construcción, para responder adecuadamente a las acciones resultantes de las condiciones en que debe prestar servicio.

Pero esto, que sólo representa la previsión de emplear el material potencialmente adecuado, no basta para obtener estructuras resistentes y durables, pues requiere conjugarse con el cumplimiento de previsiones igualmente eficaces en cuanto al diseño, especificación, construcción y mantenimiento de las propias estructuras.

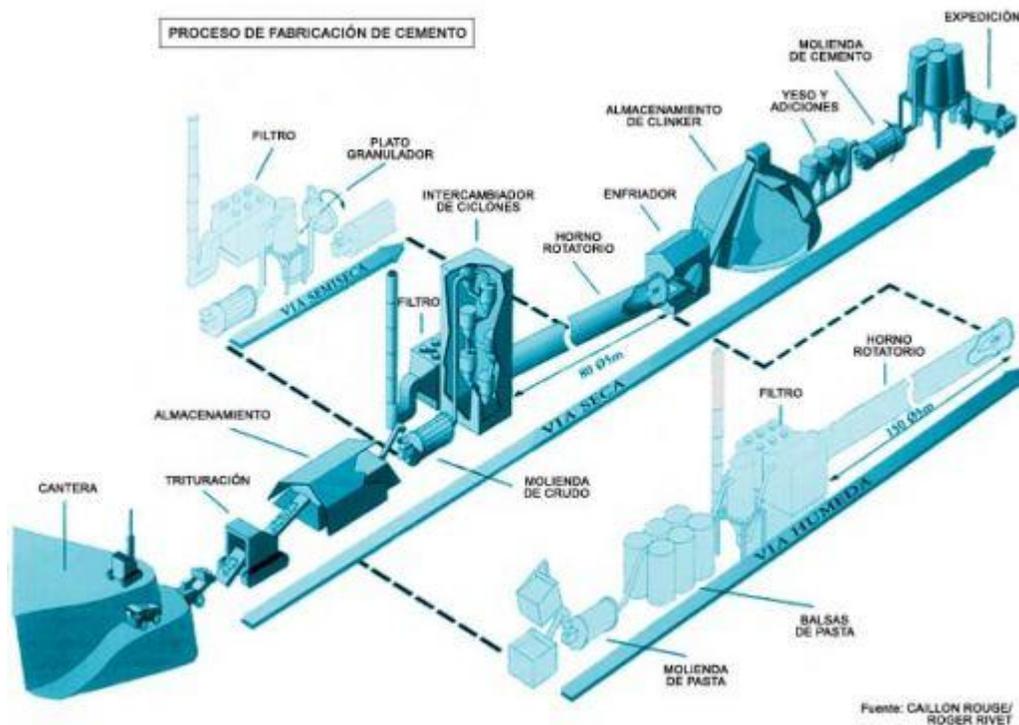
## **1.2 Materiales constituyentes**

### **1.2.1 Cemento**

En general, se denomina cemento a un conglomerante hidráulico que, mezclado con agregados pétreos (árido grueso o grava, más árido fino o arena) y agua, crea una mezcla uniforme, maleable y plástica que fragua y se endurece al reaccionar con el agua, adquiriendo consistencia pétreo, denominado concreto. Su uso está muy generalizado en construcción e ingeniería civil y siendo su principal función la de aglutinante.

El cemento Portland es un aglomerante plástico hidráulico, resultado de mezclar piedra caliza y esquistos, la cual es triturada y luego molida en un molino de bolas. Esta mezcla se cuece en hornos, a una temperatura de 1400°C a 1600°C, obteniéndose un material gris oscuro llamado clinker. Se admite la adición de otros productos siempre que su inclusión no afecte las propiedades del cemento resultante. Todos los productos adicionales deben ser pulverizados conjuntamente con el clinker. Cuando el cemento Portland es mezclado con el agua, se obtiene un producto de características plásticas con propiedades adherentes que solidifica en algunas horas y endurece progresivamente durante un período de varias semanas hasta adquirir su *resistencia característica*.

Figura 1: **Proceso de fabricación del cemento**



Fuente: <http://matdeconstruccion.wordpress.com/page/3/>

### Tipos de cemento:

- Tipo I: De uso general, para concreto de uso normal en todo tipo de construcciones, en condiciones normales.
- Tipo II: Posee una moderada resistencia a los sulfatos, para uso en exposición a suelos y aguas subterráneas que tienen un bajo contenido de sulfatos.
- Tipo III: Posee una alta resistencia inicial, utilizado en condiciones en que se requiere resistencia a edades tempranas y en lugares fríos.
- Tipo IV: Bajo calor de Hidratación, se usa cuando el calor durante el proceso de hidratación debe ser mínimo, como en construcción de presas donde se colocan grandes volúmenes de concreto.
- Tipo V: Alta resistencia a sulfatos, se usa en un concreto que estará en contacto con altas concentraciones de sulfatos, como tuberías de aguas residuales, obras expuestas al agua del mar, al ambiente marino o a suelos y aguas con alto contenido de sulfatos.

### **1.2.2 Agregado fino**

El agregado fino, más comúnmente llamado arena, constituye la mayor parte del porcentaje en peso del concreto. Este porcentaje puede llegar a superar el 60% del peso del concreto fraguado y endurecido. La adecuación de un árido para la fabricación de concreto debe cumplir un conjunto de requisitos usualmente recopilados en normas como, las de la ASTM o las normas ASCE/SEI, etc. Dichos requisitos se refieren normalmente a la composición química, la granulometría, los coeficientes de forma y el tamaño.

### **1.2.2.1 Composición**

El agregado fino consiste en arena natural proveniente de canteras aluviales o de arena producida artificialmente mediante procesos de trituración. La forma de las partículas deberá ser generalmente cúbica o esférica y razonablemente libre de partículas delgadas, planas o alargadas. La arena natural estará constituida por fragmentos de roca limpios, duros, compactos y durables.

En la producción artificial del agregado fino es muy importante no utilizar rocas que se quiebren en partículas laminares, planas o alargadas, independientemente del equipo de procesamiento empleado.

### **1.2.2.2 Calidad**

En general, el agregado fino o arena deberá cumplir con los requisitos establecidos en la norma ASTM C-33, es decir, no deberá contener cantidades dañinas de arcilla, limo, álcalis, mica, materiales orgánicos y otras sustancias perjudiciales.

El máximo porcentaje en peso de sustancias dañinas no deberá exceder de los valores siguientes, expresados como un porcentaje del peso:

Tabla I: **Porcentajes máximos de sustancias dañinas permitidas en el agregado fino**

<b>Sustancia</b>	<b>Norma</b>	<b>Límite máximo (%)</b>
Material que pasa por el tamiz n° 200	(ASTM C 117)	3%
Materiales ligeros	(ASTM C 123)	1%
Grumos de arcilla	(ASTM C 142)	1%
Total de otras sustancias dañinas (como álcalis, mica, limo)	-	2%
Pérdida por meteorización	(ASTM C 88, método Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	10%

Fuente: **Elaboración propia**

### **1.2.3 Agregado grueso**

El agregado grueso o grava es uno de los principales componentes del concreto, debido a esto su buena calidad es de suma importancia para garantizar buenos resultados en la preparación de estructuras de concreto.

#### **1.2.3.1 Composición**

El agregado grueso está formado por roca o grava triturada obtenida de fuentes previamente seleccionadas y analizadas en laboratorio, para certificar su calidad. El tamaño mínimo será de 4.8 mm.

El agregado grueso debe ser duro, resistente, limpio y sin recubrimiento de materiales extraños o de polvo, los cuales, en caso de presentarse, deberán ser eliminados mediante un procedimiento adecuado, como por ejemplo el lavado. La forma de las partículas más pequeñas del agregado grueso de roca o grava triturada deberá ser generalmente cúbica y deberá estar razonablemente libre de partículas delgadas, planas o alargadas en todos los tamaños.

### 1.2.3.2 Calidad

En general, el agregado grueso deberá estar de acuerdo con la norma ASTM C 33. El uso de esta norma está sujeto al país en el cual se aplique la misma, ya que las especificaciones de esta varían de acuerdo con la región o país. Los porcentajes de sustancias dañinas en cada fracción del agregado grueso, en el momento de la descarga en la planta de concreto, no deberán superar los siguientes límites:

Tabla II: **Porcentajes máximos de sustancias dañinas permitidas en el agregado grueso**

Sustancia	Norma	Límite máximo (%)
Material que pasa por el tamiz No. 200	(ASTM C 117)	Máx. 0.5
Materiales ligeros	(ASTM C 123)	Máx. 1
Grumos de arcilla	(ASTM C 142)	Máx. 0.5
Otras sustancias dañinas	-	Máx. 1
Pérdida por intemperismo	(ASTM C 88, método Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	Máx. 12
Pérdida por abrasión en la máquina de Los Ángeles	ASTM C 131 y C 535	Máx. 40

Fuente: **Elaboración propia**

#### **1.2.4 Agua**

En relación con su empleo en el concreto, el agua tiene dos diferentes aplicaciones: como ingrediente en la elaboración de las mezclas y como medio de curado de las estructuras recién construidas. Aunque en ambas aplicaciones las características del agua tienen efectos de variable importancia sobre el concreto, es recomendable emplear de una sola calidad en los casos. Normalmente, en las especificaciones para concreto se hace referencia en primer plano a los requerimientos que debe cumplir el agua para la elaboración del concreto, porque sus efectos son más importantes, y después se suele indicar que el agua que se utilice para el curado debe tener el mismo origen, o similar, para evitar la subestimación de esta segunda aplicación y se utilice agua para curado con características deficientes.

Cuando se utiliza como componente del concreto convencional, el agua normalmente puede llegar a representar aproximadamente entre 10% y 25% del volumen del concreto recién mezclado, aunque esta cifra depende del tamaño máximo de agregado a utilizar y del asentamiento que se requiera.

Esto le concede una influencia importante a la calidad del agua de mezclado en el comportamiento y las propiedades futuras del concreto, ya que cualquier sustancia dañina que se encuentre en ella, aún en bajas proporciones, puede tener efectos negativos de consideración en el concreto.

Una muy común práctica consiste en utilizar agua potable para fabricar concreto sin previa verificación, bajo la suposición que toda agua que es potable también es adecuada para la elaboración del concreto; sin embargo, en ocasiones esta presunción no es válida, puesto que hay aguas potables con contenido de citratos o con pequeñas cantidades de azúcares con motivo de mejorar su sabor, lo que no afecta su potabilidad pero puede hacerlas inadecuadas para la fabricación de concreto. Así mismo, el caso contrario pudiera ser más conveniente, es decir, que el agua para la elaboración del concreto no necesariamente requiere ser potable, aunque sí debe satisfacer determinados requisitos mínimos de calidad de acuerdo con las normas establecidas.

#### **1.2.4.1 Requisitos de calidad**

Los requisitos de calidad para agua de mezclado de concreto no tienen ninguna relación con el aspecto bacteriológico, sino que se limitan a definir características físico-químicas y sus efectos sobre el comportamiento y las propiedades del concreto.

**Características físico-químicas:** Cuando se trata de las características físico-químicas del agua para concreto, no hay un consenso general en cuanto a las limitaciones que deben imponerse ante las sustancias e impurezas cuya presencia es muy frecuente, como puede ser el caso de algunas sales inorgánicas (cloruros, sulfatos), sólidos en suspensión, materia orgánica, dióxido de carbono disuelto, etc.

Sin embargo, en lo que sí parece haber acuerdo es que no debe tolerarse la presencia de sustancias que son francamente dañinas, como por ejemplo grasas, aceites, azúcares y ácidos. Si el agua no proviene de una fuente de agua potable, se debe determinar su aptitud para su uso en concreto mediante los requisitos físico-químicos contenidos en las normas internacionales especialmente para aguas no potables. Para el caso específico de la fabricación de elementos de concreto preesforzado, hay requisitos que son más estrictos en cuanto a los límites tolerables de ciertas sales que pueden afectar al concreto y al acero de preesfuerzo, lo cual también se contempla en normas.

### **1.3 Propiedades generales del concreto**

#### **1.3.1 Trabajabilidad**

Se denomina así a la facilidad de colocar, consolidar y acabar al concreto recién mezclado. El concreto debe ser trabajable pero no se debe permitir que se segregue excesivamente. El sangrado es la migración del agua hacia la superficie superior del concreto recién mezclado producto del asentamiento de los materiales sólidos (cemento, arena y piedra) dentro de la masa. Este asentamiento es consecuencia del efecto combinado de la vibración y de la gravedad. El sangrado excesivo produce un aumento en la relación Agua/Cemento cerca de la superficie superior, pudiendo provocarse como resultado una capa superior débil de baja durabilidad, especialmente si se llevan a cabo las actividades de acabado mientras está presente el agua de sangrado.

### **1.3.2 Peso unitario**

El peso unitario, es decir el peso que tiene un volumen determinado, tiene gran importancia al momento de diseñar una estructura, pues es éste el que determinará el peso final de la estructura. En el caso del concreto de uso convencional (para pavimentos, edificios y en otras estructuras), se estima que tiene un peso unitario en el rango de 2,240 y 2,400 kg/m<sup>3</sup>. El peso unitario del concreto puede variar, dependiendo de las cantidades y de la densidad relativa de los agregados, así como de la cantidad del aire contenido (atrapado o incluido intencionalmente), y de los contenidos de agua y de cemento, los que a su vez se ven influenciados por el tamaño máximo del agregado a utilizar. Para el diseño de estructuras de concreto, generalmente se supone que la combinación del concreto convencional y de las barras de refuerzo (concreto reforzado), tiene un peso unitario de 2400 kg/m<sup>3</sup>.

### **1.3.3 Resistencia del concreto a fuerzas externas**

Como material estructural, estas características son generalmente las que determinan su aptitud para el uso que se le desee dar. Los principales factores que afectan la resistencia son la relación Agua/Cemento y la edad, o el grado al que haya progresado la hidratación. La resistencia a la compresión se puede definir como la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto o de mortero a carga axial compresiva. Generalmente se expresa en libras por pulgada cuadrada (PSI) o kilogramos por centímetro cuadrado (Kg/cm<sup>2</sup>), a una edad de 28 días se le designe con el símbolo  $f'_c$ .

La resistencia a la compresión del concreto es su propiedad física fundamental, y es empleada en los cálculos para diseño estructuras fabricadas de este material. El concreto de uso general tiene una resistencia a la compresión entre 210 y 350 kg/cm<sup>2</sup>. El concreto de alta resistencia tiene una resistencia a la compresión de por lo menos 420 kg/cm<sup>2</sup>. Resistencias de 1,400 kg/cm<sup>2</sup> se han llegado a utilizar en aplicaciones de construcciones especiales.

La resistencia a la flexión del concreto generalmente es utilizada en el diseño de pavimentos y otras losas sobre el terreno. La resistencia a la compresión se puede utilizar como índice de la resistencia a la flexión, una vez que se halla establecido entre ellas la relación empírica correspondiente a los materiales y el tamaño del elemento en cuestión. La resistencia a la flexión, también llamada modulo de ruptura, para un concreto de peso normal se puede aproximar a 1.99 a 2.65 veces el valor de la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión. El valor de la resistencia a la tensión del concreto se estima en un rango de 8% a 12% de su resistencia a la compresión y a menudo entre 1.33 y 1.99 veces la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión.

La resistencia a la torsión para el concreto está íntimamente relacionada con el modulo de ruptura y con las dimensiones que tenga el elemento de concreto. La resistencia al esfuerzo cortante en el concreto puede variar desde el 35% al 80% de la resistencia a la compresión. El modulo de elasticidad, representado por medio del símbolo E, se define como una relación del esfuerzo normal a la deformación correspondiente ( $\sigma/\epsilon$ ) para esfuerzos de tensión o de compresión que se encuentren por debajo del límite de proporcionalidad de un material.

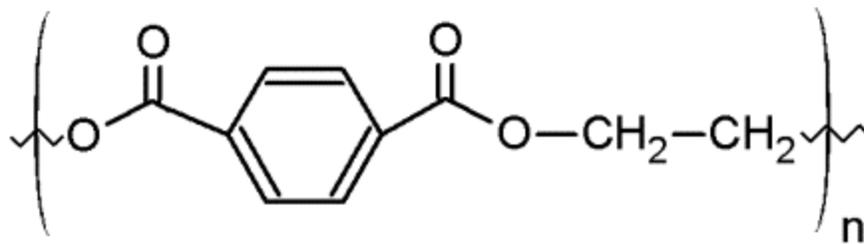
Para concretos de peso normal, E fluctúa entre 140,600 y 422,000 kg/cm<sup>2</sup>, y se puede aproximar como 15,100 veces el valor de la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión.

## 2. PLÁSTICO (PET)

### 2.1 Generalidades

El Plástico de denominación Polietileno Tereftalato (PET) es un polímero plástico, lineal, con alto grado de cristalinidad y de comportamiento termoplástico; caracterizado por una alta pureza, alta resistencia y tenacidad resistente al desgaste, dimensionalmente estable, resistente a los químicos y con buenas propiedades dieléctricas; tiene una baja velocidad de cristalización y puede encontrarse en estado amorfo-transparente o cristalino. De acuerdo a su orientación presenta propiedades de transparencia y resistencia química. Su fórmula se ilustra en la siguiente figura:

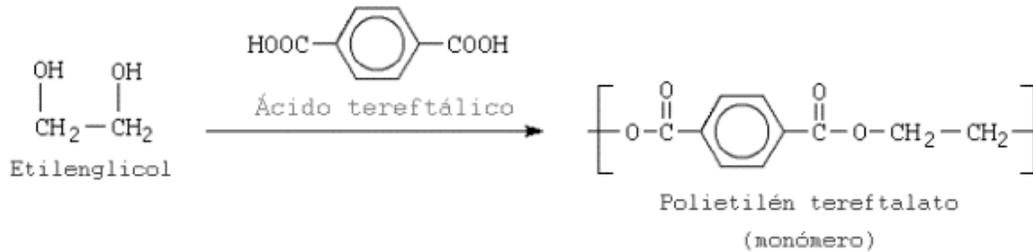
Figura 2: **Formula química del polietileno tereftalato**



Fuente: <http://www.quiminet.com/pr2/botellas%2Bpet.htm>

El PET se obtiene mediante la condensación del etilenglicol y el ácido tereftálico, el cual asume el papel primario en las fibras y materiales de moldeo.

Figura 3: **Proceso químico de fabricación del PET**



Fuente: <http://www.quiminet.com/pr2/botellas%2Bpet.htm>

El PET es un plástico de alta calidad que se identifica con el número uno, o las siglas PET, rodeado por tres flechas en el fondo de los envases fabricados con este material, según sistema de identificación SPI.

Figura 4: **Símbolo del polietileno tereftalato**



Fuente: <http://www.quiminet.com/pr2/botellas%2Bpet.htm>

El PET tiene una temperatura de transición vítrea baja (temperatura a la cual un polímero amorfo se ablanda). Esto ocasiona que los productos fabricados con dicho material no puedan calentarse por encima de dicha temperatura (por ejemplo, las botellas fabricadas con PET no pueden calentarse para su esterilización y posterior reutilización).

Entre algunas de las aplicaciones que tiene el PET, se encuentran:

- Se utiliza para envases de:
  - Bebidas carbónicas
  - Aguas minerales
  - Aceite
  - Jugos
  - Infusiones
  - Vinos y bebidas alcohólicas
  - Detergentes y productos de limpieza
  - Productos cosméticos
  - Salsas y otros alimentos
  - Productos químicos y lubricantes
  - Productos para tratamientos agrícolas
  
- Películas
  - Contenedores alimentarios
  - Cintas de audio/video
  - Fotografía
  - Aplicaciones eléctricas
  - Electrónicas
  - Embalajes especiales
  - De Rayos X
  
- Otros usos:
  - Tubos
  - Perfiles

Marcos  
Paredes  
Construcción  
Piezas inyectadas  
Fibras Textiles

## 2.2 Propiedades del PET

Las propiedades físicas del PET y su capacidad para cumplir diversas especificaciones técnicas han sido las razones por las que el material ha alcanzado un desarrollo relevante en la producción de fibras textiles y en la producción de una gran diversidad de envases, especialmente en la producción de botellas, bandejas, flejes y láminas. Entre las características más importantes que presenta el PET, se encuentran:

- Alta transparencia, aunque admite cargas de colorantes.
- Alta resistencia al desgaste y corrosión.
- Muy buen coeficiente de deslizamiento.
- Buena resistencia química y térmica.
- Muy buena barrera a CO<sub>2</sub>, aceptable barrera a O<sub>2</sub> y humedad.
- Compatible con otros materiales barrera que mejoran en su conjunto la calidad barrera de los envases y por lo tanto permiten su uso en mercados específicos.
- Totalmente Reciclable.
- Aprobado para su uso en productos que deban estar en contacto con productos alimentarios.
- Buen comportamiento frente a esfuerzos permanentes
- Muy buena barrera a CO<sub>2</sub>, aceptable barrera a O<sub>2</sub> y humedad.

- Viscosidad intrínseca: La VI (Viscosidad Intrínseca) del material es dependiente de la longitud de su cadena polimérica. Entre más larga la cadena polimérica, más rígido es el material y por lo tanto más alta la VI.
- Muy ligero, en relación a su resistencia.
- Alto grado de transparencia y brillo, que conserva el sabor y el aroma de los alimentos.

Además de acuerdo con pruebas realizadas utilizando las normas ASTM, el plástico PET presenta una resistencia a la compresión de 80 MPa (815 kg/cm<sup>2</sup>), y un modulo de elasticidad a compresión de 1 GPa (10193 kg/cm<sup>2</sup>), en cuanto a la tensión, su resistencia es de 55 MPa (560 kg/cm<sup>2</sup>) y su modulo de elasticidad a tensión de 2.7 GPa (27522 kg/cm<sup>2</sup>).

### **2.3 Problemas ambientales derivados de su mala disposición**

Hace 30 años el planeta viene acumulando 1,000 millones de objetos de plástico y la naturaleza no sabe ahora qué hacer con ellos. Cada objeto de este material dura hasta 500 años en desintegrarse y por eso, mientras tanto, el plástico convive con personas, animales y plantas y su impacto ya es evidente incluso en el fondo de los océanos. De hecho, un estudio británico detectó en 2006 restos de las bolsas plásticas en la arena del desierto y también en peces para el consumo. La contaminación por plástico es una de las más significativas en la actualidad. Se calcula que se producen cerca de 150 bolsas de plástico por persona cada año. Estudios recientes sugieren que la mayoría de productos plásticos generan efectos negativos en la salud de las personas.

## **Posible toxicidad del PET**

Un artículo publicado en la revista Environmental Health Perspectives en noviembre de 2009, presentó evidencia que el PET podría presentar di ruptores endocrinos bajo condiciones de uso común, debido a ciertas sustancias utilizadas en su fabricación; dichas sustancias, pueden ser introducidas a cualquier fluido que se encuentre en contacto con el plástico PET. Los posibles mecanismos incluyen absorción de ftalatos así como absorción de antimonio.

El riesgo de esta absorción parece incrementarse en función de la temperatura de almacenamiento y el tiempo de almacenamiento. Aunque los estudios realizados por algunas firmas indican que no son superan los límites máximos para el consumo humano, es necesario considerar que estas mismas cantidades, si podrían resultar tóxicas para otros organismos.

Resulta necesario entonces imaginar el posible daño que puede ser ocasionado a la naturaleza cuando existen grandes concentraciones de este material, podría entonces ocurrir que este tipo de contaminación fuese filtrada al subsuelo por el agua de lluvia, poniendo en riesgo así no solo a los organismos que viven en áreas aledañas a esta contaminación, sino también a todo aquel que entre en contacto con el agua proveniente de los acuíferos afectados por esta contaminación.

## **2.4 Formas de reciclaje actuales**

### **2.4.1 Reciclado en la fuente**

Uno de los problemas es que el énfasis debe ponerse en cómo generar cada vez menos residuos, de cualquier índole, especialmente residuos plásticos. La reducción en la fuente se refiere directamente al diseño y a la etapa productiva de los productos, principalmente envases, antes de ser consumidos. Es una manera de concebir los productos con un nuevo criterio ambiental; generar menos residuos

### **2.4.2 Reciclado mecánico**

El reciclado mecánico es un proceso físico mediante el cual el plástico post-consumo o el industrial (scrap) es recuperado, permitiendo su posterior utilización.

### **2.4.3 Reciclado químico**

Se trata de diferentes procesos mediante los cuales las moléculas de los polímeros son rotas, dando origen nuevamente a materia prima básica que puede ser utilizada para fabricar nuevos plásticos. Principales procesos existentes:

**Pirolisis:** Es el rompimiento de las moléculas por calentamiento en el vacío. Este proceso genera hidrocarburos líquidos o sólidos que pueden ser luego procesados en refinerías.

**Hidrogenación:** En este caso los plásticos son tratados con hidrógeno y calor. Las cadenas poliméricas son rotas y convertidas en un petróleo sintético que puede ser utilizado en refinerías y plantas químicas.

**Gasificación:** Los plásticos son calentados con aire o con oxígeno. Así se obtienen los siguientes gases de síntesis: monóxido de carbono e hidrógeno, que pueden ser utilizados para la producción de metanol o amoníaco o incluso como agentes para la producción de acero en hornos de venteo.

**Quimiólisis:** Este proceso se aplica a poliésteres, poliuretanos, poliacetales y poliamidas. Requiere altas cantidades separadas por tipo de resinas. Consiste en la aplicación de procesos solvolíticos como hidrólisis, glicólisis o alcoholólisis para reciclarlos y transformarlos nuevamente en sus monómeros básicos para la repolimerización en nuevos plásticos.

**Metanólisis:** Consiste en la aplicación de metanol en el PET. Este poliéster (el PET), es descompuesto en sus moléculas básicas, incluido el dimetiltereftalato y el etilenglicol, los cuales pueden ser luego repolimerizados para producir resina virgen. Varios productores de polietileno tereftalato están intentando de desarrollar este proceso para utilizarlo en las botellas de bebidas carbonadas.

Las experiencias llevadas a cabo por algunas empresas han demostrado que los monómeros resultantes del reciclado químico son lo suficientemente puros para ser reutilizados en la fabricación de nuevas botellas de PET.

## **2.5 Estadísticas de generación de este desecho**

Existe gran deficiencia en cuanto al registro de las estadísticas de este tipo, en nuestro país existe gran indiferencia en el manejo de este tipo de cifras, por lo que resulta virtualmente imposible tener certeza en la cantidad de desechos generados. Sin embargo, se sabe que anualmente se distribuyen aproximadamente 1 millón de litros de bebidas gaseosas, lo que indicaría que circulan casi 2 millones de embases de plástico PET, por lo que podemos deducir la magnitud de este problema. Debido a que existe aún mayor indiferencia en cuanto a la protección del medio ambiente, tanta contaminación podría causar una catástrofe ambiental.



## **3. LLANTAS**

### **3.1 Generalidades**

Sobre este material se debe resaltar que, aunque muchas personas creen que una llanta es un pedazo de caucho puesto sobre una capa de lona, esta explicación es demasiado simple. El compuesto de caucho del que se fabrican las llantas es una mezcla que incluye muchos insumos. Se utilizan tanto cauchos sintéticos como cauchos naturales. Podría pensarse un momento en el trabajo que una llanta tiene que realizar. Debe soportar pesadas cargas y tener la suficiente flexibilidad para resistir continuas deformaciones. Debe estar apta para resistir la dañina acción de: grasas, aceites, oxígeno y luz solar, que son enemigos principales del caucho; debe aportar seguridad al ser utilizada, al mismo tiempo, rendir un buen kilometraje. Con el fin de lograr todas estas características, muchos ingredientes deben ser mezclados con el caucho para modificarlo y hacer de él un producto útil y eficaz.

### **3.2 Materiales constituyentes**

Entre los ingredientes más usados en la fabricación de las llantas, tenemos:

- Negro de humo:

El negro de humo es un tipo de negro de carbón que se produce por la combustión incompleta de combustibles ricos en compuestos aromáticos que se queman en recipientes planos. Se caracteriza por una amplia distribución de tamaños de partícula (hasta 100 nm). El negro de carbón es una forma de carbono amorfo con una relación superficie-volumen extremadamente alta y que como tal es uno de los primeros nano materiales ampliamente usados. El negro de carbón se usa a menudo como pigmento y como refuerzo en productos de goma y plástico. El uso más común (70%) del negro de carbón es como pigmento y base de refuerzo en neumáticos para automóviles ya que añade consistencia y dureza. El negro de carbón también ayuda a disipar el calor de las zonas de la huella y el cinturón de la llanta, reduciendo el daño térmico e incrementando la vida de la goma.

- Azufre

Sirve para vulcanizar o "curar" el caucho y convertirlo en un producto útil. Además, éste procura que, en la fase posterior de vulcanización, las cadenas de moléculas de caucho formen redes, para después obtener goma elástica. Este proceso se denomina en química: formación de puentes sulfurosos. Al fundir el azufre, se obtiene un líquido que fluye con facilidad formado por moléculas de  $S_8$ . Sin embargo, si se calienta, el color se torna marrón algo rojizo, y se incrementa la viscosidad. Enfriando rápidamente este líquido viscoso se obtiene una masa elástica, de consistencia similar a la de la goma, denominada «azufre plástico», formada por cadenas que no han tenido tiempo de reordenarse para formar moléculas de  $S_8$ ; transcurrido cierto tiempo, la masa pierde su elasticidad cristalizando en el sistema rómbico.

- Cementos y pinturas

Utilizados durante el proceso de construcción y el acabado, son cementos plásticos sintéticos que se utilizan para generar una mejor adherencia entre los otros elementos. Las pinturas son colorantes que proveen de un acabado uniforme y más agradable.

- Fibras de Rayón y Acero.

Esta combinación de materiales también llamada lona, tiene por objeto fortalecer la llanta, de manera que en caso de exceder el esfuerzo que resiste el caucho, ésta actúe como una segunda barrera de protección.

- Caucho sintético y natural.

Estos cauchos son los materiales principales en la fabricación de las llantas, la relación de las cantidades de estos dos cauchos influye altamente en las características de la llanta. El caucho sintético se obtiene a partir del procesamiento de hidrocarburos. El caucho sintético con mayor volumen de producción mundial, cuya principal aplicación es en la fabricación de llantas, es el caucho estireno-butadieno, frecuentemente abreviado SBR (del inglés *Styrene-Butadiene Rubber*) es un elastómero sintético obtenido mediante la polimerización de una mezcla de estireno y de butadieno. El polibutadieno da a los neumáticos gran resistencia a la abrasión, excelente resistencia en condiciones de baja temperatura (la mejor de las gomas de usos múltiples) y muy buen comportamiento de envejecimiento. Sin embargo, exhibe baja adherencia a una superficie húmeda, generando deslizamiento.

Por eso se emplea mezclado con SBR o bien goma natural. El caucho natural se obtiene a partir de un fluido lácteo llamado látex hallado en muchas especies vegetales típicas de regiones tropicales.

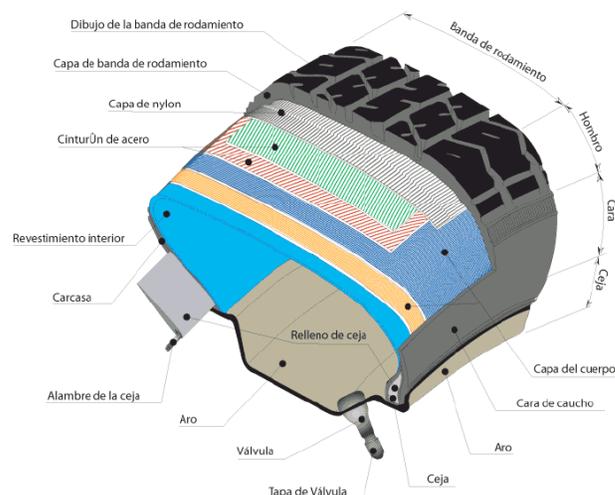
- Antioxidantes y anti-ozonantes.

Estos compuestos como su nombre lo dice, se añaden para resistir los efectos dañinos de la luz solar y del ozono, para hacer que la llanta tenga mayor durabilidad.

- Aceites y grasas.

Estos se utilizan en el proceso de fabricación, para hacer más maleable la mezcla y para ayudar en el mezclado de todos los ingredientes. Además, el aceite ayuda en la adherencia de la llanta y hace que la mezcla final sea blanda, lo cual ayuda a la precisión de virado mejorando así el servicio de las llantas.

Figura 5: Partes de una Llanta



Fuente: [www.maxxis.com](http://www.maxxis.com)

### 3.3 Propiedades del material de las llantas

Debido a que el caucho representa la base de las llantas es este también el que marca la pauta sobre su comportamiento, mientras que los otros materiales únicamente actúan como un refuerzo para éste, incrementando sus resistencias pero sin tener incidencia en el tipo de comportamiento que presenta. Es por esto que todas sus propiedades dependen de la formula que se utilice para la fabricación del caucho.

El caucho tiene fases viscosas así como elásticas. Cuando el caucho se deforma, se involucra absorción de energía, parte de la cual se regresa cuando el caucho regresa a su forma original. La parte de la energía que no retorna como energía mecánica es disipada en forma de calor en el caucho. Es por ello que frecuentemente se usa para aplicaciones en las cuales pasa por deformaciones rápidas y cíclicas a una cierta frecuencia de un rango de frecuencias. Las propiedades mecánicas dinámicas son extremadamente dependientes de la temperatura. Sin embargo en general se pueden mencionar las siguientes propiedades:

**Mecánicas:** moderada resiliencia, excelente resistencia a la abrasión, moderada resistencia al desgarro, excelente resistencia al impacto, moderada resistencia a la flexión.

**Físicas:** temperatura de servicio de hasta 70°C, resistencia a la intemperie, excelente resistencia eléctrica, permeabilidad a los gases.

**Químicas:** buena resistencia al agua, no posee resistencia a los hidrocarburos, baja resistencia a los ácidos diluidos, resistencia a los aceites.

### **3.4 Problemas ambientales derivados de su mala disposición**

Las llantas usadas proponen grandes problemas. Su resistencia a la trituración y posterior compactación descarta su utilización como material de relleno del suelo, su durabilidad genera una gran dificultad para transformarlas en otros productos y finalmente, su baja eficiencia para almacenar en centros de acopio y su costo de transporte, debido a su volumen, hace necesario invertir muchos recursos para este efecto. Por lo tanto, su disposición adecuada se complica, a veces, se encuentran mal almacenadas o quemándose al aire libre. Los problemas de salud y medio ambiente asociados con el almacenamiento o combustión de las llantas al aire libre son muchos y todos resultan muy dañinos, los principales están asociados con:

**Almacenamiento de las llantas al aire libre:** las llantas almacenadas al aire libre muchas veces favorecen la proliferación de roedores, insectos, culebras y otros animales dañinos para la salud del ser humano, por lo que este tipo de almacenamiento pone en serio riesgo a las poblaciones adyacentes a estos botaderos.

**Combustión de las llantas:** la quema de llantas a cielo abierto provoca graves problemas ambientales, ya que produce emisiones de gases que contienen contaminantes carcinogénicos (causan cáncer) y muta génicos (problemas en desarrollo de bebés) como los compuestos orgánicos volátiles (COV) e hidrocarburos.

Estas quemas representan un peligro para la salud, a corto plazo (agudo) y crónicos significativos a los residentes y trabajadores próximos, incluyendo: irritaciones de la piel, irritaciones de los ojos, irritaciones del sistema respiratorio y de las membranas mucosas, la depresión del sistema nervioso central, cáncer, y efectos muta génicos (como por ejemplo defectos físicos, abortos, o al cáncer al nacimiento).

Figura 6: **Combustión masiva de llantas**



Fuente: **Elaboración propia.**

### **3.5 Formas de reciclaje actuales**

Actualmente en el país no se cuenta con un método de reciclaje que utilice la totalidad de las llantas desechadas. Sin embargo existen ciertos métodos de reutilizar las llantas de todo tipo.

**Reencauche:** este consiste en la reposición de la banda de rodamiento ya desgastada, sobre el casco de la llanta, por otra banda que se adhiere a él. Sin embargo este tipo de actividad no contempla a todas las llantas que se producen, debido a que la fabricas de llantas en la actualidad, diseñan dichos elementos con una edad de obsolescencia programada. En general el reencauche solo puede aplicarse a llantas de vehículos de transporte pesado.

Este tipo de reutilización tiene muy claras ventajas sobre el reemplazo total de la llanta, pues en cada reencauche se requieren siete galones de petróleo, mientras que la producción de una llanta nueva requiere alrededor de 21 galones. Sin embargo para que una llanta sea apta para el reencauche es necesario que la carcasa sea apta física y químicamente.

**Transformación para su uso en otros productos:** al pasar por un proceso de trituración, se pulverizan, convirtiéndose así en polvo y arena plástica, para su reutilización en la fabricación de productos de uso diario como: suelas de zapatos, mouse pads, macetas, mangueras, juegos infantiles, o en construcción de infraestructura como loseta o para la pavimentación de avenidas y carreteras. Además del hule, el alambre de acero y las cuerdas de nylon se pueden vender a empresas fundidoras para su posterior reutilización.

**Utilización en la industria cementera:** en el caso de la producción de cemento las llantas pueden ser utilizadas como combustible para los hornos en los que se produce el cemento.

De acuerdo con la autoridades de dichas compañías, mediante la incineración en sus hornos las llantas son consumidas completamente y no se produce ningún residuo nuevo, que pueda continuar el ciclo de problemas ambientales, ya que todo el material de las llantas es absorbido en el proceso y transformado en materia prima para la producción del cemento. Este tipo de combustión completa y el uso de filtros en los hornos, garantiza que la contaminación por emisión de gases dañinos se minimice. Es necesario resaltar que debido al alto costo del transporte de las llantas para este tipo de reciclaje, éste tipo de proceso no resulta económicamente rentable para este tipo de empresas.

### **3.6 Estadísticas de generación de desechos derivados de las llantas**

En Guatemala no se cuenta con un sistema adecuado que lleve registro de la producción de desechos, pues como sabemos nuestro país tiene poca prioridad en el tema ambiental. De acuerdo con el Reporte nacional de manejo de residuos en Guatemala, publicado en 2004 por el Programa Ambiental Regional para Centroamérica (Proarca) en dicha fecha el consumo nacional de llantas en Guatemala se estimaba alrededor de 2.4 millones de unidades anuales, suponiendo que cada llanta tuviera una vida útil de 2 años. Además se estima que en el botadero más importante de la ciudad capital manejado por la empresa AMSA, existen más de 300,000 llantas en él, pero dado que la cantidad de llantas que termina en un botadero legalmente manejado es mínima, podemos inferir que la cantidad de llantas que existen en botaderos clandestinos, orillas de carreteras, ríos o lagos es inmensamente mayor.

Para tener una idea más clara de lo que en la actualidad representa este problema, podemos estimar la producción de llantas basándonos en datos conocidos como el parque vehicular y el periodo de utilidad promedio de una llanta. El parque vehicular (cantidad total de vehículos que circulan en el país) superó 1 millón 750 mil unidades al cierre de 2008, con una vida útil promedio de 2 años y un mínimo de 4 llantas por vehículo podemos inferir un mínimo de llantas inservibles de más de 7 millones a la fecha.

Esto simplemente refleja cuán grande es este problema y cuanta necesidad existe para encontrar la forma de deshacerse de ellas sin provocar daños al ambiente.

## **4. PARÁMETROS A ESTUDIAR Y NORMAS APLICABLES**

El estudio a realizar consiste en una comparación entre las mezclas de concreto modificado mediante la adición de los materiales de reciclaje y una mezcla de concreto “tradicional”, es decir, una comparación entre las mezclas que contienen plástico PET y material de Llanta, y una Mezcla Patrón que no contendrá ningún material adicional. Se utilizarán las normas de la ASTM, ya que son las normas de mayor validez y prestigio a nivel mundial, proporcionando guías y parámetros muy útiles para el ensayo y control de calidad de todo tipo de materiales.

A continuación se describen los parámetros a estudiar y comparar, así como sus aspectos más importantes y las normas que regirán los procesos de ensayos:

### **4.1 Asentamiento**

El asentamiento conocido también como slump por su nombre en inglés, es una medida de la trabajabilidad del concreto fresco. Esta medida es ampliamente reconocida como un parámetro de gran importancia al momento de evaluar la calidad del concreto en obra, es tal su importancia que debe ser considerado al momento de realizar el diseño de la mezcla.

En general se puede decir que mientras mayor sea la medida del asentamiento, mayor será también la capacidad de trabajarlo y de darle la forma deseada, sin embargo, se debe tener en cuenta los problemas asociados con un asentamiento muy grande, como el sangrado y la pérdida de resistencia debido a una mayor relación Agua/Cemento. Debido a lo anterior es de gran importancia, al momento de evaluar las características y los usos de una mezcla de concreto, contar con un valor correcto de la trabajabilidad del mismo, así como una interpretación adecuada del significado del valor obtenido.

**Método estándar de ensayo para asentamiento de concreto de cemento hidráulico ASTM C-143:** esta norma cubre el método de ensayo para la determinación del asentamiento para concreto de cemento hidráulico, tanto en el laboratorio como en el campo. En ella se describen además la geometría del aparato de ensayo, el material del que debe estar fabricado, así como su correcta utilización.

- Resumen del Método de Ensayo

Una muestra recién mezclada de concreto se coloca y compacta mediante apisonamiento en un molde con forma de cono. El molde se levanta y se permite que el concreto se siente. La distancia vertical entre la posición original y la posición final, medida desde el centro de la sección superior del concreto, es el llamado Asentamiento.

## 4.2 Resistencia a la compresión

Como se expuso anteriormente la resistencia a la compresión del concreto es sin lugar a duda el más importante indicador de sus características mecánicas así como de su calidad, ya que tiene una estrecha relación con la resistencia a los demás estados de esfuerzo. Además en general el diseño de estructuras a base de concreto reforzado, tienen la particularidad de esperar que el comportamiento del concreto sea el de resistir la mayoría de los esfuerzos de compresión, poniendo un menor énfasis en los otros esfuerzos, especialmente en el de tensión. Se estudiará también su evolución a través del tiempo realizando ensayos a las edades de siete (7), catorce (14) y veintiocho (28) días. Los parámetros a seguir para el estudio de ésta propiedad se encuentran contenidos en la siguiente norma.

**Método estándar para ensayos de resistencia de compresión de cilindros de concreto ASTM C-39:** este método de ensayo cubre la determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto, tales como cilindros moldeados y núcleos taladrados. Está limitada a concreto con peso unitario que exceda 50 lb/ft<sup>3</sup> [800 kg/m<sup>3</sup>].

- Resumen del método de ensayo

Este método de ensayo consiste en la aplicación de una carga axial de compresión a cilindros moldeados a un ritmo que está dentro de un rango prescrito hasta que ocurra la falla. El esfuerzo compresivo de la probeta está calculado mediante la división de la carga máxima alcanzada durante el ensayo y el área de la sección transversal de la probeta.



## 5. MATERIA PRIMA, OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN

### 5.1 Materiales utilizados para la fabricación de la base de concreto

**Cemento:** el cemento a utilizar es un Cemento Portland Puzolánico, formulado para uso general en la construcción, con características que cumplen con los requisitos descritos en la normas ASTM C-1157 Type GU-28 (Especificación normalizada de desempeño para cemento hidráulico) y COGUANOR NGO 41001 Tipo IP, con una masa de 42.5 kg por saco. Es utilizado para la construcción de elementos estructurales como cimientos, marcos estructurales, muros, losas, morteros, suelo cemento, etc. Su resistencia mínima es de 4,000 libras por pulgada cuadrada ( $28 \text{ N/mm}^2$ ) a 28 días en morteros normalizados de cemento, además de cumplir con una buena impermeabilidad en el concreto. Tiene un color adecuado para concretos expuestos y fachadas arquitectónicas.

**Agregado fino:** el agregado fino usado es de origen basáltico, obtenido de la trituración de roca que posteriormente puede ser sometida a un tratamiento de lavado para eliminar la mayoría de partículas finas y así ofrecer un adecuado comportamiento. El agregado utilizado es comercializado por la empresa AGREGUA, la cual anuncia que dicho producto cumple con las normas internacionales aplicables a arena, debido a que el estudio de dichas características escapa el alcance de este trabajo, se suponen ciertas las afirmaciones.

**Agregado grueso:** el piedrín utilizado también es de AGREGUA, de origen basáltico y producto de trituración de roca de cantera. De acuerdo con la información proporcionada cumple con los requisitos de calidad en cuanto a granulometría, % de partículas planas y alargadas, desgaste físico y químico. La granulometría escogida fue de ½ pulgada, debido a que es ampliamente utilizada en la construcción. Este tamaño de partículas es también permisible debido a las dimensiones de las probetas.

**Agua:** el agua utilizada fue agua de grifo, que cumple con los requerimientos físico-químicos que la clasifican como potable, tomada en el Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería. De acuerdo con la información proporcionada, ésta agua no contiene concentraciones inadecuadas de los químicos dañinos al concreto, cumpliendo así las características físico-químicas necesarias para su uso.

## **5.2 Materiales de reciclaje**

### **5.2.1 Material plástico**

Uno de los materiales seleccionados para el estudio fue el plástico de las botellas de bebidas, fabricadas con polietileno tereftalato PET, debido a que presenta características de peso y resistencia tales que parece posible una buena integración con el concreto. Su recolección fue sencilla pues se desechan en cualquier vivienda, cafetería, etc.

Debido a que no fue posible obtener material procesado industrialmente, la elaboración consistió en procesar las botellas de forma muy sencilla, removiendo la etiqueta de la botella, lavándola a modo de remover las sustancias que anteriormente contenía, y posteriormente procediendo a cortarlas en trozos de un tamaño aproximado de  $12\text{mm}^2$ . Además se calculó el peso unitario aproximado del material cuyo valor es de  $550\text{ kg/m}^3$ .

Figura 7: **Material de Plástico PET**



Fuente: **Elaboración propia**

### **5.2.2 Material de llantas**

El otro material a utilizar se obtendrá de las llantas usadas de vehículos, pues sus características y abundancia lo convierten en un buen candidato para convertirse en un material reutilizable. Como se ha expuesto las llantas son en sí una mezcla de muchos otros materiales, sin embargo su principal componente, así como el componente más problemático como desecho es el caucho o hule.

No fue posible encontrar alguna empresa que procesara las llantas y que estuviera dispuesta a proveer este material, por lo que fue necesario un procesamiento manual. Este material presentó gran dificultad a la hora de procesarlo, pues a pesar de que es duro, tiene cierta flexibilidad.

El material base se obtuvo en la terminal de la Zona 9, de la ciudad capital, este material, en forma de tiras, es el desperdicio de una actividad que tiene por objeto la reutilización de llantas denominada “laboreo”. Para la fabricación del material a utilizar, se cortaron estas tiras en trozos más pequeños. El material utilizado tiene forma cubica, de tamaño aproximado de 4 mm de lado. Su peso unitario fue calculado en aproximadamente 720 kg/m<sup>3</sup>.

Figura 8: **Material de Llantas**



Fuente: **Elaboración propia**

## 6. DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 6.1 Diseño de las mezclas

Las mezclas fueron diseñadas para alcanzar un asentamiento de 5 cm a 10 cm, de modo que mediante el asentamiento fuera posible elegir el uso que se les daría. La mezcla patrón, es decir, la mezcla de concreto simple, fue diseñada para alcanzar una resistencia a la compresión  $f'c$  de  $210 \text{ kg/cm}^2$  (3000 psi), por lo tanto la relación Agua/Cemento usada fue de 0.56, sin embargo debido a que los agregados tenían un alto contenido de agua, se realizó una prueba de Porcentaje de humedad contenida, cuyos resultados fueron: Para el Agregado Fino un 3.5% y para el Agregado Grueso un 0.63%. De acuerdo a las consideraciones anteriores se obtuvo una proporción volumétrica aproximada de 1:2:2:0.56.

Siguiendo los parámetros del estudio se utilizó la misma base de 1:2:2 para las mezclas con adición de plástico PET y con adición de material de llantas, sin embargo para alcanzar el asentamiento deseado fue necesaria la adición de más agua, por lo que las relaciones Agua/Cemento se modificaron, para el plástico a 0.65 y para la llanta a 0.60, esto a su vez modificó los valores de resistencia que alcanzó el concreto.

## **6.2 Elaboración de las probetas para ensayo de compresión**

Las características de las probetas a utilizar para los ensayos a compresión se encuentran descritas en la norma ASTM C-31, la norma describe el procedimiento de elaboración de la mezcla, los materiales para los moldes, así como las dimensiones adecuadas de los mismos. Tomando en cuenta las dimensiones de las probetas, los ensayos requerirán 2 probetas para cada edad del concreto, por lo que para cada mezcla se elaboraron 6 cilindros para ser ensayados a edades de siete (7), catorce (14) y veintiocho (28) días, por lo que se elaboraron un total de 18 probetas.

### **6.2.1 Proporcionamiento y pesado de los materiales**

Se elaboraron los tres tipos de mezclas de concreto, una con adición de plástico PET, una con adición de material de llantas y la otra sin materiales extra, que servirá como parámetro de comparación y control sobre la calidad de los materiales. Para las mezclas que contenían los otros dos materiales de reciclaje (plástico y llanta) se utilizó la misma base de concreto. Las proporciones se realizaron en base al peso del cemento, de acuerdo con el volumen necesario para la elaboración de todos los testigos necesarios para la realización de los ensayos, para cada tipo de mezcla. El cálculo de la cantidad de los materiales de reciclaje se realizó como un porcentaje del volumen de la base de concreto de cada tipo de mezcla.

Se escogió una concentración de materiales de reciclaje (plástico y llantas) del 10% del total del volumen de la base de concreto simple, debido a que esta cantidad parece ser suficiente para observar los efectos que causa esta adición, sin que reduzca excesivamente la concentración de concreto, integrando una cantidad de material de reciclaje lo suficientemente significativa para lograr algún beneficio ambiental. Basándose en las proporciones definidas, se pesó el cemento, los agregados y el agua en una balanza electrónica con capacidad para kilogramos y aproximación a 0.1 kg.

Figura 9: **Pesado de los materiales para la mezcla, en la balanza electrónica**



Fuente: **Elaboración propia**

### **6.2.2 Mezclado de los materiales**

El mezclado de los materiales se realizó utilizando una mezcladora o concretera, el procedimiento realizado se resume de la siguiente manera:

Habiendo pesado los materiales y calculado los volúmenes de materiales de reciclaje, se procedió a realizar la mezcla, introduciendo primeramente el cemento, la arena y el pedrín dentro de la concretera por aproximadamente 3 minutos con el objeto de conseguir una mezcla homogénea. Luego en el caso de las mezclas con adición de materiales de reciclaje, se procedió a agregar dichos materiales y de la misma forma esperar el tiempo necesario para que la mezcla sea uniforme.

Luego de que la mezcla estaba lista se procedió a realizar la prueba de asentamiento, y posteriormente al llenado de los cilindros para la realización del ensayo de compresión.

Figura 10: **Mezclado de los materiales en la concretera**



Fuente: **Elaboración propia**

### **6.2.3 Moldeado de cilindros**

Los moldes utilizados para conformar los cilindros de ensayo fueron de 6 pulgadas de diámetro por 12 pulgadas de altura. Los moldes estaban hechos de metal, cortados longitudinalmente para poder abrirlos al momento de desencofrar, con tornillos y mariposas para cerrarlos y abrirlos fácilmente. En la parte inferior los moldes cuentan con un placa metálica plana la cual sirve como base, en ella existen también tornillos los cuales coinciden con protuberancias en el molde cilíndrico, de modo que se pueda fijar la base a él. Antes de verter el concreto, los moldes fueron aceitados con el objeto de que no existiera adherencia entre ellos y el concreto, logrando así un desencofrado más fácil.

La mezcla fue vertida en el molde en tres capas de altura idealmente igual, cada capa fue apisonada con un apisonador metálico de 5/8 de pulgada de diámetro y con extremos esféricos. El apisonamiento consiste en dar 25 golpes a cada capa, distribuyendo los golpes de forma uniforme sobre la sección transversal, de modo que los golpes penetraran cada capa hasta la inferior.

Luego de apisonar la última capa, el molde se golpeó 20 veces a los costados, utilizando un martillo de hule y distribuyendo los golpes uniformemente, esto con el objetivo de que la mezcla se asentara completamente, la última capa se enrasó utilizando una pieza metálica plana.

Figura 11: Llenado y enrasado de las probetas



Fuente: **Elaboración propia**

#### **6.2.4 Desencofrado**

Aproximadamente veinticuatro horas después de haber moldeado las probetas, se procedió a desencofrarlas, para esto se procedió a desatornillar las mariposas y luego se quitaron los cilindros de metal alrededor de las probetas, por último se les asignó una nomenclatura para poder identificarlos al momento de ensayarlos.

Figura 12: **Desencofrado de Probetas**



Fuente: **Elaboración propia**

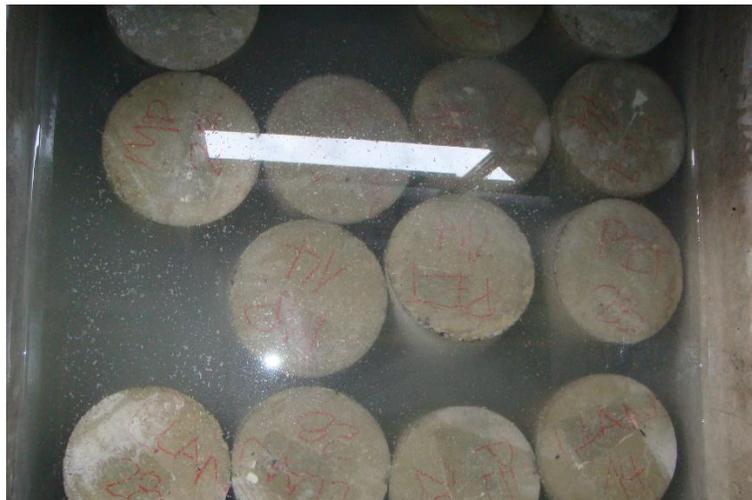
### **6.2.5 Curado**

El proceso de curado tiene una gran importancia, ya que con este se previenen situaciones potencialmente dañinas para el concreto. En general podemos decir que el curado tiene por objeto evitar un secado prematuro, especialmente bajo la acción de los rayos del sol y del viento. Para garantizar que se obtengan las propiedades que se esperan del concreto, especialmente en la zona cercana a la superficie, es necesario curar el concreto fresco durante un período adecuado, iniciando tan pronto sea posible.

En general el curado puede evitar que ocurra una interrupción en la reacción química que ocurre entre el agua y el cemento, debido a falta de agua, lo cual evita que el concreto alcance las propiedades que su composición permitiría. También se puede evitar una contracción temprana, por cambios de temperatura, produciendo fisuramiento.

La evaporación del agua puede generar esfuerzos en concreto joven, que pueden llegar incluso a superar sus valores de resistencia a la tensión. Además la falta del curado o la insuficiencia del mismo, perjudica la durabilidad del concreto, especialmente en la superficie. Por todo ello, luego de ser desencofradas, las probetas fueron sumergidas en un tanque con agua. Se dejaron inmersas hasta las edades a las cuales fueron ensayadas, 7, 14 y 28 días, para garantizar que se mantuvieran las condiciones de curado adecuadas.

Figura 13: **Curado de las Probetas**



Fuente: **Elaboración propia**

## **6.3 Procedimientos de Ensayos**

### **6.3.1 Ensayo de Asentamiento (Slump)**

Este ensayo se realizó basado en la norma ASTM C-143, el ensayo se llevo a cabo después del mezclado de los materiales y antes del moldeo de las probetas.

Aunque la realización de este ensayo resulta muy sencilla, es de gran importancia. El procedimiento de ensayo se puede resumir de la siguiente manera:

- Humedecer el molde y colocarlo en una superficie plana, húmeda y no absorbente. Deberá ser sostenido firmemente en su lugar durante el llenado por un operador, parándose sobre los dos apoyos para los pies. Llenar el molde inmediatamente con el concreto, en tres capas, cada una aproximadamente de un tercio del volumen del molde.
- Apisonar cada capa con 25 golpes, distribuyéndolos uniformemente sobre la sección transversal de la capa. Para la capa inferior será necesario inclinar levemente el apisonador y dar la mitad de los golpes cerca del perímetro. El apisonamiento de la segunda y tercera capa, debe abarcar su propia profundidad, de modo que los golpes penetren únicamente dicha capa.
- Cuando se llene y apisone la capa superior, amontonar el concreto sobre el molde antes de iniciar el apisonamiento. Si el apisonamiento causa que el nivel del concreto baje del borde superior del molde, agregar concreto adicional de modo que se mantenga un exceso de concreto sobre la parte superior del molde durante todo el proceso. Luego de apisonar la capa superior rasar el exceso del concreto, rodando el apisonador sobre el borde superior del molde. Continuar sosteniendo el molde firmemente, y remover el concreto que se encuentre en la zona circundante a la base del molde para evitar interferencias con el movimiento para realizar la prueba de asentamiento.

- Remover el molde inmediatamente del concreto, levantándolo cuidadosamente en dirección vertical. Levantar el molde una distancia de 12 plg. en  $5 \pm 2$  seg. en un movimiento firme hacia arriba sin movimiento lateral o torsional. Todo el proceso, desde el llenado hasta la remoción del molde, deberá realizarse sin interrupción y en un lapso de tiempo de 2 1/2 min.
- Inmediatamente después, medir el Asentamiento, mediante la determinación de la diferencia de altura entre la altura del molde y la altura del centro original de la superficie superior del concreto. En caso de que el concreto caiga hacia un lado o parezca haber perdido volumen de un solo lado, no tomar en cuenta el ensayo y hacer otro ensayo con otra porción de la mezcla.

Figura 14: **Ensayo de asentamiento, llenado del cono**



Fuente: **Elaboración propia**

Figura 15: **Ensayo de asentamiento, apisonado de la mezcla**



Fuente: **Elaboración propia**

Figura 16: **Ensayo de asentamiento, medición del asentamiento**



Fuente: **Elaboración propia**

### 6.3.2 Ensayo de Compresión

Como se indicó anteriormente el ensayo se apegó a la norma ASTM C-39, además las probetas fueron refrentadas sin adherencia, según la norma ASTM C-1231 Práctica estándar para uso de cabezales no adheridos en la determinación de la resistencia a compresión de cilindros de concreto endurecido. Habiendo establecido ya, las normas y los procedimientos a los cuales se apegarían los ensayos, se procedió a realizarlos, esto se llevo a cabo en el Centro de Investigaciones de Ingeniería, de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Para realizar los ensayos de se utilizó la máquina para ensayar testigos de concreto marca RIEHLE (Figura 17) la cual tiene una capacidad de carga de hasta 600000Lb.

Figura 17: Máquina marca RIEHLE



Fuente: **Elaboración propia**

Previo a realizar los ensayos, las muestras fueron pesadas utilizando una balanza de 1 gramo de aproximación. Además se tomaron mediciones de sus dimensiones utilizando un vernier o pie de rey con 0.1 mm de aproximación.

Figura 18: **Medición de las probetas utilizando el Vernier**



Fuente: **Elaboración propia**

Figura 19: **Pesado de las probetas**



Fuente: **Elaboración propia**

La nomenclatura utilizada para registrar los resultados de manera más ordenada, fue la siguiente:

MP – Mezcla patrón.

PET – Mezcla con contenido de plástico PET.

LLAN – Mezcla con contenido de material de llantas.

Además se identificaron 2 probetas de cada tipo de mezcla para cada edad a ensayar, es decir con los números 7, 14 y 28, de acuerdo con la edad de ensayo, las que a su vez se identificaron con los números 1 y 2 para distinguirlas entre sí. Las pruebas fueron realizadas en probetas cilíndricas de 6 pulgadas (15.24 cm) de diámetro y 12 pulgadas (30.48 cm) de altura.

El procedimiento establecido en la norma para la realización de este ensayo es el siguiente:

- El cilindro debe ser elaborado de acuerdo a la norma ASTM C-31 (práctica normalizada para preparación y curado de especímenes de ensayo de concreto).
- La maquina a utilizar debe ser capaz de aplicar una fuerza continua de 20 a 50 psi/seg, sin provocar choques.
- Hacer las mediciones de las dimensiones del cilindro de acuerdo a la norma.
- Pesar e identificar los especímenes.

- Proceder a nivelar los especímenes utilizando azufre sublimado, esto se hace para asegurarse que la carga se distribuya de forma uniforme sobre toda la superficie del espécimen.
- Luego se coloca el espécimen sobre el centro de la base inferior de la máquina, para ser ensayado.
- Se realiza el ensayo, cargando el espécimen hasta la carga de ruptura.
- Anotar la carga máxima que soporta el espécimen.
- Por último se realizan los cálculos y se elabora el reporte como se describe en la norma.

Figura 20: Nivelación de las Probetas con el azufre



Fuente: **Elaboración propia**

Figura 21: Realización del ensayo de compresión



Fuente: **Elaboración propia**

## 6.4 Datos obtenidos

### 6.4.1 Datos del diseño de mezclas

Del diseño de las mezclas se obtuvieron las proporciones presentadas en la tabla siguiente, también se incluyen las resistencias para las cuales fueron proyectadas:

Tabla III: **Proporción volumétrica de diseño de las mezclas**

<b>Mezcla</b>	<b>Proporción Volumétrica</b>	<b>Resistencia a la Compresión esperada</b>
Mezcla Patrón	1 : 2 : 2 : 0.56	210 kg/cm <sup>2</sup> (3000 psi)
Mezcla con adición de Plástico PET	1 : 2 : 2 : 0.65	140 kg/cm <sup>2</sup> (2000 psi)
Mezcla con adición de Material de Llantas	1 : 2 : 2 : 0.60	175 kg/cm <sup>2</sup> (2500 psi)

Fuente: **Elaboración propia**

#### **6.4.2 Cantidades de materiales utilizadas**

La tabla presentada a continuación muestra la dosificación obtenida en volumen y en peso de los materiales que se utilizaron para la mezcla de concreto base. La cantidad de concreto mezclada para cada tipo de mezcla, corresponde a 0.033 m<sup>3</sup>, necesarios para la conformación de los 6 cilindros de 6 pulgadas de diámetro por 12 pulgadas de altura.

Tabla IV: **Cantidad de materiales para la base de cada mezcla, dosificación volumétrica y por peso**

<b>Material</b>	<b>Dosificación por Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Dosificación por Peso (kg)</b>
Cemento	0.0094	13.83
Agregado Fino	0.0186	36.67
Agregado Grueso	0.0186	36.67
Agua	0.00657	6.57

Fuente: **Elaboración propia**

Además de los materiales anteriores, para las mezclas con materiales de reciclaje se adicionó la cantidad del material correspondiente a cada mezcla, equivalente al 10% del volumen del concreto. La siguiente tabla muestra la cantidad de material de reciclaje adicionada a las bases de concreto para cada mezcla, expresada en volumen, así como su equivalente en peso.

Tabla V: **Contenido de materiales de reciclaje en las mezclas**

Material	Volumen (m <sup>3</sup> )	Peso (kg)
Plástico PET	0.0033	1.77
Material de llanta	0.0033	2.32

Fuente: **Elaboración propia**

Del análisis de las consideraciones de trabajabilidad y humedad en agregados, las cantidades de agua utilizadas en las mezclas con adición de materiales de reciclaje, fueron.

Tabla VI: **Contenido de agua en las mezclas**

Material	Agua (litros)
Mezcla con adición de Plástico PET	8.20
Mezcla con adición de material de Llanta	6.90

Fuente: **Elaboración propia**

### 6.4.3 Datos obtenidos de los ensayos

Los datos presentados a continuación se obtuvieron de los ensayos realizados mediante los procedimientos ya definidos, de acuerdo con las normas citadas.

#### 6.4.3.1 Ensayo de asentamiento

Los resultados de esta prueba se presentan en la siguiente tabla:

Tabla VII: **Resultados del Ensayo de Asentamiento**

Mezcla	Valor del Asentamiento (cm)
Mezcla Patrón	7
Mezcla con adición de Plástico PET	7
Mezcla con adición de Material de Llanta	7

Fuente: **Elaboración propia**

#### 6.4.3.2 Ensayo de resistencia a compresión

A continuación se presentan los datos obtenidos del ensayo de compresión para las probetas de las diferentes mezclas, tomados de acuerdo con los procedimientos definidos, y utilizando dichos instrumentos, según la edad a la que se practicó el ensayo.

**Tabla VIII. Datos obtenidos del Ensayo a Compresión en las probetas de 7 días de edad**

Probeta	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Carga Máxima (lb)
---------	--------------	------------------	----------------------

Mezcla Patrón a 7 días			
MP-1-7	12.616	15.180	49,499.00
MP-2-7	12.606	15.153	49,499.00
Promedio	12.611	15.1665	49,499.00

Mezcla con PLÁSTICO PET a 7 días			
PET-1-7	12.269	15.150	31,392.00
PET-2-7	12.319	15.087	31,887.00
Promedio	12.294	15.1185	31,639.50

Mezcla con Material de Lantas a 7 días			
LLAN-1-7	12.329	15.143	36,343.00
LLAN-2-7	12.250	15.220	36,838.00
Promedio	12.290	15.182	36,590.50

Fuente: **Elaboración propia**

**Tabla IX: Datos obtenidos del Ensayo a Compresión en las probetas de 14 días de edad**

Probeta	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Carga Máxima (lb)
---------	--------------	------------------	----------------------

Mezcla Patrón a 14 días			
MP-1-14	12.711	15.180	66,143.00
MP-2-14	12.712	15.153	58,433.00
Promedio	12.712	15.167	62,288.00

(Continúa)

Mezcla con Plástico PET a 14 días			
PET-1-14	12.290	15.173	41,725.00
PET-2-14	12.385	15.150	39,303.00
Promedio	12.338	15.162	40,514.00

Mezcla con Material de Llantas a 14 días			
LLAN-1-14	12.333	15.153	48,022.00
LLAN-2-14	12.322	15.180	45,115.00
Promedio	12.328	15.167	46,568.50

Fuente: **Elaboración propia**

Tabla X: **Datos obtenidos del Ensayo a Compresión en las probetas de 28 días de edad**

Probeta	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Carga Máxima (lb)
Mezcla Patrón a 28 días			
MP-1-28	12.762	15.220	77,925.00
MP-2-28	12.664	15.163	82,788.00
Promedio	12.713	15.192	80,356.50
Mezcla con Plástico PET a 28 días			
PET-1-28	12.234	15.140	48,022.00
PET-2-28	12.365	15.223	47,537.00
Promedio	12.300	15.182	47,779.50

Mezcla con Material de Llantas a 28 días			
LLAN-1-28	12.347	15.147	54,562.00
LLAN-2-28	12.358	15.110	53,469.00
Promedio	12.353	15.129	54,015.50

Fuente: **Elaboración propia**



## 7. CÁLCULOS, RESULTADOS Y GRÁFICAS

### 7.1 Cálculos Realizados

Luego de haber obtenido los datos de los ensayos fue necesario realizar los cálculos pertinentes para dar significado a dichos datos y obtener los resultados deseados. Para la realización de los cálculos se utilizaron los valores de conversión:

1 kilogramo = 2.204 libras

1 pulgada = 2.54 centímetros

#### 7.1.1 Cálculo de la resistencia a la compresión del concreto

Según la norma se calcula la resistencia a la compresión mediante la división de la máxima carga soportada por la probeta dentro del área promedio de la sección transversal de dicha probeta. Se utilizaron las siguientes fórmulas:

$$f'c = \frac{C_{\max}}{A_{t_{\text{prom}}}}$$

Donde:

$C_{\max}$  = Carga máxima obtenida de la lectura de la máquina de ensayo

$A_{t_{\text{prom}}}$  = Área transversal promedio, calculada mediante:

$$A_{t_{\text{prom}}} = \frac{\pi \cdot (D)^2}{4}$$

D = Diámetro promedio de la probeta.

Para contar con datos más confiables se calculó además el promedio de los resultados obtenidos para cada par de probetas de cada tipo, ensayadas a la misma edad.

$$f'_{c_{\text{prom}}} = \frac{f'_{c_1} + f'_{c_2}}{2}$$

### **7.1.2 Cálculo del peso específico grueso de las mezclas de concreto**

El cálculo de éste dato resulta de mucho interés puesto que nos indica de que manera afecta la adición de los materiales de reciclaje, una característica física tan fundamental como lo es el peso. El peso específico se define como la cantidad de peso contenida en una unidad de volumen. Por lo tanto se calculo mediante la expresión:

$$\gamma = \frac{P}{\text{Vol}}$$

Donde:

$\gamma$  = Peso específico.

P = Peso de la probeta.

Vol = Volumen de la probeta.

### 7.1.3 Cálculo de relaciones entre datos teóricos y datos reales

Además de los cálculos anteriores también se calcularon ciertas relaciones con el objeto de comprender de mejor manera el comportamiento de los materiales estudiados. En primer lugar se calculó el porcentaje de resistencia alcanzado por la muestra patrón a 28 días de edad, mediante la razón de la resistencia real por la resistencia teórica de la mezcla patrón.

$$\%AlcMP = \frac{f'_{C_{MPreal}}}{f'_{C_{MPteorica}}}$$

La relación anterior se estableció como un factor de tolerancia, a utilizar para re-calcular la resistencia teórica de las mezclas con materiales de reciclaje de la siguiente manera:

Para la mezcla con plástico PET:

$$f'_{C_{PET,Teo}} = \%AlcMP * f'_{C_{PET,Dis}}$$

Donde:

$f'_{C_{PET,Teo}}$  = Nuevo valor de resistencia a la compresión teórica.

$f'_{C_{PET,Dis}}$  = Resistencia a la compresión de diseño.

Para la mezcla con material de llantas:

$$f'_{C_{LLAN,Teo}} = \%AlcMP * f'_{C_{LLAN,Dis}}$$

Donde:

$f'_{C_{LLAN,Teo}}$  = Nuevo valor de resistencia a la compresión teórica.

$f'_{C_{LLAN,Dis}}$  = Resistencia a la compresión de diseño.

A partir de los valores anteriores se procedió a calcular el porcentaje de resistencia real alcanzada a los 28 días, por las mezclas con materiales de reciclaje. Esto se realizó mediante las expresiones:

Para la mezcla con plástico PET:

$$\%AlcPET = \frac{f_{C_{PETreal}}}{f_{C_{PET,Teo}}}$$

Para la mezcla con material de llantas:

$$\%AlcLLAN = \frac{f_{C_{LLANreal}}}{f_{C_{LLAN,Teo}}}$$

Además también se calculó la relación entre los pesos específicos de las mezclas con materiales de reciclaje y el de la mezcla patrón. Se utilizaron las expresiones:

Para la mezcla con plástico PET:

$$RelY_{PET} = \frac{Y_{PET}}{Y_{MP}}$$

Para la mezcla con material de llantas:

$$RelY_{LLAN} = \frac{Y_{LLAN}}{Y_{MP}}$$

Donde:

$Y_{MP}$  = Peso específico de la mezcla patrón.

$Y_{PET}$  = Peso específico de la mezcla con plástico PET.

$Y_{LLAN}$  = Peso específico de la mezcla con material de llantas.

## 7.2 Resumen de los resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los cálculos anteriores, realizados utilizando los datos del ensayo de compresión para las probetas de las diferentes mezclas, según la edad a la que se practicó el ensayo.

Tabla XI: Resultados del Ensayo a Compresión en las probetas de 7 días de edad

Probeta	Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia	
		kg/cm <sup>2</sup>	Psi

Mezcla Patrón a 7 días			
MP-1-7	2296.08	124.06	1764.54
MP-2-7	2302.44	124.50	1770.75
<b>Promedio</b>	<b>2299.26</b>	<b>124.28</b>	<b>1767.65</b>

Mezcla con PLÁSTICO PET a 7 días			
PET-1-7	2241.78	78.99	1123.50
PET-2-7	2269.75	80.91	1150.81
<b>Promedio</b>	<b>2255.76</b>	<b>79.95</b>	<b>1137.16</b>

Mezcla con Material de Llantas a 7 días			
LLAN-1-7	2254.82	91.53	1301.83
LLAN-2-7	2217.76	91.84	1306.30
<b>Promedio</b>	<b>2236.29</b>	<b>91.69</b>	<b>1304.07</b>

Fuente: **Elaboración propia**

Tabla XII: Resultados del Ensayo a Compresión en las probetas de 14 días de edad

Probeta	Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia	
		kg/cm <sup>2</sup>	Psi

Mezcla Patrón a 14 días			
MP-1-14	2313.37	165.05	2347.54
MP-2-14	2321.80	145.87	2074.81
<b>Promedio</b>	<b>2317.58</b>	<b>155.46</b>	<b>2211.18</b>

(Continúa)

Mezcla con Plástico PET a 14 días			
PET-1-14	2238.81	104.67	1488.72
PET-2-14	2262.97	98.90	1406.62
<b>Promedio</b>	<b>2250.89</b>	<b>101.79</b>	<b>1447.67</b>

Mezcla con Material de Llantas a 14 días			
LLAN-1-14	2252.58	120.79	1717.99
LLAN-2-14	2242.57	113.07	1608.26
<b>Promedio</b>	<b>2247.57</b>	<b>116.93</b>	<b>1663.13</b>

Fuente: Elaboración propia

Tabla XIII: Resultados del Ensayo a Compresión en las probetas de 28 días de edad

Probeta	Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia	
		kg/cm <sup>2</sup>	Psi
Mezcla Patrón a 28 días			
MP-1-28	2310.46	194.28	2763.28
MP-2-28	2309.98	207.95	2957.71
<b>Promedio</b>	<b>2310.22</b>	<b>201.12</b>	<b>2860.50</b>

Continuación tabla XIII

Mezcla con Plástico PET a 28 días			
PET-1-28	2238.33	121	1720.94
PET-2-28	2237.70	118.47	1684.96
<b>Promedio</b>	<b>2238.02</b>	<b>119.74</b>	<b>1702.95</b>
Mezcla con Material de Llantas a 28 días			
LLAN-1-28	2256.92	137.35	1953.59
LLAN-2-28	2270.01	135.26	1923.76
<b>Promedio</b>	<b>2263.47</b>	<b>136.31</b>	<b>1938.68</b>

Fuente: **Elaboración propia**

Los resultados de las relaciones calculadas se presentan a continuación:

- Relación entre la resistencia real y la resistencia teórica de la mezcla patrón.

$$\%AlcMP = 96\%$$

- Re-cálculo de la resistencia teórica de las mezclas con adición de materiales de reciclaje, utilizando el 96% de la resistencia de diseño como rango de tolerancia:

Mezcla con adición de plástico PET:

$$f'_{c_{PET,Teo}} = 134.4 \text{ kg/cm}^2$$

Mezcla con adición de material de llantas:

$$f'_{c_{LLAN,Teo}} = 168.00 \text{ kg/cm}^2$$

- Porcentaje de resistencia real alcanzada a los 28 días, por las mezclas con materiales de reciclaje:

Para la mezcla con plástico PET:

$$\%AlcPET = 89\%$$

Para la mezcla con material de llantas:

$$\%AlcLLAN = 81\%$$

- Relación entre los pesos específicos de las mezclas con materiales de reciclaje y el de la mezcla patrón, se presentan en la siguiente tabla:

Tabla XIV: **Relaciones de pesos específicos entre las mezclas**

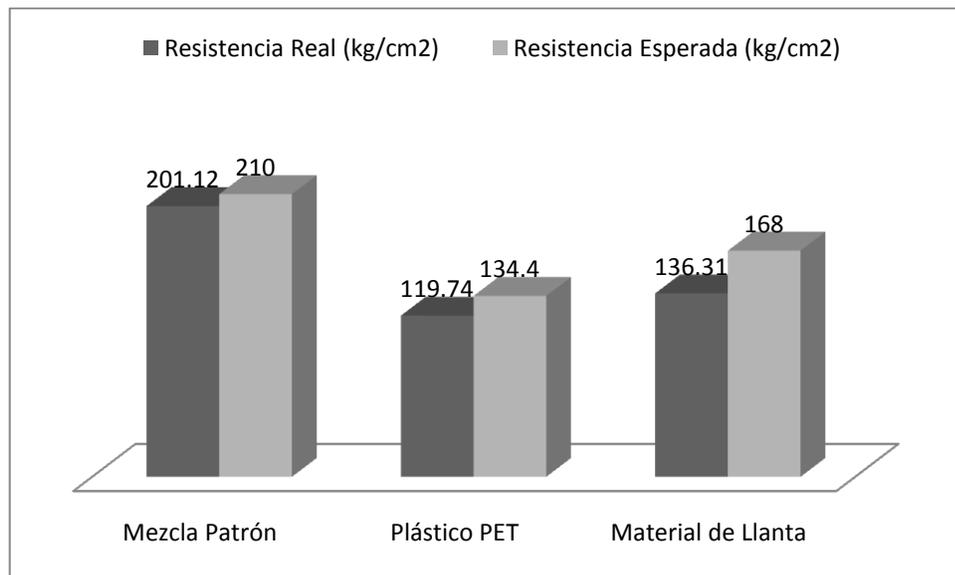
Mezcla	$\gamma_{Real} \text{ (kg/m}^3\text{)}$	Relación
Mezcla Patrón	2310.22	100%
Mezcla con adición de Plástico PET	2238.02	97%
Mezcla con adición de Material de Llanta	2263.47	98%

Fuente: **Elaboración propia**

### 7.3 Gráficas

La siguiente grafica ilustra la relación entre la resistencia teórica y la resistencia real alcanzada por las mezclas, Las resistencias teóricas para las mezclas con materiales de reciclaje corresponden a las re-calculadas en función de la tolerancia establecida por la resistencia de la mezcla patrón.

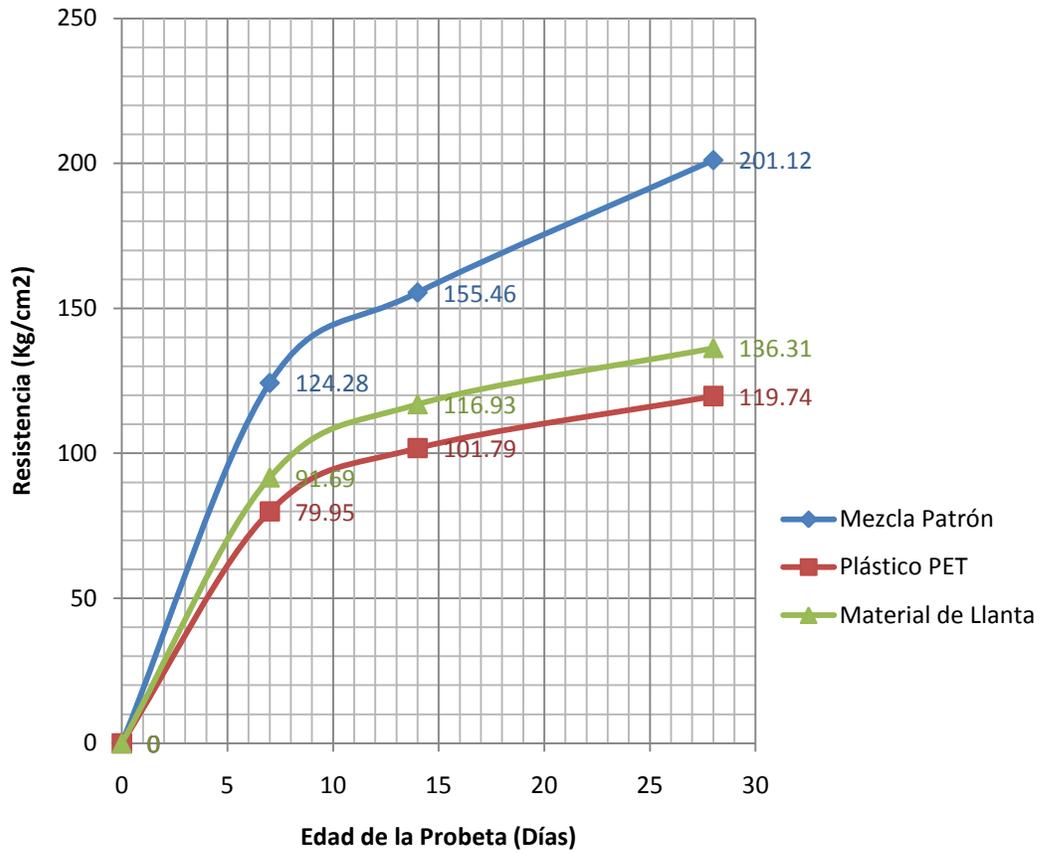
Figura 22: **Resistencia a compresión a los 28 días en los distintos tipos de mezcla, en comparación con la resistencia esperada.**



Fuente: **Elaboración propia**

La siguiente gráfica describe el comportamiento de las mezclas a través del tiempo. En la misma se incluyen las tres mezclas con el objeto de que sea más visible la diferencia en el comportamiento de cada una.

Figura 23: Comportamiento en el tiempo de los distintos tipos de mezclas



Fuente: **Elaboración propia**

## **8. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

A continuación se presenta el análisis de los resultados obtenidos de la realización de los ensayos, habiendo realizado los cálculos pertinentes según las normas utilizadas.

### **8.1 Ensayo de Asentamiento según la norma ASTM C-143**

Los resultados de este ensayo corresponden a una mezcla con una trabajabilidad buena, aunque requiere de cierta compactación para ser colocado. Este asentamiento permitiría su uso en la mayoría de situaciones, es decir, es apto para utilizarlo en condiciones donde exista cierta dificultad para su colocación, sin que existan condiciones especialmente difíciles.

### **8.2 Ensayo de resistencia a compresión según la norma ASTM C-39**

#### **8.2.1 Comparación e Interpretación de los resultados**

De acuerdo con los resultados de los ensayos realizados, se pudo observar que la adición de los dos tipos de materiales de reciclaje redujo sustancialmente la resistencia a la compresión esperada.

Debido a que la mezcla patrón alcanzó sólo un 96% de la resistencia esperada se puede establecer dicho porcentaje como un margen de tolerancia para las otras dos mezclas, lo que estableció una resistencia esperada para el concreto con adición de plástico PET a  $133 \text{ kg/cm}^2$ , para el concreto, con adición de material de llantas, a  $166.25 \text{ kg/cm}^2$ . Habiendo establecido esto, se procedió a comparar los resultados obtenidos de los ensayos a las probetas con materiales de reciclaje con los datos teóricos de resistencia, de lo que se concluyó que la mezcla con plástico PET alcanzó un 89% de la resistencia esperada, mientras que la mezcla con material de llanta alcanzó un 81%, lo que indica una reducción del 11% y 19% respectivamente, esto se ilustró en la figura 22.

En cuanto a la evolución de la resistencia a través del tiempo, la mezcla patrón se pudo observar un aumento de 38.2% en su resistencia, en el lapso entre los 7 días de edad y los 28 días de edad, así mismo, cabe resaltar que las mezclas con el material de reciclaje tuvieron un aumento menor en su resistencia a través del tiempo, siendo de únicamente de 33.2% para la mezcla que contenía plástico PET, y de 32.7% para la mezcla con material de llanta, siendo ésta la que presento un menor aumento. Sin embargo todas alcanzaron la mayoría de su resistencia a la edad de 7 días (figura 23).

### **8.2.2 Fallas en los especímenes ensayados**

De acuerdo con la norma ASTM C-39, las fallas que se pudieron observar corresponden al tipo de cono y dividida para la mezcla patrón y de tipo columnar para las mezclas con material de reciclaje, pues se pudo observar agrietamiento vertical en toda la longitud de la probeta.

En el caso de la falla de la mezcla patrón, puede presentarse por algunos motivos, entre ellos una aplicación de carga no completamente uniforme, sin embargo aunque esta falla no se desea cabe resaltar que resulta un tanto común en este tipo de ensayos.

Figura 24: **Falla en la Mezcla Patrón**



Fuente: **Elaboración propia**

La falla observada en las mezclas con contenido de materiales de reciclaje puede presentarse por varios motivos; sin embargo, uno de ellos consiste con este caso, en la posible existencia de concentraciones de esfuerzos. Ésta concentración podría deberse a una mala adherencia entre los materiales de reciclaje y la matriz cementicia.

Figura 25: Falla en las mezclas con material de reciclaje



Fuente: **Elaboración propia**

### 8.2.3 Efectos de los materiales sobre el concreto

En cuanto a las propiedades mecánicas, el efecto más notable fue la reducción de la resistencia a la compresión, esto puede deberse a que los materiales adicionados sufran diferentes deformaciones unitarias bajo los mismos esfuerzos, lo que impediría que los materiales trabajen de manera uniforme. No fue posible observar daños debido a la composición química de los materiales de reciclaje, los restos almacenados durante 56 días no presentaban ningún efecto visible. Esto era esperado puesto que dichos materiales de reciclaje presentan características químicas inertes.

En el caso de efectos físicos no fue posible observar ningún efecto adverso de este tipo. Al principio del experimento se infería una posible reducción del peso unitario del material, sin embargo se observó que dicha reducción fue mínima, del 3% en la mezcla con plástico PET y del 2% en la mezcla con material de llantas, esto podría atribuirse a que, a aunque los materiales tienen un menor peso unitario que el concreto, éstos no tienen un porcentaje alto de absorción de agua, la que en el concreto deja vacíos al evaporarse.

Esta falta de vacíos puede ser la explicación de tal fenómeno, pues aun con un 10% del volumen del material de reciclaje no se observó gran diferencia en el peso.



## CONCLUSIONES

1. Fue posible observar que la adición de los materiales de reciclaje redujo la resistencia a la compresión del concreto, siendo dicha reducción mayor en el concreto con material de llanta.
2. El manejo del diseño de las mezclas disminuye con la adición de materiales de reciclaje. Este fenómeno se observó especialmente en la mezcla con plástico PET, ya que, en su caso, cuando se utilizó una relación agua/cemento, correspondiente a una mezcla de resistencia moderada, se obtuvo un valor de asentamiento de 1 cm únicamente.
3. Cuando los agregados presentan un contenido excesivo de agua, es necesario realizar las pruebas y cálculos necesarios para obtener un valor correcto de la relación Agua/Cemento, para que luego de hacer las correcciones pertinentes, sea posible determinar de manera adecuada la resistencia que alcanzará el concreto.
4. La resistencia a la compresión alcanzada por la mezcla patrón fue menor a la resistencia para la cual fue diseñada, esto se debió seguramente a deficiencias en la calidad de los agregados pétreos utilizados en la misma.

5. La evolución de la resistencia en las mezclas, con adición de materiales de reciclaje, tuvo un menor aumento en el periodo comprendido entre los 7 y 28 días de edad.
  
6. El concreto con materiales de reciclaje mantuvo su peso alrededor de los valores promedio, a pesar de la adición de los materiales de reciclaje que son más livianos.
  
7. Las mezclas con materiales de reciclaje, estudiadas, presentan características aptas para usos no estructurales; sin embargo, poseen la ventaja de ser un método de mitigación de daños ambientales producidos por este tipo de desechos.

## RECOMENDACIONES

1. Realizar pruebas con otras concentraciones de materiales de reciclaje, variando también las dimensiones y formas de las partículas de los mismos, con el propósito de determinar si existe una combinación de elementos que proporcione mejores características mecánicas.
2. Llevar a cabo ensayos que determinen la adherencia entre los materiales de reciclaje y demás elementos del concreto, para establecer si la adherencia puede ser un impedimento para que este tipo de concreto alcance una mayor resistencia.
3. Estudiar los efectos que sufriría el material bajo diferentes estados de esfuerzo, realizando ensayos como el de tensión indirecta, así como ampliar el estudio a otras características importantes, como el módulo de elasticidad, de manera que se determinen usos adicionales para este tipo de materiales.
4. Realizar pruebas en concretos con diferentes proporciones, en el caso de requerir mayor trabajabilidad en mezclas de mayor resistencia y considerar la utilización de aditivos fluidificantes, para evitar la necesidad de alterar la relación agua/cemento, de manera radical.

5. Efectuar ensayos con mezclas diseñadas para alcanzar una mayor resistencia, para determinar la máxima resistencia con la cual los materiales conservan su utilidad.
  
6. Verificar que los agregados pétreos, utilizados en las mezclas de prueba, cumplan con todos los requisitos de calidad incluidos en la norma ASTM C-535.

## BIBLIOGRAFÍA

1. American Standard for Testing and Materials (por sus siglas en inglés). *Normas ASTM*: C-31 práctica normalizada para preparación y curado de especímenes de ensayo de concreto, C-143 método estándar de ensayo para asentamiento de concreto de cemento hidráulico, C-39 método estándar para ensayos de resistencia de compresión de cilindros de concreto.
2. Environmental Health Perspectives Volumen 117. Número 11. Disponible en: <http://ehsehplp03.niehs.nih.gov/article/fetchArticle.action?articleURI=info%3Adoi%2F10.1289%2Fehp.0901253> (Consultado el 9 de julio de 2010).
3. Grava, disponible en: [http://es.wikipedia.org/wiki/Grava\\_\(hormig%C3%B3n\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Grava_(hormig%C3%B3n)) (consultado el 10 de junio de 2010).
4. IUPAC. *Nomenclature of Regular Single-Strand Organic Polymers (IUPAC Recommendations 2002)* *Pure Appl. Chem.* n. ° 74. páginas. 1921-1956.
5. J. W., Nicholson. *The Chemistry of Polymers*. 3ª edición. Estados Unidos: University of Greenwich. 2006. pp. 300 páginas.
6. Meyer, Ralph. *The Artist's Handbook of Materials and Techniques*. 5ª edición. Estados Unidos: Viking. 1991. pp. 150 páginas
7. Perles, Pedro. *Hormigón Armado*. Buenos Aires, Argentina: Nobuko. 2005. pp. 450 páginas.

8. Plastic Recycling Resources: [http://www.plasticsresource.com/s\\_plasticsresource/](http://www.plasticsresource.com/s_plasticsresource/). (consultado el 10 de junio de 2010).
9. "Reencauche", Revista Mundo & Motor, Prensa Libre, Guatemala, agosto de 2010, No. 153.
10. Revista *Construcción y Tecnología*. México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. Mayo 1999. pp. 60 páginas.
11. Shotyk, William; Krachler, Michael; Chen, Bin (2006). "Contamination of Canadian and European bottled waters with antimony from PET containers" *Journal of Environmental Monitoring* 8 (2): 288. [http://www.rsc.org/delivery/\\_ArticleLinking/DisplayArticleForFree.cfm?doi=b517844b&JournalCode=EM](http://www.rsc.org/delivery/_ArticleLinking/DisplayArticleForFree.cfm?doi=b517844b&JournalCode=EM).
12. T. William Lambe. Robert V. Whitman. *Mecánica de suelos*. México: Editora Limusa. 1997. pp. 400 páginas.
13. Ulrich K. Thiele. *Polyester Bottle Resins, Production, Processing, Properties and Recycling*. Alemania: Heidelberg. 2007. pp. 85.

## **ANEXOS**

- **Informes de Resultados de las Pruebas.**

NOTA: Estos informes contienen la proporción por peso únicamente y no contienen las correcciones realizadas por el contenido de agua en los agregados.



**RESISTENCIA DE CILINDROS DE CONCRETO  
NORMA ASTM C-39**

INFORME No. S.C. - 380

O.T. No. 27109

HOJA 1/1

**INTERESADO:** Billy Josealberto Hernandez Hernandez Carné No. 2005-11823

**ASUNTO:** Diseño y realizacion de Mezcla de Concreto

**PROYECTO:** Tesis "Estudio Comparativo de la Resistencia a la Compresion en Mezclas de concreto elaboradas con materiales de reciclaje: Plastico y Llantas"

**DIRECCION:** 1ra. Calle 1-08 Zona 1 San Antonio Aguas Calientes sacatepequez

**FECHA:** 23 de Julio de 2,010

No CILINDRO OBRA	No. CILINDRO LABORATORIO	FECHA DE HECHURA	EDAD EN DIAS	CILINDRO REPRESENTATIVO DE LA FUNDICION	PESO EN kg	DIAMETRO EN cm	CARGA en Libras	RESISTENCIA kg/cm <sup>2</sup>	RESISTENCIA lb/plg <sup>2</sup>
1	43-7	14/06/2010	7	Concreto Estructural	12.616	15.180	49,499	124.06	1764.54
2	44-7	14/06/2010	7	Concreto Estructural	12.606	15.153	49,499	124.50	1770.75
3	45-7	14/06/2010	14	Concreto Estructural	12.711	15.213	66,143	165.05	2347.54
4	46-7	14/06/2010	14	Concreto Estructural	12.712	15.210	58,433	145.87	2074.81
5	47-7	14/06/2010	28	Concreto Estructural	12.762	15.220	77,925	194.28	2763.28
6	48-7	14/06/2010	28	Concreto Estructural	12.664	15.163	82,788	207.95	2957.71

**OBSERVACIONES :**

- El interesado proporciono el material para la mezcla.
- Las proporciones fueron dadas por el interesado.
- El asentamiento obtenido en la mezcla fue de 7 cm.
- Diseño teórico de acuerdo a la proporcion 1:2.65:2.65:0.47

Atentamente,

Vo.Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales  
Directora CII/USAC



Inga. Dilma Yanet Mejicanos, Jol  
Jefa Sección de Concretos





**RESISTENCIA DE CILINDROS DE CONCRETO  
NORMA ASTM C-39**

INFORME No. S.C. - 381

O.T. No. 27109

HOJA 1/1

**INTERESADO:** Billy Josealberto Hernandez Hernandez Carné No. 2005-11823

**ASUNTO:** Diseño y realizacion de Mezcla de Concreto

**PROYECTO:** Tesis "Estudio Comparativo de la Resistencia a la Compresion en Mezclas de concreto elaboradas con materiales de reciclaje: Plastico y Llantas"

**DIRECCION:** 1ra. Calle 1-08 Zona 1 San Antonio Aguas Calientes sacatepequez

**FECHA:** 23 de Julio de 2,010

No. CILINDRO OBRA	No. CILINDRO LABORATORIO	FECHA DE HECHURA	EDAD EN DÍAS	CILINDRO REPRESENTATIVO DE LA FUNDICION	PESO EN kg	DIAMETRO EN cm	CARGA en Libras	RESISTENCIA kg/cm <sup>2</sup>	RESISTENCIA lb/plg <sup>2</sup>
1	49-7	14/06/2010	7	Concreto Estructural adicionado con PET	12.269	15.150	31,392	78.99	1123.50
2	50-7	14/06/2010	7	Concreto Estructural adicionado con PET	12.319	15.087	31,887	80.91	1150.81
3	51-7	14/06/2010	14	Concreto Estructural adicionado con PET	12.290	15.173	41,725	104.67	1488.72
4	52-7	14/06/2010	14	Concreto Estructural adicionado con PET	12.385	15.150	39,303	98.90	1406.62
5	53-7	14/06/2010	28	Concreto Estructural adicionado con PET	12.234	15.140	48,022	121.00	1720.94
6	54-7	14/06/2010	28	Concreto Estructural adicionado con PET	12.365	15.223	47,537	118.47	1684.96

**OBSERVACIONES :**

- a) El interesado proporciono el material para la mezcla.
- b) Las proporciones fueron dadas por el interesado.
- c) El asentamiento obtenido en la mezcla fue de 7 cm.
- d) Diseño teórico de acuerdo a la proporcion 1:2.65:2.65:0.59
- e) La cantidad de PET adicionada a la mezcla fue de 1.77 kg.

Atentamente,

  
Inga. Dilma Yanét Mejicanos Jol  
Jefa Sección de Concretos

Vo.Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales  
Directora CII/USAC



EMG



RESISTENCIA DE CILINDROS DE CONCRETO  
NORMA ASTM C-39

INFORME No. S.C. - 382

O.T. No. 27109

HOJA 1/1

INTERESADO: Billy Josealberto Hernandez Hernandez Carné No. 2005-11823

ASUNTO: Diseño y realizacion de Mezcla de Concreto

PROYECTO: Tesis "Estudio Comparativo de la Resistencia a la Compresion en Mezclas de concreto elaboradas con materiales de reciclaje: Plastico y Llantas"

DIRECCION: 1ra. Calle 1-08 Zona 1 San Antonio Aguas Calientes sacatepequez

FECHA: 23 de Julio de 2,010

No. CILINDRO OBRA	No. CILINDRO LABORATORIO	FECHA DE HECHURA	EDAD EN DÍAS	CILINDRO REPRESENTATIVO DE LA FUNDICION	PESO EN kg	DIAMETRO EN cm	CARGA en Libras	RESISTENCIA kg/cm <sup>2</sup>	RESISTENCIA lb/plg <sup>2</sup>
1	55-7	14/06/2010	7	Concreto Estructural adicionado con hule	12.329	15.143	36,343	91.53	1301.83
2	56-7	14/06/2010	7	Concreto Estructural adicionado con hule	12.250	15.220	36,838	91.84	1306.30
3	57-7	14/06/2010	14	Concreto Estructural adicionado con hule	12.333	15.153	48,022	120.79	1717.99
4	58-7	14/06/2010	14	Concreto Estructural adicionado con hule	12.322	15.180	45,115	113.07	1608.26
5	59-7	14/06/2010	28	Concreto Estructural adicionado con hule	12.347	15.147	54,562	137.35	1953.59
6	60-7	14/06/2010	28	Concreto Estructural adicionado con hule	12.358	15.110	53,469	135.26	1923.76

OBSERVACIONES :

- El interesado proporciono el material para la mezcla.
- Las proporciones fueron dadas por el interesado.
- El asentamiento obtenido en la mezcla fue de 7 cm.
- Diseño teórico de acuerdo a la proporcion 1:2.65:2.65:0.50
- La cantidad de Hule adicionada a la mezcla fue de 2.32 kg.

Atentamente,

Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol  
Jefa Sección de Concretos

Vo.Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales  
Directora CII/USAC



EMG