



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

**UTILIZACIÓN DE GRANULADO DE CAUCHO RECICLADO COMO ADICIÓN PARA  
CONCRETO PERMEABLE PARA USO EN ESTACIONAMIENTOS VEHICULARES**

**José Gerardo González Quiñonez**

Asesorado por la Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol

Guatemala, septiembre de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**UTILIZACIÓN DE GRANULADO DE CAUCHO RECICLADO COMO ADICIÓN PARA  
CONCRETO PERMEABLE PARA USO EN ESTACIONAMIENTOS VEHICULARES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**JOSÉ GERARDO GONZÁLEZ QUIÑONEZ**

ASESORADO POR LA INGA. DILMA YANET MEJICANOS JOL

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Ángel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian De León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton De León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero
EXAMINADOR	Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos
EXAMINADORA	Inga. Karla Giovanna Pérez Loarca
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

**UTILIZACIÓN DE GRANULADO DE CAUCHO RECICLADO COMO ADICIÓN PARA  
CONCRETO PERMEABLE PARA USO EN ESTACIONAMIENTOS VEHICULARES**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 09 de mayo de 2016.

**José Gerardo González Quiñonez**



Guatemala, 29 de mayo de 2017

Ingeniero  
José Gabriel Ordoñez Morales  
Área de Materiales y Construcciones Civiles  
COORDINADOR

Ingeniero Ordoñez

Me dirijo a usted para informarle, que he revisado el trabajo de graduación: **UTILIZACIÓN DE GRANULADO DE CAUCHO RECICLADO COMO ADICIÓN PARA CONCRETO PERMEABLE PARA USO EN ESTACIONAMIENTOS VEHICULARES**, elaborado con el estudiante universitario José Gerardo González Quiñonez, quien contó con la asesoría de la suscrita.

Considerando que el trabajo desarrollado por el estudiante universitario González Quiñonez, satisface los requisitos exigidos en el reglamento de graduación, por lo cual recomiendo su aprobación.

Atentamente,

*"Id y enseñad a todos"*

  
Inga. Civil Dilma Yanet Mejicanos Jol  
Col. 5947  
ASESORA

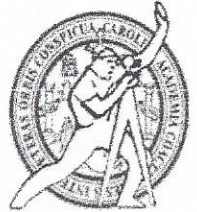
**Dilma Y. Mejicanos Jol**  
Ingeniera CMI  
Col. 5947



**USAC**  
**TRICENTENARIA**  
 Universidad de San Carlos de Guatemala  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

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

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



Guatemala,  
 11 de agosto de 2017

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


Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **UTILIZACIÓN DE GRANULADO DE CAUCHO RECICLADO COMO ADICIÓN PARA CONCRETO PERMEABLE PARA USO EN ESTACIONAMIENTOS VEHICULARES** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil José Gerardo González Quiñonez quien contó con la asesoría de la Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol.

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

Atentamente,

ID Y ENSEÑADA A TODOS

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



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

/mrrm.



*Mas de 136 años de Trabajo y Mejora Continua*



**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
FACULTAD DE INGENIERÍA

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

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen de la Asesora Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol y Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles Ing. José Gabriel Ordóñez Morales, al trabajo de graduación del estudiante José Gerardo González Quiñonez UTILIZACIÓN DE GRANULADO DE CAUCHO RECICLADO COMO ADICIÓN PARA CONCRETO PERMEABLE PARA USO EN ESTACIONAMIENTOS VEHICULARES da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

  
Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, septiembre 2017

/mrm.


*Mas de 136 años de Trabajo y Mejora Continua*





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: **UTILIZACIÓN DE GRANULADO DE CAUCHO RECICLADO COMO ADICIÓN PARA CONCRETO PERMEABLE PARA USO EN ESTACIONAMIENTOS VEHICULARES**, presentado por el estudiante universitario: **José Gerardo González Quiñonez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

  
Ing. Angel Roberto Sotelo García  
Decano en Función



Guatemala, septiembre de 2017



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por brindarme la vida para llegar a este momento y poner en mi camino a las personas que me ayudaron a culminar con éxito esta etapa de mi vida.
- Mis padres** Salvador González y Maricela Quiñonez, por su apoyo incondicional a lo largo de mi vida, por su amor y sus enseñanzas. Sin ustedes esto no habría sido posible.
- Mi hermana** Zucely González, por ser no solo mi hermana sino mi amiga, gracias por tu apoyo, amor y comprensión.
- Mis bisabuelos** Gonzalo Barrera y Piedad Meza, por ser un ejemplo de vida, por su amor y enseñanzas.
- Mis amigos** Juan Manuel García y Vilma Dueñas, por ser mis compañeros de batalla a lo largo de nuestros años de estudio, por motivarme y ayudarme en los momentos de dificultad.
- Mis abuelos y tíos** Por su cariño, apoyo y consejos.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Mi alma mater, por mi formación académica profesional, viva por siempre la gloriosa y tricentenaria.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por brindarme las herramientas académicas y sociales para ejercer tan honorable profesión.
<b>El pueblo de Guatemala</b>	A quien todo sancarlista debe la oportunidad de estudiar y optar a una carrera profesional.
<b>Honorable Comité de Huelga de Dolores, Facultad de Ingeniería</b>	Por enseñarme el sentido de la camaradería y mostrarme una vida universitaria que pocos tienen la dicha de conocer. Gris y negro por siempre.
<b>Mis amigos y compañeros de la facultad</b>	Por los buenos momentos, por compartir las risas y preocupaciones, por su apoyo y amistad.
<b>Movimiento Scout</b>	Por las enseñanzas, herramientas, valores y experiencias dadas a lo largo de todos estos años.

**Inga. Dilma Mejicanos**

Mi asesora de tesis, por su apoyo y colaboración en la realización de este documento.

**Comité Organizador de  
CEIC 2016**

Por permitirme compartir con ustedes una de las experiencias más gratificantes como estudiante y devolver a la universidad un poco de lo mucho que nos ha dado.

**Marimba de la Facultad  
de Ingeniería**

Por el conocimiento y experiencias vividas como músicos de esta Facultad.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVII
1. CONTEXTO AMBIENTAL Y ANTECEDENTES.....	1
1.1. Utilización y estudios previos referentes al concreto permeable.....	1
1.2. El ciclo hidrológico.....	3
1.3. Aguas subterráneas.....	5
1.3.1. Fuentes de recarga.....	6
1.3.2. Factores que influyen en la recarga y circulación de aguas subterráneas.....	7
1.3.3. Disminución del nivel freático como consecuencia de la impermeabilización del suelo por la actividad humana.....	8
1.3.4. Aumento de la escorrentía superficial por la impermeabilización del suelo y el balance hidrológico.....	11
1.4. Industria del caucho.....	13
1.4.1. Fabricación de neumáticos.....	13
1.4.2. Problemas ambientales generados por neumáticos desechados.....	15

1.4.3.	Tiempo de degradación del caucho .....	17
1.4.4.	Datos estadísticos sobre la generación de desechos de llantas de caucho.....	17
1.4.5.	Principales centros de acopio y disposición final de llantas de caucho en Guatemala .....	19
1.4.6.	Alternativas de reciclaje.....	20
2.	MATERIALES, OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN.....	23
2.1.	Concreto y su uso como pavimento .....	23
2.1.1.	Generalidades .....	23
2.1.2.	Comportamiento y estructura .....	24
2.1.3.	Cargas admisibles .....	25
2.1.4.	Módulos de ruptura.....	25
2.1.5.	Efectos de la permeabilidad en pavimentos y su estructura .....	26
2.2.	Concreto permeable.....	27
2.2.1.	Antecedentes .....	28
2.2.2.	Generalidades .....	28
2.2.3.	Aplicaciones .....	29
2.2.4.	Ventajas y desventajas.....	30
2.2.5.	Materiales del concreto.....	32
2.2.6.	Propiedades del concreto .....	34
2.3.	Llantas o neumáticos de caucho .....	37
2.3.1.	Generalidades .....	38
2.3.2.	Composición y estructura .....	39
2.3.3.	Características .....	41
2.3.4.	Propiedades .....	42
2.3.5.	Fabricación.....	43
2.3.6.	Caucho triturado de llantas obsoletas.....	44

3.	DESARROLLO EXPERIMENTAL .....	47
3.1.	Metodología del experimento.....	47
3.2.	Análisis de materiales.....	47
3.2.1.	Cemento .....	48
3.2.2.	Agregado grueso .....	48
3.2.3.	Agregado fino .....	49
3.2.4.	Adiciones .....	49
3.3.	Diseño de mezcla .....	50
3.4.	Elaboración de probetas para ensayo.....	53
3.5.	Ensayos.....	54
3.5.1.	Equipo utilizado.....	55
3.5.2.	Ensayos al concreto fresco .....	60
3.5.3.	Ensayos al concreto endurecido .....	62
3.6.	Resultados.....	63
3.6.1.	Datos obtenidos .....	63
3.6.2.	Cálculos realizados .....	66
3.6.3.	Resumen de resultados .....	69
3.6.4.	Gráficas y tablas .....	71
3.6.5.	Comparación e interpretación de resultados .....	72
3.6.6.	Tipos de fallas en especímenes ensayados.....	73
3.6.7.	Efecto del caucho triturado sobre el concreto .....	74
	CONCLUSIONES .....	77
	RECOMENDACIONES.....	79
	BIBLIOGRAFÍA.....	81
	ANEXOS .....	83



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Representación del ciclo hidrológico .....	3
2.	Diferencia entre agua de escorrentía e infiltración.....	4
3.	Distribución del agua subterránea .....	6
4.	Crecimiento de la ciudad de Guatemala de 1970 a 1980 .....	9
5.	Proyección de crecimiento de la ciudad de Guatemala de 2000 a 2020 .....	10
6.	Proceso general en la fabricación de llantas de caucho .....	15
7.	Incendio en un vertedero de llantas, ciudad de Guatemala .....	16
8.	Parque vehicular por tipo de vehículo, abril de 2016 .....	18
9.	Esquema de estructura para un pavimento de concreto.....	24
10.	Gráfico esfuerzo a compresión/contenido de aire.....	35
11.	Gráfico esfuerzo a flexión/contenido de aire.....	36
12.	Factores que influyen en la permeabilidad del concreto permeable .....	37
13.	Gráfico esfuerzo contra deformación de una muestra de caucho vulcanizado y caucho natural .....	38
14.	Partes constituyentes de un neumático o llanta de caucho .....	40
15.	Diversas granulometrías de caucho triturado .....	45
16.	Esquema de probetas elaboradas.....	54
17.	Elaboración de probetas para ensayo .....	54
18.	Balanza granataria .....	55
19.	Tamices para ensayo de granulometría en agregados finos .....	56
20.	Moldes para ensayos a compresión y flexión en concreto.....	57
21.	Mezcladora eléctrica para concreto.....	58



22.	Utilización del cono de Abrams para la prueba de asentamiento .....	58
23.	Uso del anillo para prueba de permeabilidad en pavimentos .....	59
24.	Ensayo a compresión en prensa para cilindros de concreto .....	60
25.	Determinación de temperatura al concreto fresco.....	61
26.	Ensayo a flexión en viga de concreto permeable .....	63
27.	Comparación de la resistencia a compresión de los tres tipos de mezcla ensayadas .....	71
28.	Comparación del módulo de ruptura de las diferentes mezclas ensayadas .....	72
29.	Tipos de fractura en cilindros sometidos a compresión.....	74
30.	Falla en espécimen de concreto permeable sometido a compresión ...	75

## TABLAS

I.	Módulo de ruptura recomendado para pavimentos de concreto .....	26
II.	Espesores aceptables para pavimentos de concreto permeable .....	29
III.	Resumen de resultados del trabajo de graduación <i>Desarrollo y uso de bloques de concreto permeable en senderos ecológicos</i> .....	50
IV.	Comparación de análisis de agregados para concreto .....	51
V.	Granulometría para agregado fino .....	64
VI.	Granulometría para agregado grueso .....	64
VII.	Características físicas.....	64
VIII.	Datos de laboratorio, mezcla núm. 1 .....	65
IX.	Datos de laboratorio, mezcla núm. 2 .....	65
X.	Datos de laboratorio, mezcla núm. 3 .....	66
XI.	Resultados de ensayos a compresión .....	69
XII.	Resultados de ensayos a flexión a 28 días.....	70
XIII.	Resultados de ensayos de permeabilidad .....	70
XIV.	Peso unitario y porcentaje de vacíos .....	70

XV. Comparación de resultados .....72



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>H</b>	Altura
<b>cm</b>	Centímetro
<b>∅</b>	Diámetro
<b>h</b>	Hora
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>lb</b>	Libra
<b>PSI</b>	Libra sobre pulgada cuadrada
<b>MPa</b>	Megapascales
<b>m</b>	Metro
<b>mm</b>	Milímetro
<b>in</b>	Pulgada



## GLOSARIO

<b>ACI</b>	Instituto Americano del Concreto ( <i>American Concrete Institute</i> ).
<b>AASHTO</b>	Asociación Americana de Oficiales Estatales de Carreteras y Transporte ( <i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i> ).
<b>ASTM</b>	Sociedad Americana de Pruebas y Materiales ( <i>American Society for Testing and Materials</i> ).
<b>Atmósfera</b>	Capa gaseosa que envuelve la tierra.
<b>Caucho</b>	Es un polímero elástico, proveniente de una emulsión lechosa de algunas plantas, también, puede ser producido sintéticamente; se utiliza comúnmente como materia prima para la elaboración de subproductos.
<b>COGUANOR</b>	Comisión Guatemalteca de Normas.
<b>Espécimen</b>	Pieza de concreto o cualquier otro material, elaborado bajo parámetros normalizados y cuyo fin es ser sometido a pruebas en laboratorio.

<b>Hidrosfera</b>	Parte de la Tierra ocupada por los océanos, mares, ríos, lagos y demás masas y corrientes de agua.
<b>Índice de infiltración</b>	Es un parámetro que permite conocer la cantidad de agua que se filtra por unidad de tiempo y área en el suelo o a través de un material determinado.
<b>Litósfera</b>	Capa externa de la tierra compuesta por suelo y roca.
<b>NTG</b>	Norma Técnica Guatemalteca.
<b>Percolar</b>	Cuando un fluido se filtra a través de un material o del suelo.
<b>Permeable</b>	Cuando un cuerpo, dado su grado de porosidad permite el paso de agua o un fluido a través de este.
<b>Revenar</b>	Retomar o volver una cosa a su estado propio.
<b>Subrasante</b>	Nombre dado a la capa de suelo inferior en la estructura de un pavimento.
<b>Xenobiótico</b>	Es todo compuesto químico que no forme parte de la composición de los organismos vivos. Suelen ser contaminantes (concentración en exceso) de determinados ambientes y generalmente ejercen algún tipo de efecto sobre los seres vivos, aunque no tengan toxicidad aguda.

## RESUMEN

Toda actividad humana tiene como consecuencia un daño al medio ambiente en menor o mayor grado; el área de la construcción no está exenta de esto, y aunque se diseñe un proyecto de tal manera que minimice el daño medioambiental, es inevitable su existencia. En esta línea, surgen dos problemáticas causadas al ambiente debido a la actividad humana: la reducción de la recarga de mantos acuíferos a través del suelo debido al incremento de urbanización y la mala disposición de desechos de neumáticos de caucho inservibles.

La relación entre ambos problemas y su posible solución, enmarcada en el área de la ingeniería civil, resulta en el planteamiento de adicionar granulado de caucho triturado, obtenido de llantas usadas, al concreto permeable con el fin de modificar sus propiedades mecánicas y lograr un cambio positivo. Específicamente, se plantea comparar la resistencia a flexión y compresión del concreto con caucho en relación a un concreto permeable convencional para que su uso sea de beneficio a la recarga del manto freático, utilizado en áreas de tránsito peatonal y vehicular.

En función de los resultados obtenidos a través de las muestras ensayadas del concreto descrito, se espera obtener una alternativa para el reciclaje de llantas de caucho inservibles a través de su utilización en tecnologías de ingeniería civil que promuevan prácticas de construcción amigables con el ambiente.





# OBJETIVOS

## General

Analizar la utilización de granulado de caucho reciclado como adición para concreto permeable para uso en estacionamientos vehiculares.

## Específicos

1. Determinar el comportamiento mecánico a compresión y flexión del concreto permeable con adición de caucho y su variación respecto al concreto permeable convencional.
2. Determinar y comparar la variación en el peso unitario y porcentaje de vacíos del concreto con adición de caucho y el concreto permeable convencional.
3. Analizar y comparar los cambios en la permeabilidad del concreto con adición de triturado de caucho reciclado y el concreto permeable común.
4. Establecer los parámetros dentro de los cuales es factible el uso de caucho triturado como adición en concreto permeables como pavimento en estacionamientos vehiculares.
5. Enfocar al medio técnico – ambiental los mejores resultados para su beneficio.



## INTRODUCCIÓN

Debido al crecimiento de zonas urbanas, el suelo tiene cada vez menos fuentes de abastecimiento para la recarga de mantos acuíferos; el concreto permeable es una de las soluciones a esta problemática pues permite la filtración del agua hacia el suelo; se ha observado, además, la existencia de otros problemas que afectan el ambiente: los neumáticos o llantas elaboradas de caucho que una vez utilizadas son botadas a vertederos o quemadas con fines diversos, perjudican, en ambos casos, el ambiente.

El interés de esta investigación se basa en la búsqueda de una alternativa para el procesamiento de llantas inservibles mediante su utilización en materiales utilizados en la ingeniería civil. Al adicionar caucho triturado a una mezcla de concreto permeable se determinó cómo afecta su comportamiento mecánico, específicamente a flexión y compresión; además, se establecieron las cantidades más convenientes a adicionar para obtener resultados positivos de este material.

Además de mejorar o mantener las propiedades mecánicas del concreto, se obtuvieron resultados positivos de infiltración, pues su índice es adecuado para mantener el manto freático con condiciones de humedad que favorecen el entorno ambiental y aprovechan el agua filtrada para mantener la vegetación, resaltando el enfoque que debe tener la construcción civil en la preservación y conservación ambiental.



# 1. CONTEXTO AMBIENTAL Y ANTECEDENTES

## 1.1. Utilización y estudios previos referentes al concreto permeable

El concreto permeable es considerado un material ecológico debido a que permite la filtración del agua hacia el suelo. Su uso y composición ha variado ligeramente desde sus inicios. La primera variante del concreto permeable se utilizó en 1852 en la construcción de dos casas en el Reino Unido: estaba constituido por grava gruesa y cemento. Posteriormente, dado que la II Guerra Mundial, dejó devastada a casi toda Europa, la falta de materiales obligó a los constructores a utilizar concreto permeable como alternativa. En años recientes, investigadores mexicanos y brasileños, han creado cementos específicamente para la producción de concreto permeable con el fin de aumentar sus propiedades mecánicas con relación al concreto permeable constituido por cemento hidráulico convencional.

En Guatemala, como primera pauta, se tiene que en febrero de 2011 se presentó en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala el trabajo de graduación de grado titulado *Estudios comparativos de la resistencia a la compresión en mezclas de concreto elaboradas con materiales de reciclaje: plástico y llantas* por Billy Josealberto Hernández Hernández, como requisito para optar al título de ingeniero civil.

La investigación es un estudio de la comparación de la resistencia a compresión de mezclas de concreto convencional y concreto adicionado con material plástico PET y material de llantas de caucho. El estudio consistió en sustituir un 10 % del volumen total de la mezcla por los agregados ya

mencionados; los resultados de las pruebas demostraron una disminución de la resistencia a compresión de los elementos modificados con relación a los constituidos por concreto convencional; el investigador recomienda, basado en sus resultados, la limitación de la mezcla modificada a usos no estructurales.

No se tiene constancia de más pruebas realizadas a nivel nacional referentes a la utilización de triturado de caucho como agregado del concreto; sin embargo, existe un estudio similar al del ingeniero Billy Josealberto Hernández Hernández, realizado en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, el estudio lleva por nombre *Valoración de propiedades mecánicas y de durabilidad de concreto adicionado con residuos de llantas de caucho* por el ingeniero Hermes Andrés Torres Ospina; el contexto de la investigación es similar, evaluando la resistencia a compresión y flexión, los resultados fueron similares, se constató una disminución en la resistencia del concreto, por lo que se recomendó no utilizar para concreto estructural.

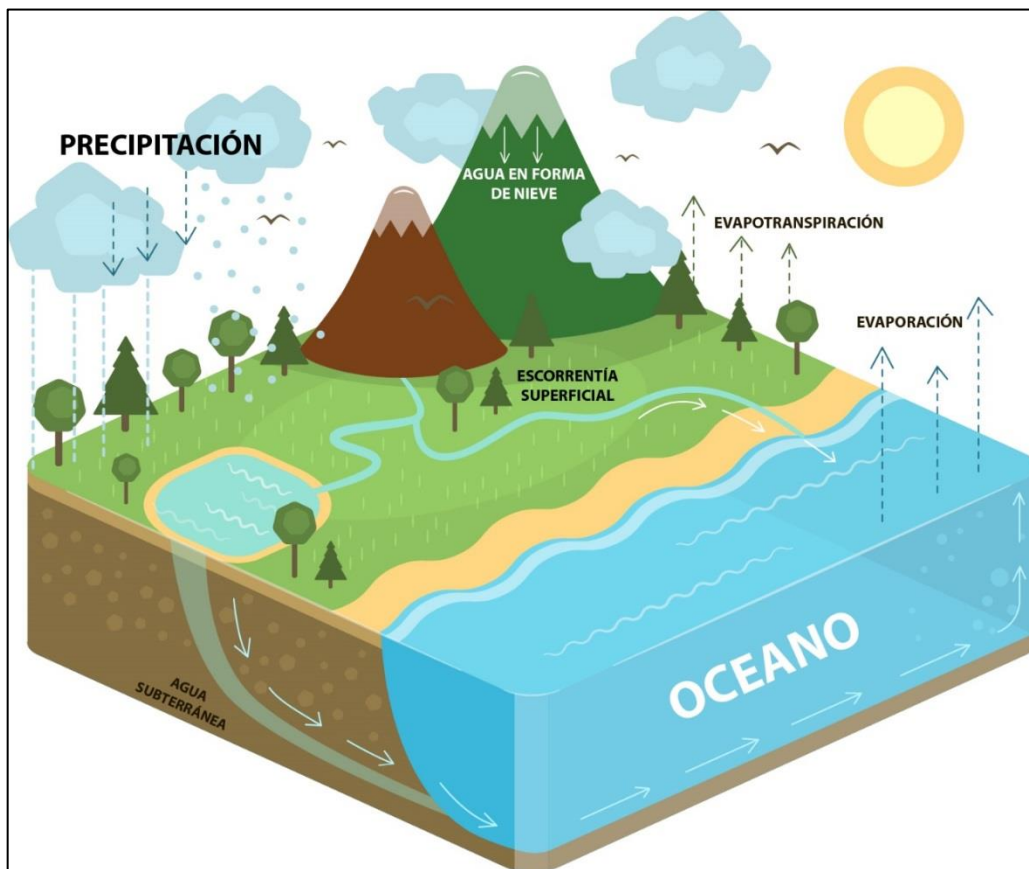
En ninguno de los dos estudios se describe la granulometría específica utilizada en el caucho triturado, limitándose a describir el porcentaje de volumen sustituido por agregado fino en la mezcla.

Como argumento final, no existen estudios directos sobre la utilización del caucho en concreto permeable, dado que el mismo no contiene agregado fino; el comportamiento del mismo bajo la adición de granulado de caucho con una granulometría específica puede variar de los estudios realizados con concreto convencional en una u otra medida.

## 1.2. El ciclo hidrológico

El agua existente en el planeta se mantiene en constante movimiento y cambia a distintos estados físicos debido a un proceso conocido como ciclo hidrológico: el agua pasa a través de la atmósfera, litosfera e hidrosfera. A lo largo de este proceso, el agua atraviesa distintos ecosistemas y es aprovechada por los organismos que los habitan. En general, el ciclo hidrológico puede resumirse según lo muestra la figura 1.

Figura 1. Representación del ciclo hidrológico



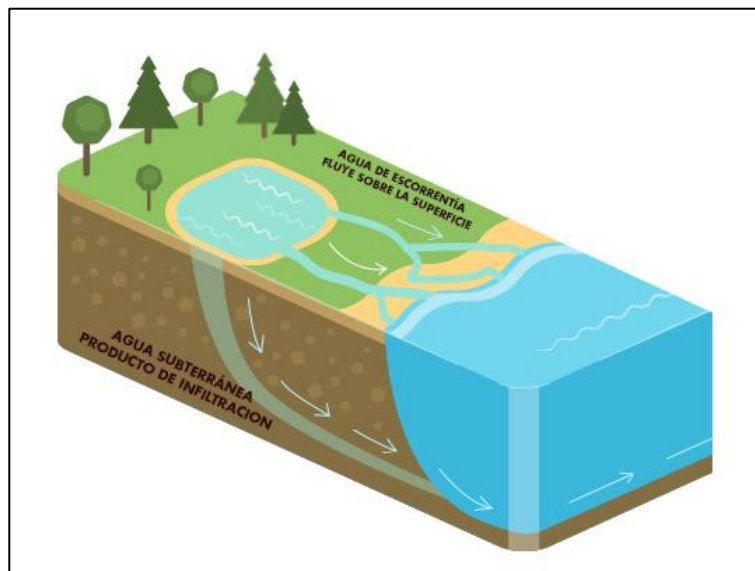
Fuente: elaboración propia.



El ser humano aprovecha para sus diversas actividades, principalmente, el agua dulce encontrada en almacenamientos superficiales y el agua subterránea. Desafortunadamente, debido a la contaminación ambiental resultante de estas mismas actividades, la utilización del agua superficial es cada vez más escasa, lo que resulta en el uso de las aguas subterráneas como principal fuente de abastecimiento para el consumo humano; en consecuencia, estas generan un interés particular en cuanto a su naturaleza y sus cuidados, aspectos a profundizar a continuación.

Cabe resaltar que el agua que fluye hacia el océano sobre la superficie terrestre y que es denominada escorrentía superficial, fluye usualmente a través de ríos en forma natural, mientras el agua que logra infiltrarse en el suelo y es conocida como agua subterránea puede tomar caminos más diversos y puede llegar a tardar siglos en regresar al océano.

Figura 2. **Diferencia entre agua de escorrentía e infiltración**



Fuente: elaboración propia.

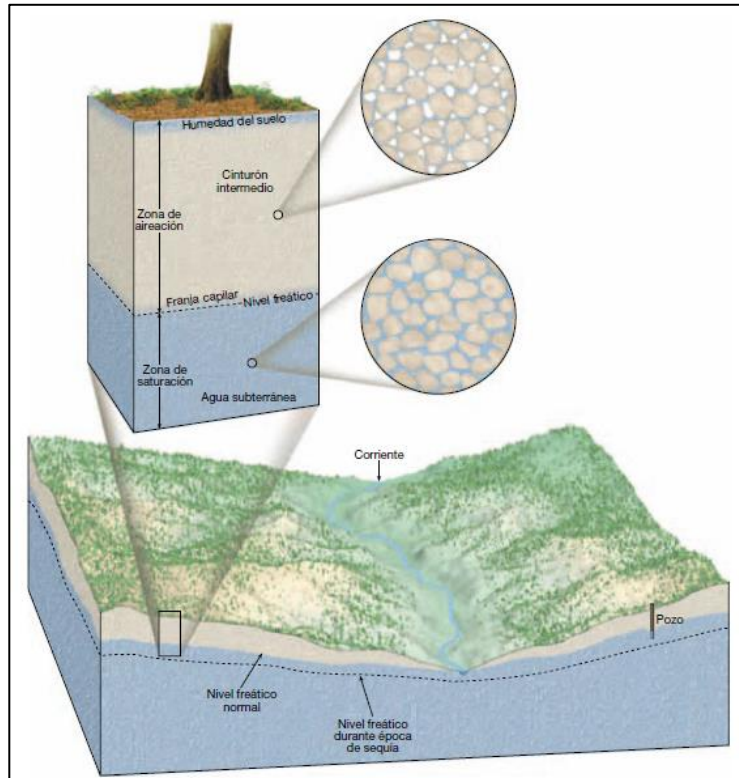
### **1.3. Aguas subterráneas**

Son un recurso muy valioso para el ser humano y, en general, para todo un ecosistema. Debido a que estas son prácticamente invisibles, la percepción sobre sus fuentes de recarga o el estado en que se encuentran son usualmente incorrectas. Si bien es cierto que existen ríos subterráneos que fluyen en cavernas e inclusive llegan a formar lagos, la mayor parte de agua subterránea se encuentra en depósitos que se mueven a través de los poros del suelo hasta llegar al mar; toma este recorrido, desde semanas hasta siglos.

Al infiltrarse el agua en el suelo, cierta parte es retenida cerca de la superficie por atracción molecular, esta zona, cercana a la superficie, está compuesta por raíces y elementos orgánicos que aumentan la infiltración del agua, se le denomina cinturón de humedad del suelo; parte del agua en esta zona es utilizada por las plantas y otro porcentaje se evapora. El agua que no es retenida en esta zona, percola hasta alcanzar niveles más profundos, en donde los poros o espacios vacíos del suelo están completamente llenos de agua, esta es conocida como zona de saturación, al nivel superior de esta zona se le conoce como nivel freático, este es un indicador indispensable para analizar el comportamiento del agua subterránea, o bien, diseñar pozos para la utilización humana.

A la zona comprendida entre el nivel freático y el cinturón de humedad se le conoce como zona de aireación, aquí el agua no es de aprovechamiento para pozos, pues la misma está aferrada a las partículas sólidas del suelo. En la figura 2 se ilustra de manera práctica la distribución ya mencionada.

Figura 3. **Distribución del agua subterránea**



Fuente: TARBUCK, Edward. *Ciencias de la Tierra*. p. 482.

### 1.3.1. **Fuentes de recarga**

Las aguas subterráneas son el producto directo de las precipitaciones pluviales que se infiltran en el suelo, sin embargo, esta puede darse de diversas maneras: una, cuando la lluvia cae directamente al suelo con características permeables, que permiten que el agua percole hasta llegar al nivel de saturación. También, puede darse el caso en que corrientes superficiales (ríos, riachuelos, entre otros) alimenten las aguas subterráneas; para que esta situación se dé, el nivel freático debe estar por debajo de la superficie de la corriente y el suelo debe tener características permeables. Existe, además, el

caso contrario al anterior, en el que el nivel freático se encuentra por sobre la superficie de la corriente y este alimenta a la corriente superficial; es común encontrar ambos casos combinados a lo largo de distintos tramos de una corriente superficial.

### **1.3.2. Factores que influyen en la recarga y circulación de aguas subterráneas**

Uno de los principales factores que condicionan el movimiento y almacenamiento de las aguas subterráneas es el material que compone el suelo; este puede analizarse desde dos puntos de vista: la porosidad y la permeabilidad.

La porosidad se refiere a la cantidad de vacíos existentes entre las partículas del suelo, a estos espacios se les denomina poros. Estos vacíos pueden llegar a representar entre un 20 % y 50 % del volumen total del suelo, también, existen grietas, fallas o diaclasas que se forman en la roca o suelo y que permiten el movimiento de las aguas subterráneas. La porosidad depende, también, del tamaño y disposición de las partículas del suelo, cuando existe un suelo con una gradación variada; las partículas más pequeñas se acomodan entre las de mayor tamaño impidiendo el paso del agua a través del suelo, por tal razón, que pueden existir arcillas con un 50 % de vacíos y gravas con tan solo un 20 %. En el caso del material ígneo o metamórfico, las grietas y fallas constituyen la porosidad o porcentaje de vacíos.

La porosidad por sí sola no es un buen indicador de la cantidad de agua que puede filtrarse en el suelo, ni de la velocidad a la que esta se moverá. Un suelo sedimentario puede contener un gran porcentaje de vacíos, pero puede que sus poros no estén conectados entre sí o sean tan pequeños que impidan

el movimiento del agua a través de estos. A la capacidad del suelo para permitir el movimiento del agua a través de sus poros con relativa velocidad se le denomina permeabilidad. Al tomar como ejemplo un suelo arcilloso para denotar la relación entre porosidad y permeabilidad, se observa que este tiene un gran porcentaje de vacíos, pero sus poros son tan pequeños que impiden el paso del agua, es decir, es impermeable.

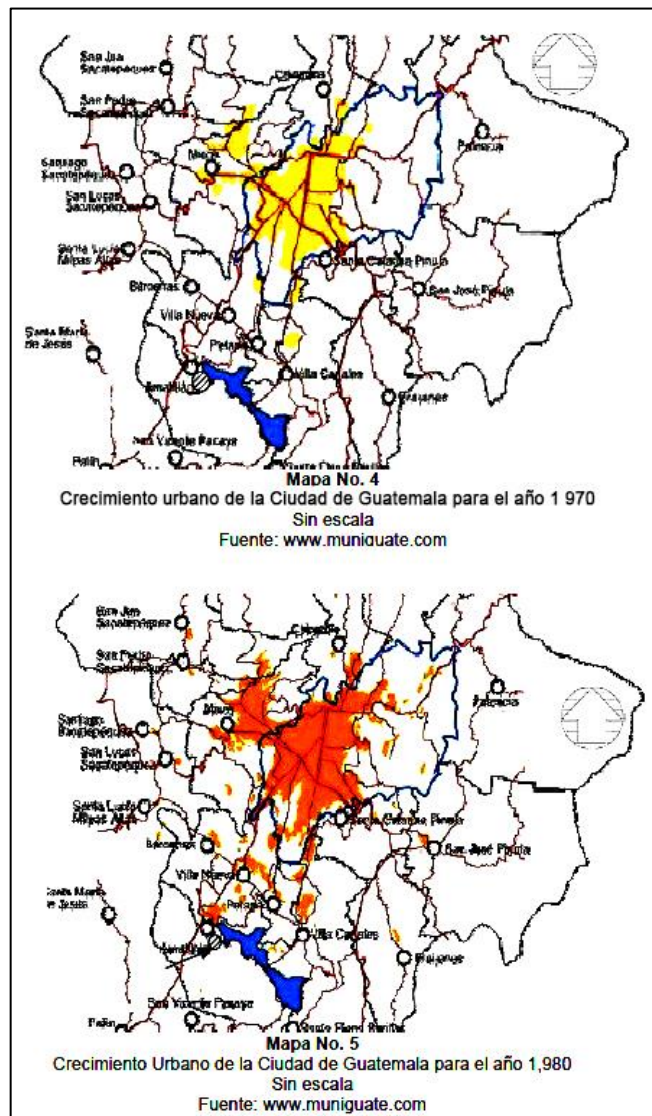
Según la permeabilidad del suelo, el agua subterránea puede dividirse en dos categorías: a una cierta porción que drena bajo la influencia de la gravedad se le denomina porosidad eficaz y es un indicador de la cantidad de agua que se mueve en el suelo y es utilizable; una porosidad eficaz alta es signo de un suelo permeable, a estos estratos de roca o sedimentos que permiten el movimiento del agua con relativa facilidad se les denomina acuíferos, un ejemplo de este tipo de suelo es la arena o grava. Por otra parte, se tiene el agua que no drena a través de los poros del suelo, sino que se adhiere al material y es retenida por el mismo, a esta se le conoce como retención específica y se da en suelos impermeables, como la arcilla o el limo, a estos estratos se les conoce como acuicludos.

### **1.3.3. Disminución del nivel freático como consecuencia de la impermeabilización del suelo por la actividad humana**

El nivel freático puede verse disminuido por distintas razones: naturales o debidas a la actividad humana. Entre las causas naturales principales se encuentran las sequías, sin la existencia de lluvia no habrá agua que percole hacia los acuíferos y debido a que estos están siempre en movimiento, eventualmente comenzarán a reducirse, y en casos extremos, a desaparecer. Las causas relacionadas con la actividad humana son más variadas y dependerá de varios factores: una es la creación de pozos y la velocidad a la

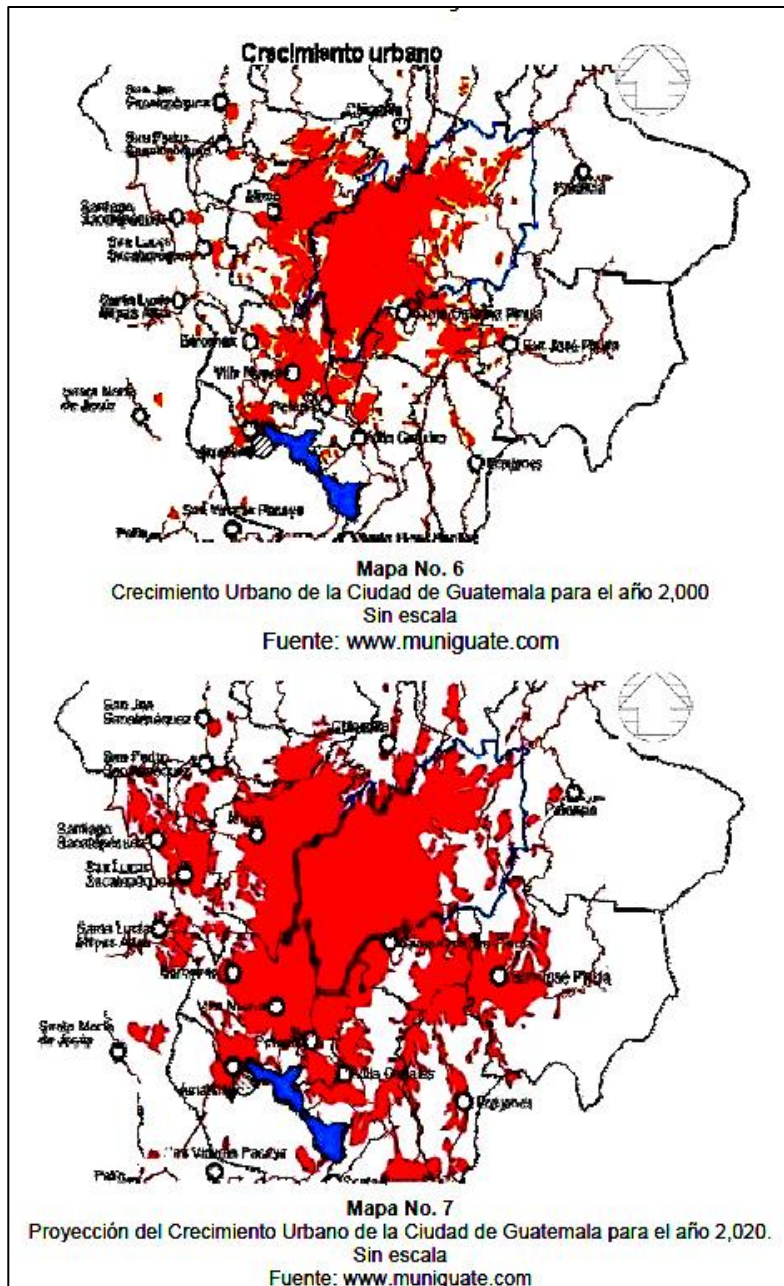
que se extrae el agua de los mismos; esto resultará en la disminución del nivel freático, sino se cuenta con un equilibrio entre el bombeo y la recarga del acuífero.

Figura 4. Crecimiento de la ciudad de Guatemala de 1970 a 1980



Fuente: KOHÖN, Sharon. *Propuesta de reglamento y normas de diseño para el desarrollo de proyectos urbanísticos en el municipio de Amatitlán*. p. 5.

Figura 5. **Proyección de crecimiento de la ciudad de Guatemala de 2000 a 2020**



Fuente: KOHÖN, Sharon. *Propuesta de reglamento y normas de diseño para el desarrollo de proyectos urbanísticos en el municipio de Amatitlán*. p. 5.

Otro de los factores más influyentes en la disminución del nivel freático es la impermeabilización del suelo debido al crecimiento de las ciudades, al cubrirse el suelo por concreto, o cualquier otro material impermeable, como el asfalto, baldosas y otros. El agua escurre evitando su infiltración en el suelo, en vez de ello, el agua pasará a unirse a un sistema de drenajes que usualmente desemboca en un río o cuerpo de agua, o en su defecto, en una planta de tratamiento para ser reutilizada. Este factor afecta de manera significativa la recarga de acuíferos, debido a que las ciudades se expanden cada vez más y con ello el área de suelo para la infiltración del agua hacia los acuíferos disminuye; ejemplo de ello es la figura 3, en la que se muestra el crecimiento que ha tenido la ciudad de Guatemala y la proyección esperada para el 2020.

Las consecuencias de la impermeabilización del suelo no son notorias al evaluarse en un período de tiempo corto, sin embargo, a largo plazo se encontrará un aumento en la profundidad de los pozos para abastecimiento de agua potable hasta que eventualmente los mismos se agoten. Se estima que para Guatemala, en promedio se extrae 9 veces más agua de la que el suelo recarga naturalmente.

#### **1.3.4. Aumento de la escorrentía superficial por la impermeabilización del suelo y el balance hidrológico**

El cambio en el uso de un suelo puede afectar de manera significativa el clima, el balance hidrológico y la calidad del agua de una determinada región. Algunos ejemplos de estos cambios puede ser el aumento de crecidas en los ríos, intensificación de sequías y una alteración en la calidad del agua, ya sea por contaminantes sólidos o químicos.



Estos efectos se dan de manera proporcional a los cambios sufridos por el suelo; en el caso de áreas urbanas o residenciales, el incremento de la permeabilidad reducirá el tiempo de concentración de la escorrentía, es decir; el pico de descarga se incrementa inmediatamente después de comenzada la lluvia, y al ser conducidos a través de un sistema de alcantarillado, se producirán inundaciones aguas abajo. Algunos estudios han determinado que en promedio, la reducción de áreas verdes y vegetación en zonas urbanas reduce la evapotranspiración entre un 25 % a 40 %, aumenta la tasa de escorrentía hasta un 30 % y la infiltración subterránea puede llegar a decrecer hasta un 50 %.

Eventualmente, toda el agua producto de la precipitación o de alguna otra fuente que cae sobre cierta área de terreno, específicamente, dentro de una cuenca hidrológica, debe salir de la misma dentro de un período de tiempo determinado. A este proceso se le conoce como balance hidrológico; este se calcula mediante mediciones en campo y una serie de procedimientos matemáticos relativamente simples y se sustenta en el concepto de que la misma cantidad de agua que entra en una cuenca debe salir de la misma en un intervalo de tiempo  $x$ . En este se establece una parte activa, comprendida por la escorrentía superficial y la evapotranspiración, y una parte pasiva, comprendida por el agua de las precipitaciones.

En general, la ecuación de balance hídrico contempla el agua de escurrimiento, la adicionada de reservas subterráneas y pérdidas por evaporación; esto debe coincidir con el agua medida de precipitaciones (entrada y salida). Al producirse un cambio en el uso del suelo, los valores asignados a cada factor se verán afectados, en el caso de una impermeabilización del suelo, el agua de escorrentía aumentará, mientras que la obtenida de reservas subterráneas se verá disminuida o inclusive, será nula.

Técnicamente, el balance se mantiene a pesar de estas circunstancias; sin embargo, una fuga del agua hacia otra cuenca, producto de manipulación humana, tal como la desembocadura de un drenaje en otra cuenca, o su uso para actividades agrícolas. Puede afectar la determinación del balance; empero, son factores identificables que usualmente se toman en cuenta para dichos cálculos.

#### **1.4. Industria del caucho**

El caucho es un polímero elástico que se obtiene a partir de una secreción lechosa llamada látex, encontrada en numerosas plantas. Al hacer una incisión o corte en algún árbol productor de látex, como el hule, el material comienza a escurrir y es recolectado en recipientes para posteriormente ser procesado. El caucho tiene un gran coeficiente de dilatación que aumenta considerablemente con el proceso conocido como vulcanización. Este proceso consiste en calentar el caucho crudo en presencia de azufre con el fin obtener una forma del mismo más dura y resistente; los resultados dependerán de la temperatura a la cual sea calentado el caucho, al alcanzar un valor entre 150 °C y 160 °C se obtiene el material oscuro y poco elástico que se utiliza para la elaboración de neumáticos. Este proceso fue descubierto por Charles Goodyear.

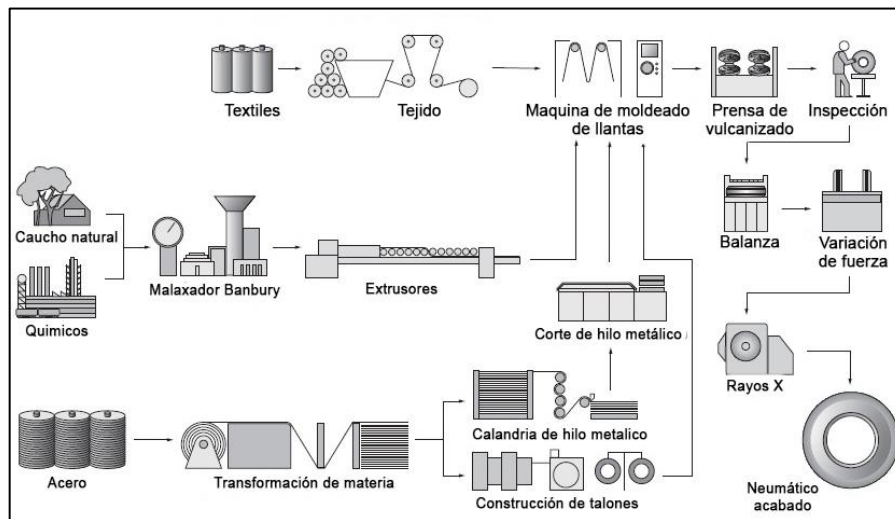
##### **1.4.1. Fabricación de neumáticos**

Las llantas o neumáticos pasan por complejos procesos para su fabricación y pueden estar constituidas por hasta más de 200 componentes ya sea de manera directa o indirecta. Esto es debido a que deben satisfacer altos controles de calidad que garanticen la seguridad de los usuarios. Aunque las llantas cuentan con un gran número de materiales, estos pueden clasificarse dentro de las siguientes categorías.

- Caucho natural: es el obtenido del látex de ciertas plantas, y tiene como fin reducir el calentamiento interno de la llanta y aportar una resistencia mecánica elevada.
- Caucho sintético: compone alrededor del 60 % del caucho de la llanta, se obtiene mediante procesos químicos y su función es la de aportar resistencia al desgaste por rodadura.
- Negro de carbono: obtenido de la combustión incompleta de ciertos componentes derivados del petróleo. Este multiplica la resistencia al desgaste de las llantas, constituye cerca del 30 % de la goma y es el responsable del color de los neumáticos; aportan, además, resistencia a la radiación ultravioleta (sol), fisuración y agrietamiento de la goma.
- Azufre: agente vulcanizador, evita que el caucho pase de un estado plástico a elástico.
- Sílice: procede de la arena y su función es mejorar la resistencia al desgarre de las gomas.
- Refuerzos textiles: se ha utilizado como refuerzo casi desde los orígenes de las llantas de caucho, su función es ayudar al neumático a rodar a gran velocidad sin sufrir deformaciones. Los materiales más utilizados en este rango son el poliéster, nylon, rayón y aramida, que aportan resistencia, aguante y comodidad.
- Refuerzos metálicos: se utiliza para lograr un ajuste hermético entre los neumáticos tipo radial y el aro; además, brindan resistencia y rigidez al neumático. El material usualmente utilizado es acero duro en alambre de forma trefilada.

Para dar una idea general de la forma de fabricación de una llanta, la figura 4 ilustra el proceso de fabricación de un neumático y cómo interviene cada uno de los materiales descritos en el proceso.

Figura 6. **Proceso general en la fabricación de llantas de caucho**



Fuente: *Salud y seguridad*. <http://saludyseguridad.blogspot.com/2011/04/proceso-de-fabricacion-de-neumaticos.html>. Consulta: 8 de mayo de 2016.

#### 1.4.2. **Problemas ambientales generados por neumáticos desechados**

Según Proverde, una empresa dedicada a la gestión integral de residuos, se estima que para el año 2013 en Guatemala se generaban ya más de 100 000 toneladas de desperdicio de llantas de caucho por año. La mayor parte de estos son llevados a vertederos, ya sea de carácter general, o creados específicamente para la recolección de neumáticos. Al estar las llantas compuestas por materiales sintéticos poliméricos y metálicos, su tiempo de degradación varía entre 500 y 3 000 años.

Adicionalmente, a su largo período de desintegración, que provoca una acumulación masiva del material, se generan otros problemas: incendios no provocados que producen la emanación de gases tóxicos a la atmósfera, que al ser respirados pueden llegar a causar problemas respiratorios, intoxicación y a largo plazo, cáncer. Asimismo, el uso de llantas como combustible para hornos no controlados tiene las mismas repercusiones en el ambiente y la salud, dado que los gases son igualmente liberados a la atmósfera. En la figura 5, se observa un incendio generado en un vertedero de llantas ubicado en la avenida Petapa de la ciudad de Guatemala.

Figura 7. **Incendio en un vertedero de llantas, ciudad de Guatemala**



Fuente: elaboración propia.

Otro problema común al encontrarse con vertederos de llantas es la creación de criaderos de mosquitos, ratas y otros organismos que pueden llegar a ser portadores de enfermedades: dengue, rabia o fiebre hemorrágica. Esto es debido a que por su forma y disposición, las llantas tienden a acumular agua y desechos que, eventualmente, al estar estancados, propician la generación de bacterias y otros organismos.

### **1.4.3. Tiempo de degradación del caucho**

Además del caucho, las llantas tienen, como bien se ha mencionado, otros materiales que tienen su propio tiempo de degradación; para los metales, como el acero, el tiempo de degradación varía entre 350 a 400 años; para los materiales sintéticos, como el nylon o poliéster, el tiempo de degradación puede variar entre 500 y 1 000 años. Ahora bien, para el caucho como tal, se tiene que:

“El componente principal de los neumáticos es el caucho vulcanizado: largas cadenas de polímeros de hidrocarburos que contienen carbono e hidrógeno, unidas durante la vulcanización por enlaces de azufre para obtener la elasticidad y la resistencia mecánica y térmica necesaria para sus aplicaciones. Se ha estimado que su degradación, acumulados a la intemperie, requiere entre 500 y 3 000 años. Así, desde cierto punto de vista, el caucho vulcanizado puede ser considerado un material xenobiótico”.<sup>1</sup>

### **1.4.4. Datos estadísticos sobre la generación de desechos de llantas de caucho**

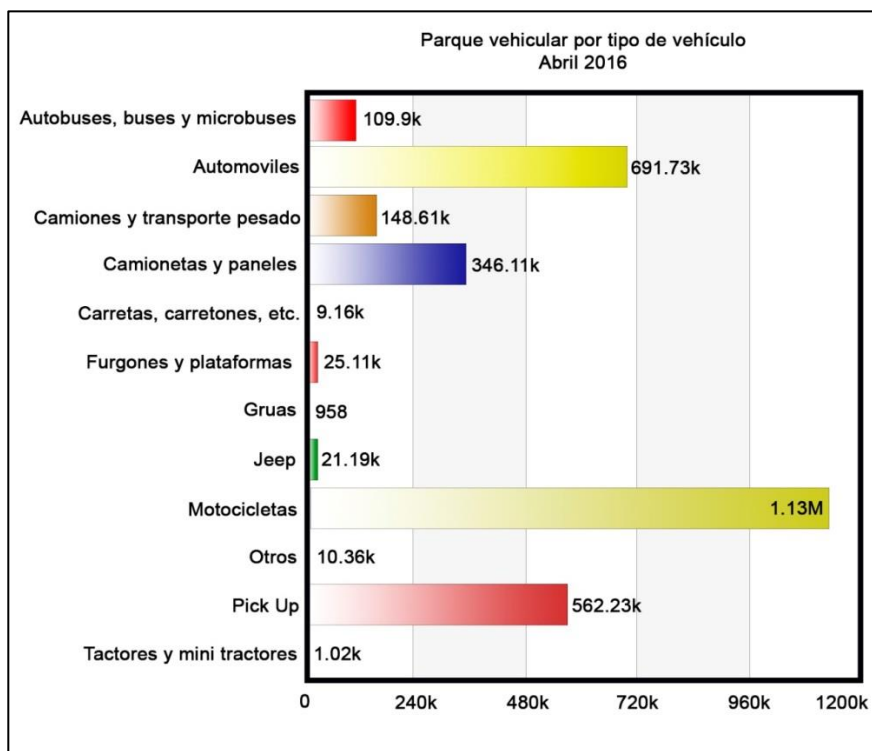
En Guatemala no se cuenta con un registro que controle la cantidad de neumáticos desechados, sin embargo, es posible realizar un estimado con base en datos como el parque vehicular, importación de hule y el peso de los neumáticos.

---

<sup>1</sup> PAÑOS, Nora. *Biodegradación de caucho vulcanizado*.  
[www.microbiologiaminera.com/home/BIODEGRADACION.doc](http://www.microbiologiaminera.com/home/BIODEGRADACION.doc). Consulta: 8 de mayo de 2016.

Según datos y proyecciones del Banco de Guatemala, se estima que para el 2015 habrán entrado a Guatemala más de 4 600 000 kilogramos de hule, aunque su utilización final, no es destinada a la elaboración de llantas en su totalidad. Ahora bien, el número de llantas en circulación puede estimarse a partir del parque vehicular. El siguiente gráfico, elaborado por la Cámara Guatemalteca de la Construcción, muestra el parque vehicular a nivel nacional para el mes de abril de 2016.

Figura 8. **Parque vehicular por tipo de vehículo, abril de 2016**



Fuente: Cámara Guatemalteca de la Construcción. *Sistema de registro fiscal de vehículos de la SAT*. <http://www.construguate.com/index.php/estadisticas/indicadoresmacroeconomicos/parque-vehicular>. Consulta: 14 de mayo de 2016.

Se puede considerar en promedio, la fabricación de 5 llantas por cada vehículo liviano y 9 llantas por vehículo pesado, con una vida útil por llanta entre 3 y 5 años. El peso promedio de una llanta es de 13 kg y 55 kg. Para vehículos livianos y pesados, respectivamente.

Según la figura 5, se tiene un aproximado de 712 000 vehículos pesados y 2 414 000 vehículos livianos. Lo que resulta en la existencia de poco más de 18 000 479 000 llantas en circulación, que eventualmente, en un tiempo no mayor a 5 años, serán desechadas y enviadas a vertederos o centros de recolección.

#### **1.4.5. Principales centros de acopio y disposición final de llantas de caucho en Guatemala**

La disposición final de llantas de caucho en Guatemala tiende a ser variada y carece de un control que registre los datos pertinentes a dicha actividad. Según datos de la Comisión de Desechos Sólidos CONADES del 2012, se estima que un 70 % de las llantas terminan en vertederos no autorizados, un 15 % son reencauchadas a nivel industrial y artesanal y solo un 12 % de todas las llantas desechadas es reciclado.

Entre algunas de las entidades dedicadas a la recolección de llantas usadas para reciclaje a nivel industrial, se cuentan:

- Inregua: empresa dedicada a la trituración de llantas usadas en la ciudad de Guatemala; cuenta con un sistema de recolección, un centro de acopio y una planta trituradora. Su planta se ubica en la 10 calle 13-79, zona 8, Mixco.



- Proverde: empresa dedicada a prestar servicios de recolección de residuos, destrucción de material médico, laboratorios sobre muestreo, análisis y caracterización de residuos. Cuenta con un programa de recolección de llantas, que entre el 2011 y 2013, recolectó más de 8 000 toneladas de llantas, el equivalente aproximado a 300 000 mil unidades. Son dispuestas en sus instalaciones de manera correcta, ya sea para ser reutilizadas, recicladas o destruidas. Sus oficinas centrales se ubican en la diagonal 6 10-65, zona 10, Centro Gerencial Las Margaritas Torre 1, nivel 12 oficina 1201.
- CARECA, Caucho Reciclado de Centroamérica: empresa fundada en el 2011 y ubicada en el departamento de Jutiapa, la planta contiene 13 máquinas para procesamiento de llantas, entre las cuales se encuentran separadoras de alambre, trituradoras y molinos para extracción de caucho. La empresa obtiene las llantas mediante un centro de acopio en que se compran las llantas recolectadas, por el valor de Q 0,10 por cada libra de llanta. Su planta se ubica en carretera a El Salvador km 114,5 Cerro Gordo, Jutiapa.

#### **1.4.6. Alternativas de reciclaje**

Además de la trituración de llantas existen otras alternativas que se utilizan en la actualidad: formas de reciclaje, desde luego, en mayor y menor número, entre estas se encuentra.

- Reencauche: consiste en colocar una nueva banda de rodamiento a la llanta sobre su superficie ya desgastada, esta banda es adherida mediante material cementante y finalmente vulcanizada. Esta técnica permite reutilizar las llantas que prolongan así su tiempo de vida y

reducen el consumo de materiales hasta 3,5 veces en relación a la producción de una llanta nueva; su utilización es más frecuente en neumáticos destinados para uso en transporte pesado.

- Incineración: ciertas industrias utilizan las llantas como combustible para hornos de incineración que dejan pocos o ningún residuo; sin embargo, si la empresa no cuenta con los sistemas adecuados, los gases emanados pueden liberarse a la atmósfera que causan una contaminación considerable y en ciertos casos, riesgo de intoxicación para las poblaciones cercanas a la planta de incineración.
- Alternativas varias: son las menos comunes y representan un valor inferior al 1 % de utilización de llantas para reciclaje. A nivel industrial puede mencionarse el procesamiento del hule de las llantas para la elaboración de calzado, artículos deportivos, entre otros productos fabricados de dicho material; no es común, pues el costo de la transformación de las llantas aunado al transporte y recolección, tienen a elevar el precio final de los productos que resultan en una alternativa poco atractiva para el sector empresarial.

Otras alternativas de reciclaje tienen lugar a nivel comunitario y/o artesanal; las llantas son utilizadas para la elaboración de juegos infantiles, jardineras e inclusive muebles, entre otros usos domésticos, con el fin de evitar que terminen en un vertedero clandestino. Aunque estas prácticas son insignificantes comparadas con otros medios de reciclaje como la trituración, es cada vez más común en pequeñas comunidades, comercio informal y personas individuales.



## **2. MATERIALES, OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN**

### **2.1. Concreto y su uso como pavimento**

A lo largo de la historia se han utilizado distintos materiales para la construcción de caminamientos, carreteras o áreas sobre las cuales se espera tener un tránsito vehicular o peatonal. Entre estos materiales se encuentra el concreto hidráulico, usado desde hace más de un siglo en la construcción de carreteras, clasificado como un pavimento rígido; existen diversas clasificaciones, según su diseño y aplicable al área de carreteras, pueden ser: pavimentos de concreto simple o pavimentos de concreto continuamente reforzados con barras de acero, por ejemplo.

#### **2.1.1. Generalidades**

Sobre el pavimento de concreto recae la responsabilidad estructural de soportar el tránsito peatonal o vehicular, las capas inferiores, como la base y subbase, se encargan únicamente de dar un apoyo uniforme al concreto. El espesor de la losa de concreto puede ser inferior a 20 cm para tránsito ligero y llegar hasta 40 cm en casos donde el tránsito sea muy pesado, por ejemplo, en aeropuertos. Entre las ventajas del concreto hidráulico sobre otros materiales como el asfalto y su uso como pavimento se encuentran una mejor durabilidad, bajo costo de mantenimiento, seguridad y altos índices de servicio.

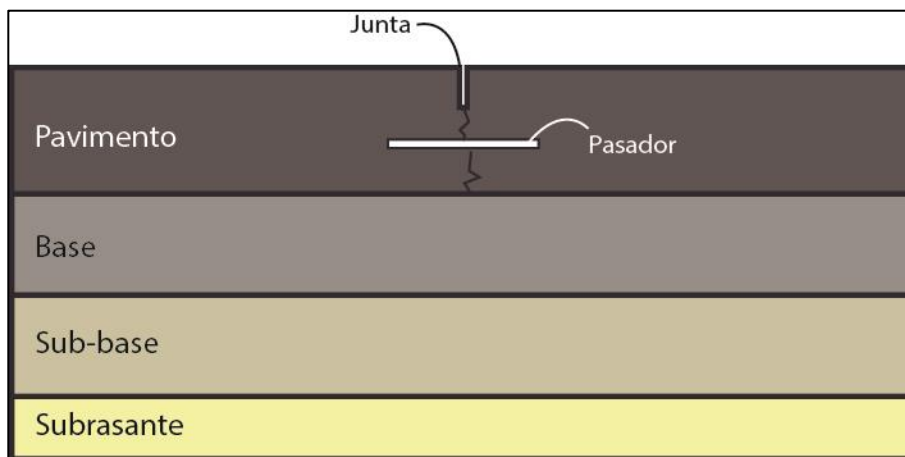
La durabilidad dependerá, además, de factores como la fatiga a flexión que sufra el concreto, espesor de la losa, resistencia a flexión del concreto, el clima y las cargas a las que sea sometido.

### 2.1.2. Comportamiento y estructura

“El concreto tiene un comportamiento, bajo acciones de tráfico, fundamentalmente elástico, incluso en condiciones severas de tráfico pesado, intenso y lento y elevadas temperaturas, no experimenta deformaciones viscoplásticas. Con un módulo de Young que fácilmente supera los 40 000 MPa.”<sup>2</sup>

El concreto no necesita, además, de una base con la misma función que la de un pavimento flexible; está más bien debe ser un apoyo firme y resistente a la erosión. Sin embargo, no debe restársele importancia al cimiento del concreto, pues un suelo heterogéneo que sufra cambios de volumen, puede afectar de manera considerable la estructura final si no se cuenta con una base y subbase diseñadas adecuadamente.

Figura 9. **Esquema de estructura para un pavimento de concreto**



Fuente: elaboración propia.

<sup>2</sup> KRAMER, Carlos. *Ingeniería de carreteras*. p. 346.

En la figura 7 se observa un esquema general de la estructura de un pavimento elaborado con concreto hidráulico, nótese la proyección del pasador, en caso sea la modalidad utilizada en las juntas. Las juntas se hacen debido a las variaciones de volumen que pueda tener el concreto; estas deben ser imperceptibles a los usuarios; también, evitan un alabeo de las losas por gradientes de temperatura.

Los pavimentos de concreto no se ven afectados por acumulación de aceites o combustibles en la superficie; esta es una ventaja de importancia en estacionamientos y rampas, dado que con frecuencia se suele dar el derramamiento de este tipo de fluidos.

### **2.1.3. Cargas admisibles**

Debido a que el concreto permeable posee características mecánicas inferiores a las del concreto convencional como: resistencia a compresión, su uso se inclina más para soportar cargas vehiculares pequeñas, como vehículos tipo sedán o picops. Según el *Reglamento para el control de pesos y dimensiones de vehículos automotores y sus combinaciones*, emitido por el Ministerio de Comunicaciones, estas cargas corresponderían a las de un vehículo tipo S-3, cuya carga máxima permitida por eje (simple) corresponde a 5 000 kg.

### **2.1.4. Módulos de ruptura**

Entre las propiedades mecánicas del concreto se encuentra la resistencia a flexión, conocida también como módulo de ruptura, que juega un papel importante en el diseño de pavimentos debido a que la circulación de vehículos provoca esfuerzos a tracción y flexión en el material. Desde luego esta

propiedad depende de factores como el tipo de agregados, el diseño de la mezcla y estructura, pero debe tenerse en cuenta que el valor de resistencia debe satisfacer a las demandas de los usuarios; es decir, el módulo de ruptura del concreto debe estar en un rango dentro del cual pueda soportar las cargas a las que será sometido durante su vida útil. En el caso del uso de concreto como pavimento, en la tabla I se presentan algunos valores de módulo de ruptura de concreto como pavimento; es de recordar que estos valores solo pretenden dar una idea del rango a manejar según el tipo de tráfico, el valor final del diseño dependerá de los códigos y requerimientos de la estructura específica a diseñar.

Tabla I. **Módulo de ruptura recomendado para pavimentos de concreto**

Tipo de pavimento	Módulo de ruptura (MR) recomendado	
	Kg/cm <sup>2</sup>	psi
Autopista	48,0	682,7
Carretera	48,0	682,7
Zona industrial	45,0	640,1
Urbanas principales	45,0	640,1
Urbanas secundarias	42,0	597,4

Fuente: elaboración propia.

De manera general, los módulos de ruptura aceptables van desde los 41 hasta los 50 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días de fraguado.

### **2.1.5. Efectos de la permeabilidad en pavimentos y su estructura**

Los pavimentos rígidos pueden sufrir distintos tipos de deterioro o falla, entre estos se encuentran juntas, fisuras y grietas, deterioro superficial y otros

tipos más diversos. En el caso de las juntas pueden darse distintos tipos de deterioro, como las deficiencias por sellado, estas se refieren a la acumulación de material incompresible en las juntas que impidan el movimiento del concreto que producen fisuras o grietas. Otros tipos de deterioro directamente relacionados con la infiltración o retención excesiva de agua son:

- **Baches:** es la desintegración de ciertas porciones del concreto que dan lugar a cavidades irregulares. Se producen ya sea por causas aisladas o por la convergencia de diversas situaciones, por ejemplo, cuando las capas inferiores han sido mal diseñadas, el espesor del pavimento es insuficiente o por errores del constructor, como la formación de cavidades o fisuras que den lugar a la acumulación de agua, lo que provoca una fuerza interna que termina por reventar el pavimento, fragmentándolo y dando lugar a los baches.
- **Hundimientos:** es la depresión de la superficie del pavimento en un área localizada, pueden estar acompañadas de fisuramiento significativo. Esto puede ocurrir cuando se produce un asentamiento en la subrasante o bien por condiciones de retención excesiva de agua acompañado de una deficiente compactación al momento de construir la estructura o por simple movimiento del suelo.

## **2.2. Concreto permeable**

Es un tipo de concreto especial que se caracteriza por contener un porcentaje casi nulo de agregado fino lo que genera un alto grado de porosidad o vacíos interconectados que permiten el paso del agua a través de su estructura. A lo largo de la historia, el concreto permeable ha tenido variantes en su utilización, según el contexto de la época y las necesidades presentadas;



sin embargo, siempre se ha caracterizado por la ausencia de finos en su composición.

### **2.2.1. Antecedentes**

Las aplicaciones del concreto permeable han sido distintas a lo largo de la historia, se estima que se comenzó a utilizar como material a mediados del siglo XIX. Como se ha mencionado anteriormente, este tipo de concreto se utilizó por primera vez en 1852 en el Reino Unido. Posteriormente, en la década de 1930 la Asociación Escocesa de Vivienda adoptó el concreto permeable para la construcción de tipo residencial; construyó para finales de 1942 más de 900 casas con este material. Luego de la Segunda Guerra Mundial, debido a la gran devastación acontecida en Europa, las autoridades se vieron en la necesidad de buscar alternativas de construcción, optando por utilizar concreto permeable para la edificación de viviendas. Fue hasta 1946 cuando el uso del concreto permeable se diversificó en una amplia gama de aplicaciones.

### **2.2.2. Generalidades**

El concreto permeable se compone principalmente de cemento Portland convencional, agregado grueso y agua, esta composición sin finos hace que una fina capa de pasta de cemento recubra el agregado grueso uniéndolo en los puntos de contacto entre un elemento y otro. Como resultado, se forman vacíos interconectados que permiten el paso del agua de una manera fácil y rápida. La capacidad de drenaje del concreto permeable, es decir, la velocidad a la que deja fluir el agua por sus poros, varía según el tamaño del agregado y la densidad de la mezcla; aunque según referencias del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, este se encuentra en el rango de 81 a 730 l/min por cada metro cuadrado de concreto permeable.

Otra característica particular del concreto permeable es que tiene un porcentaje de vacíos entre el 15 % y 35 %. Gracias a su alto nivel de permeabilidad, además de filtrar el agua al suelo, permite la recarga de mantos acuíferos y evita que gran parte de los contaminantes que se encuentran sobre el pavimento sean arrastrados por las corrientes y llevadas directamente a los sistemas de alcantarillado o a los ríos y cuerpos de agua utilizados como desagüe.

### 2.2.3. Aplicaciones

Sus aplicaciones hoy en día pueden ser realmente variadas: recubrimiento de plazas, parques, caminamientos, fuentes, ciclovías y estacionamientos. Por sus propiedades mecánicas, ofrece una durabilidad bastante aceptable; empero, es importante resaltar que para cada una de sus aplicaciones existen ciertos espesores que le permitirán desempeñarse de manera adecuada; la tabla II muestra un rango de referencia de ciertos espesores y aplicaciones que deben tomarse únicamente como referencia, pues el espesor final dependerá del diseño de la estructura y su cimentación.

Tabla II. **Espesores aceptables para pavimentos de concreto permeable**

<b>Uso</b>	<b>Espesor (cm)</b>
Vías de tráfico pesado	15
Áreas de carga	15
Vías de tráfico medio	12
Vías de tráfico ligero	10
Estacionamiento vehicular ligero	8
Vías de uso peatonal	6
Ciclo pistas	6

Fuente: Facultad de Ingeniería, UNAM. *Aspectos generales del concreto permeable*. p. 9.

Como pavimento, los usos del concreto permeable pueden ser muy variados, otras aplicaciones que se le ha dado son: patios y jardines, pavimentos, muros y pisos donde se requiera de cierto aislamiento acústico, dado que el material tiene esta propiedad, e inclusive, ayuda a disminuir el ruido causado por el rodamiento de los vehículos, siendo esta una de sus ventajas.

#### **2.2.4. Ventajas y desventajas**

El concreto permeable presenta múltiples ventajas sobre el concreto convencional, además, de ser más económico y ecológico. Entre estas ventajas se encuentran:

- Gracias a su capacidad permeable, permite la filtración del agua pluvial hacia el suelo, contribuyendo a recargar los mantos acuíferos.
- Evita que gran parte del agua escurra por las calle, contaminándose y uniéndose a las aguas negras en los sistemas de drenaje.
- Dada su estructura, existe menos posibilidad de formación de baches o deformaciones.
- Debido a su naturaleza porosa y color, contribuye a reducir las islas de calor en las ciudades.
- Disminuye las distancias de frenado de los vehículos y evita el deslizamiento de los mismos en condiciones de lluvia.
- Por su composición y estructura, ayuda a reducir los ruidos generados por rodamiento y en otros usos, tiene propiedades de aislamiento acústico.

- Su elaboración no requiere de mano de obra especializada y puede fabricarse con la misma facilidad que el concreto convencional.
- Presenta cierta versatilidad de acabados, como color o textura, añadiendo estética a las estructuras.
- Es más económico que el concreto convencional y es menos susceptible a presentar fisuras o deformaciones.

Entre las principales desventajas del concreto permeable se encuentran:

- Eventualmente puede darse una pérdida de permeabilidad debido a la obstrucción de sus poros por intrusión de sólidos como polvo o arena. Esto hace necesario un mantenimiento utilizando agua a presión o succión por aspiradora.
- Presenta una resistencia al desgaste menor que la del concreto convencional, por lo que su uso debe limitarse a tránsito ligero.
- Puede presentar problemas cuando se instala en suelos impermeables, como en el caso de suelos arcillosos. Por lo que debe verificarse la permeabilidad de los suelos previo a su instalación.

Para que el concreto permeable tenga un funcionamiento exitoso, deberán tenerse en cuenta ciertos aspectos. En áreas con registro de altos niveles de precipitación pluvial, será necesario proveer a la estructura de un sistema de drenaje, ya que el concreto permeable por sí mismo podría no ser suficiente para filtrar el agua percibida. Ligado a este factor, deberá tenerse en cuenta la capacidad de infiltración del suelo, puede ser un mínimo aceptable de 13 mm/h.

Tampoco, se recomienda la aplicación de concreto permeable en zonas áridas o con un nivel de polvo alto que pueda ser arrastrado por el viento, debido a que esto acelerará la obstrucción de los poros del pavimento si no se cuenta con el mantenimiento adecuado. Durante el proceso de construcción debe ponerse especial atención en no exceder el nivel de compactación recomendado para el suelo y evitar que arena o tierra se deslice sobre el pavimento una vez sea instalado.

### **2.2.5. Materiales del concreto**

Como se ha mencionado anteriormente, los principales componentes del concreto permeable son el cemento, agregado grueso y agua. Este por ser un tipo especial de concreto poroso no contiene agregado fino, o en todo caso, utiliza un porcentaje muy bajo.

- **Agregados:** usualmente se utilizan tamaños de agregado grueso entre 3/4 y 3/8 de pulgada; pueden considerarse aptos para su uso: gravas, gravas trituradas, escoria de horno o piedra triturada. En general, todo agregado a utilizar para la elaboración de concreto, debe cumplir con la Norma ASTM C33, Especificación Normalizada para Agregados para Concreto. La razón por la que el agregado fino es casi nulo o inexistente, se debe a que su uso puede afectar la interconexión de los poros o vacíos del concreto.
- **Cemento:** generalmente se utiliza cemento Portland convencional, en Guatemala estos deben cumplir con la Norma Coguanor NGO 41 0001. Básicamente, el cemento Portland se considera un aglomerante plástico hidráulico; compuesto principalmente de piedra caliza, silicatos y esquisto, todos finamente triturados y sometidos a diversos procesos que

dan como resultado final el cemento. Existen diversas clasificación según sus características y usos:

- Tipo I: normal, su uso está generalizado para la construcción de casas, mampostería, cimentaciones, puentes y estructuras en las que no se requiera ningún tipo de propiedades específicas en el concreto.
  - Tipo II: alta resistencia rápida, genera una menor cantidad de calor de hidratación y presenta moderada resistencia al ataque de sulfatos. Sus aplicaciones son similares al tipo I, aunque se presta bien para su uso en prefabricados o estructuras de uso industrial.
  - Tipo III: alta resistencia temprana, este produce una resistencia elevada en un tiempo de fraguado menor al convencional, sus granos son más finos que el tipo I, y genera un calor de hidratación mayor. Se utiliza comúnmente en prefabricados, como fosas, tanques, postes, entre otros.
  - Tipo IV: de bajo calor de hidratación, su composición química hace que genere menor calor de hidratación; empero, esto produce una pérdida en resistencia; su uso se limita a obras hidráulicas como represas o diques.
  - Tipo V: alta resistencia a sulfatos, es ideal para obras que están en contacto con agua o humedad, ya sea dulce o salada.
- Agua: es utilizada para la elaboración de concreto hidráulico, debe cumplir con los requisitos exigidos por la norma técnica guatemalteca

COGUANOR NTG 41073 – Agua de mezcla para uso en la producción de concreto de cemento hidráulico. Especificaciones: según la norma, el agua debe ser esencialmente libre de agregados, residuos de aditivos no requeridos o cualquier tipo de materia o sustancia presente en una cantidad significativa según parámetros establecidos en dicho documento. A su vez, esta puede provenir de fuentes de agua potable, hielo y cualquier otra fuente bajo previa aprobación y análisis de su contenido.

#### **2.2.6. Propiedades del concreto**

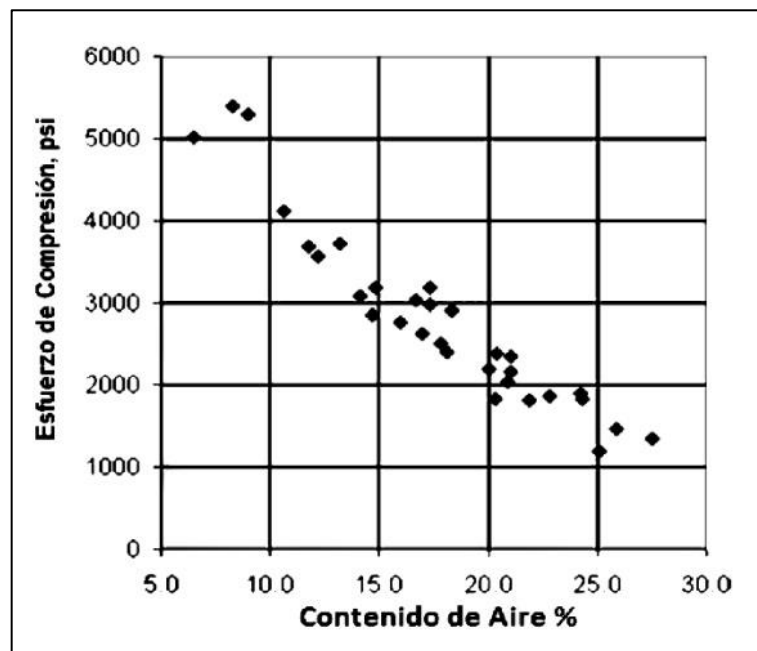
El concreto permeable por su carencia de agregado fino difiere del concreto convencional en sus rangos de resistencia mecánica. Sus propiedades como la resistencia a compresión, flexión, porosidad, entre otras, dependerán del diseño de la mezcla, el proporcionamiento de los materiales y, desde luego, su calidad. En relación a sus características más relevantes están:

- Resistencia a la compresión: el rango normal del concreto permeable, según el comité ACI 522, se encuentra entre los 35 kg/cm<sup>2</sup> hasta los 280 kg/cm<sup>2</sup>, el valor a utilizar depende de los requerimientos de la estructura. Adicional a los materiales, un factor que influye de manera considerable en la resistencia a compresión del concreto permeable es el contenido de aire. En la figura 8 se aprecia la relación entre la resistencia a compresión y el contenido de aire según estudios realizados por el comité ACI 522. La resistencia a compresión del concreto permeable se evalúa mediante la Norma ASTM C39.
- Resistencia a flexión: esta es de gran relevancia al utilizar concreto permeable en la construcción de pavimentos o losas sobre el suelo. La

resistencia a flexión del concreto permeable representa cerca del 30% de la resistencia a compresión, y es por lo tanto, mayor que la del concreto ordinario. El rango normal en este tipo de concreto usualmente se encuentra entre los 10,5 kg/cm<sup>2</sup> y 40 kg/cm<sup>2</sup>.

- Densidad: esta es alrededor del 70 % del concreto convencional, la dosificación de material y la compactación de la mezcla influyen considerablemente en la densidad del concreto. Esta se encuentra generalmente entre los 1 680 kg/cm<sup>2</sup> y 1 920 kg/m<sup>3</sup>. Para el concreto permeable, la Norma ASTM C1688 especifica un método para determinar la densidad del concreto en relación a su contenido de vacíos.

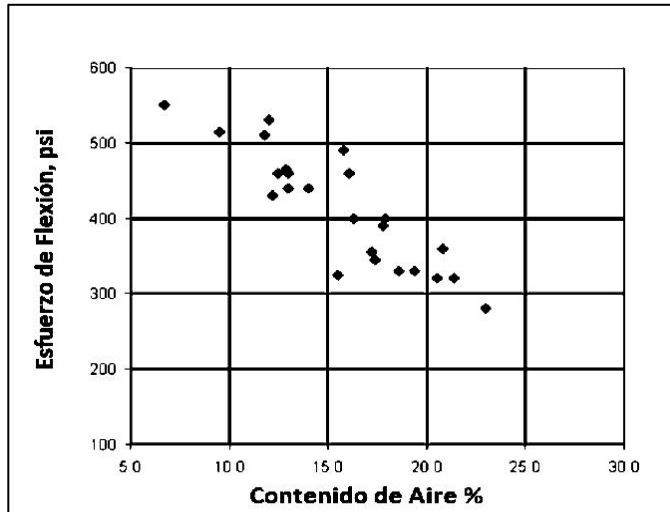
Figura 10. **Gráfico esfuerzo a compresión/contenido de aire**



Fuente: ACI 522 Committee. *Reporte de concreto permeable ACI 522-10. Sección 5.2. p. 550.*



Figura 11. **Gráfico esfuerzo a flexión/contenido de aire**



Fuente: ACI 522 Committee. *Reporte de concreto permeable ACI 522R-10. Sección 5.3. p. 552.*

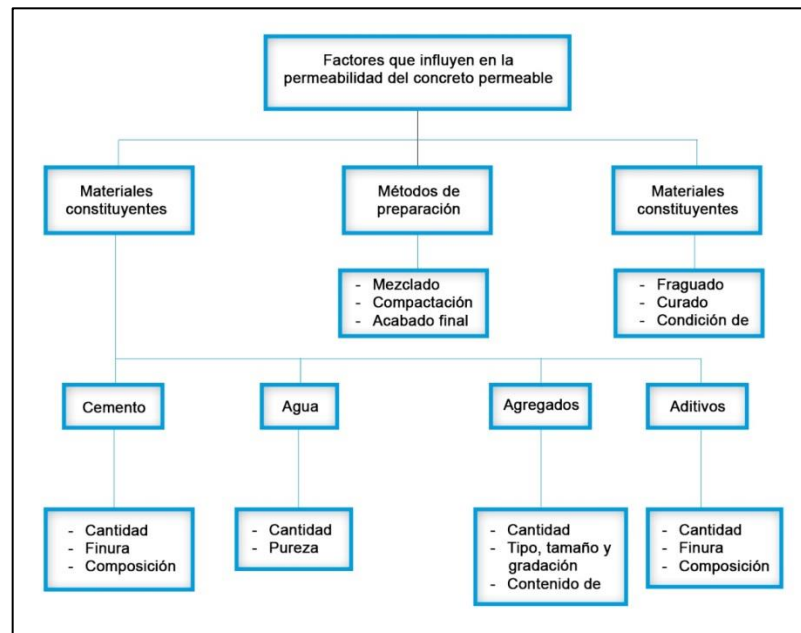
- Permeabilidad: es una de las características primordiales de este concreto; se elabora con el único fin de permitir la infiltración del agua a través de sus poros. Para que este tipo de concreto sea efectivo debe tener al menos un 15 % de contenido de vacíos. La permeabilidad del concreto se puede evaluar mediante la Norma ASTM C1701. La figura 10 muestra un esquema de los factores que inciden en la permeabilidad del concreto. Un concreto con un grado de permeabilidad alto tendrá, por consecuencia, una reducción en la resistencia a flexión y compresión; mientras que una permeabilidad baja, o contenido de vacíos pobre, resultará en el aumento de la resistencia a compresión y flexión.
- Otra propiedad del concreto permeable como material es la absorción acústica, debido a su alto contenido de vacíos, absorbe las ondas sonoras, reduciendo, por ejemplo, el ruido por rodamiento de llantas sobre el pavimento. Un concreto normal tiene un coeficiente de absorción

acústica entre 0,3 y 0,5, mientras que el concreto permeable puede llegar a alcanzar valores de 0,9 o casi 1, dependiendo de su contenido de vacíos. Esta propiedad se puede evaluar mediante procedimientos descritos por la Norma ASTM E 1050.

### 2.3. Llantas o neumáticos de caucho

En este caso se utiliza material triturado de llantas como adición al concreto permeable común; el caucho, al igual que todo material, posee ciertas características físicas y mecánicas; a lo largo de la historia se han mejorado los procesos de producción de caucho, obteniendo una mejora en rendimiento y en sus propiedades finales; se detallan las más relevantes a continuación.

Figura 12. Factores que influyen en la permeabilidad del concreto permeable

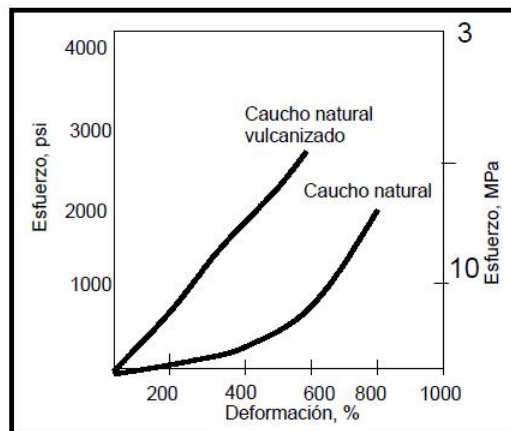


Fuente: elaboración propia.

### 2.3.1. Generalidades

Los neumáticos están constituidos por una gran diversidad de materiales además del caucho; incluso, una misma llanta puede contener distintos tipos de este material. Gracias al proceso de vulcanización, el caucho utilizado en la fabricación de neumáticos adquiere una gran resistencia al calor, deformación y desgaste en comparación a otros tipos de caucho procesado; por ejemplo, en la figura 11, se muestra un gráfico en donde se compara la deformación contra el esfuerzo de una muestra de caucho vulcanizado y caucho natural. La vulcanización también hace que el caucho pase de ser un material termoplástico a uno elastomérico.

Figura 13. **Gráfico esfuerzo contra deformación de una muestra de caucho vulcanizado y caucho natural**



Fuente: BOTASSO, Hugo. *Utilización de cauchos en mezclas asfálticas*. p. 5.

Las aplicaciones del caucho al área de la construcción son muy diversas, pueden ir desde su utilización como aditivo de algunos elementos hasta aislante acústico o sísmico. El polvo de caucho, por ejemplo, se utiliza como aditivo en

las mezclas asfálticas en caliente, pues mejora sus propiedades a flexión y ayuda a reducir el ruido por rodamiento; también, es común su utilización como disipador de energía en algunas estructuras como puentes o similares. Puede ser utilizado además, de forma no estructural, por ejemplo, en la fabricación de baldosas, carpetas para recubrimiento de superficies, sellos de artefactos en instalaciones hidráulicas, entre otras funciones.

### **2.3.2. Composición y estructura**

Se ha detallado que un neumático puede estar constituido por hasta más de 200 elementos: metales, textiles y diversas sustancias químicas. Las partes de un neumático o llanta que se detallan a continuación, corresponden a la numeración señalada en la figura 14.

- (1) Revestimiento de goma interior: es la capa de caucho que se encuentra en el interior del neumático, su función es servir como sellante de la cámara de aire.
- (2) Carcasa: la capa siguiente está formada por textiles y metales, ayudan a soportar la carga y la presión por velocidad, además de dar estabilidad al neumático y mejorar su rendimiento.
- (3) Zona baja: “tiene el papel de transmitir el par motor (potencia del vehículo) en la aceleración y en la frenada de la llanta hacia la zona de contacto con el suelo”.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Michelin. *Características de neumáticos*.<http://www.michelin.es/neumaticos/consejos/todo-sobre-el-neumatico/como-es-un-neumatico>. Consulta 7 de agosto de 2016.

- (4) Aro de talón: es un cable de acero colocado internamente en la boca del neumático, su función es dar rigidez a la llanta y asegurar su adhesión al aro, en este se sujetan además los revestimientos y carcasa.
- (5) Flanco: es el área comprendida entre la banda de rodadura y los talones de la cubierta, es decir, representa el peralte de la llanta o neumático.
- (6 y 7) Lonas de cima: son cables de acero finos revestidos por caucho que forman un cinturón sobre la cara de rodadura del neumático, su función es impedir la deformación del mismo y brindar estabilidad y resistencia. Estas se encuentran por debajo de la capa de rodadura.
- (8) Banda de rodadura: es la capa de caucho que está en contacto con el suelo o superficie de rodadura, y por ende, la más resistente, tiene ciertas ranuras que brindan seguridad, agarre, comodidad acústica y estética entre otras cualidades.

Figura 14. **Partes constituyentes de un neumático o llanta de caucho**



Fuente: *Michelin*. <http://www.michelin.es/neumaticos/consejos/todo-sobre-el-neumatico/como-es-un-neumatico>. Consulta: 7 de agosto de 2016.

### 2.3.3. Características

El caucho adquiere diversas características y propiedades según el proceso al que sea sometido; un caucho natural será de carácter viscoso y lechoso; sus principales características en su estado natural pueden ser:

- Tiende a verse altamente afectado por los cambios de temperatura, a bajas temperaturas se vuelve rígido y en estado de congelamiento, fibroso.
- Este adquiere una deformación permanente debido a su plasticidad, la cual varía de un árbol a otro.
- La densidad del caucho natural varía entre 0,950 a 0,934.
- Este tiene la capacidad de absorber agua y es soluble en distintas sustancias como azufre, aceites, resinas, colorantes, entre otros, esta propiedad facilita el proceso de vulcanización.

Muy distinto es el caucho natural del caucho vulcanizado o procesado de alguna otra manera. En la fabricación de neumáticos, se utiliza principalmente caucho vulcanizado, debido a que sus propiedades mecánicas no son tan variables y son considerablemente mejores sobre otros tipos de caucho procesado. “El caucho vulcanizado tiene más fuerza, elasticidad y mayor resistencia a los cambios de temperatura que el no vulcanizado, el bruto; además es impermeable a los gases y resistente a la abrasión, acción química, calor y electricidad. También posee un alto coeficiente de rozamiento en

superficies secas y un bajo coeficiente de rozamiento en superficies mojadas por agua.”<sup>4</sup>

#### **2.3.4. Propiedades**

El caucho está constituido por un polímero de moléculas pequeñas llamadas isopreno. Su resistencia se refiere principalmente a su capacidad de soportar esfuerzos y fuerzas aplicadas sin romperse, adquirir deformaciones permanentes o deteriorarse relativamente rápido. Entre las propiedades mecánicas más importantes del caucho se pueden mencionar:

- Dureza: la propiedad más indicada por fabricantes y vendedores de caucho, representa la rigidez del caucho frente a esfuerzos moderados, su valor varía en función del uso o servicio al cual el material sea sometido. La forma más común de medir la dureza del caucho es mediante la escala de Shore y la utilización de un durómetro; en el caso de las llantas de caucho, la dureza de Shore puede variar entre 50A y 70A.
- Tracción: esta es junto con la dureza, una de las propiedades más relevantes. La tracción se mide mediante la utilización de un dinamómetro, en el que se sujeta la muestra por sus extremos hasta conseguir la ruptura o falla, el valor de fuerza obtenido se divide entre el área de la muestra dando como resultado su resistencia a la tracción. El ensayo a tracción sobre caucho vulcanizado puede ser llevado a cabo mediante la utilización de la Norma ASTM D412.

---

<sup>4</sup> *Escuela de Ingenierías Industriales.* <http://www.eis.uva.es/~macromol/curso03-04/automovil/paginas/vulcanizado.htm>. Consulta: 8 de agosto de 2016.

### 2.3.5. Fabricación

Como se aprecia en la figura 4, un neumático pasa a través de varios procesos simultáneos, en la que sus partes, metales, textiles y cauchos, pasan por procesos paralelos hasta ser unidos finalmente para la vulcanización del neumático. El caucho en sí, pasa inicialmente por un proceso de mezclado, en el que se unen distintos tipos de caucho para crear un compuesto gomoso de color negro que se tritura en una fase posterior.

Posterior a la fase de mezclado, el caucho enfriado se corta en tiras que conformarán la estructura principal del neumático, se preparan otros elementos y algunos de ellos se recubren nuevamente con otros tipos de caucho. Luego, se construye el neumático como tal, de adentro hacia afuera, se colocan los textiles, cables, talones, lonas, entre otros, que finalmente conforman un neumático en crudo, es decir, sin vulcanizar.

El siguiente paso es, en efecto, la vulcanización del neumático en donde el caucho adquiere sus propiedades finales y la llanta adquiere su forma final, incluyendo las marcas de rodadura y del fabricante. El principal agente vulcanizador es el azufre. “Se puede determinar el gran valor del descubrimiento de la vulcanización si se comparan las características físicas del látex puro y del caucho vulcanizado. Su grado de elasticidad es de 275 kg/cm<sup>2</sup> a 350 kg/cm<sup>2</sup>; el del látex puro es de 20 kg/cm<sup>2</sup> a 40 kg/cm<sup>2</sup>. La dureza en el tensiómetro pasa de 20-30 a 40-45. Sin embargo, la capacidad de estiramiento sin deformación disminuye. La deformación consecutiva a un estiramiento del 200 % durante 24 horas disminuye del 75 % -125 % a 13 % -5 %.”<sup>5</sup>

---

<sup>5</sup> *Escuela de Ingenierías Industriales.* <http://www.eis.uva.es/~macromol/curso03-04/automovil/paginas/vulcanizado.htm>. Consulta: 8 de agosto de 2016.



Finalmente todos los neumáticos pasan por un proceso de revisión en busca de defectos o fallas en el proceso de fabricación, aunque el neumático está prácticamente terminado en este punto; la puesta en uso de un elemento defectuoso o no inspeccionado puede traer graves consecuencias para el usuario.

### **2.3.6. Caucho triturado de llantas obsoletas**

Entre las acciones de reciclaje de llantas mencionadas en el capítulo uno, se encuentra su trituración; el proceso consiste en cortar los neumáticos para extraer las tiras de caucho internas y externas, separándolas de los demás componentes como textiles y metales; una vez realizado este proceso, se continúa con una inspección general del caucho extraído, en el que se retiran cuerpos extraños que pudieran haberse adherido al caucho. Posterior, las tiras de caucho se introducen en una banda transportadora para ingresar a la trituradora; el proceso de trituración pasa por diversas etapas, en la que el caucho es cortado en trozos más pequeños hasta ser convertido en polvo.

Usualmente, se retira cierto porcentaje de caucho en cada etapa de triturado, ya sea de 8, 5 o 3 mm debido a que este tiene diversas aplicaciones según su granulometría; el polvo de caucho es usualmente utilizado como aditivo para mezclas asfálticas en caliente; mientras que las granulometrías más grandes pueden utilizarse inclusive en el mantenimiento de canchas con gramilla sintética.

Figura 15. **Diversas granulometrías de caucho triturado**



Fuente: *Portal de ingenieros españoles*. <http://www.ingenieros.es/noticias/ver/termoplasticos-modificados-una-segunda-vida-para-el-caucho-reciclado/3119>. Consulta: 14 de agosto de 2016.



### **3. DESARROLLO EXPERIMENTAL**

#### **3.1. Metodología del experimento**

La propuesta del experimento consistió en la comparación de una mezcla convencional de concreto permeable contra dos diferentes mezclas con adición de caucho triturado, en diferente porcentaje e igual granulometría. La cantidad de caucho adicionada fue determinada mediante la utilización de un porcentaje X de la suma total del peso de los agregados de la mezcla.

Las muestras fueron analizadas en su comportamiento a compresión, flexión y permeabilidad, así como su variación en cuanto a peso unitario y porcentaje de vacíos. Con base en los resultados de las muestras ensayadas, se determinó el comportamiento mecánico de las mezclas con caucho en relación a una mezcla ordinaria y el rango dentro del cual es permisible adicionar caucho triturado para mejorar su comportamiento o en su defecto no alterar de manera perjudicial su correcto desempeño.

#### **3.2. Análisis de materiales**

Las propiedades de los materiales utilizados en el estudio son descritas a continuación según ensayos de laboratorio y requerimientos establecidos en las normativas correspondientes.

### **3.2.1. Cemento**

Para la elaboración de las mezclas se utilizó cemento estructural Portland con una resistencia de 5 800 PSI. Este cemento es de fabricación nacional y cumple con las normas ASTM C1157 y COGUANOR NGO 41001. Este cemento pertenece a la categoría tipo III: alta resistencia inicial, según la clasificación de las normas ASTM C 150 y AASHTO M 85, consideradas equivalentes por la Asociación de Cemento Portland (PCA). Aunque la composición química y física es similar al cemento tipo I, sus partículas son más finas y la resistencia ofrecida durante la primera semana de fraguado es considerablemente mayor.

### **3.2.2. Agregado grueso**

Según ACI 522R-10, se recomienda la utilización de agregado cuyo tamaño nominal sea de 3/4 o 3/8 de pulgada. Para la elaboración de la mezcla a analizar se optó por el segundo valor. Sus propiedades, según ensayos de laboratorio son: una densidad relativa de 2,63 y una masa unitaria suelta de 1 470 kg/m<sup>3</sup>. Ambos dentro del rango permitido por ACI 522R-10 sección 4.1.

En relación a la granulometría del material, presenta una ligera desviación de los límites establecidos por la norma COGUANOR NTG-41007. Según la tabla II, número de tamaño 8; el porcentaje de agregado que debería de pasar el tamiz 3/8" debería estar entre el 85 % al 100 % del material, mientras que la muestra analizada deja pasar únicamente un 78 %. Una diferencia del 7 % en relación al valor mínimo aceptado por la norma. El porcentaje que pasa para todos los demás tamices cumple con la norma correspondiente.

### **3.2.3. Agregado fino**

La cantidad de agregado fino requerido por el concreto permeable es casi despreciable; sin embargo, una leve adición aumenta considerablemente su resistencia. La arena analizada dio como resultado una densidad relativa de 2,52 y una masa unitaria suelta de  $1340 \text{ kg/m}^3$ , ambos dentro del rango aceptado en de la normativa correspondiente. El módulo de finura obtenido fue de 2,5; clasificando la arena como mediana. De la granulometría se tiene que el material cumple con todos los rangos establecidos por la norma COGUANOR NTG-41007. Su contenido de materia orgánica corresponde a un valor de 2, el límite permitido es de 3. Con base en los resultados obtenidos se puede decir que el material analizado cumple con todas las normativas para su uso en la elaboración de concreto.

### **3.2.4. Adiciones**

La adición utilizada en las mezclas de concreto es triturado de caucho obtenido de neumáticos obsoletos. Dicho material resulta de la puesta de las bandas de caucho en una trituradora que refina el material hasta obtener el tamaño nominal deseado, en este caso se utilizó triturado de 3 mm.

Según el análisis granulométrico, el mayor porcentaje de material quedó retenido en el tamiz núm. 16. Por ser este un material sintético y de distinta naturaleza a la arena convencional utilizada como agregado fino, sus parámetros quedan por debajo de los límites establecidos por la norma COGUANOR NTG 41007. Su módulo de finura es de 3,85.

### 3.3. Diseño de mezcla

Debido a la carencia de una metodología definida o normalizada, se planteó utilizar una mezcla basada en el diseño de la ingeniera civil Natalia Rodas, que utilizó para la elaboración de su trabajo de graduación *Desarrollo y uso de bloques de concreto permeable en senderos ecológicos*. Dicho trabajo propuso 3 mezclas con distinto proporcionamiento de materiales, todas elaboradas bajo los parámetros del código ACI 522R-10. Las mezclas, su proporcionamiento y resultados son presentados en la tabla III.

Tabla III. **Resumen de resultados del trabajo de graduación *Desarrollo y uso de bloques de concreto permeable en senderos ecológicos***

<b>Mezcla</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Proporcionamiento en peso cemento : arena : pedrín : agua	1 : 0,37 : 4,48 : 0,49	1 : 0,6 : 4,5 : 0,49	1 : 0,3 : 4,2 : 0,49
Peso unitario (kg/cm <sup>3</sup> )	872,76	1 635,71	1 578,57
Porcentaje de vacíos	46,85 %	3,78 %	7,14 %
Resistencia a compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	61,93	84,04 %	52,73 %
Resistencia a flexión (kg/cm <sup>2</sup> )	21,33	22,33	20,59
Permeabilidad (in/hora)	1 762,08	1 409,67	1 601,89

Fuente: elaboración propia.

Para este caso de estudio se utilizará la mezcla 1, por presentar una resistencia a compresión de 61,93 kg/cm<sup>2</sup> y a flexión de 21,33 kg/cm<sup>2</sup>, ambos valores son los segundos más altos, respectivamente. La mezcla, también, presenta una permeabilidad de 1 762,08 in/h, la más alta de las tres mezclas.

Cabe resaltar que el proporcionamiento propuesto por la ingeniera civil Natalia Rodas sirvió únicamente como base para la elaboración de las mezclas

elaboradas, ya que al utilizarse materiales de distinta procedencia los resultados son distintos a los presentados en el trabajo de la ingeniera Natalia Rodas; la tabla IV muestra la comparación entre el análisis de materiales utilizados en la investigación de la ingeniera civil Natalia Rodas y el presente trabajo.

Tabla IV. **Comparación de análisis de agregados para concreto**

Parámetro analizado	Trabajo Natalia Rodas		Agregados analizados	
	Agregado grueso	Agregado fino	Agregado grueso	Agregado fino
Densidad relativa (sss)	2,60	1,97	2,63	2,52
Densidad (sss) (kg/m <sup>3</sup> )	S/D	S/D	2 620,00	2 510,00
Masa unitaria, compactada (kg/m <sup>3</sup> )	1 554,67	1 008,32	1 470,00	1 430,00
Masa unitaria, suelta (kg/m <sup>3</sup> )	1 517,14	941,49	1 390,00	1 340,00
Porcentaje de absorción (%)	0,44	7,31	0,60	2,70
Porcentaje de vacíos, compactado (%)	40,15	48,82	44,00	43,00
Porcentaje de vacíos, suelto (%)	S/D	S/D	47,00	47,00
Pasa tamiz #200 (%)	1,54	5,81	1,60	3,00
Retenido tamiz 6,35 (%)	S/D	0,00	40,80	1,30
Módulo de finura	S/D	2,20	6,09	2,50
Contenido de materia orgánica	N/A	3	N/A	2

Fuente: elaboración propia.

El procedimiento para la determinación del material utilizado en cada una de las mezclas se describe a continuación.

- Proporción a utilizar 1:0,37:4,48:0,49
- Peso unitario ideal: 1 680 kg/m<sup>3</sup> a 1 920 kg/m<sup>3</sup>
- Peso unitario propuesto: 1 700 kg/m<sup>3</sup>
- Volumen de mezcla: 0,08 m<sup>3</sup>

$$\frac{1\,700\text{ Kg/m}^3}{(1 + 0,37 + 4,87 + 0,49)} = 252,6$$



$$\text{Cemento: } 1 \times 252,6 = 252,6 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{Arena: } 0,37 \times 252,6 = 93,46 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{Piedrín: } 4,87 \times 252,6 = 1\,230 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{Agua: } 0,49 \times 252,6 = 125,44 \text{ Kg/m}^3$$

Determinación de cantidad de material para 0,08 m<sup>3</sup> de mezcla.

$$\text{Cemento: } 252,6 \text{ Kg/m}^3 \times 0,08 \text{ m}^3 = 20,21 \text{ Kg}$$

$$\text{Arena: } 93,46 \text{ Kg/m}^3 \times 0,08 \text{ m}^3 = 7,48 \text{ Kg}$$

$$\text{Piedrín: } 1\,230 \text{ Kg/m}^3 \times 0,08 \text{ m}^3 = 98,41 \text{ Kg}$$

$$\text{Agua: } 125,44 \text{ Kg/m}^3 \times 0,08 \text{ m}^3 = 10,04 \text{ L}$$

Determinación de caucho a adicionar sobre el 4 % y 2 % de la suma del peso de los agregados fino y grueso.

$$\text{Arena} + \text{Piedrín} = 7,48 \text{ Kg} + 98,41 \text{ Kg} = 105,89 \text{ Kg}$$

- Mezcla con 4 % de caucho (mezcla 2)

$$105,89 \text{ KG} \times 4 \% = 4,24 \text{ Kg}$$

- Mezcla con 2 % de caucho (mezcla 3)

$$105,89 \text{ KG} \times 2 \% = 2,11 \text{ Kg}$$

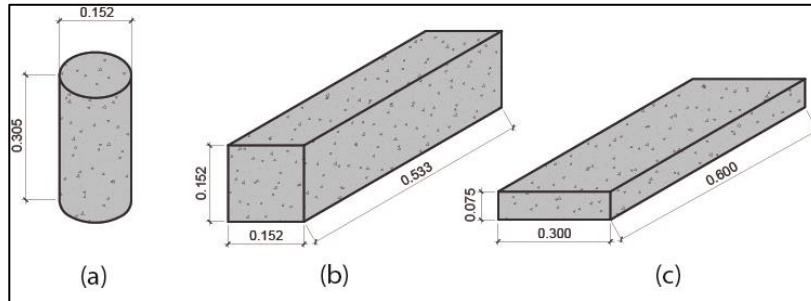
### 3.4. Elaboración de probetas para ensayo

Las probetas para la realización de los ensayos a compresión fueron elaboradas según la norma COGUANOR NTG - 41017h1 *Método de ensayo. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto* equivalente a la Norma ASTM C39. Para el análisis de cada tipo de mezcla se elaboraron 6 cilindros, de 6 pulgadas de diámetro por 12 pulgadas de altura, para ser ensayadas a 3, 7 y 28 días, el esquema de dichas probetas se ilustra en el gráfico (a) de la figura 16.

Para la realización de los ensayos a flexión las probetas fueron realizadas según la norma COGUANOR NTG 41017 - h2 *Método de ensayo para determinar el esfuerzo de flexión del concreto (utilizando una viga simplemente soportada con cargas en los tercios de la luz)* equivalente a la Norma ASTM C78. Por cada diseño de mezcla se elaboró una viga de 0,152 m de alto por 0,152 m de ancho y 0,53 m de longitud para ser ensayadas a los 28 días de fraguado, el esquema de dichas probetas se ilustra en el gráfico (b) de la figura 16.

EL ensayo de permeabilidad se realizó tomando como guía la Norma ASTM C1701 *Método de prueba estándar para la tasa de infiltración in situ de concreto permeable*. Y una plancha de 0,075 m de alto por 0,30 m de ancho y 0,60 m de longitud, el esquema de dichas probetas se ilustra en el gráfico (c) de la figura 16.

Figura 16. **Esquema de probetas elaboradas**



Fuente: elaboración propia.

### 3.5. Ensayos

Para la determinación de las propiedades mecánicas de las mezclas elaboradas, se realizaron ensayos al concreto fresco como endurecido, los presentados a continuación precedidos por una descripción del equipo utilizado.

Figura 17. **Elaboración de probetas para ensayo**



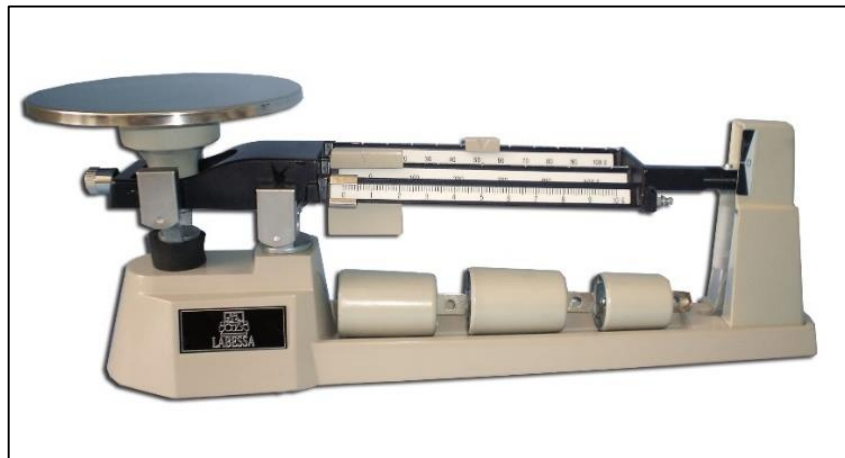
Fuente: elaboración propia.

### 3.5.1. Equipo utilizado

La utilización de un equipo adecuado, que cumpla con las normativas correspondientes y se encuentre en buenas condiciones, además de su conocimiento, brinda una mejor calidad de la mezcla final y los resultados obtenidos tanto en ensayos al concreto fresco, endurecido y en la preparación de la mezcla.

- Balanza: puede ser análoga o digital, la capacidad máxima de medición deberá estar en función de las especificaciones de norma del ensayo a realizar y deberá tenerse completa certeza de la correcta calibración del instrumento.

Figura 18. **Balanza granataria**



Fuente: *Laboratorio escolar*. <https://www.laboratorioescolar.com/productos/big/BALANZA-GRANATARIA-610GR-16137.jpg>. Consulta: 3 de mayo de 2017.

- Tamices para análisis granulométrico y tamizador: los tamices pueden ir desde una abertura de 3 pulgadas hasta el núm. 200 en función del tipo

de agregado a analizar. Estos deben estar en perfectas condiciones y totalmente limpios al momento de realizar el ensayo, la norma que rige el control de calidad de los mismos es la Norma ASTM E11 *Tela de malla alambre y tamices utilizados para ensayos*. La tamizadora tiene por finalidad lograr la correcta separación del material a través de los tamices utilizados.

Figura 19. **Tamices para ensayo de granulometría en agregados finos**



Fuente: *Estudios geotécnicos*. <http://www.estudiosgeotecnicos.info/wp-content/uploads/2012/12/image025.jpg>. Consulta: 3 de mayo de 2017.

- Moldes para probeta: deben corresponder a las especificaciones dadas por la Norma ASTM C39 para ensayo a compresión de concreto y la

Norma ASTM C78 para ensayos a flexión. Estos deben estar limpios, en buenas condiciones y debidamente etiquetados al momento de ser utilizados; se recomienda, además, la aplicación de aceite desmoldante para facilitar la extracción de las probetas de ensayo una vez estas han fraguado, de no utilizarlo puede dificultarse la labor de extracción y con ello dañar las probetas de ensayo en el proceso.

Figura 20. **Moldes para ensayos a compresión y flexión en concreto**



Fuente: *Molde para prueba de compactación*. <http://www.pinzuar.com.co/pinzuar/images/stories/virtuemart/product/FOTO%2019%20Molde%20para%20vigueta.png>. Consulta: 3 de mayo de 2017.

- Mezcladora eléctrica de concreto: su uso no es obligatorio para la elaboración de la mezcla; sin embargo, garantiza una mejor calidad de mezcla si se usa adecuadamente y requiere un menor esfuerzo por parte del personal que realiza la mezcla de concreto. En el caso de la mezcladora utilizada para la elaboración de las mezclas analizadas en este estudio, el trompo mezclador tiene una capacidad para medio saco de cemento más agregados. Su utilización se observa en la figura 21.

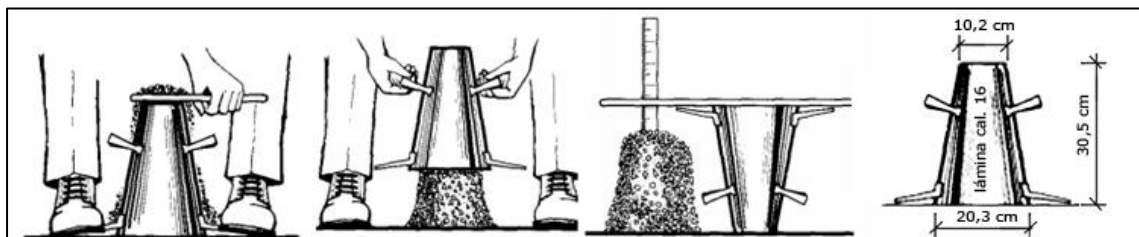
Figura 21. **Mezcladora eléctrica para concreto**



Fuente: elaboración propia.

- Cono de Abrams: se utiliza para determinar el revenimiento de la mezcla de concreto que se está elaborando (ensayo al concreto fresco) con el fin de determinar si la cantidad de agua adicionada es la correcta o no. La figura 22 muestra de manera general su modo de empleo durante el ensayo, mientras que la figura 22 muestra sus dimensiones del mismo.

Figura 22. **Utilización del cono de Abrams para la prueba de asentamiento**



Fuente: elaboración propia.

- Anillo para ensayo de permeabilidad: este debe tener un diámetro entre 6 y 12 pulgadas y una altura de al menos 4 pulgadas que permita verter el agua sin tener pérdidas por rebalse o filtración; por lo mismo, debe ser de un material impermeable y adherirse con sellador a la pieza de ensayo. La figura 20 muestra el uso de este anillo en una prueba de permeabilidad en pavimento asfáltico.

Figura 23. **Uso del anillo para prueba de permeabilidad en pavimentos**



Fuente: *YouTube*. <https://i.ytimg.com/vi/G5NVCUPJ0OQ/hqdefault.jpg>.

Consulta: 5 de mayo de 2017.

- Máquina de ensayo a compresión: la máquina utilizada para los ensayos a compresión fue una máquina RIEHLE, con capacidad máxima de carga de 300 000 libras y un rango de aplicación de 2 500 libras a 240 000 libras según certificado de calibración 2017; la máquina tiene una velocidad de aplicación de 0 a 3" por minuto. Estos valores cumplen con los requerimientos indicados en la Norma ASTM C39. La figura 21 muestra la realización de un ensayo a compresión utilizando la máquina del Centro de Investigaciones de Ingeniería descrita.



Figura 24. **Ensayo a compresión en prensa para cilindros de concreto**



Fuente: elaboración propia.

### **3.5.2. Ensayos al concreto fresco**

La importancia de estos ensayos radica en lograr un correcto control de calidad del concreto antes de ser colocado en su sitio final y durante su fraguado. La temperatura indica aspectos como el calor que generará el concreto durante su fraguado y cambios de volumen relacionados con la temperatura, así como los efectos ambientales sobre la mezcla analizada. El revenimiento, peso unitario y porcentaje de aire dan un parámetro de la correcta dosificación de materiales y agua y su mezclado. Si al realizar estos ensayos los resultados se encuentran fuera de los rangos establecidos por la normativa correspondiente, deben tomarse medidas para asegurar una correcta calidad del concreto a colocar en obra.

- Temperatura: tomada de forma directa mediante la utilización de un termómetro normado para dicha práctica y que consta de indicador análogo en forma de manómetro y un vástago para tomar las mediciones mediante penetración de la mezcla. Dicha práctica se realiza bajo la norma NTG – 41053.

Figura 25. **Determinación de temperatura al concreto fresco**



Fuente: elaboración propia.

- Revenimiento: no existe una normativa para el revenimiento en concreto permeable; sin embargo, fuentes como el *Estudio experimental de concretos permeables con agregados andesíticos* elaborado por el ingeniero civil Daniel Pérez Ramos de la Universidad Autónoma de México sugieren que es adecuado que esté comprendido entre 0 y 2 pulgadas; puede variar en función de las necesidades o condiciones del concreto a utilizar.

- **Peso unitario:** propiedad directamente relacionada con la permeabilidad del concreto, se determina mediante la norma COGUANOR NTG - 41017h5 (ASTM C138/C138M) *Método de ensayo. Determinación de la densidad aparente (masa unitaria) rendimiento (volumen de concreto producido) y contenido de aire (gravimétrico) del concreto.*
- **Contenido de aire:** se trabajó bajo la norma COGUANOR NTG 41017 h7 (ASTM C231-14) *Método de ensayo. Determinación del contenido de aire del concreto hidráulico recién mezclado por el método de presión.*

### **3.5.3. Ensayos al concreto endurecido**

Los procedimientos de ensayo para concreto endurecido están regidos bajo las mismas normas que para el concreto convencional, para compresión se trabajó bajo la Norma COGUANOR NTG - 41017h1.

El ensayo de flexión se realizó según los procedimientos de ensayo de la Norma COGUANOR NTG 41017 - h2, procedimiento valido para determinar el módulo de ruptura en concreto para pavimentos según las especificaciones de la Dirección General de Caminos.

El ensayo de permeabilidad se trabajó bajo los parámetros especificados en la Norma ASTM C1701 exceptuando que las planchas no fueron ensayadas directamente sobre suelo, sino utilizando soportes en sus extremos de la misma permitiendo el paso libre del agua por debajo de la plancha que provocó una taza de infiltración mayor a las presentadas por concretos permeables directamente colocados sobre el suelo; por lo tanto, los valores dados deben utilizarse únicamente como una referencia de las variaciones de permeabilidad en función de la cantidad de caucho adicionado a las mezclas.

## Ensayo a flexión en viga de concreto permeable



Fuente: elaboración propia.

### **3.6. Resultados**

Los datos, cálculos y resultados obtenidos del ensayo de cada uno de los elementos sometidos a compresión, flexión y permeabilidad en cada una de las distintas mezclas se presentan a continuación.

#### **3.6.1. Datos obtenidos**

Análisis completo de agregados para concreto

Tabla V. **Granulometría para agregado fino**

Tamaño en milímetros							
Tamiz núm.	3/8"	4	8	16	30	50	100
% que pasa	100,00	99,00	94,00	83,00	55,00	17,00	2,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Granulometría para agregado grueso**

Tamaño en milímetros								
Tamiz núm.	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	4	8	16
% que pasa	100,00	100,00	100,00	100,00	78,00	13,00	0,00	0,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Características físicas**

Parámetro analizado	Agregados analizados	
	Agregado grueso	Agregado Fino
Densidad relativa (sss)	2,63	2,52
Densidad (sss) (kg/m <sup>3</sup> )	2 620,00	2 510,00
Masa unitaria, compactada (kg/m <sup>3</sup> )	1 470,00	1 430,00
Masa unitaria, suelta (kg/m <sup>3</sup> )	1 390,00	1 340,00
Porcentaje de absorción (%)	0,60	2,70
Porcentaje de vacíos, compactado (%)	44,00	43,00
Porcentaje de vacíos, suelto (%)	47,00	47,00
Pasa tamiz #200 (%)	1,60	3,00
Retenido tamiz 6,35 (%)	40,80	1,30
Módulo de finura	6,09	2,50
Contenido de materia orgánica	N/A	2

Fuente: elaboración propia.

Ensayos realizados a cada una de las 3 diferentes mezclas de concreto:

- Mezcla núm. 1 (patrón)

Fecha de elaboración: 17 de enero de 2017

Adición de caucho: 0 % Tara: 3,67 kg / tara + material 15,22 kg

Asentamiento: 0,5" Proporcionamiento: 1:0,37:4,48:0,49

Tabla VIII. **Datos de laboratorio, mezcla núm. 1**

No. Cilindro laboratorio	Peso (Kg)	diámetro (cm)		altura (cm)			Tipo de falla	carga máxima
		Ø1	Ø2	H1	H2	H3		
1	3,10	15,23	15,23	30,43	30,39	30,37	Cono y clivaje	22 500
2	3,10	15,15	15,18	30,35	30,40	30,46	Cono y clivaje	19 500
3	9,87	10,10	10,12	20,30	20,39	20,28	Cono	15 800
4	9,76	10,20	10,20	20,22	20,22	20,24	Cono	14 000
5	9,61	15,13	15,14	30,60	30,47	30,56	Cono y clivaje	35 000
6	9,90	15,11	15,18	30,46	30,44	30,38	Cono y clivaje	32 500

Fuente: elaboración propia.

- Mezcla núm. 2

Fecha de elaboración: 20 de enero de 2017

Adición de caucho: 4 % Porcentaje de aire: 2,8%

Asentamiento: 4" Tara: 3,68 kg / tara + material 15,41 kg

Proporcionamiento: 1:0,37:4,48:0,49

Tabla IX. **Datos de laboratorio, mezcla núm. 2**

No. Cilindro laboratorio	Peso (kg)	Diámetro (cm)		Altura (cm)			Tipo de falla	Carga máxima
		Ø <sub>1</sub>	Ø <sub>2</sub>	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>3</sub>		
1	9,40	15,18	15,16	30,33	30,44	30,41	Cono y clivaje	15 000
2	9,54	15,03	14,98	30,55	30,50	30,59	Cono y clivaje	13 900
3	9,79	15,15	15,17	30,58	30,53	30,55	Cono y clivaje	17 500
4	9,70	15,10	15,17	30,26	30,38	30,27	Cono y clivaje	18 000
5	10,00	15,20	15,13	30,40	30,47	30,38	Cono y clivaje	21 000
6	9,66	15,00	15,10	30,26	30,27	30,22	Cono y clivaje	20 000

Fuente: elaboración propia.

- Mezcla núm. 3

Fecha de elaboración: 3 de febrero de 2017

Adición de caucho: 2 % Porcentaje de aire: 3,7%

Asentamiento: 0,8" Tara: 3,68 kg / Tara + material 15,00 kg

Proporcionamiento: 1:0,37:4,48:0,49

Tabla X. **Datos de laboratorio, mezcla núm. 3**

Núm. Cilindro laboratorio	Peso (kg)	Diámetro (cm)		Altura (cm)			Tipo de falla	Carga máxima
		Ø <sub>1</sub>	Ø <sub>2</sub>	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>3</sub>		
1	9,86	14,99	14,94	30,73	30,68	30,70	Cono y ruptura	20 000
2	9,60	14,99	14,96	30,20	30,24	30,30	Cono y clivaje	18 000
3	10,21	15,13	15,27	30,54	30,50	30,50	Cono y clivaje	25 000
4	10,05	15,23	15,23	30,57	30,54	30,65	Cono y clivaje	26 000
5	10,06	15,16	15,15	30,65	30,66	30,65	Cono y ruptura	32 500
6	9,97	15,09	15,00	30,64	30,58	30,54	Cono y clivaje	30 000

Fuente: elaboración propia.

### 3.6.2. Cálculos realizados

Se detalla en esta sección el procedimiento de cálculo para el procesamiento final de los datos, se deja como ejemplo el procedimiento para la mezcla núm. 1, aplicado para el resto de datos obtenidos de las diferentes mezclas ensayadas.

- Peso unitario

$$PU = \frac{(PT + M) - PT}{V}$$

Donde:

- PU = peso unitario
- PT = peso tara (recipiente)
- M = peso material
- V = volumen de recipiente

Cálculo para mezcla 1

$$PU = \frac{(15,22 \text{ Kg}) - 2,67 \text{ kg}}{0,007 \text{ L}} = 1792,86 \text{ kg/m}^3$$

- Ensayo a compresión

$$\sigma = \frac{P/2,2046}{\left(\frac{\pi * \emptyset^2}{4}\right)}$$

Donde:

- $\sigma$  = esfuerzo en kg/cm<sup>2</sup>
- P = carga en libras
- $\emptyset$  = diámetro promedio en cm

Cálculo para mezcla 1, cilindro 1

$$\sigma_1 = \frac{22\,500 \text{ lb}/2,2046}{\left(\frac{\pi * (15,228 \text{ cm})^2}{4}\right)} = 56,04 \text{ kg/cm}^2$$



- Ensayo a flexión

$$R = \frac{PL}{bd^2}$$

Donde:

- R = módulo de ruptura
- P = carga máxima aplicada en N o lb
- L = longitud de la separación de apoyos en mm o pulgadas
- b = ancho promedio del espécimen
- d = espesor promedio del espécimen

Cálculo para mezcla 1:

$$R = \frac{1\,800\text{ lb} * 18\text{ in}}{6,02 * 6,06^2} = 146,56\text{ lb/in}^2 = 10,30\text{ kg/cm}^2$$

- Ensayo de permeabilidad

$$i = \frac{KM}{D^2t}$$

Donde:

- i = tasa de infiltración en in/hora.
- K = constante de permeabilidad, según ASTM C1701 esta es 126 870 in<sup>3</sup>\*s/lb\*h.
- M = masa de agua filtrada en lb.
- D = diámetro del anillo en pulgadas.
- t = tiempo de infiltración.

Cálculo para mezcla 1:

$$i = \frac{126\,870 * 40}{7,30^2 * 38,92} = 2\,450,10 \text{ in/h}$$

### 3.6.3. Resumen de resultados

Para una mejor comprensión y comparación los resultados de los diversos ensayos se presentan en las siguientes tablas. Cabe resaltar que para los ensayos a compresión se muestran los datos a las edades de 3, 7 y 28 días, mientras que para flexión y permeabilidad únicamente a la edad de 28 días.

Se hace notar, además, que los cilindros 3 y 4 de la mezcla número 1 fueron elaborados en probetas de 6 pulgadas de alto y 3 pulgadas de diámetro. Por tanto debe prestársele una mayor atención a los resultados a 3 y 28 días, dado que todas las probetas a las respectivas edades fueron elaboradas con el mismo tamaño y condiciones.

Tabla XI. **Resultados de ensayos a compresión**

Mezcla	Edad	Cilindro	Resistencia (kg/cm)	Resistencia promedio
1 Patrón: adición de caucho: 0 %	3	1	56,06	51,51
		2	48,00	
	7	3	88,76	82,515
		4	76,27	
	28	5	87,24	83,735
		6	80,23	
2 Adición de caucho: 4 %	3	1	37,64	36,66
		2	35,68	
	7	3	43,98	44,665
		4	45,35	
	28	5	52,7	51,85
		6	51,00	

Continuación de la tabla XI:

3  Adición de caucho: 2 %	3	1	51,58	48,97
		2	46,36	
	7	3	62,49	63,615
		4	64,74	
	28	5	81,72	79,105
		6	76,49	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Resultados de ensayos a flexión a 28 días**

Mezcla	Parámetro	Valor	Unidades
1	Carga máxima	816,47	kg
	Módulo de ruptura	10,30	kg/cm <sup>2</sup>
2	Carga máxima	1 133,98	kg
	Módulo de ruptura	14,20	kg/cm <sup>2</sup>
3	Carga máxima	1 270,06	kg
	Módulo de ruptura	15,44	kg/cm <sup>2</sup>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Resultados de ensayos de permeabilidad**

Mezcla	Índice de infiltración (in/h)
1	2 450,10
2	2 410,00
3	2 443,10

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Peso unitario y porcentaje de vacíos**

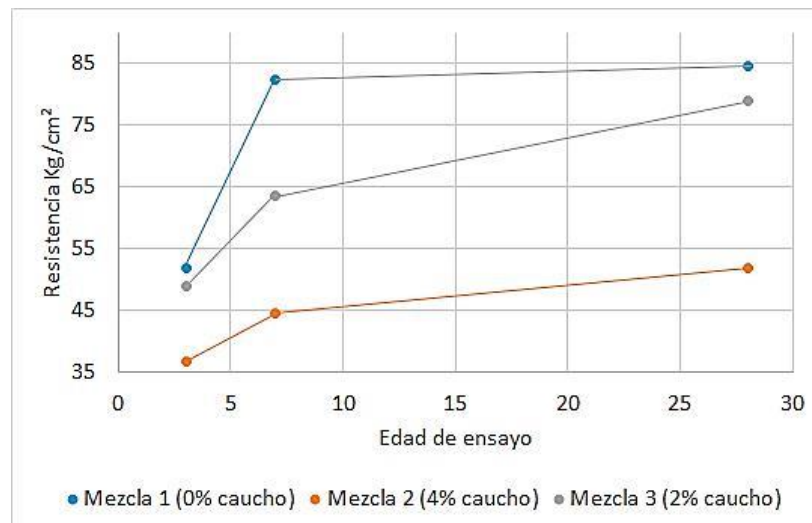
Mezcla	Adición de caucho	Peso Unitario Kg/m <sup>3</sup>	Porcentaje de vacíos
1	0 %	1 792,86	8,0
2	4 %	1 818,57	2,8
3	2 %	1 760,00	3,7

Fuente: elaboración propia.

### 3.6.4. Gráficas y tablas

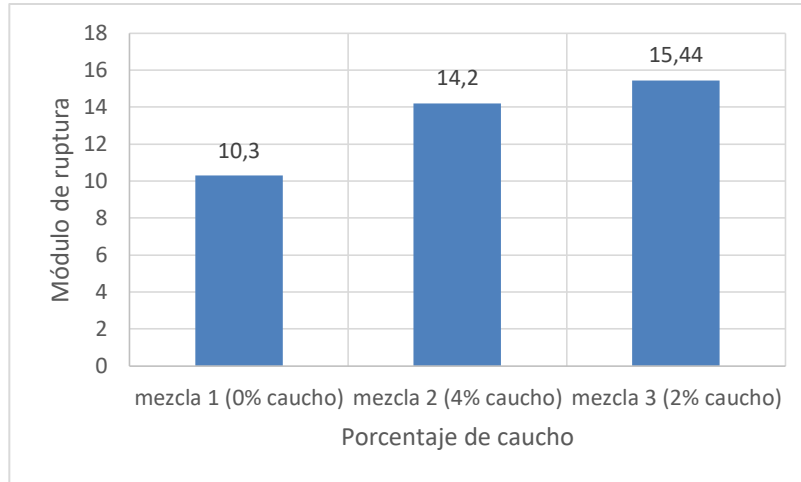
Con el fin de realizar una comparación más simple y visual entre los resultados de las diferentes mezclas ensayadas, se presentan los siguientes gráficos.

Figura 26. **Comparación de la resistencia a compresión de los tres tipos de mezcla ensayadas**



Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Comparación del módulo de ruptura de las diferentes mezclas ensayadas**



Fuente: elaboración propia.

### 3.6.5. Comparación e interpretación de resultados

Los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos y mezclas y las diferencias entre las mezclas adicionadas con caucho y la mezcla patrón son presentadas en la tabla XV.

Tabla XV. **Comparación de resultados**

Parámetro analizado	Datos de mezcla			Variaciones			
	1	2	3	Diferencia entre M1 y M2		Diferencia entre M3 y M1	
				Absoluta	%	Absoluta	%
Compresión (28 días)	83,74	51,85	79,11	31,89	38,08	4,63	5,53
Flexión (28 días)	10,30	14,20	15,44	-3,90	-37,86	-5,14	-49,90
Permeabilidad	2 449,98	2 410,95	2 443,08	39,03	1,59	6,90	0,28
Peso unitario	1 792,86	1 818,57	1 760,00	-25,71	-1,43	32,86	1,83
Porcentaje de vacíos	8,00	2,80	3,70	5,0	65,00	4,30	53,75

Fuente: elaboración propia.

De los ensayos a compresión se observa a primera vista que una adición del 4 % de caucho en la mezcla causa un decremento de 38,08 % en la resistencia del material; sin embargo, para un 2 % de caucho adicionado la reducción en la resistencia es solamente de 5,53 %, un porcentaje mayormente aceptable en relación al primer valor obtenido.

De los ensayos por flexión se obtuvo un incremento de la resistencia en ambos casos. Para una adición de caucho del 4 % el módulo de ruptura fue aproximadamente un 37,86 % mayor que para la mezcla patrón; mientras que para una adición del 2 % la resistencia se incrementó un 49,9 % respecto de la mezcla 1.

En relación al índice de permeabilidad, su reducción es casi despreciable, para una adición del 4 % de caucho se produjo una reducción del 1,59 % en el índice de permeabilidad; mientras que para una adición del 2 % la reducción de dicho factor es inferior al 0,28 %.

Evidentemente, el porcentaje óptimo de caucho para adición al concreto permeable se encuentra a un valor cercano al 2 % del peso de los agregados de la mezcla. Esto con el fin de incrementar considerablemente la resistencia a flexión sin afectar de manera significativa la resistencia a compresión y permeabilidad, aunque con un leve decremento en valor de estos dos últimos parámetros en relación a una mezcla convencional de concreto permeable.

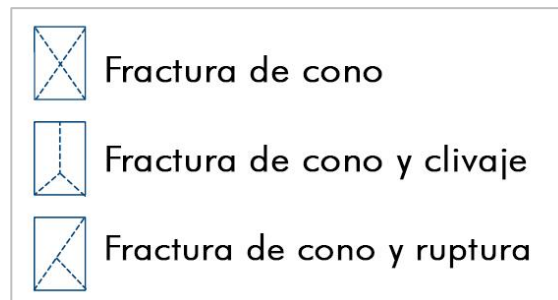
### **3.6.6. Tipos de fallas en especímenes ensayados**

Las fallas en los cilindros de concreto para ensayo a compresión indican ciertas desviaciones de sus parámetros establecidos, estas variaciones pueden ser geométricas; en el equipo utilizado para el ensayo o en la forma de realizar

el procedimiento. En el caso de las mezclas ensayadas, de 18 cilindros 14 tuvieron una fractura de tipo cono y clivaje, 2 en forma de cono y el resto en forma cono y ruptura.

La fractura en cono se da cuando la carga se aplica correctamente sobre un espécimen de ensayo en las condiciones ideales. Cuando el espécimen de ensayo presenta una cara de aplicación de carga convexa o existe alguna irregularidad en los platos de nivelación o carga, se produce una fractura en forma de cono y clivaje. La fractura tipo cono y ruptura se da cuando las caras de aplicación de carga de la muestra se desvían ligeramente de su relación de paralelismo.

Figura 28. **Tipos de fractura en cilindros sometidos a compresión**



Fuente: elaboración propia.

### **3.6.7. Efecto del caucho triturado sobre el concreto**

Con base en los ensayos realizados se observa que el caucho tiene un efecto benéfico en relación a la resistencia a compresión del concreto permeable pero negativo en cuanto a su resistencia a compresión. En cuanto a la cantidad de material de caucho a adicionar a una mezcla puede decirse que en una cantidad adecuada, este caso fue del 2 % del peso de los agregados, el

caucho actúa posiblemente como un disipador de energía, permitiendo al material aumentar su resistencia a flexión; sin embargo, en cantidades mayores a las mencionadas, la resistencia a compresión se ve considerablemente afectada mientras que el comportamiento en flexión, aunque es superior al de una mezcla convencional no es el óptimo que pudiera obtenerse al adicionar caucho.

Existen ciertos factores que pudieran mejorar el desempeño de una mezcla adicionada con caucho, tal es el caso de una distinta granulometría o su proporción en distintos diseños de mezcla.

Figura 29. **Falla en espécimen de concreto permeable sometido a compresión**



Fuente: elaboración propia.





## CONCLUSIONES

1. Para el caso del concreto permeable una adición de caucho en proporciones adecuadas resulta positivo para su desempeño en flexión; el mejor resultado lo proporciona la mezcla 3 (15,44 kg/cm<sup>2</sup> de módulo de ruptura).
2. Las variaciones en el peso unitario y porcentaje de vacíos obtenidos depende directamente de la uniformidad en el tamaño del agregado grueso, que reduce o incrementa la resistencia del concreto. Para las cantidades de caucho adicionado el peso unitario aumentó entre 26 kg/m<sup>3</sup> y 32 kg/m<sup>3</sup> mientras que el porcentaje de vacíos se redujo entre un 4 y 5 por ciento en referencia a la mezcla de concreto permeable convencional. Sin embargo, la variación de estos parámetros en los rangos especificados no afectó la permeabilidad de las mezclas.
3. De todas las propiedades afectadas por la adición de caucho triturado, la permeabilidad es la que menos presenta variaciones para una adición de caucho entre el 2 % y 4 %; las variaciones de permeabilidad no son significativas con ambos porcentajes, sin embargo, la mezcla 3 muestra el mejor resultado; por otro lado, cantidades fuera de estos rangos causan cambios considerables en las propiedades mecánicas del material.
4. Según las pruebas realizadas, para este caso la cantidad óptima de adición de caucho de 3 mm fue de un 2 % del peso total del agregado fino y grueso de la mezcla. Esto resulta en un aumento considerable en

la resistencia a flexión con una disminución de la resistencia a compresión relativamente baja.

5. De las propiedades estudiadas se observa que el beneficio de utilizar caucho triturado como adición al concreto permeable se da únicamente en su resistencia a flexión, además de optar por una práctica eco-amigable siempre que el caucho provenga de material reciclado, ya que la permeabilidad también brinda resultados óptimos con la mezcla 3 (2 443,08 in/h).

## RECOMENDACIONES

1. Al momento de utilizar caucho triturado, el diseñador debe tener en cuenta el uso final del concreto permeable para elegir el porcentaje más conveniente a adicionar, considerando que el beneficio de utilizar este material se da únicamente en la resistencia a flexión del concreto.
2. Conviene estudiar el efecto del caucho en relación a otras propiedades del concreto como la acústica, pues existe la posibilidad de que el material reduzca el ruido por rodadura de los neumáticos al transitar.
3. El estudio realizado se limita al uso del caucho triturado con granulometría de 3 mm. Conviene investigar el comportamiento utilizando distintos tamaños del material, así como un diferente proporcionamiento de mezcla.
4. Al hacer uso del caucho como adición al concreto, es conveniente verificar el tamaño de las partículas para que cumpla con los resultados esperados; además, no exceder de un 2 % de material si se desean resultados como los obtenidos en esta investigación.
5. Al optar por el concreto permeable como recubrimiento del suelo o pavimento, debe considerarse que es un material que sin el mantenimiento periódico adecuado perderá las propiedades para filtrar el agua al suelo, motivo principal de la utilización de este material. Otro de los factores para la colocación de un concreto permeable es que el

suelo debe ser permeable y no sufrir cambios de volumen al momento de saturarse.

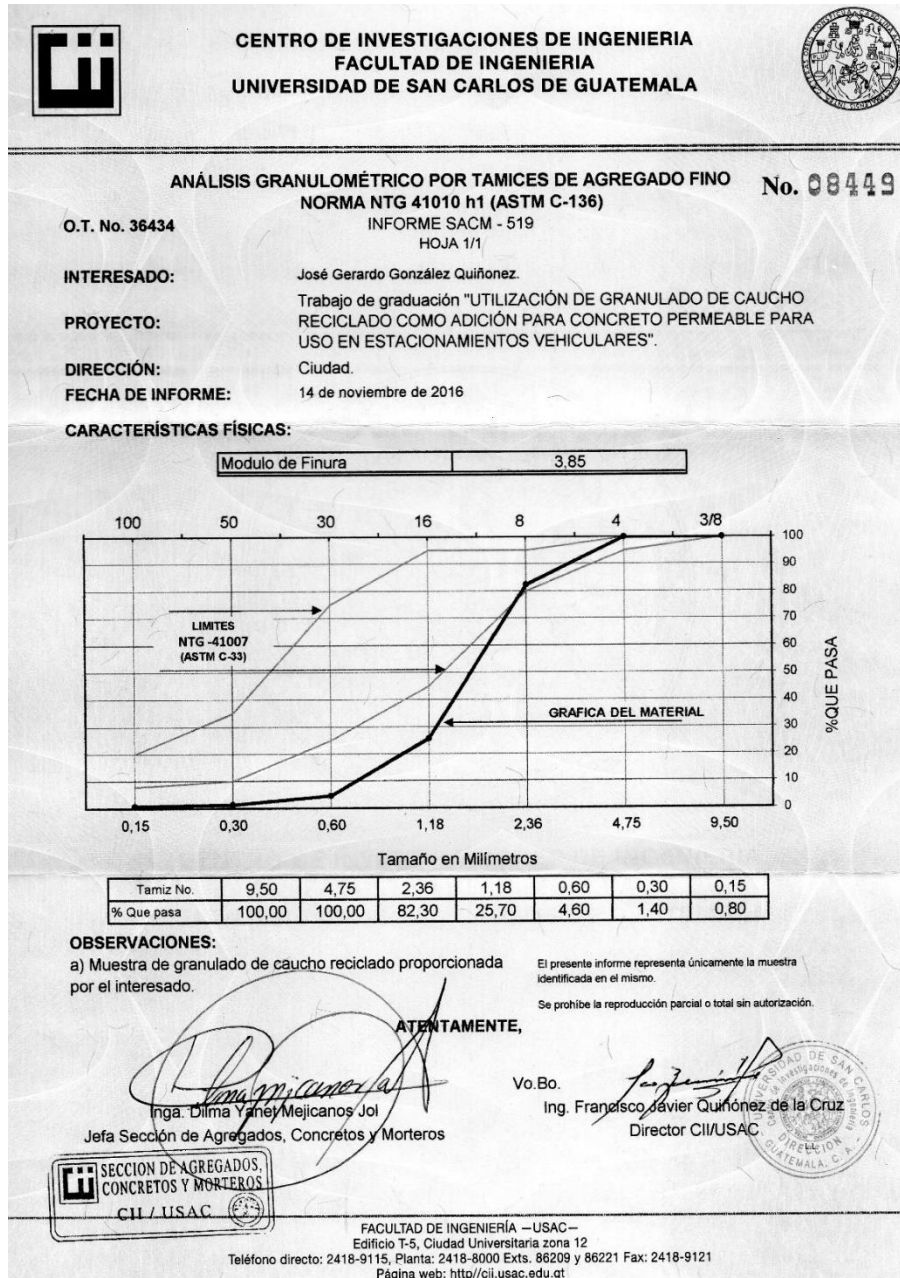
## BIBLIOGRAFÍA

1. AIRE, Carlos. *Concreto permeable: alternativas sustentables*. [En línea]. <<http://www.imcyc.com/revistacyt/jun11/arttecnologia.htm>>. [Consulta 15 de noviembre de 2016].
2. Aislamiento y Estanqueidad. *Caucho: comportamiento mecánico*. [En línea]. <<http://www.eric.es/web/mecanica-de-los-cauchos/>>. [Consulta 5 de noviembre de 2016].
3. CENTENO, Oswaldo. *Pavimentos rígidos*. [En línea]. <<https://oswaldodavidpavimentosrigidos.blogspot.com/>>. [Consulta 15 de noviembre de 2016].
4. GARCÍA PUENTE, Nelson Giovanni. *Control de pesos y dimensiones de vehículos automotores y sus combinaciones*. Guatemala: Dirección General de Caminos, 2012. 27 p.
5. HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ, Billy Josealberto. *Estudio comparativo de la resistencia a la compresión en mezclas de concreto elaboradas con materiales de reciclaje: plástico y llantas*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2011. 121 p.
6. ORDOÑEZ GÁLVEZ, Juan Julio. *Cartilla técnica: balance hídrico superficial*. Perú: Sociedad Geográfica de Lima, 2012. 44 p.

7. PÉREZ RAMOS, Daniel. *Estudio experimental de concretos permeables con agregados andesíticos*. Trabajo de graduación de maestría en Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 2009. 157 p.
8. RODAS RALDA, Natalia Ixchel. *Desarrollo y uso de bloques de concreto permeable en senderos ecológicos*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2012. 117 p.
9. SOLANO CERDAS, Cindy. *Análisis de la flexotracción del concreto permeable*. Trabajo de graduación de Licenciatura en Ingeniería de la Construcción. Escuela de Ingeniería de la Construcción, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2009. 123 p.
10. TARBUCK, E. J. *Ciencias de la Tierra*. 8a ed. Madrid, España: Pearson Educación S.A., 2005. 736 p.
11. TORRES FLORES, Luis Enrique. *Tecnología del concreto permeable o ecológico en la construcción*. Trabajo de Graduación para especialista en Construcción. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 2010. 57 p.

# ANEXOS

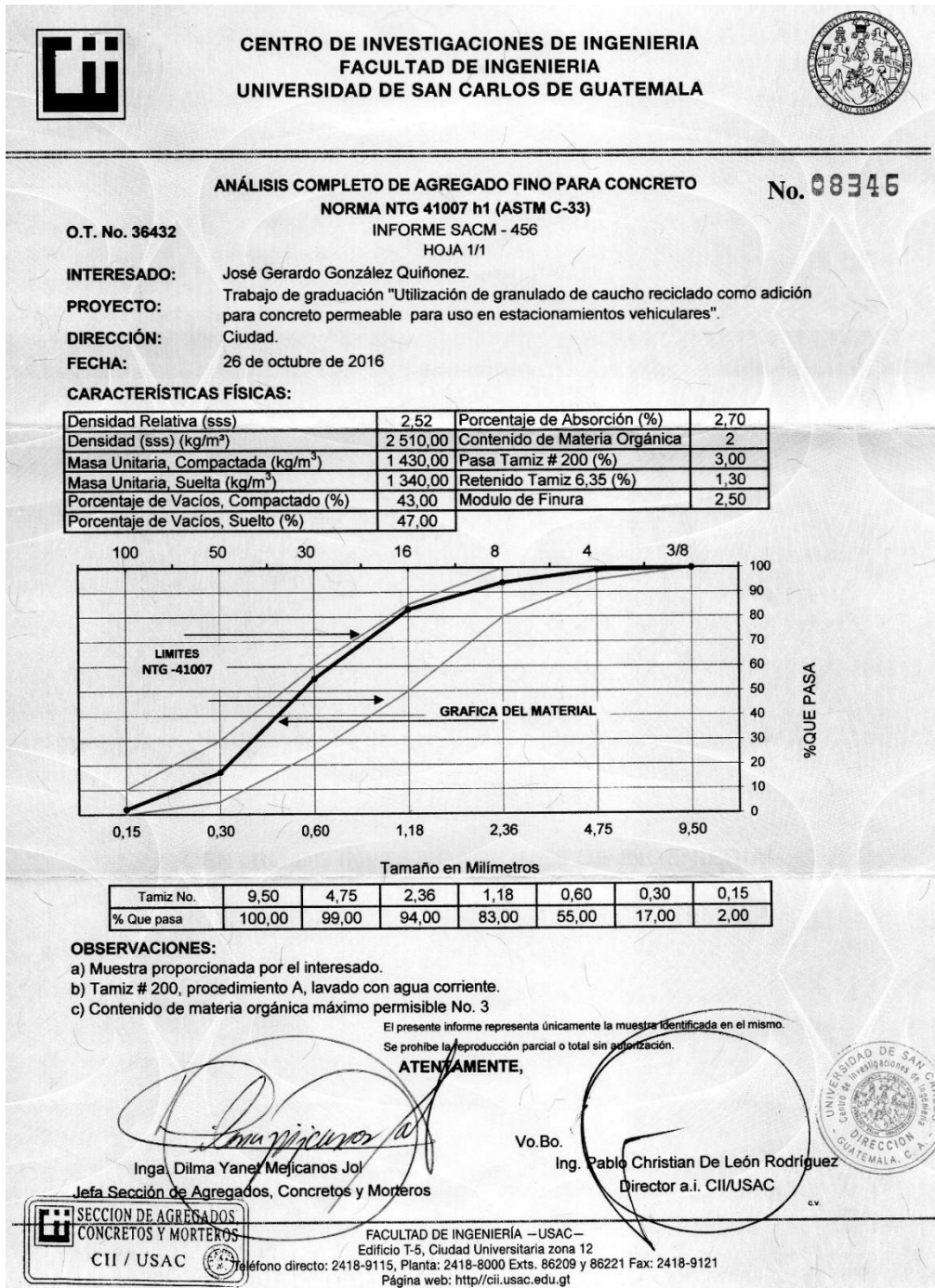
## Anexo 1. Análisis granulométrico de caucho triturado



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Usac.




## Anexo 2. Análisis granulométrico de agregado fino para concreto




Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Usac.

### Anexo 3. Análisis granulométrico de agregado grueso para concreto



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



---

**ANÁLISIS COMPLETO DE AGREGADO GRUESO PARA CONCRETO**  
NORMA NTG 41007 h1 (ASTM C-33)  
INFORME SACM - 457  
HOJA 1/1

O.T. No. 36433

**INTERESADO:** José Gerardo González Quiñonez.

**PROYECTO:** Trabajo de graduación "Utilización de granulado de caucho reciclado como adición para concreto permeable para uso de estacionamientos vehiculares"

**DIRECCIÓN:** Ciudad.

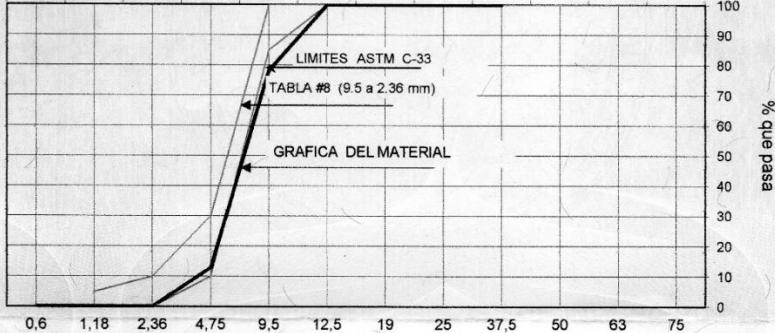
**FECHA:** 26 de octubre de 2016.

**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS:**

Densidad Relativa (sss)	2,63	Pasa Tamiz # 200 (%)	1,60
Densidad (sss) (kg/m <sup>3</sup> )	2 620,00	Porcentaje de Vacíos, Compactado (%)	44,00
Masa Unitaria, Compactada (kg/m <sup>3</sup> )	1 470,00	Porcentaje de Vacíos, Suelto (%)	47,00
Masa Unitaria, Suelta (kg/m <sup>3</sup> )	1 390,00	Modulo de Finura	6,09
Porcentaje de Absorción (%)	0,60	Retenido Tamiz 6,35 (%)	40,80

**No. 08347**

No.30 No.16 No.8 No.4 3/8" 1/2" 3/4" 1" 1 1/2" 2" 2 1/2" 3"



Tamaño en milímetros

Tamiz No.	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No.4	No.8	No.16
% Que pasa	100,0	100,00	100,00	100,00	78,00	13,00	0,00	0,00

**OBSERVACIONES:**

a) Muestra proporcionada por el interesado.

b) Tamiz # 200, procedimiento A, lavado con agua corriente.

**ATENTAMENTE,**

*[Firma]*  
Inga. Dilma Yanez Méjicanos Jol  
CII / USAC

Vo.Bo. *[Firma]*  
Ing. Pablo Christian de León Rodríguez  
Director a.i. CII/USAC

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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Usac.

Anexo 4. **Resultados de ensayos a compresión en cilindros de concreto permeable sin adición de caucho**



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



---

**INFORME DE ENSAYO A COMPRESIÓN PARA CILINDROS DE CONCRETO No. 11373**  
NORMA NTG - 41017 h1 (ASTM C-39)  
INFORME SACM - 214  
HOJA 1/1

**O.T. No. 36436**

**INTERESADO:** José Gerardo González Quiñonez, Carné: 2011 - 14598

**PROYECTO:** Trabajo de Graduación "Utilización de granulado de caucho reciclado como adición para concreto permeable para uso en estacionamientos vehiculares".

**DIRECCIÓN:** Ciudad de Guatemala.

**EMISIÓN DE INFORME:** 9 de agosto de 2017

No. CILINDRO OBRA	No. CILINDRO LABORATORIO	FECHA DE COLOCACIÓN	FECHA DE RUPTURA	EDAD en días	CILINDRO REPRESENTATIVO DE LA COLOCACIÓN	PESO en kg	DIÁMETRO en cm	ALTURA en cm	CARGA en libras	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/in <sup>2</sup>	TIPO DE FRACTURA
1	95-02	17/01/2017	20/01/2017	3	Mezcla Patrón (0% de adición)	9,865	15,228	30,397	22 500	5,50	800	B
2	96-02	17/01/2017	20/01/2017	3	Mezcla Patrón (0% de adición)	9,775	15,163	30,403	19 500	4,80	700	B
3	97-02	17/01/2017	24/01/2017	7	Mezcla Patrón (0% de adición)	3,095	10,110	20,323	15 800	8,80	1 280	A
4	98-02	17/01/2017	24/01/2017	7	Mezcla Patrón (0% de adición)	3,100	10,200	20,225	14 000	7,60	1 100	A
5	99-02	17/01/2017	14/02/2017	28	Mezcla Patrón (0% de adición)	9,610	15,135	30,543	35 000	8,70	1 260	B
6	100-02	17/01/2017	14/02/2017	28	Mezcla Patrón (0% de adición)	9,900	15,145	30,427	32 500	8,00	1 160	B

**OBSERVACIONES :**

a) Muestra proporcionada por el interesado.

b) Muestras ensayadas en máquina de compresión RIEHLE Testing Machine División con capacidad de 300 000 libras, dial utilizado para lectura 300 000 libras.

c) Cilindros 3 y 4 cabeceado según norma ASTM C-617 y cilindros 1,2,5 y 6 según norma ASTM C- 1231.

d) El interesado proporcionó:

- No. de cilindro en obra.
- Fecha de colocación.
- Edad de ensayo.
- El representativo de estructura.

e) Peso unitario: **1790 kg/m<sup>3</sup>**

f) Porcentaje de aire: **8,00 %**

g) Asentamiento: **1/2" in (1,27 cm)**

h) Temperatura: **20 °C**

**BOSQUEJO DE TIPOS DE FRACTURA**







A. CONO      B. CONO Y CLIVAJE      C. CONO Y RUPTURA      D. CORTE      E. COLUMNAR

El presente informe únicamente es para las muestras identificadas en el mismo. Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.

ING. *[Firma]*  
Inga Dilma Yano Mojicanos Jor  
Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros

ATENTAMENTE,  
Vo.Bo. *[Firma]*  
Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
Director CII/USAC



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



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Usac.

Anexo 5. **Resultados de ensayos a compresión en cilindros de concreto permeable con 4% de adición de caucho**



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



---

**INFORME DE ENSAYO A COMPRESIÓN PARA CILINDROS DE CONCRETO** No. 11267  
**NORMA NTG - 41017 h1 (ASTM C-39)**  
 INFORME SACM - 218  
**HOJA 1/1**

O.T. No. 36438

**INTERESADO:** José Gerardo González Quiñonez, Carné: 2011 - 14598

**PROYECTO:** Trabajo de Graduación "Utilización de granulado de caucho reciclado como adición para concreto permeable para uso en estacionamientos vehiculares".

**DIRECCIÓN:** Ciudad de Guatemala.

**EMISIÓN DE INFORME:** 18 de mayo de 2017

No. CILINDRO OBRA	No. CILINDRO LABORATORIO	FECHA DE COLOCACIÓN	FECHA DE RUPTURA	EDAD en días	CILINDRO REPRESENTATIVO DE LA COLOCACIÓN	PESO en kg	DIÁMETRO en cm	ALTURA en cm	CARGA en libras	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/in <sup>2</sup>	TIPO DE FRACTURA
1	107-02	20/01/2017	23/01/2017	3	4% de adición	9,400	15,170	30,393	15 000	3,70	540	B
2	108-02	20/01/2017	23/01/2017	3	4% de adición	9,535	15,003	30,545	13 900	3,50	510	B
3	109-02	20/01/2017	27/01/2017	7	4% de adición	9,780	15,158	30,552	17 500	4,30	620	B
4	110-02	20/01/2017	27/01/2017	7	4% de adición	9,695	15,135	30,302	18 000	4,50	650	B
5	111-02	20/01/2017	17/02/2017	28	4% de adición	9,995	15,165	30,415	21 000	5,20	750	B
6	112-02	20/01/2017	17/02/2017	28	4% de adición	9,655	15,050	30,250	20 000	5,00	730	B

**OBSERVACIONES :**

a) Muestra proporcionada por el interesado.  
 b) Muestras ensayadas en máquina de compresión RIEHLE Testing Machine División con capacidad de 300 000 libras, dial utilizado para lectura 300 000 libras.  
 c) Cilindros cabeceado según norma ASTM C-1231  
 d) El interesado proporcionó:

- No. de cilindro en obra.
- Fecha de colocación.
- Edad de ensayo.
- El representativo de estructura.

e) Peso unitario: **1820 kg/m<sup>3</sup>**  
 f) Porcentaje de aire: **2,80 %**  
 g) Asentamiento: **4" in (10,16 cm)**  
 h) Temperatura: **22,4 °C**

*[Firma]*  
 Ing. Zulma Janet Mejicanos Jol  
 Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros

**BOSQUEJO DE TIPOS DE FRACTURA**







A. CONO      B. CONO Y CLIVAJE      C. CONO Y RUPTURA      D. CORTE      E. COLUMNAR

El presente informe únicamente es para las muestras identificadas en el mismo.  
 Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.

ATENTAMENTE,


Vo.Bo. *[Firma]*  
 Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
 Director CIUSAC

SECCION DE AGREGADOS  
CONCRETOS Y MORTEROS  
CII / USAC


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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Usac.

Anexo 6. Resultados de ensayos a compresión en cilindros de concreto permeable con 2% de adición de caucho



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



---

**INFORME DE ENSAYO A COMPRESIÓN PARA CILINDROS DE CONCRETO**  
NORMA NTG - 41017 h1 (ASTM C-39) No. 11272

O.T. No. 36437 INFORME SACM - 216  
**HOJA 1/1**

**INTERESADO:** José Gerardo González Quiñonez, Carné: 2011 - 14598

**PROYECTO:** Trabajo de Graduación "Utilización de granulado de caucho reciclado como adición para concreto permeable para uso en estacionamientos vehiculares".

**DIRECCIÓN:** Ciudad de Guatemala.

**EMISIÓN DE INFORME:** 18 de mayo de 2017

No. CILINDRO OBRA	No. CILINDRO LABORATORIO	FECHA DE COLOCACIÓN	FECHA DE RUPTURA	EDAD en días	CILINDRO REPRESENTATIVO DE LA COLOCACIÓN	PESO en kg	DIÁMETRO en cm	ALTURA en cm	CARGA en libras	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/in <sup>2</sup>	TIPO DE FRACTURA
1	101-02	03/02/2017	06/02/2017	3	2% de adición	9,855	14,965	30,703	20 000	5,10	740	C
2	102-02	03/02/2017	06/02/2017	3	2% de adición	9,600	14,975	30,247	18 000	4,50	650	B
3	103-02	03/02/2017	10/02/2017	7	2% de adición	10,210	15,200	30,513	25 000	6,10	890	B
4	104-02	03/02/2017	10/02/2017	7	2% de adición	10,045	15,228	30,597	26 000	6,40	930	B
5	105-02	03/02/2017	03/03/2017	28	2% de adición	10,060	15,155	30,653	32 500	8,00	1 160	C
6	106-02	03/02/2017	03/03/2017	28	2% de adición	9,970	15,045	30,587	30 000	7,50	1 090	B

**OBSERVACIONES :**

a) Muestra proporcionada por el interesado.

b) Muestras ensayadas en máquina de compresión RIEHLE Testing Machine División con capacidad de 300 000 libras, dial utilizado para lectura 300 000 libras.

c) Cilindros cabeceado según norma ASTM C-1231

d) El interesado proporcionó:

- No. de cilindro en obra.
- Fecha de colocación.
- Edad de ensayo.
- El representativo de estructura.



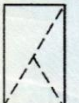


e) Peso unitario: **1760 kg/m<sup>3</sup>**

f) Porcentaje de aire: **3,70 %**

g) Asentamiento: **3,15" in (8,00 cm)**

h) Temperatura: **19,5 °C**

**BOSQUEJO DE TIPOS DE FRACTURA**

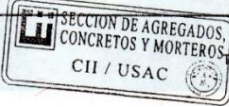






El presente informe únicamente es para las muestras identificadas en el mismo. Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.

ATENTAMENTE,

*[Firma]*  
Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jdl  
Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros


Vo.Bo. *[Firma]*  
Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz.  
Director CII/USAC




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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Usac.

Anexo 7. **Resultados de ensayos a flexión y permeabilidad en concreto permeable sin adición de caucho**



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



---

**No. 11271**

**INFORME DE ENSAYO A FLEXIÓN DE VIGAS DE CONCRETO Y ENSAYO DE PERMEABILIDAD EN CONCRETO**  
**NORMA NTG 41017 h2 (ASTM C-78) Y NORMA NTG 41017 h 34 (ASTM C-1701)**  
 O.T. No. 36436 INFORME SACM - 215  
 HOJA 1/1

**INTERESADO:** José Gerardo González Quiñonez, Carné: 2011 - 14598  
**PROYECTO:** Trabajo de Graduación "Utilización de granulado de caucho reciclado como adición para concreto permeable para uso en estacionamientos vehiculares".  
**DIRECCIÓN:** Ciudad de Guatemala.  
**EMISIÓN DE INFORME:** 18 de mayo de 2017

---

**ENSAYO A FLEXIÓN DE VIGAS DE CONCRETO**

MUESTRA	FECHA DE COLOCACIÓN	FECHA DE RUPTURA	EDAD (días)	ANCHO (mm)	ALTO (mm)	LARGO (mm)	LUZ ENTRE APOYOS (mm)	CARGA RUPTURA (N)	ESFUERZO A FLEXIÓN (Mpa)	ESFUERZO A FLEXIÓN (PSI)
Mezcla patrón (0% de adición)	17/01/2017	14/02/2017	28	152,80	153,80	540,00	457,20	8010,00	1,00	145,00

---

**ENSAYO DE PERMEABILIDAD EN CONCRETO**

	<b>TASA DE INFILTRACIÓN (pulgadas/hora)</b>
<b>CONCRETO PERMEABLE</b>	2 450,10

---

**OBSERVACIONES :**  
 a) Muestra proporcionada por el interesado.  
 b) Muestras ensayadas en máquina de compresión RIEHLE Testing Machine División con capacidad de 300 000 libras, dial utilizado para lectura 60 000 libras.  
 c) Mezclas y ensayos realizados bajo condiciones de laboratorio.

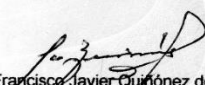
El presente informe únicamente es para las muestras identificadas en el mismo.  
Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.

ATENTAMENTE,




Inga. Dilma Yañet Mejicanos Jol  
Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros

Vo.Bo.



Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
Director CII/USAC






SECCION DE AGREGADOS,  
CONCRETOS Y MORTEROS  
CII / USAC


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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Usac.

Anexo 8. **Resultados de ensayos a flexión y permeabilidad en concreto permeable con 4% de adición de caucho**



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



---

**No. 11269**

**INFORME DE ENSAYO A FLEXIÓN DE VIGAS DE CONCRETO Y DE ENSAYO DE PERMEABILIDAD EN CONCRETO**  
**NORMA NTG 41017 h2 (ASTM C-78) Y NORMA NTG 41017 h 34 (ASTM C-1701)**  
 O.T. No. 36438 INFORME SACM - 219  
**HOJA 1/1**

**INTERESADO:** José Gerardo González Quiñonez, Carné: 2011 - 14598  
**PROYECTO:** Trabajo de Graduación "Utilización de granulado de caucho reciclado como adición para concreto permeable para uso en estacionamientos vehiculares".  
**DIRECCIÓN:** Ciudad de Guatemala.  
**EMISIÓN DE INFORME:** 18 de mayo de 2017

---

**ENSAYO A FLEXIÓN DE VIGAS DE CONCRETO**

MUESTRA	FECHA DE COLOCACIÓN	FECHA DE RUPTURA	EDAD (días)	ANCHO (mm)	ALTO (mm)	LARGO (mm)	LUZ ENTRE APOYOS (mm)	CARGA RUPTURA (N)	ESFUERZO A FLEXIÓN (Mpa)	ESFUERZO A FLEXIÓN (PSI)
4% de adición	20/01/2017	17/02/2017	28	152,57	154,73	540,00	457,20	11120,00	1,40	205,00

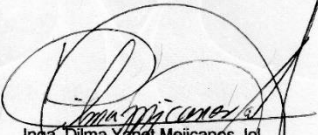
**ENSAYO DE PERMEABILIDAD EN CONCRETO**

TASA DE INFILTRACIÓN (pulgadas/hora)	
CONCRETO PERMEABLE	2 411,00

**OBSERVACIONES :**  
 a) Muestra proporcionada por el interesado.  
 b) Muestras ensayadas en máquina de compresión RIEHLE Testing Machine División con capacidad de 300 000 libras, dial utilizado para lectura 60 000 libras.  
 c) Mezclas y ensayos realizados bajo condiciones de laboratorio.

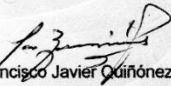
El presente informe únicamente es para las muestras identificadas en el mismo.  
Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.

ATENTAMENTE,




Inga Dilma Yanet Mejicanos Jol  
 Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros

Vo.Bo.



Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz.  
 Director CI/USAC






SECCIÓN DE AGREGADOS,  
CONCRETOS Y MORTEROS  
 CII / USAC


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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Usac.

Anexo 9. **Resultados de ensayos a flexión y permeabilidad en concreto permeable con 2% de adición de caucho**



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



---

**No. 11273**

**INFORME DE ENSAYO A FLEXIÓN DE VIGAS DE CONCRETO Y DE ENSAYO DE PERMEABILIDAD EN CONCRETO**  
**NORMA NTG 41017 h2 (ASTM C-78) Y NORMA NTG 41017 h 34 (ASTM C-1701)**

O.T. No. 36437 INFORME SACM - 217  
HOJA 1/1

**INTERESADO:** José Gerardo González Quiñonez, Carné: 2011 - 14598

**PROYECTO:** Trabajo de Graduación "Utilización de granulado de caucho reciclado como adición para concreto permeable para uso en estacionamientos vehiculares".

**DIRECCIÓN:** Ciudad de Guatemala.

**EMISIÓN DE INFORME:** 18 de mayo de 2017

---

**ENSAYO A FLEXIÓN DE VIGAS DE CONCRETO**

MUESTRA	FECHA DE COLOCACIÓN	FECHA DE RUPTURA	EDAD (días)	ANCHO (mm)	ALTO (mm)	LARGO (mm)	LUZ ENTRE APOYOS (mm)	CARGA RUPTURA (N)	ESFUERZO A FLEXIÓN (Mpa)	ESFUERZO A FLEXIÓN (PSI)
2% de adición	03/02/2017	03/03/2017	28	152,80	156,93	535,00	457,20	12460,00	1,50	220,00

**ENSAYO DE PERMEABILIDAD EN CONCRETO**


TASA DE INFILTRACIÓN (pulgadas/hora)	
CONCRETO PERMEABLE	2 443,10

**OBSERVACIONES :**

- a) Muestra proporcionada por el interesado.
- b) Muestras ensayadas en máquina de compresión RIEHLE Testing Machine División con capacidad de 300 000 libras, dial utilizado para lectura 60 000 libras.
- c) Mezclas y ensayos realizados bajo condiciones de laboratorio.

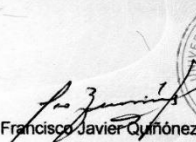
El presente informe únicamente es para las muestras identificadas en el mismo. Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.

ATENTAMENTE,



Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol  
Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros

Vo.Bo.



Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz.  
Director CII/USAC

SECCION DE AGREGADOS  
CONCRETOS Y MORTEROS  
CII / USAC

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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Usac.



