UNIVERSIDAD ISAAC NEWTON
SEDE VIRTUAL
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**Licenciatura en Ingeniería Civil**

# MODIFICACIÓN DE CONCRETO HIDRÁULICO CON CAUCHO RECICLADO TRITURADO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CUNETAS EN CARRETERAS DE CIUDAD QUESADA,

TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL

MARÍA PAULA BARQUERO DELGADO
LUIS FELIPE RODRÍGUEZ SOLÍS

NOMBRE DEL DIRECTOR DE TESIS

Ing. Danilo Hernández Guerrero, M. Sc.

JUNIO, 2024.

Universidad Isaac Newton
Escuela de Ingeniería Civil
Licenciatura en Ingeniería Civil

# DECLARACIÓN JURADA

Yo María Paula Barquero Delgado cédula de identidad N.º [redacted] estudiante de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Isaac Newton, declaro bajo fe de juramento y conscientes de las responsabilidades de los civiles y penales de este acto, que este Trabajo Final de Investigación es de mi autoría y es presentado con la finalidad de obtener el grado de Licenciatura y tiene como título "Licenciatura en Ingeniería Civil".

Declaro que en él no se han reproducido informaciones parciales o totales de otros autores, como si fueran de mi propia autoría, por el contrario, se han destacado en el uso de citas textuales las informaciones de otros autores, consignando su origen. Debido a lo anterior, libero a la Universidad Isaac Newton de cualquier responsabilidad en caso de que la declaración sea falsa.

Además, por este medio, autorizo la consulta de esta investigación para fines académicos por parte de la comunidad de usuarios de la Biblioteca de la Universidad Isaac Newton, bajo las modalidades de préstamo interno y a domicilio, así como su inclusión en repositorios o bases de datos digitales que la Universidad considere oportunas.

Entregado en las oficinas de la Dirección Administrativa de la Universidad Issac Newton ubicada en San Carlos a los 29 días del mes de Julio del 2024.

Firma MARIA PAULA BARQUERO DELGADO (FIRMA) Firmado digitalmente por MARIA PAULA BARQUERO DELGADO (FIRMA) Fecha: 2024.07.29 15:36:44 -06'00'

María Paula Barquero Delgado

[redacted]

Universidad Issac Newton
Escuela de ingenierías Civil
Licenciatura Ingeniería Civil

# DECLARACIÓN JURADA

Yo Luis Felipe Rodríguez Solís cédula de identidad Nº [redacted] estudiante de la carrera Ingeniería Civil de la Universidad Issac Newton, declaro bajo fe de juramento y conscientes de las responsabilidades de los civiles y penales de este acto, que este Trabajo Final de Investigación es de mi autoría y es presentado con la finalidad de obtener el grado de Licenciatura y tiene como título "Licenciatura en Ingeniería Civil".

Declaro que en él no se han reproducido informaciones parciales o totales de otros autores, como si fueran de mi propia autoría, por el contrario, se han destacado en el uso de citas textuales las informaciones de otros autores, consignando su origen. Debido a lo anterior, libero a la Universidad Issac Newton de cualquier responsabilidad en caso de que la declaración sea falsa.

Además, por este medio, autorizo la consulta de esta investigación para fines académicos por parte de la comunidad de usuarios de la Biblioteca de la Universidad Issac Newton, bajo las modalidades de préstamo interno y a domicilio, así como su inclusión en repositorios o bases de datos digitales que la Universidad considere oportunas.

Entregado en las oficinas de la Dirección Administrativa de la Universidad Issac Newton ubicada en San Carlos a los 23 días del mes de Julio del 2024.

Firma: Luis Felipe R.S.

Luis Felipe Rodríguez Solís

[redacted]

# CARTA DEL TUTOR

San José, 5 de agosto del 2024.

Señores
**UNIVERSIDAD ISAAC NEWTON**
Presente

Estimados señores:

En mi calidad de tutor designado a la Tesis elaborada por el estudiante Luis Felipe Rodríguez Solís, titulada *Modificación de Concreto Hidráulico con Caucho Triturado para la Construcción de Cunetas en Carreteras de Ciudad Quesada*, durante el período 2024, al respecto hago de su conocimiento que doy mi aprobación para que este Trabajo Final de Graduación, sea desarrollado y presentado ante la Universidad Isaac Newton, contando con los lineamientos establecidos por esta reconocida Universidad.

Agradezco la oportunidad brindada para poder desarrollar junto este estudiante este trabajo que enriquecerá la estructura institucional de esta dependencia.

Sin más por el momento me despido cordialmente,

DANILO ALBERTO HERNANDEZ GUERRERO (FIRMA)

Firmado digitalmente por DANILO ALBERTO HERNANDEZ GUERRERO (FIRMA)
Fecha: 2024.08.05 09:12:51 -06'00'

***Ing. Danilo Hernández Guerrero, M. Sc.***
Tutor de Tesis
Docente de la Universidad Isaac Newton

**CARTA DEL TUTOR**

San José, 5 de agosto del 2024.

Señores
**UNIVERSIDAD ISAAC NEWTON**
Presente

Estimados señores:

En mi calidad de tutor designado a la Tesis elaborada la estudiante María Paula Barquero Delgado, titulada *Modificación de Concreto Hidráulico con Caucho Triturado para la Construcción de Cunetas en Carreteras de Ciudad Quesada*, durante el período 2024, al respecto hago de su conocimiento que doy mi aprobación para que este Trabajo Final de Graduación, sea desarrollado y presentado ante la Universidad Isaac Newton, contando con los lineamientos establecidos por esta reconocida Universidad.

Agradezco la oportunidad brindada para poder desarrollar junto este estudiante este trabajo que enriquecerá la estructura institucional de esta dependencia.

Sin más por el momento me despido cordialmente,

DANILO ALBERTO HERNANDEZ GUERRERO (FIRMA)

Firmado digitalmente por DANILO ALBERTO HERNANDEZ GUERRERO (FIRMA)
Fecha: 2024.08.05 09:13:58 -06'00'

***Ing. Danilo Hernández Guerrero, M. Sc.***
Tutor de Tesis
Docente de la Universidad Isaac Newton

**CARTA DEL LECTOR**

San Carlos 29 de Julio del 2024

Señores
**UNIVERSIDAD ISAAC NEWTON**
Presente

Estimados señores:

En mi calidad de Lector designado a la Tesis elaborada por el estudiante Luis Felipe Rodríguez Solís, titulada Modificación de Concreto Hidráulico con Caucho Triturado para la Construcción de Cunetas en Carreteras de Ciudad Quesada, *durante el período 2024*, al respecto hago de su conocimiento que doy mi aprobación para que este Trabajo Final de Graduación, sea desarrollado y presentado ante la Universidad Isaac Newton, contando con los lineamientos establecidos por esta reconocida Universidad.

Agradezco la oportunidad brindada para poder desarrollar junto este estudiante este trabajo que enriquecerá la estructura institucional de esta dependencia.

Sin más por el momento me despido cordialmente,

Firmado digitalmente por RAFAEL ERNESTO VILLEGAS VILLEGAS (FIRMA)
Fecha: 2024.08.05 19:10:13 -06'00'

***Ing. Ernesto Villegas Villegas, candidato PhD***
Lector de Tesis
Docente de la Universidad Isaac Newton

# CARTA DEL LECTOR

San Carlos 29 de Julio del 2024

Señores
**UNIVERSIDAD ISAAC NEWTON**
Presente

Estimados señores:

En mi calidad de Lector designado a la Tesis elaborada la estudiante Maria Paula Barquero Delgado, titulada Modificación de Concreto Hidráulico con Caucho Triturado para la Construcción de Cunetas en Carreteras de Ciudad Quesada, *durante el período 2024*, al respecto hago de su conocimiento que doy mi aprobación para que este Trabajo Final de Graduación, sea desarrollado y presentado ante la Universidad Isaac Newton, contando con los lineamientos establecidos por esta reconocida Universidad.

Agradezco la oportunidad brindada para poder desarrollar junto este estudiante este trabajo que enriquecerá la estructura institucional de esta dependencia.

Sin más por el momento me despido cordialmente,

Firmado digitalmente por RAFAEL
ERNESTO VILLEGAS VILLEGAS (FIRMA)
Fecha: 2024.08.05 19:11:19 -06'00'

***Ing. Ernesto Villegas Villegas, candidato PhD***
Lector de Tesis
Docente de la Universidad Isaac Newton

## Dedicatorias

### María Paula Barquero Delgado

A mi amada familia, fuente inagotable de apoyo y amor. A mis compañeros de la universidad, con quienes compartí desafíos y aprendizaje.  A mis amigos, quienes siempre estuvieron a mi lado brindando apoyo. Y a mi Dios, por guiar mis pasos y darme fuerzas y sabiduría en este camino.

Gracias a todos por ser parte de mi vida y por inspirarme a seguir adelante. Esta tesis es también un tributo a cada uno de ustedes.

Con gratitud, María Paula Barquero Delgado.

### Luis Felipe Rodríguez Solís

A Dios por ser mi guía, por enseñarme a ser paciente en momentos de frustración, por darme la sabiduría y discernimiento en la búsqueda, y por ser mi más grande apoyo inquebrantable.

A mi familia, en especial a mi abuela que siempre confió y nunca me dejó hundirme en el desánimo del no lograr mis metas.

## Agradecimientos

**María Paula Barquero Delgado**

Mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que contribuyeron al desarrollo de esta tesis. Sus apoyos y esfuerzos han sido invaluables:

A mis tutores y directores de tesis:

Ing. Luis Guillermo Loria Salazar Msc, PhD, por la dedicación y paciencia infinita. Su dirección académica, llena de sabiduría y estimulo.

Ing. Danilo Hernández Guerrero, M. SC., mi agradecimiento por su inestimable orientación. Sus perspicaces comentarios y su incansable búsqueda de la excelencia han sido de gran ayuda en el proceso de investigación.

A las empresas y organizaciones:

Agradezco a Laboratorio OJM, Constructora Herrera, Cementos Progreso y Constructora BYB por sus colaboraciones y accesos a recurso. Su contribución ha enriquecido este trabajo.

A mi familia por el apoyo en este largo camino académico. Sus palabras y comprensión han sido mi motor en los momentos desafiantes.

Finalmente, agradezco a mi Dios por la sabiduría, entendimiento y oportunidades que me ha brindado en esta etapa.

**Luis Felipe Rodríguez Solís**

A mis tutores y directores de tesis:

Ing. Luis Guillermo Loria Salazar Msc, PhD, mi agradecimiento por su guía y humilde atención.

Ing. Danilo Hernández Guerrero, M. SC., mi agradecimiento por su orientación y sus comentarios que han sido de gran ayuda en el proceso de investigación.

A las empresas y organizaciones:

Agradezco a Laboratorio OJM, Constructora Herrera, Cementos Progreso y Constructora BYB por sus colaboraciones y accesos a recurso. Su contribución ha enriquecido este trabajo.

*"El alma del perezoso desea, pero nada consigue; mas el alma de los diligentes queda satisfecha."*

**Proverbios 13:4**

Tabla de contenidos|

Capítulo 1: Introducción ..... i

1.1 Planteamiento del problema en investigación ..... ii

1.1. 1 Contexto. ..... ii

1.1.2 Justificación ..... iii

1,1,3 Problema de investigación ..... iv

1,1,4 Estado del arte ..... v

1.4.1.1Investigación en torno al uso de caucho triturado reciclado. ..... viii

1.2 Objetivo de la investigación ..... ix

1.2.1 Objetivo general ..... ix

1,2,2 Objetivos específicos ..... ix

1,3 Matriz de la investigación ..... x

1.4 Alcances ..... xi

1.5 Hipótesis ..... xi

Capítulo 2: Marco Teórico ..... 1

2.1 Antecedentes ..... 1

2.1.1 Llantas. ..... 1

2.1.2 Aplicaciones de investigación del uso del caucho triturado como agregado al concreto hidráulico ..... 2

2.2 Bases conceptuales..... 3

2.2.1 Caucho ..... 3

2.2.4 Agregados ..... 3

2.2.5 Agua ..... 4

2.2.5 Cemento ..... 4

2.2.6 Concreto Hidráulico..... 4

2.3 Marco legal ..... 4

2.3.1 Reglamento sobre la Protección, Uso y Mantenimiento de Parques y Espacios Públicos de Competencia. ..... 5

2.3.2 Ley 833, Ley de Construcciones..... 5

2,3,3 Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR-2020. ..... 5

2.3.4 Código sísmico de Costa Rica CSCR-2010,..... 6

2,4 Desarrollo de los ensayos de laboratorio a realizar ..... 7

2,4,1 Muestreo de materiales ASTM D-75, ..... 7

2.4.2 Método para la reducción de muestras de agregados AASHTO R76, Norma de referencia ASTM C702..... 9

2.4.3 Método de ensayo para el análisis granulométrico en tamices y determinación por lavado del material pasando el tamiz de 0,075 mm (no 200) en agregado fino y grueso INTE C46 – INTE C49. ..... 11

2.4.4 Método de ensayo para la determinación de partículas planas, partículas elongadas o partículas planas y elongadas en agregados gruesos, ASTM D 4791. ..... 13

2,4,5 Método de gravedad específica y absorción de agregado fino Norma de referencia ASTM C128. ..... 16

2.4.5 Método de gravedad específica y absorción de agregado grueso AASHTO T85 Norma de referencia ASTM C127 ..... 18

2.3.6 Método de ensayo para determinar la densidad masiva (peso unitario) y los vacíos en agregado Norma de referencia ASTM C29/ C29M. ..... 20

2.4.7 Determinación en laboratorio del contenido de humedad de suelos AASHTO T 265. ..... 21

2,4,8 Método de ensayo para la medición de temperatura del concreto recién mezclado con cemento hidráulico ASTM C-1064 (ANEXO 1,) ..... 22

2.4.9 Método de ensayo para el asentamiento en el concreto del cemento hidráulico INTE C41 (ANEXO 2) ..... 23

2.4.10 Práctica normalizada para hacer y curar especímenes de concreto para ensayo en el laboratorio ASTM C192/C192M (ANEXO 3,), ..... 26

Capítulo 3: Análisis e interacción de resultados ..... 32

3.1 Presentación de los resultados ..... 32

3.1.1 Datos obtenidos del caucho ..... 32

3.1.2 Cifras de agregado Fino, Grueso, Cemento y Agua..... 34

3.1.3 Análisis de las fallas obtenidas en el laboratorio ..... 36

3.2 Análisis de resultados..... 39

3.2.1 Espécimen de referencia o diseño modelo..... 40

3,2,2 Especímenes con dosificaciones al 1%, 5% y 10% ..... 41

3.3 Aceptación o rechazo de la Hipótesis ..... 46

Capítulo 4: Limitaciones, Conclusiones y Recomendaciones, ..... 49

4.1 Limitaciones..... 49

4.2 Conclusiones..... 49

4.3 Recomendaciones ..... 50

Bibliografía ..... 51

**Índice de tablas**

Tabla 1: Matriz de la categoría de análisis,..... x

Tabla 2: Composición del concreto para estructuras menores..... 6

Tabla 3: Granulometría del caucho triturado ..... 13

Tabla 4: Equivalencias métricas..... 15

Tabla 5: Peso agregado fino y porcentajes a adicionar de caucho triturado ..... 32

Tabla 6: Peso agregado fino y porcentajes a adicionar de caucho triturado ..... 33

Tabla 7: Datos para producción del espécimen de referencia,..... 35

Tabla8: Resultados de Fallas de Laboratorio diseño modelo,..... 40

Tabla9: Resultados de Fallas de Laboratorio diseños adicionado caucho triturado ..... 42

Tabla 10: Proporciones de concreto hidráulico para la construcción de 100m de cuneta, ..... 46

Índice de figuras

Figura 1: Ejemplo de talud construido con llantas..... vii

Figura 2: Ejemplo de casa construida con llantas. ..... vii

Figura 3: Reducción de muestras con cuarteo. ..... 10

Figura 4: Reducción de Muestras por cuarteo manual..... 11

Figura 5: Dimensiones de la partícula. ..... 13

Figura 6: Dispositivo de calibracion proporcional..... 14

Figura 7: Medición de temperatura al 1%, 5% y 10% del concreto con el agregado de caucho.. 23

Figura 8: Medición de asentamiento al 1%, 5% y 10% del concreto con el agregado de caucho.26

Figura 9: Moldeo..... 26

Figura 10: Relleno de especímenes, envarillado y golpeteo con mazo ..... 28

Figura 11: Especímenes en sus moldes para el curado final..... 29

Figura 12: Identificación de los especímenes manteniendo el agregado fino y adicionando caucho triturado..... 30

Figura 13: Curado de especímenes ..... 31

Figura 14: Dosificaciones de caucho reciclado al 1%, 5% y 10%..... 34

Figura 16: Espécimen no alterado..... 36

Figura 17: Fallas realizadas a los especímenes de 1%, 5% y 10% a los 7 días ..... 37

Figura 18: Vista en Planta de los especímenes de 1%, 5% y 10% fallados a 7 días..... 37

Figura 19: Fallas realizadas a los especímenes a los 14 días..... 38

Figura 20: Fallas realizadas a los especímenes a los 28 días..... 38

Figura 21: Vista en Planta y Perfil de los especímenes fallados, 28 días ..... 39

Figura 22: Dimensiones de cuneta..... 46

Gráfico 1: Diseño cilindro modelo ..... 41

Gráfico 2: Diseño de espécimen 1% de caucho triturado adicionado, ..... 43

Gráfico 3: Diseño de espécimen 5% de caucho triturado adicionado, ..... 44

Gráfico 4: Diseño de espécimen 10% de caucho triturado adicionado, ..... 44

# Capítulo 1: Introducción

Los entes públicos como son las municipalidades siempre buscan realizar construcciones que favorezcan a la población en cuanto a comodidad de movilización al igual que alcanzar una huella de carbono lo más baja posible, un tema muy necesario a tratar cuando se refiere a infraestructura, ya que se busca siempre compensar el desarrollo con la repercusión que se le pueda generar al medio ambiente.

En Costa Rica, al igual que en otros países, la contaminación está presente en todo momento, la problemática del desecho de llantas a mantos acuíferos o terrenos baldíos es una de las comunes.

González (2024) las llantas usadas son un material de difícil manejo en la zona sur del país y, su disposición en ríos, calles y lotes baldíos, genera contaminación ambiental y es fuente de criaderos para mosquitos que trasmiten el Dengue, Zika y Chikungunya, por ello la alianza pública privada con Funde llantas y Bridgestone es de vital importancia para el bienestar de las personas.

Las llantas después de cumplir su vida útil se deben retirar y desechar, Costa Rica no se queda atrás en poner manos a la obra para reutilizarlas, para este proceso ya existen empresas que utilizan este material de manera eficaz con un proceso llamado coprocesamiento que convierte la llanta en combustible, sin embargo, utilizar la llanta ya triturada para aportar más ideas y así sumar más maneras de favorecer al medio ambiente es importante, en dado caso que haya un exceso y no se pueda utilizar un solo método, se puede optar por maneras distintas como otra vía de salida para su reúso, por lo tanto, se aborda la propuesta de desarrollar un concreto hidráulico modificado con caucho de llanta triturado que logre cumplir las normas establecidas para su uso en campo, como lo son las cunetas las cuales se puede incorporar el concreto modificado ya que éstas

presentan una baja resistencia en cuanto a pesos continuos a soportar, y sólo deben cumplir la función de transportar aguas de lluvias entre otras.

La dosificación que se utilizará es al 1%, 5%, y 10% en adición respecto al agregado fino con el fin de verificar cual dosificación es la que se acerca más a las características del modelo referencia, para su uso en cunetas aplicando la normativa de Costa Rica y verificar si su uso es aprobado o no con las medidas expuestas.

## 1.1 Planteamiento del problema en investigación

### *1.1. 1 Contexto.*

Las pruebas para el desarrollo de la investigación se realizarán en laboratorio, con un concreto hidráulico que cumple con una resistencia de 210 kg/cm$^2$ para modificar con caucho reciclado triturado en porcentajes del 1%, 5%, y 10% obtenido de llantas desechadas, para alcanzar valores en cilindros sobre una resistencia mínima requerida a compresión, según las proporciones incorporadas y compararlo con muestras patrón, para valorar si se puede usar en cunetas, aplicada con la normativa vigente de Costa Rica.

El propósito de esta idea tiene como iniciativa colaborar con maneras distintas de utilizar el reciclaje de llantas, con el fin de tener un amplio campo de donde escoger y así controlar la reutilización de estos desechos, como lo es aplicarlo en obras civiles como cunetas, las cuales si bien debe cumplir con la normativa respecto a su resistencia, estas pueden incluir en adición de agregados el caucho triturado ya que la cuneta cumple la función de transportar agua, no representando un esfuerzo a compresión que le pueda llegar a realizar fisuras sobrepasando su capacidad de resistencia, además, utilizando esta adición de caucho reciclado se controlan los

gases de efecto invernadero como también la contaminación de mantos acuíferos y aumento de enfermedades por criaderos de mosquito debido al desecho de llantas en lugares no adecuados, favoreciéndose también las municipalidades en tener una huella de carbono más limpia.

### *1.1.2 Justificación*

El transporte en vehículos para la población que pueda permitírselo es de uso diario, al igual que los camiones de carga y diferente maquinaria de trabajo, utilizan llantas, a producirse masivamente por su desgaste, generando una demanda considerable, por lo tanto, luego de cumplir su vida útil, se deben desechar, lamentablemente muchas veces esto no es así porque las dejan en lugares no apropiados, lo cual al caer las lluvias el agua se estanca en estas y provoca criadero de mosquitos como lo es Dengue, Zika y Chikungunya, a como también estas terminan en mantos acuíferos y por ende muchas veces en el mar, desatando componentes tóxicos que perjudican el agua y a la fauna marina.

Costa Rica a pesar de ser un país que actualmente tiene una base fuerte respecto al reciclaje de llantas con ayuda de empresas sin fines de lucro, estas tienen como fin muchas veces ser combustible, por lo tanto, tener como alternativa utilizar este material en concreto hidráulico se vuelve una excelente opción ya que solo se tritura y se agrega a este, no se deben utilizar más procesos para reciclarlo, algo que es muy factible para cuidar del medio ambiente; también, en muchos lugares se necesita realizar la caída de aguas fuera de la carretera en las cunetas; estas perfectamente se pueden modificar con el agregado triturado de llantas recicladas, a sabiendas de que el esfuerzo en las cunetas no llega a ser constante ya que su fin es el transporte de aguas, algunas veces se utilizan como aceras pero igualmente su resistencia se diseña de manera que esta cumpla con la normativa vigente de Costa Rica para su construcción.

Al utilizar este diseño de mezcla, la huella de carbono disminuye, asimismo, si se llegara a dar un excedente de llantas por alta demanda se podrían utilizar de esta manera aportando resistencia al concreto, aspecto que es factible y funcional.

### *1,1,3 Problema de investigación*

Marín (2022) una llanta de desecho se convertirá casi con total seguridad en un criadero para la reproducción del mosquito Aedes aegypti el cual es principal trasmisor de Dengue, Zika y Chikungunya en el país, si somos capaces de eliminar las llantas de desecho en las estaciones de Riteve u otros entes autorizados le estamos dando un golpe mortal al mosquito Aedes aegypti y a las enfermedades que pueda trasmitir.

El factor salud llega a ser muy preocupante cuando se habla de enfermedades transmitidas por insectos sin embargo, las llantas también tienen un problema grave al intentar combustionarse para deshacerse de ellas en ríos como indica Fundellantas (2022) la quema de neumáticos en las orillas de un río genera residuos aceitosos que contaminan las aguas, excediendo los valores máximos de metales establecidos por la normativa ambiental para los diferentes destinos del agua como lo son para el uso humano, doméstico, agrícola, pecuario y recreativo.

Y no sólo se tienen problemas con insectos y contaminación de agua, también están los problemas en los órganos al ingerir y exponerse a el humo que ocasiona el quemar llantas, Fundellantas (2022) las llantas tienen plomo, acero y cadmio, estos son dañinos para la salud humana y las mismas emiten al aire contaminantes que atacan al sistema respiratorio, y dan lugar a la aparición inmediata y progresiva de enfermedades bronco respiratorias, asma, e incluso cáncer, también afecciones a la piel, afecciones cardíacas, y afecciones a los ojos.

Costa Rica actualmente tiene una base fuerte sobre gestión y reciclaje de llantas, la campaña permanente de recolección de llantas que se realiza en las estaciones de Riteve logró sacar de circulación durante el 2020 un total de 44,581 llantas usadas, equivalentes a más de 790 toneladas de material que ya no va a representar nunca más un peligro para la salud y el ambiente, estas llantas fueron coprocesadas para convertirlas en combustible alternativo, lo cual logró evitar que más de 1,643 toneladas de emisiones de dióxido de carbono $CO^2$ fueran lanzadas al ambiente, así mismo desde que la campaña inició en junio de 2018 se han recuperado un total de 81,908 llantas que luego de ser gestionadas adecuadamente han sumado un aproximado de 3,140 toneladas de emisiones de dióxido de carbono $CO^2$ evitadas, Ministerio de Salud (2022)

A partir de la observación del estado del país con respecto a su buen manejo en desechos de llantas utilizando métodos efectivos, se suma también la idea de utilizar otro método de reciclaje, por ende, se plantea la siguiente interrogante de investigación ¿Cuál sería el diseño óptimo de un concreto hidráulico con caucho triturado de llantas recicladas que cumpla con la normativa vigente de Costa Rica para su uso en campo y así aportar al mismo tiempo una menor huella de carbono?

### *1,1,4 Estado del arte*

Las llantas, además de cumplir su función en los vehículos, después llegar a su desgaste se reutilizan de maneras distintas, como, por ejemplo, en la estabilización de taludes, cumpliendo una función muy importante que refuerza el suelo, Barón y Sánchez (s,f,) las llantas tienen un tiempo de degradación de 350 años, por lo tanto, su uso se vuelve más factible debido a su alta resistencia a la degradación, además que utilizarlas de esta manera hace un uso responsable finalizada su vida útil.

Utilizar llantas para la estabilización de taludes reduce en un mayor porcentaje la huella de carbono ya que su proceso en este punto es sencillo, no se requiere trituración o degradación para producción de combustible.

En relación con lo anterior, Barón y Sánchez (s.f.) menciona algunas ventajas:

1. El muro tiene una alta duración y funcionalidad dadas las características del material de las llantas.
2. Tiene alta resistencia a la lluvia, rayos solares y vientos.
3. El costo económico se reduce comparado con otros sistemas constructivos como gaviones o muros de contención, adicional es flexible, deja pasar el agua y permite la revegetación.
4. Evita la contaminación aleja cualquier tipo de enfermedad.
5. En el sector se potencia la facilidad de obtener llantas, fácil de construir y de manejar por la comunidad.
6. Permite un fácil mantenimiento del muro.

El uso de llantas para estabilizar taludes es muy común, como se menciona en las ventajas, es fácil de hacer y económico, por eso se opta mucho por utilizar este método de construcción, también favorece al medio ambiente dándole un uso funcional y que estas no terminen en lugares no debidos afectando de maneras distintas al medio ambiente, consecuente a las personas.



***Figura 1: Ejemplo de talud construido con llantas.***
***Fuente: Barón y Sánchez (s.f.)***



***Figura 2: Ejemplo de casa construida con llantas.***
***Fuente: geocax.com***

Geocax.com (s.f.) el caucho es un material ideal en la construcción por una variedad de razones, es sostenible y duradero, proporciona un buen aislamiento a cualquier estructura que se utiliza para construir, el uso de bloques de mampostería que contengan caucho en la construcción permitiría reducir el calentamiento de manera significativa, también se reduce el costo de materiales cerca del ciencuenta por ciento, el caucho incluso tiene el potencial de mejorar la seguridad contra terremotos de un edificio actuando como amortiguadores.

#### *1.4.1.1Investigación en torno al uso de caucho triturado reciclado.*

Coward (2018) en su tesis para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil en la Universidad de Costa Rica cuyo objetivo era "Analizar la prefactibilidad técnica y financiera del uso de llantas de desechos molidos, para la elaboración de concreto" menciona que se realizará un diseño de mezcla, con un porcentaje de sustitución del agregado fino del 3 %, 10 % y 15 % por caucho triturado de desecho, del cual afirma que el concreto modificado en el proyecto realizado, cumple con la resistencia a un concreto no estructural de un 15 $N/mm^2$ equivalente a 153 $kg/cm^2$, sin embargo en tema de costos, el desarrollo financiero del concreto modificado, no presenta un ahorro con respecto al concreto convencional.

Soto y Marín (2019) en su tesis para optar por el título de Ingeniero Civil en la Universidad Libre Seccional en Colombia, cuyo objetivo era "Determinar la variación del peso en las mezclas de concreto modificadas con la adición del caucho reciclado en porcentajes de 3 %, 5% ,7% y 10% del peso con respecto a una mezcla normal" afirman que el cilindro con 5% de caucho alcanza una resistencia de 23,1 MPa no afectando la resistencia, además de que este también fue el que tuvo una reducción de peso efectiva del 6,6%.

Contreras (2018) en su tesis para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil en la Universidad Privada del Norte en Perú, cuyo objetivo era "Evaluar la influencia del tamaño y porcentaje de caucho reciclado en un concreto estructural sobre su compresión, asentamiento, peso unitario y deformación," concluye que el concreto con adición de caucho no cumple con los requisitos establecidos para un concreto estructural, es por ello que el caucho no debe ser utilizado como adición en concretos con dichos fines, puesto que al evaluar la influencia del tamaño y porcentaje de caucho reciclado adicionado en la mezcla de concreto, se obtuvo que la mala

interacción de estos materiales disminuye severamente se resistencia debido a la facilidad que tiene el caucho para deformarse cuando se aplican cargas; por otro lado, el caucho al ser un material más liviano aligera el concreto, vuelve a la mezcla más fluida y le brinda mayor deformabilidad.

## 1.2 Objetivo de la investigación

### *1.2.1 Objetivo general*

Diseñar un concreto hidráulico con caucho triturado de llantas recicladas que cumpla con la normativa vigente de Costa rica para su uso en campo y así aportar al mismo tiempo a la reducción de la huella de carbono.

### *1,2,2 Objetivos específicos*

1-Desarrollar un concreto hidráulico añadiendo al agregado fino caucho triturado de llantas recicladas que cumpla con las especificaciones de las normas ASTM y a su vez la normativa vigente de Costa Rica.

2-Realizar pruebas de calidad en laboratorio para el concreto hidráulico añadiendo al agregado fino caucho triturado de llantas recicladas utilizando las normas ASTM y a su vez la normativa vigente de Costa Rica.

3-Evaluar el cumplimiento del concreto hidráulico modificado con caucho triturado reciclado de llantas con la normativa vigente de Costa Rica, para su uso en cunetas.

## 1,3 Matriz de la investigación

***Tabla 1: Matriz de la categoría de análisis.***

| Hipótesis | Conceptos | Variables | Indicadores |
|---|---|---|---|
| La incorporación de caucho triturado de llantas recicladas en la mezcla de concreto hidráulico resultará en una resistencia mecánica comparable a la del concreto convencional, cumpliendo al mismo tiempo con las regulaciones ambientales de Costa Rica. | Caucho: utilizado para la elaboración de llantas.<br>Cemento: utilizado para la elaboración de concreto.<br>Normas ASTM (American Society for Testing and Materials) normas internacionales que parametrizan los resultados mínimos aceptados para un material. | Eficacia de los parámetros de resistencia en el concreto hidráulico modificado a través de los ensayos a compresión.<br>Medición del impacto ecológico al medirse cuantitativamente la cantidad de caucho a tratar mediante el proceso de diseño de concreto modificado. | Resultados de los ensayos.<br>Resistencia a la compresión del concreto hidráulico modificado.<br>Tipos de fallas,<br>Análisis de factibilidad de uso para construcción en cunetas. |

***Fuente: Elaborado por: María Paula Barquero Delgado, Luis Felipe Rodríguez Solís (2024)***

## 1.4 Alcances

Coward (2018) menciona que para un concreto modificado con llantas trituradas en porcentajes de sustitución de agregados finos, 3 %, 10 % y 15 % cumple con la resistencia a un concreto no estructural de un 15 $N/mm^2$ equivalente a 153 $kg/cm^2$.

Sin embargo, se han corroborado más porcentajes que cumplen con las resistencias requeridas para su uso.

Los métodos de ensayo de Laboratorio Nacional de Materiales y modelos estructurales [LANNAME], para verificar la resistencia del concreto se utilizan para la elaboración de cilindros los cuales se fallarán a compresión para corroborar su resistencia arrojando datos de calidad.

Lograr procesar en su totalidad todas las llantas desechadas significaría un aporte grande al medio ambiente reduciendo la huella de carbono.

## 1.5 Hipótesis

La incorporación del caucho triturado al concreto hidráulico en la construcción de cuentas se podría ver como una mejoría en durabilidad y resistencia para así reducir costos de producción a lo que también ayudaría en la mitigación de la huella de carbono.

La incorporación de caucho en los diseños de concreto hidráulico para cunetas tiene como fin darle una solución efectiva y económicamente viable al manejo de los residuos de llantas a su vez mejorando la calidad y resistencia de las cuentas de acuerdo a las normas técnicas que exige el país para la construcción de ellas.

Con esta modificación se espera que contribuya al manejo de los recursos y cumplimientos ambientales de la región, con la introducción del caucho al concreto no solo puede tener beneficios

de rendimiento a las cuentas sino también en el entorno ambiental ya que el caucho tendrá un mejor manejo y no estará contaminando distintos lugares de la región.

# Capítulo 2: Marco Teórico

## 2.1 Antecedentes

### *2.1.1 Llantas.*

Las llantas son algo muy común que se ve diario ya que todos los vehículos cuentan con estas para realizar la función de soportar la carga del carro y lograr hacer que ruede para poder movilizarse y brindar comodidad del usuario, El Comercio (2012) en 1915, los alemanes pusieron a punto un caucho sintético, en los años 1920, la tela tejida desapareció y fue sustituida por tejidos con cables de metal sin trama, en 1937, Michelin creó la carcasa de acero, el 4 de junio 1946 Michelin inventa y patenta la llanta radial que desde entonces ha sido utilizado por todos los fabricantes.

Continental (s.f.) la llanta se compone de distintos materiales:

- Caucho (natural y sintético): 41%
- Cargas (negro de humo, sílice, carbón, tiza.): 30%
- Materiales de refuerzo (acero, poliéster, rayón, nylon):15%
- Plastificantes (aceites y resinas):  6%
- Productos químicos para vulcanización (azufre, óxido de zinc): 6%
- Antienvejecimiento y otros productos químicos: 2%

La combinación de todos estos químicos fuerza a que la llanta sea muy resistente y de difícil degradación para el medio ambiente como indica Puro Motor (2024) “un neumático abandonado tarda en degradarse y desaparecer de la naturaleza más de 1,000 años”

### *2.1.2 Aplicaciones de investigación del uso del caucho triturado como agregado al concreto hidráulico*

Coward (2018) en su tesis para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil en la Universidad de Costa Rica cuyo objetivo era "Analizar la prefactibilidad técnica y financiera del uso de llantas de desechos molidos, para la elaboración de concreto" el resultado de su investigación concluyó que para la sustitución de un 3% de agregado con caucho se determinó que su resistencia a la compresión se redujo en un 37,2% y cuando se sustituyó en un 15% el agregado, este disminuyó en un 54,3% la resistencia a la compresión.

Soto y Marín (2019) en su tesis para optar por el título de Ingeniero Civil en la Universidad Libre Seccional en Colombia, cuyo objetivo era "Determinar la variación del peso en las mezclas de concreto modificadas con la adición del caucho reciclado en porcentajes de 3 %, 5% ,7% y 10% del peso con respecto a una mezcla normal" el resultado de su investigación concluyó que al agregar 5% de caucho triturado en sustitución de finos al concreto hidráulico este alcanzó una resistencia de 23,1 MPa en relación con la resistencia de cilindro patrón sin modificar la cual la resistencia fue de 21MPa.

Contreras (2018) en su tesis para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil en la Universidad Privada del Norte en Perú, cuyo objetivo era "Evaluar la influencia del tamaño y porcentaje de caucho reciclado en un concreto estructural sobre su compresión, asentamiento, peso unitario y deformación," Afirma que un posible causante de la disminución de la resistencia del concreto puede ser el tamaño y dureza de los agregados, además al agregar más caucho la resistencia se verá afectada, también detalla los resultados, a los 28 días de curado con una adición el 1% de caucho granulado la mezcla disminuye la resistencia a 212 $kg/cm^2$, y para el polvillo de

caucho la resistencia disminuye a 243 kg/cm$^2$ y a 214 kg/cm$^2$ con la combinación de polvillo y caucho granulado, indicando que el polvillo presenta una resistencia mayor al granulado.

También menciona que a los 56 días de curado la adición del 1% de polvillo disminuye la resistencia a 236 kg/cm$^2$ y con el 1% de caucho granulado y combinando las resistencias disminuyen a 268 kg/cm$^2$ y 251 kg/cm$^2$, indicando que el agregado grueso de caucho presenta una mayor resistencia respecto a la adición de polvillo.

## 2.2 Bases conceptuales

### *2.2.1 Caucho*

Cowar (2018) el caucho o hule en su estado natural aparece en forma de suspensión coloidal, se obtiene de un líquido lechoso de color blanco llamado látex, que se encuentra en plantas productoras de caucho, o también de forma sintética se caracteriza por su elasticidad, repele el agua también presenta resistencia eléctrica, dependiendo de su fórmula de elaboración original, se definen las diferentes capacidades en su versión de llanta, debido a ello, en el pasado se han dado diferencias en los estudios del concreto creado a partir de las llantas de desecho.

### *2.2.4 Agregados*

Contreras (2018,) los agregados finos y gruesos ocupan comúnmente de 60% a 75% del volumen del concreto (70% a 85% en peso), e influyen notablemente en las propiedades del concreto recién mezclados y endurecidos, en las proporciones de la mezcla y la economía.

### *2.2.5 Agua*

Contreras (2018) el agua es un componente esencial en las mezclas de concreto, dado a que esta permite que el cemento desarrolle su capacidad ligante la NTC 3459 habla sobre la calidad del agua en el concreto.

### *2.2.5 Cemento*

Marvin Gutiérrez (2024) también denominado como cemento tipo 1-RTCR, y que cumple con las especificaciones físicas de la norma (ASTM C150 para el cemento tipo 1) cemento hidráulico producido al pulverizar Clinker y una o más formas de sulfato de calcio como adición de molienda.

### *2.2.6 Concreto Hidráulico*

Marvin Gutiérrez (2024) material artificial de naturaleza inorgánica y mineral, que finamente molido y convenientemente amasado con agua forma una pasta que fragua y endurece a causa de las reacciones de hidrólisis e hidratación de sus constituyentes, dando lugar a productos hidratados mecánicamente resistentes y estables, tanto al aire como bajo agua.

## 2.3 Marco legal

Para el correcto uso de los materiales utilizados en las obras y el cumplimiento con la calidad especificada, deben realizarse los ensayos correspondientes sobre muestras representativas de los materiales de construcción, para lo tanto se deben cumplir con las Normas ASTM y las Normas Técnicas nacionales mencionadas por las Municipalidades locales encargados de dictar las pautas en lo referente a la construcción de cunetas.

### *2.3.1 Reglamento sobre la Protección, Uso y Mantenimiento de Parques y Espacios Públicos de Competencia.*

Artículo 4º-Deberes de la municipalidad: La Municipalidad procurará el mantenimiento adecuado de los parques y demás espacios públicos, mediante la realización de las obras y labores de mantenimiento necesarias, que garanticen su mejor y más adecuado uso.

### *2.3.2 Ley 833, Ley de Construcciones.*

Artículo 49,- Materiales Nuevos, Los materiales de construcción que se vayan a emplear por primera vez en la República, deberán tener la aprobación previa del Colegio de Ingenieros y arquitectos, el que la concederá o no en vista del análisis y pruebas que se hagan por cuenta del interesado en el laboratorio que designe el Colegio.

### *2,3,3 Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR-2020.*

La Sección 601,) Estructuras menores de concreto Hidráulico, nos define las propiedades mínimas del concreto para la construcción de cunetas.

***Tabla 2: Composición del concreto para estructuras menores***

| **Clase X-2** | |
|---|---|
| Contenido de cemento | 362 kg/$m^3$ (aproximadamente 7 sacos de 50 kg) |
| Relación agua/ cemento | 0,49 máximo |
| Asentamiento | 125mm máximo |
| Contenido de aire | 4% mínimo |
| Tamaño de agregado grueso | ASTM C33: con 100% pasando la malla 37,5mm para un tamaño máximo nominal de 25mm |
| Esfuerzo a la compresión a los 28 días | 25MPa mínimo |
| Esfuerzo a la compresión promedio de diseño a los 28 días | Utilizar criterio de la tabla 552-03 Resistencia a compresión promedio de diseño requerida |

***Fuente: CR-2020***

Sección 608. Construcción, preparación de zanjas y revestimiento de canales, cunetas y contracunetas

608,01 Descripción, esta Sección se refiere a la ejecución de obras que tienen como objetivo interceptar aguas superficiales que escurren por los terrenos adyacentes a la vía, alejándolas del pie de los terraplenes y pedraplenes o del coronamiento de los cortes u otras áreas que puedan sufrir daños por efecto del escurrimiento de aguas pluviales descontroladas., CR (2020)

### *2.3.4 Código sísmico de Costa Rica CSCR-2010,*

Apartado 8 Requisitos para Concreto Estructural

8.1.2 Resistencia de los materiales.

Concreto: La resistencia mínima especificada del concreto en compresión debe ser 210 kg/cm$^2$ y la resistencia máxima especificada para elementos de concreto liviano debe ser 280 kg/cm$^2$, Código Sísmico de Costa Rica [CSCR] (2010)

## 2,4 Desarrollo de los ensayos de laboratorio a realizar

En esta sección, se explican las teorías metodológicas que respaldan el análisis de una opción interactiva para demostrar en laboratorio, siguiendo las normas ASTM, en el siguiente orden.

### 2,4,1 Muestreo de materiales ASTM D-75,

Comisión Guatemalteca de Normas Ministerio de Economía [Coguanor] (2017) el muestreo es tan importante como el ensayo y la persona que toma la muestra debe aplicar toda precaución para obtener muestras representativas que exhiban la naturaleza y condición de los materiales que representan.

Las muestras para ensayos de investigación preliminar son adquiridas por la parte responsable para desarrollo de la cantera potencial, las muestras de los materiales para control de la producción en la cantera o control del trabajo en el sitio de uso, son adquiridas por el fabricante, contratista u otra parte responsable para realizar el trabajo, las muestras para ensayos a ser usadas en decisiones de aceptación o rechazo por el comprador son adquiridas por el comprador o su representante autorizado.

Donde sea posible, las muestras a ser ensayadas para control de calidad deben obtenerse del producto terminado las muestras del producto terminado a ser ensayadas para pérdida por abrasión, no deben someterse a trituración o reducción manual en el tamaño de partículas en la preparación

para el ensayo de abrasión, a menos que el tamaño del producto terminado sea tal que requiera de una subsiguiente reducción para propósitos de ensayo.

El material debe inspeccionarse visualmente para determinar variaciones apreciables, Si se observan variaciones apreciables, se tomarán medidas correctivas para establecer la homogeneidad en el material antes del muestreo, si es necesario indicar el grado de variabilidad existente dentro de la pila principal, se tomarán muestras separadas de áreas separadas de la pila, El productor deberá proporcionar el equipo apropiado que se necesita para una inspección y muestreo adecuados.

Procedimiento:

Seleccione las unidades de producción a ser muestreadas por un método aleatorio, tal como lo indica la práctica ASTM D 3665, obtenga al menos tres porciones aproximadamente iguales, seleccionadas aleatoriamente de la unidad muestreada, y combínelas para formar una sola muestra de campo cuya masa sea igual o exceda el mínimo.

Tome cada porción de la sección transversal completa del chorro de material que está siendo descargado, usualmente es necesario tener un recipiente construido para uso de cada planta en particular, este dispositivo consiste en una bandeja de tamaño suficiente como para interceptar la sección transversal completa del chorro de la descarga y retener la cantidad requerida de material, sin desbordamiento, puede ser necesario tener un juego de rieles para soportar la bandeja cuando esta pasa bajo el chorro de descarga, en la medida de lo posible, mantenga los contenedores continuamente llenos o casi llenos para disminuir  la segregación.

### *2.4.2 Método para la reducción de muestras de agregados AASHTO R76, Norma de referencia ASTM C702*

Instituto Nacional de Vías [INVIAS] (2012) en la presente norma se describen tres procedimientos para la reducción de muestras de agregado voluminosas a un tamaño ideal para la realización de los ensayos que se requieren, en los cuales se aplican técnicas que intentan reducir las variaciones en las características que han sido medidas entre las muestras adquiridas de la muestra principal de gran volumen,

Selección del método:

INVIAS (2012) las muestras más secas que las que están en condición saturada y superficialmente secas de agregado fino, deberán de reducirse por medio de un cuarteador mecánico.

Como opción adicional, si la muestra húmeda es de proporción mayor, se puede hacer un cuarteo preliminar usando un cuarteador mecánico que cuente con un canal que tenga aberturas anchas de 38 mm (1 ½") o más, con el fin de reducir la muestra a no menos de 5 kg (10 lb).

Es posible disminuir el tamaño de las muestras que contienen humedad libre en las superficies de las partículas mediante el proceso de cuarteo.

Agregados gruesos y mezclas de agregados finos y gruesos se pueden reducir mediante el cuarteo.

Procedimiento: en el cuarteador mecánico, la muestra original se coloca en la canaleta alimentadora, distribuyéndola de manera uniforme de lado a lado, de esta manera, cuando es agregadas por los ductos, cantidades aproximadamente iguales pasan a través de cada uno.

La velocidad a la que se debe introducir la muestra debe permitir su libre descenso por los ductos hacia los recipientes inferiores, luego, se reintroduce en el cuarteador la porción de la muestra que está en uno de los recipientes inferiores, repitiendo el proceso cuantas veces sea necesario para reducir la muestra al tamaño que se requiere para la prueba.

La porción del material recolectado en el otro recipiente inferior se puede conservar y reducir para utilizar en pruebas futuras.

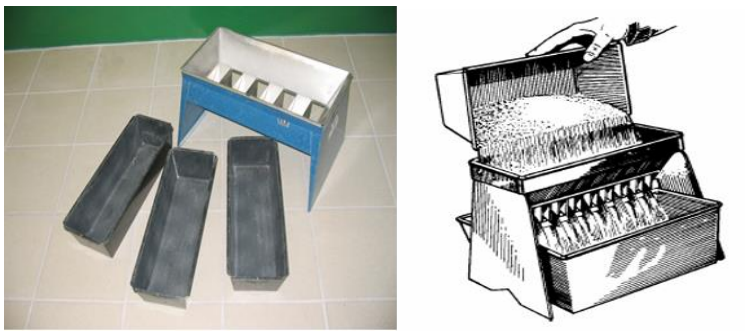


***Figura 3: Reducción de muestras con cuarteo.***
***Fuente: LANAMME UCR ensayos de laboratorio, (s.f.)***

Cuarteo manual: para este procedimiento se debe tener el equipo adecuado, el cual incluye una pala de borde recto, una pala común, un palustre, una escoba o cepillo, y una pieza de lona de aproximadamente 2 × 2,5 metros (6 × 8 pies).

La muestra original se debe situar sobre una superficie dura, limpia y nivelada para evitar pérdida de material o incorporación accidental de otros elementos, Se procede a mezclar el material completo, volteándolo tres veces en su totalidad, en la última vuelta, forma una pila cónica depositando cada palada encima de la anterior, aplane cuidadosamente la pila cónica para lograr un espesor y un diámetro uniformes, presionando su vértice con una pala, el objetivo es que cada

cuarto de la pila resultante contenga el material original, este diámetro deberá ser aproximadamente de cuatro a ocho veces su espesor.

Luego, divide la muestra aplanada en cuatro cuartos iguales utilizando una pala o un palustre, se retiran dos cuartos diagonalmente opuestos, incluyendo todo el material fino, por siguiente se barren completamente los espacios resultantes, repite esta operación hasta que la muestra quede reducida al tamaño deseado para la prueba requerida.

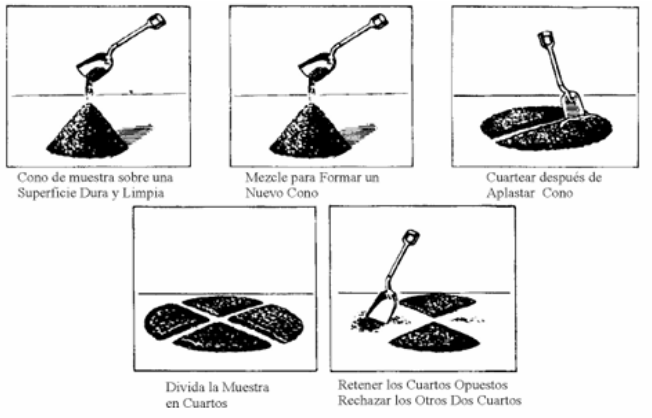



***Figura 4: Reducción de Muestras por cuarteo manual.***
***Fuente: Lanamme UCR ensayos de laboratorio, (s.f.)***

### *2.4.3 Método de ensayo para el análisis granulométrico en tamices y determinación por lavado del material pasando el tamiz de 0,075 mm (no 200) en agregado fino y grueso INTE C46 – INTE C49.*

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales [Lanamme] (s.f.) este ensayo permite la determinación por lavado de la cantidad de material más fino que la malla de 0,075 mm (No,200) en agregados, las partículas de arcilla y otras partículas de agregados que se dispersan por el agua de lavado y los materiales solubles en agua, se remueven de los agregados durante el ensayo.

El material más fino que la malla de 0,075 mm (No,200) puede ser separado de partículas mayores de manera mucho más eficiente y completamente por tamizado en húmedo que por tamizado en seco, por siguiente, cuando se desee una determinación exacta del material más fino que 0,075 mm en agregados finos o gruesos, se utiliza este método de ensayo sobre el espécimen antes del tamizado en seco (análisis granulométrico).

Los resultados de este método de ensayo pueden ser incluidos en los cálculos del análisis granulométrico, de manera que la cantidad total de material más fino que 0,075 mm por lavado, más el obtenido por tamizado en seco del mismo espécimen, se reporten como un resultado de la prueba de granulometría.

LANAMME (s.f.) un espécimen de agregado seco es lavado en un recipiente por medio de agitación manual, utilizando agua corriente o agua que contenga un agente humectante disuelto (si es necesario o cuando se especifique) el agua del lavado (que contiene material suspendido y disuelto) es decantada y se pasa a través de la malla de 0,075 mm (No,200), hasta que el agua que pasa por la malla sea clara o lo más cercano a transparente.

La pérdida en masa que resulta del tratamiento de lavado se calcula como un porcentaje de masa del espécimen original y se reporta como el porcentaje de material más fino que la malla de 0,075 mm (No.200) por lavado.

***Tabla 3: Granulometría del caucho triturado***

| Ensayo | Análisis Granulométrico |
|---|---|
| Tipo de Material | Caucho triturado |
| Mallas | Resultados |
| 25,4mm (1 plg) | 100 |
| 19,2mm (3/4 plg) | 100 |
| 12,7mm (1/2 plg) | 44 |
| 9,5mm (3/8 plg) | 19 |
| 4,75mm (4 plg) | 11 |
| 2,36mm (8 plg) | 9 |
| 1,18mm (16 plg) | 9 |
| 0,600mm (30 plg) | 9 |
| 0,300mm (50 plg) | 9 |
| 0,150mm (100 plg) | 9 |
| 0,075mm (200 plg) | 8,8 |

**Fuente: María Paula Barquero Delgado, Luis Felipe Rodríguez Solís (2024)**

### *2.4.4 Método de ensayo para la determinación de partículas planas, partículas elongadas o partículas planas y elongadas en agregados gruesos, ASTM D 4791.*

Coguanor (s,f,) En este método de ensayo se abarca la determinación de los porcentajes de partículas planas, partículas alargadas o de partículas planas y alargadas.

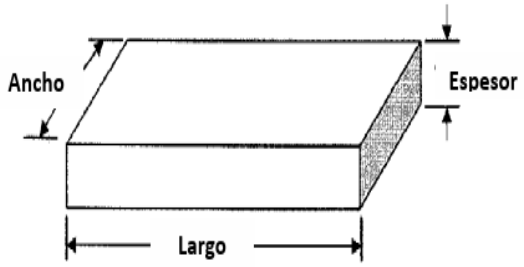



***Figura 5: Dimensiones de la partícula.***

**Fuente: Coguanor (s.f.)**

La configuración de las partículas en el agregado grueso afecta las propiedades de ciertos materiales de construcción y puede influir en su colocación y compactación, este procedimiento de análisis ofrece una manera de verificar si se cumplen las especificaciones que restringen dichas partículas o para evaluar las características relacionadas con la forma de los agregados gruesos.

El equipo utilizado debe ser ideal para realizar los ensayos de partículas de agregados con el fin de verificar su cumplimiento con las definiciones que se dan en la tabla 4 a las relaciones de las dimensiones deseadas.

Equipo: se requiere un dispositivo de calibración proporcional el cual consiste en una placa de base con dos pines fijos y un brazo que oscila montado entre ellos de manera que las aberturas entre los extremos de cada brazo mantengan relación constante, el eje en su posición puede ser ajustado de manera que provea relación entre las dimensiones de abertura.

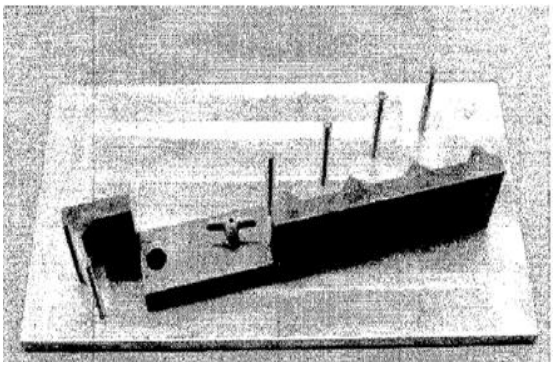


***Figura 6: Dispositivo de calibracion proporcional***

***Fuente: Coguanor (s.f.)***

***Tabla 4: Equivalencias métricas***

| **Equivalencias métricas** | | | |
|---|---|---|---|
| **Tamaño máximo nominal de abertura cuadrada** | | **Mínima masa de la muestra de ensayo** | |
| **(mm)** | **(Pulg)** | **kg** | **lb** |
| 9,5 | 3/8 | 1 | 2 |
| 12,5 | 1/2 | 2 | 4 |
| 19 | 3/4 | 5 | 11 |
| 25 | 1 | 10 | 22 |
| 37,5 | (1 ½) | 15 | 33 |
| 50 | 2 | 20 | 44 |
| 63 | (2½) | 35 | 77 |
| 75 | 3 | 60 | 130 |
| 90 | (3½) | 100 | 220 |
| 100 | 4 | 150 | 330 |
| 112 | (4½) | 200 | 440 |
| 125 | 5 | 300 | 660 |
| 150 | 6 | 500 | 1100 |

Fuente: LANAMME (s.f.)

***2,4,5 Método de gravedad específica y absorción de agregado fino Norma de referencia ASTM C128.***

LANAMME (s.f.) este análisis posibilita calcular la densidad promedio de un conjunto de partículas de agregado grueso (sin considerar el volumen del espacio vacío entre las partículas), así como la gravedad específica (densidad relativa) y la capacidad de absorción del agregado grueso según el procedimiento utilizado se obtiene la densidad seca al horno (Dbs), densidad saturada superficie seca (Dbss) y densidad aparente (Ds), en $kg/m^3$.

Así mismo, la cualidad adimensional gravedad específica (densidad relativa), se expresa como gravedad específica seca al horno (Gbs).

La gravedad específica (densidad relativa) es comúnmente la característica utilizada para el cálculo del volumen ocupado por el agregado en mezclas que contienen agregados, como lo es el concreto de cemento portland, concretos bituminosos entre otras mezclas que son proporcionadas o examinadas con base en un volumen absoluto, Los datos obtenidos de absorción se utilizarán para calcular el cambio en la masa de un agregado debido al agua absorbida en el espacio de los poros dentro de las partículas que lo constituyen, comparada con la condición seca.

Equipo requerido para el ensayo Universidad Centroamericana José Simeón Cañas en el Salvador [UCA] (s.f.)

- Balanza o báscula con una capacidad de 1 kg o más, sensitividad a 0,1 g o menos y precisión de 0,1% de la carga de ensayo en algún punto con el rango de uso para este método de ensayo, Dentro de un rango de 100g de la carga de ensayo, una diferencia de lecturas será precisa con 0,1g.

- Picnómetro (para usar con el procedimiento gravimétrico), un frasco u otro recipiente compatible en el cual la muestra de ensayo de agregado fino puede ser fácilmente introducida y en el cual el volumen contenido puede ser reproducido con 0,1 cm3, El volumen del recipiente lleno a la marca será al menos 50% mayor que el espacio requerido para acomodar la muestra de ensayo.
- Frasco (para usar con el procedimiento volumétrico), un frasco Le Chatelier es satisfactorio para una muestra de ensayo de aproximadamente 55 g.
- Molde y pisón para ensayo de humedad superficial, el molde deberá ser metálico, con la forma de un cono truncado, con las dimensiones siguientes: 40 3 mm de diámetro interno en el borde superior, 90 3 mm de diámetro interno en la base y 75 3 mm de altura, con un espesor mínimo del metal de 0,8 mm, El pisón deberá ser metálico con una masa de 340 15 g y una cara plana y circular de 25 3 mm de diámetro.
- Horno de convección.
- Cuchara de albañilería.
- Cucharón o cuchara grande.
- Espátula.
- Malla N°4.
- Bandeja metálica mediana.

Para el procedimiento se realiza lo siguiente según menciona LANAMME (s.f.) Un espécimen de agregado se sumerge en agua por 24 más 4 horas para esencialmente llenarlos poros, Luego se retira del agua, se seca el agua de la superficie de las partículas (por medio de aire o por calor en una plantilla) y se determina la masa, Subsecuentemente el espécimen (o una porción de

éste) se coloca en un recipiente graduado para determinar su volumen por el método gravimétrico, Finalmente, el espécimen se seca al horno y se determina su masa, utilizando los valores de masa así obtenidos y las fórmulas de este método, es posible calcular la densidad, la gravedad específica (densidad relativa) y la absorción.

### *2.4.5 Método de gravedad específica y absorción de agregado grueso AASHTO T85 Norma de referencia ASTM C127*

LANAMME (s.f.) Este ensayo permite la determinación de la densidad promedio de una cantidad de partículas de agregado grueso (sin incluir el volumen de los vacíos entre las partículas), la gravedad específica (densidad relativa) y la absorción del agregado grueso.

De igual modo, la cualidad adimensional gravedad específica (densidad relativa), se expresa como gravedad específica seca al horno (Gbs), gravedad específica saturada-superficie-seca (Gbss) y gravedad específica aparente (Gs), La densidad seca al horno (Dbs) y la gravedad específica seca al horno (Gbs) se determinan con el agregado en condición seca, La densidad (Dbss), la gravedad específica (Gbss) y la absorción se determinan luego de remojar en agua el agregado por una duración preestablecida.

Equipo a utilizar para realizar el procedimiento según UCA (s.f.)

- Balanza, para determinar la masa, que sea sensitiva, legible y precisa a 0,05% de la masa de la muestra en algún punto del rango usado para este ensayo, o 0,5 g, el que sea mayor, La balanza deberá estar equipada con aparatos adecuados para suspender la muestra contenida en agua, desde el centro de la plataforma de la balanza.
- Contenedor de muestra, una cesta de alambre de 3,35 mm (Nº 6) o malla fina, o una cesta de abertura y altura iguales, con una capacidad de 4 a 7 litros para alojar un tamaño nominal

máximo de agregado de 37,5 mm (1 ½") o menor y una canastilla más grande según se necesite, para ensayar mayores tamaños máximos de agregado, la canastilla será construida de tal forma que se evite atrapar aire cuando sea sumergida.

- Tanque de agua, en el cual la canastilla es colocada suspendida debajo de la balanza.
- Tamices o mallas, una malla de 4,75 mm (Nº 4).
- Horno de convección.
- Cuchara de albañilería.
- Cucharón.
- Brocha.
- Bandejas metálicas.
- Franela o cualquier tela absorbente.

Para el procedimiento, LANNAME (s.f.) un espécimen de agregado se sumerge en agua por 24 horas más menos 4 horas con el fin de llenar los poros, cuando se remueve, se seca el agua de la superficie de las partículas y se determina su masa, subsecuentemente, se determina el volumen del espécimen por el método de desplazamiento de agua, finalmente el espécimen se seca al horno y se determina su masa.

Con los valores de masa obtenidos y las fórmulas brindadas en la norma, es posible calcular la densidad, la gravedad específica y la absorción.

### *2.3.6 Método de ensayo para determinar la densidad masiva (peso unitario) y los vacíos en agregado Norma de referencia ASTM C29/ C29M.*

LANAMME (s.f.) Este ensayo abarca la determinación del peso unitario ("densidad masiva") del agregado en una condición compactada o suelta, y el cálculo de los vacíos en agregados finos, gruesos o una mezcla de ambos, basándose en una misma determinación, este procedimiento es aplicable a agregados que no excedan un tamaño máximo nominal de37,5 mm (1 1/2 pulg).

Este procedimiento es frecuentemente utilizado para determinar los valores de peso unitario que son necesarios para utilizarse en muchos métodos de selección de las proporciones para mezclas de concreto.

El peso unitario también puede ser utilizado para determinar las relaciones masa/volumen necesarias para hacer las conversiones en acuerdos de contrato, se incluye un procedimiento para el cálculo del porcentaje de vacíos entre las partículas de agregado basándose en el peso unitario determinado por este método de ensayo.

Procedimiento:

Para lograr el peso unitario envarillado de una muestra de agregado fino o grueso en condición seca, ésta se coloca en tres capas aproximadamente iguales dentro de las medidas volumétricas calibradas, compactando cada capa veinticinco veces con la varilla de apisonado, para el caso del peso unitario suelto, la muestra se coloca en la medida dejándola caer desde una cuchara o pala una altura que no exceda 50 mm arriba del borde superior de la medida.

Luego de emparejar la parte alta de la medida, se determina la masa (para cualquiera de los dos procedimientos).

Usando las masas obtenidas y las fórmulas especificadas en la norma, es posible calcular los dos tipos de peso unitario y el porcentaje de vacíos entre las partículas del agregado.

### *2.4.7 Determinación en laboratorio del contenido de humedad de suelos AASHTO T 265.*

LANAMME (s.f.) este método de ensayo cubre la determinación en laboratorio del contenido de humedad por masa de suelo, roca, y materiales similares donde la diminución en masa por secado se debe a la pérdida de agua.

Equipo requerido para el ensayo, Universidad La gran Colombia (2016).

- Balanza: Debe tener una exactitud mínima de 0,01g  y/o 0,1% de la masa de ensayo.
- Horno: debe permitir una temperatura uniforme, de 110ºC +- 5ºC.
- Recipiente para las muestras, preferiblemente metálico que soporte cambios de temperatura.
- Espátula.
- Cucharones.

Muestra: se debe mantener las muestras de manera que no queden expuestas a luz solar, la determinación del contenido de agua se deberá hacer lo más pronto del muestreo para evitar la pérdida de humedad por el paso del tiempo, la masa de la muestra se deberá tomar la indicada en algún otro ensayo que requiera determinar el contenido de humedad.

Procedimiento: se determina la masa de un recipiente seco y limpio, se coloca la muestra dentro del recipiente previamente pesado.

Se determina la masa del recipiente con la muestra, se introduce el recipiente con la muestra en el horno que debe estar a una temperatura constante de 110ºC más menos 5ºC, salvo que se especifique otra temperatura debido al contenido de material como cementos, yesos u materias

orgánicas, se debe dejar la muestra dentro del horno hasta que este alcance una masa constante, en la mayoría de los casos esto se alcanza entre las 12 a 16 horas de introducir la muestra, en casos que se tenga dudas del secado de la muestra se podrá verificar por medio de una tira de papel que se pondrá inmediatamente se saque la muestra de horno, sobre la muestra y si la tira tiende a enrollarse la muestra aún no está completamente seca, otra forma será tomando pesos en intervalos de tiempo y verificando que la muestra no pierda más masa durante estos lapsos de tiempo.

Terminado el secado se dispondrá las muestras a enfriamiento, ya sea por medio de un desecador o colocándole una tapa para evitar que la muestra pueda absorber humedad del ambiente.

Enfriada la muestra se pesará en una balanza la muestra seca en el recipiente, este procedimiento se realizará para tres muestras del mismo suelo con el fin de determinar un promedio del contenido de humedad en el suelo.

### *2,4,8 Método de ensayo para la medición de temperatura del concreto recién mezclado con cemento hidráulico ASTM C-1064 (ANEXO 1,)*

Coguanor (s.f.) Este método de ensayo permite medir la temperatura de mezclas de concreto recién mezclado, la temperatura medida representa la temperatura al tiempo del ensayo y puede no ser indicativa de la temperatura del concreto recién mezclado a un tiempo posterior, puede ser usado para verificar que el concreto satisfaga un requisito específico de temperatura.

Procedimiento: colocar el dispositivo medidor de temperatura, de modo que el sensor de temperatura esté sumergido al menos 75 mm (3 pulg) en el concreto recién mezclado, presionar suavemente la superficie del concreto alrededor del dispositivo medidor de temperatura, para

cerrar los vacíos provocados por la inmersión y para que la temperatura del aire circundante no afecte la medición.

Dejar el dispositivo medidor de temperatura en la mezcla de concreto recién mezclado por un período mínimo de dos minutos, pero no más de cinco minutos, entonces leer y registrar la misma, con una aproximación de 0,5°C (1°F) no retirar del concreto el dispositivo, cuando haga la lectura.



***Figura 7: Medición de temperatura al 1%, 5% y 10% del concreto con el agregado de caucho. Fuente: María Paula Barquero Delgado, Luis Felipe Rodríguez Solís (2024)***

### *2.4.9 Método de ensayo para el asentamiento en el concreto del cemento hidráulico INTE C41 (ANEXO 2)*

Instituto Ecuatoriano de Normalización (2010) esta norma establece el método de ensayo para determinar el asentamiento del hormigón de cemento hidráulico tanto en el laboratorio como en el campo.

Equipo: el espécimen para ensayo debe ser elaborado en un molde de metal que no sea fácilmente atacado por la pasta de cemento, el metal no debe tener un espesor menor a 1,5 mm y

si se forma por el proceso de rolado, no debe haber ningún punto en el molde en el que el espesor sea inferior a 1,15 mm, el molde debe tener la forma de un cono truncado, con diámetros internos de 200 mm en la base, 100 mm en la parte superior y altura de 300 mm, los diámetros y alturas individuales deben tener una tolerancia de más menos 3 mm de las dimensiones especificadas, la base y la parte superior del cono deben ser abiertas, paralelas entre sí y perpendiculares al eje longitudinal del cono, el molde debe estar provisto de dos estribos para apoyar los pies y manijas el interior debe estar relativamente liso y libre de imperfecciones, abolladuras, deformaciones o de mortero adherido.

Varilla de compactación: debe ser una varilla recta, lisa, de acero, de 16 mm de diámetro y aproximadamente 600 mm de longitud, teniendo el extremo de compactación o los dos extremos redondeados con punta semiesférica, cuyo diámetro es de 16 mm.

Instrumento de medida: puede utilizarse una regla, cinta de medir enrollada de metal o un instrumento similar de medición rígido o semirrígido, marcado en incrementos de 5 mm o menos, la longitud del instrumento debe ser de al menos 300 mm.

Cucharón: de un tamaño lo suficientemente grande para que cada cantidad de hormigón obtenida del recipiente de muestreo sea representativa y lo suficientemente pequeño como para que no se derrame durante la colocación en el molde.

Procedimiento: humedecer el molde y colocarlo sobre una superficie plana, rígida, húmeda y no absorbente, el operador debe sostener firmemente el molde en su lugar durante el llenado y la limpieza del perímetro, parándose sobre los dos estribos o fijándolo a la placa base, inmediatamente después de obtener la muestra de hormigón, llenar el molde en tres capas, cada una de aproximadamente un tercio del volumen del molde, colocar el hormigón en el molde

utilizando el cucharón, mover el cucharón siguiendo el perímetro de la abertura del molde para asegurar una distribución uniforme del hormigón con una mínima segregación.

Compactar cada capa con veinticinco golpes utilizando la varilla de compactación distribuir de manera uniforme los golpes sobre la sección transversal de cada capa, para la capa inferior, es necesario inclinar la varilla ligeramente y dar aproximadamente la mitad de los golpes cerca del perímetro y luego continuar con golpes verticales en espiral hacia el centro, compactar la capa inferior en toda su profundidad, compactar la segunda capa y la capa superior, cada una en toda su profundidad, de tal manera que los golpes apenas penetren en la capa anterior.

Al llenar la capa superior, mantener un excedente de hormigón sobre la parte superior del molde antes de empezar la compactación, si durante la operación de compactación, la superficie del hormigón queda por debajo del borde superior del molde, agregar más hormigón para mantener en todo momento un exceso de hormigón sobre la parte superior del molde, después de haber compactado la capa superior, enrasar la superficie del hormigón rodando la varilla de compactación sobre el borde superior del molde, continuar presionando el molde firmemente hacia abajo y retirar el hormigón del área que rodea la base del molde para evitar interferencias con el movimiento de asentamiento del hormigón, de inmediato retirar el molde del hormigón levantándolo cuidadosamente en dirección vertical, levantar el molde en su altura de 300 mm en 5s más menos 2s con un movimiento ascendente uniforme y sin movimientos laterales o de torsión, completar todo el ensayo desde el inicio del llenado hasta la remoción del molde sin interrupción dentro de un periodo de 2 ½ minutos.

Inmediatamente medir el asentamiento determinando la diferencia vertical entre la parte superior del molde y el centro original desplazado de la superficie superior del espécimen.



***Figura 8: Medición de asentamiento al 1%, 5% y 10% del concreto con el agregado de caucho,***

***Fuente: María Paula Barquero Delgado, Luis Felipe Rodríguez Solís (2024)***



***Figura 9: Moldeo,***

***Fuente: María Paula Barquero Delgado, Luis Felipe Rodríguez Solís (2024)***

### *2.4.10 Práctica normalizada para hacer y curar especímenes de concreto para ensayo en el laboratorio ASTM C192/C192M (ANEXO 3,),*

LANAMME (s.f.) esta práctica cubre la elaboración y el curado de especímenes de ensayo de concreto en el laboratorio, bajo el control de materiales y condiciones de ensayo, utilizando concretos que se pueden consolidar por envarillado o por vibración.

Esta práctica provee los requerimientos normalizados para la preparación de materiales, mezclas de concreto, elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayo bajo condiciones de laboratorio, si la preparación del espécimen se controla como se indica, la información desarrollada se puede utilizar para los siguientes propósitos:

- Proporcionarlas mezclas para concreto
- Evaluar las diferentes mezclas y materiales
- Correlación con ensayos no destructivos y
- Probar especímenes de concreto hechos y curados utilizando esta práctica se usan ampliamente,

Pueden ser la base para los ensayos de aceptación de concreto de proyectos, evaluación de investigaciones y otros estudios,

Con las muestras de agregados (arena y piedra), cemento y aditivos si aplica, se elaboran los especímenes que pueden ser cilíndricos o vigas, Los tamaños estándar de los cilindros son de 150 x 300 mm o de 100 x 200 mm, el tamaño estándar de la viga es de 150 x 150 x500 mm.



***Figura 10: Relleno de especímenes, envarillado y golpeteo con mazo***
***Fuente: María Paula Barquero Delgado, Luis Felipe Rodríguez Solís (2024)***

La elaboración de los especímenes consiste en preparar los materiales, dosificarlos según lo especificado, realizar la mezcla para producir el concreto, realizar las pruebas especificadas de control de calidad y luego elaborar los especímenes para pruebas de resistencia y curarlos.

Cuando se mezcla el concreto, se evalúa siempre el revenimiento y cuando se requiere, el contenido de aire, el rendimiento y la temperatura, la consolidación se realiza de acuerdo al tamaño del espécimen, en cada caso será consolidado por vibración o apisonado, la superficie del molde debe ser enrazada con una llaneta o una cuchara de albañilería, el curado se debe realizar manteniendo el espécimen en los moldes por un tiempo indicado sin que pierdan humedad en un rango de temperatura establecida, luego deben permanecer en una cámara húmeda hasta la falla.

Se debe aportar los agregados (piedra y arena), el cemento, si se requiere los aditivos e indicar el diseño de mezcla por peso, la cantidad de agregados tiene que ser suficiente para producir un volumen de concreto de 0,06 $m^3$ y realizar las pruebas de humedad de los agregados.

Se debe aportar los agregados (piedra y arena), el cemento, si se requiere los aditivos e indicar el diseño de mezcla por peso, la cantidad de agregados tiene que ser suficiente para producir un volumen de concreto de 0,06 $m^3$ y realizar las pruebas de humedad de los agregados.



***Figura 11: Especímenes en sus moldes para el curado final***
***Fuente: María Paula Barquero Delgado, Luis Felipe Rodríguez Solís (2024)***

Para el curado de especímenes los requerimientos son, Coguanor (s,f,) para evitar la evaporación de agua del concreto no endurecido, cubra los especímenes inmediatamente después del acabado, preferiblemente con una placa o lámina no reactiva, no absorbente, de plástico resistente, impermeable y durable, los especímenes deben ser almacenados inmediatamente después de ser acabados hasta que se retiren los moldes para prevenir pérdida de humedad de los especímenes.

Retire los especímenes de los moldes 24 más menos 8 h después de moldeados,




***Figura 12: Identificación de los especímenes manteniendo el agregado fino y adicionando caucho triturado***

***Fuente: María Paula Barquero Delgado, Luis Felipe Rodríguez Solís (2024)***

A menos que sea especificado de otra forma, todos los especímenes deben ser curados en húmedo a 73,5 más menos 3,5 °F [23,0 más menos 2,0 °C] desde el tiempo del moldeo hasta el momento que se realiza el ensayo.

El almacenamiento durante las primeras 48 h de curado debe ser en un ambiente libre de ciclos, como se aplica al tratamiento de los especímenes desmoldados, el curado húmedo significa que los especímenes de ensayo deben mantener agua libre sobre su superficie completa en todo momento, esta condición se cumple usando tanques de agua de almacenamiento o un cuarto con una humedad elevada.



***Figura 13: Curado de especímenes***

***Fuente: María Paula Barquero Delgado, Luis Felipe Rodríguez Solís (2024)***

# Capítulo 3: Análisis e interacción de resultados

## 3.1 Presentación de los resultados

### *3.1.1 Datos obtenidos del caucho*

Para este apartado el análisis e interacción de resultados se toman en cuenta los registros por medio de la recolección e información obtenida por fuentes bibliográficas y trabajo de laboratorio, adicional se adjuntan las cantidades de caucho utilizadas en los ensayos de laboratorio que fueron adicionadas al agregado fino, se pueden identificar en la Tabla 5.

***Tabla 5: Peso agregado fino y porcentajes a adicionar de caucho triturado***

| Para 4 especímenes con volumen de 0,024$m^3$ | | | |
|---|---|---|---|
| Agregado fino real | 12455kg | Equivalente a % de 1 llanta | Peso total promedio de una llanta 9kg |
| Caucho 1% | 0,0124 kg | 1,38% | |
| Caucho 5% | 0,0622 kg | 6,91% | |
| Caucho 10% | 1245 kg | 13,83% | |

***Fuente: Elaborado por: María Paula Barquero Delgado, Luis Felipe Rodríguez Solís (2024)***

En esta parte de la investigación para los ensayos de laboratorio, se logran modificar los especímenes, a estos se les adiciono caucho triturado sin alterar las dosificaciones de agregados del diseño original el cual tiene una capacidad de resistencia a la compresión de 210 $kg/cm^2$, la tabla 5 muestra las cantidades porcentuales que se usaron, el modelo de trabajo usado es en el que se adiciona 1%, 5% y 10% de caucho triturado, sin alterar los otros agregados.

***Tabla 6: Peso agregado fino y porcentajes a adicionar de caucho triturado***

| Para 4 especímenes con volumen de 0,024m$^3$ | | | |
|---|---|---|---|
| Agregado fino real | 12455kg | Equivalente a % de 1 llanta | Peso total promedio de una llanta 9kg |
| Caucho 1% | 0,0124 kg | 1,38% | |
| Caucho 5% | 0,0622 kg | 6,91% | |
| Caucho 10% | 1245 kg | 13,83% | |
| Nuevo peso del agregado fino adicionando caucho triturado, | | | |
| Caucho 1% + Fino | 12579 kg | 1,38% | |
| Caucho 5% + Fino | 13077kg | 6,91% | |
| Caucho 10% + Fino | 13700kg | 13,83% | |

***Fuente: Elaborado por: María Paula Barquero Delgado, Luis Felipe Rodríguez Solís (2024)***

El peso del caucho triturado reciclado se observa en la figura 14 con una granulometría de 12,7mm el cual se obtuvo a partir de la trituración de llantas ya previamente procesadas para evitar cualquier contaminación de residuos ajenos al caucho, el material se obtuvo ya triturado de la empresa Cementos Progreso Costa Rica S,A, ubicada en Patarrá de Desamparados, San José.



***Figura 14: Dosificaciones de caucho reciclado al 1%, 5% y 10%***

***Fuente: María Paula Barquero Delgado, Luis Felipe Rodríguez Solís (2024)***

### *3.1.2 Cifras de agregado Fino, Grueso, Cemento y Agua*

Para el agregado fino se utilizó arena de rio la cual se procedió a secar en un horno durante 15 horas con una temperatura promedio de 100°C, una vez finalizada la corrección de humedad y absorción el peso final obtenido es de 12,455 kg.

Para el agregado grueso se utilizó piedra cuarta y con el mismo procedimiento realizado para el agregado fino se procedió a secar dando como resultado un peso final de 12,889kg,

El cemento requerido equivale a un peso de 6,00 kg, como proporción real para el diseño de los especímenes.

La formulación del concreto hidráulico confeccionado se detalla en la tabla 7, con estos agregados se obtiene un volumen final de 0,024 $m^3$ con el que se fabricaron cuatro especímenes para las diferentes fallas a efectuar en los periodos de 7,14 y 28 días, el espécimen de referencia final obtenido se observa en la figura 15.

***Tabla 7: Datos para producción del espécimen de referencia,***

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **4** | **Número de moldes** | | | | | |
| **150 mm** | Diámetro del molde | | | | | |
| **300 mm** | Altura molde | Volumen Requerido ($m^3$) | 0,024 | | | |
| **15%** | Desperdicio | | | | | |
| **Volumen a mezclar** | 0,015 m3 | Corrección por humedad y absorción | | | | Proporción Real |
| **Material** | Por peso Kg | Humedad | | Absorción | | |
| **Cemento** | 6,00 | | | | | 6,00 |
| **Agua** | 3,504 | | -2,04 | | 0,9 | 2,364 |
| **Agregados Cuarta** | 12,418 | 3,80% | 0,471 g | 1,84% | -0,23 | 12,889 |
| **Agregado fino** | 10,887 | 14,40% | 1,568 kg | 6,16% | -0,67 | 12,455 |

***Fuente: Laboratorio OJM Ing. González (2023)***



***Figura 16: Espécimen no alterado***

***Fuente: María Paula Barquero Delgado, Luis Felipe Rodríguez Solís (2024)***

### *3.1.3 Análisis de las fallas obtenidas en el laboratorio*

Para este apartado se muestran las fallas en cada uno de los procesos de pérdida de plasticidad del concreto, conocido también como periodo de fraguado o endurecimiento, dichas fallas serán analizadas en el apartado de resultados, las figuras 16, 17, 18, 19, 20 y 21 detalladas a continuación muestran las pruebas a compresión realizadas en el laboratorio para determinar su resistencia tanto al espécimen de referencia como a los especímenes modificados con caucho triturado, cada imagen ilustra los resultados para las fallas a los 7, 14 y 28 días.



***Figura 17: Fallas realizadas a los especímenes de 1%, 5% y 10% a los 7 días***
***Fuente: María Paula Barquero Delgado, Luis Felipe Rodríguez Solís (2024)***



***Figura 18: Vista en Planta de los especímenes de 1%, 5% y 10% fallados a 7 días***
***Fuente: María Paula Barquero Delgado, Luis Felipe Rodríguez Solís (2024)***




***Figura 19: Fallas realizadas a los especímenes a los 14 días***

***Fuente: María Paula Barquero Delgado, Luis Felipe Rodríguez Solís (2024)***




***Figura 20: Fallas realizadas a los especímenes a los 28 días***

***Fuente: María Paula Barquero Delgado, Luis Felipe Rodríguez Solís (2024)***



***Figura 21: Vista en Planta y Perfil de los especímenes fallados, 28 días***
***Fuente: María Paula Barquero Delgado, Luis Felipe Rodríguez Solís (2024)***

INVE (s.f.) ninguna de las muestras ensayadas a compresión se debe separar de la perpendicularidad del eje en más de 0,5° (equivalentes a 3 mm en 300 mm (0,12” en 12”) aproximadamente).

Las muestras no se deben ensayar si cualquier diámetro individual de un cilindro difiere de cualquier otro diámetro del mismo cilindro en más de 2%.

El centro de la rótula debe coincidir con el de la superficie de la cara de carga dentro de una tolerancia de más menos 5% del radio de la rótula, el diámetro de la rótula debe ser, al menos, el 75% del diámetro de la muestra que se va a ensayar.

### 3.2 Análisis de resultados

En este apartado se muestran los valores obtenidos de los ensayos realizados en el laboratorio a los especímenes, el fin de este análisis es poder comparar los resultados con lo establecido por las normas de regulación y comprobar la implementación y aplicación para el uso en cunetas.

### *3.2.1 Espécimen de referencia o diseño modelo*

Se toma un diseño modelo el cual es la base de referencia para poder comparar las posibilidades de utilizar o descartar cualquier modificación de los agregados, ya que la dosificación con la cual está confeccionado cumple con las normas para una resistencia de *f´c* 210 kg/cm$^2$

Los resultados obtenidos se detallan en la tabla 7, los cuales son los valores de las fallas realizadas a los especímenes en los periodos de 7,14 y 28 días de modelados, se puede apreciar que las proyecciones de resistencia cumplen según lo requerido para esa dosificación.

***Tabla8: Resultados de Fallas de Laboratorio diseño modelo,***

| N° de muestra | Fecha Moldeo | Fecha Falla | Edad Días | Diámetro (mm) | | Área (mm$^2$) | Resistencia (kN) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Modelo | 17/2/2024 | 24/2/2024 | 7 | 101,1 | 101,2 | 8043,6 | 125,5 |
| | 17/2/2024 | 2/3/2024 | 14 | 100,2 | 100,3 | 7901,1 | 157,9 |
| | 17/2/2024 | 16/3/2024 | 28 | 100,7 | 100,8 | 7980,1 | 182,1 |
| | 17/2/2024 | 16/3/2024 | 28 | 101,3 | 101,3 | 8059,5 | 195,1 |

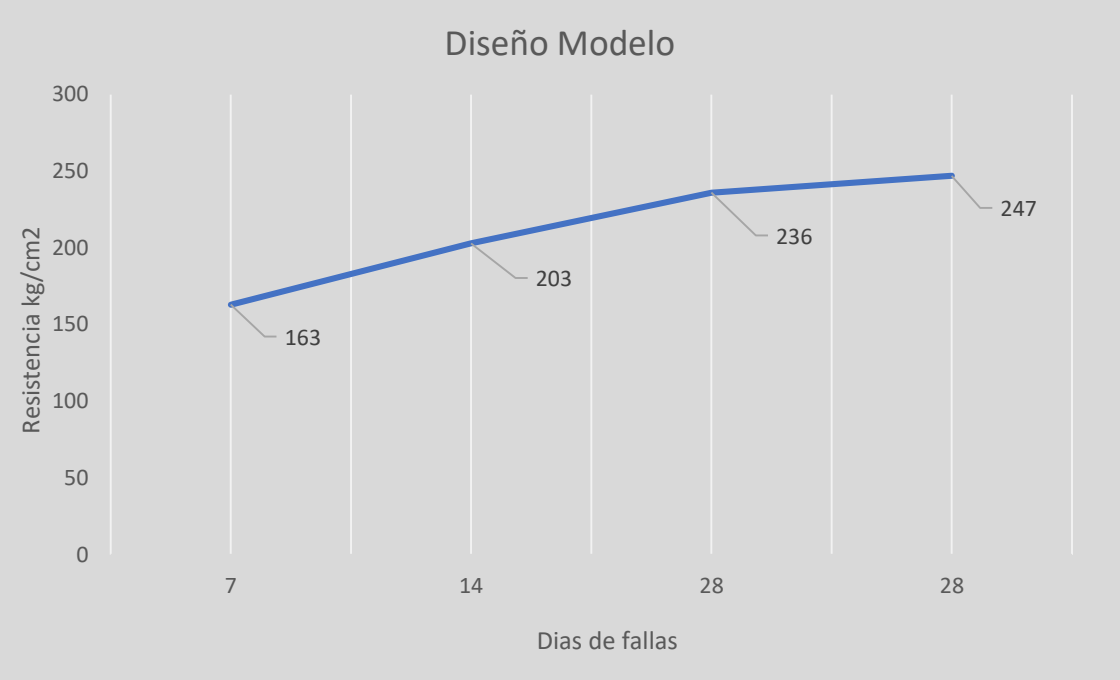
| Resistencia (kg) | Factor Proyección | Resistencia (kg/cm$^2$) | Resistencia (MPa) | Proyección (kg/cm$^2$) | Proyección (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|
| 12795 | 0,66 | 163 | 15,98 | 245 | 24,02 |
| 16105 | 0,82 | 203 | 19,9 | 248 | 24,31 |
| 18585 | 1,00 | 236 | 23,14 | 236 | 23,14 |
| 19905 | 1,00 | 247 | 24,22 | 247 | 24,22 |

***Fuente: Elaborado por: María Paula Barquero Delgado, Luis Felipe Rodríguez Solís (2024)***

Los resultados que se muestran en la tabla 7 evidencian que la resistencia máxima obtenida para el cilindro modelo es de 247 kg/cm$^2$, cumpliendo con lo que se indica en las normas la cual

es 210 kg/cm$^2$, este resultado se utilizará como modelo para comparar las resistencias obtenidas de las pruebas que se harán con las dosificaciones de 1% 5% y 10 para verificar si cumplen y poder avalar su uso, en el siguiente grafico se muestra su progreso de aumento de resistencia a lo largo de 7, 14 y 28 días.

***Gráfico 1: Diseño cilindro modelo***




***Fuente: Elaborado por: María Paula Barquero Delgado, Luis Felipe Rodríguez Solís (2024)***

### *3,2,2 Especímenes con dosificaciones al 1%, 5% y 10%*

El diseño de los especímenes se realizó adicionando caucho triturado reciclado en dosificaciones del 1%, 5%, y 10%, recalcar que el diseño original consta de un peso en finos de 12,455 kg para obtener un volumen de 0,024m$^3$ de concreto hidráulico, por tanto, se realizó la adición de manera porcentual en cada ensayo.

***Tabla9: Resultados de Fallas de Laboratorio diseños adicionando caucho triturado***

| N° de muestra | Fecha de moldeo | Fecha de falla | Edad días | Diámetro (mm) | | Área (mm2) | Resistencia (kN) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1% | 17/2/2024 | 24/2/2024 | 7 | 102,1 | 102,7 | 8235,5 | 210,9 |
| | 17/2/2024 | 2/3/2024 | 14 | 102,3 | 102,2 | 8211,4 | 216,0 |
| | 17/2/2024 | 16/3/2024 | 28 | 102,3 | 102,4 | 8227,5 | 241,5 |
| | 17/2/2024 | 16/3/2024 | 28 | 102,4 | 102,3 | 8225,5 | 251,3 |

| Resistencia kg | Factor proyección | Resistencia kg / cm2 | Resistencia Mpa | Proyección Mpa | Proyección kg /cm2 |
|---|---|---|---|---|---|
| 21506 | 0,42 | 261 | 25,6 | 61,0 | 622 |
| 22026 | 0,66 | 268 | 26,3 | 39,9 | 406 |
| 24626 | 1,00 | 299 | 29,4 | 29,4 | 299 |
| 25625 | 1,00 | 311 | 30,5 | 30,5 | 311 |

| N° de muestra | Fecha de moldeo | Fecha de falla | Edad días | Diámetro (mm) | | Área (mm2) | Resistencia (kN) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5% | 17/2/2024 | 24/2/2024 | 7 | 102,0 | 102,3 | 8195,3 | 61,9 |
| | 17/2/2024 | 2/3/2024 | 14 | 102,3 | 102,4 | 8227,5 | 85,0 |
| | 17/2/2024 | 16/3/2024 | 28 | 102,4 | 102,2 | 8219,4 | 164,1 |
| | 17/2/2024 | 16/3/2024 | 28 | 102,2 | 102,3 | 8211,4 | 139,3 |

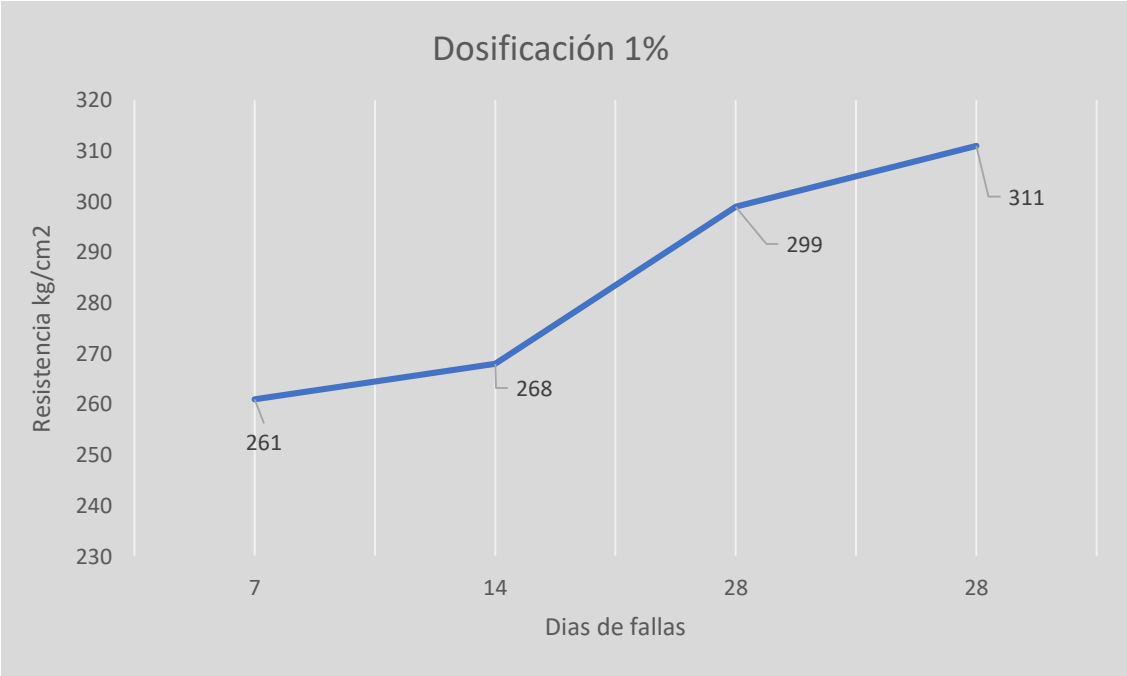
| Resistencia kg | Factor proyección | Resistencia kg / cm2 | Resistencia Mpa | Proyección Mpa | Proyección kg /cm2 |
|---|---|---|---|---|---|
| 6312 | 0,42 | 77 | 7,6 | 18,0 | 183 |
| 8668 | 0,66 | 105 | 10,3 | 15,7 | 160 |
| 16734 | 1,00 | 204 | 20,0 | 20,0 | 204 |
| 14205 | 1,00 | 173 | 17,0 | 17,0 | 173 |

| N° de muestra | Fecha de moldeo | Fecha de falla | Edad días | Diámetro (mm) | | Área (mm2) | Resistencia (kN) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10% | 17/2/2024 | 24/2/2024 | 7 | 101,9 | 101,8 | 8147,3 | 98,6 |
| | 17/2/2024 | 2/3/2024 | 14 | 101,3 | 101,2 | 8051,6 | 109,0 |
| | 17/2/2024 | 16/3/2024 | 28 | 101,4 | 101,2 | 8059,5 | 135,5 |
| | 17/2/2024 | 16/3/2024 | 28 | 101,2 | 101,3 | 8051,6 | 140,5 |

| Resistencia kg | Factor proyección | Resistencia kg / cm2 | Resistencia Mpa | Proyección Mpa | Proyección kg /cm2 |
|---|---|---|---|---|---|
| 10054 | 0,42 | 123 | 12,1 | 28,8 | 294 |
| 11115 | 0,66 | 138 | 13,5 | 20,5 | 209 |
| 13817 | 1,00 | 171 | 16,8 | 16,8 | 171 |
| 14327 | 1,00 | 178 | 17,5 | 17,5 | 178 |

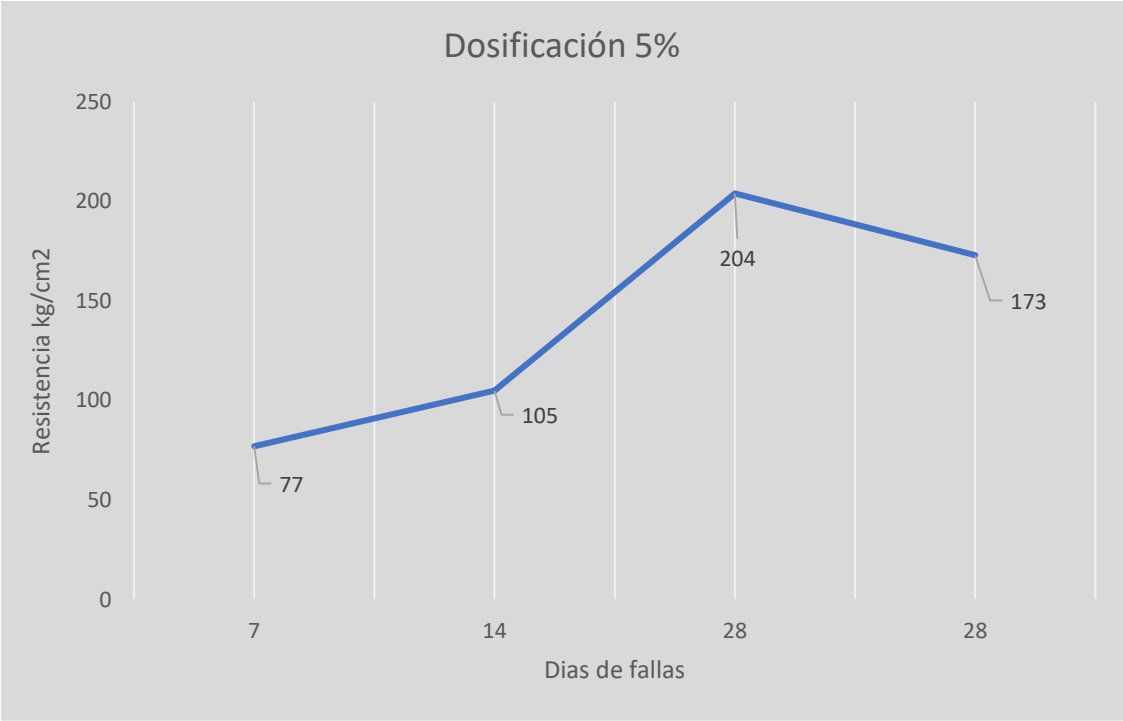
***Fuente: Elaborado por: María Paula Barquero Delgado, Luis Felipe Rodríguez Solís (2024)***

***Gráfico 2: Diseño de espécimen 1% de caucho triturado adicionado.***



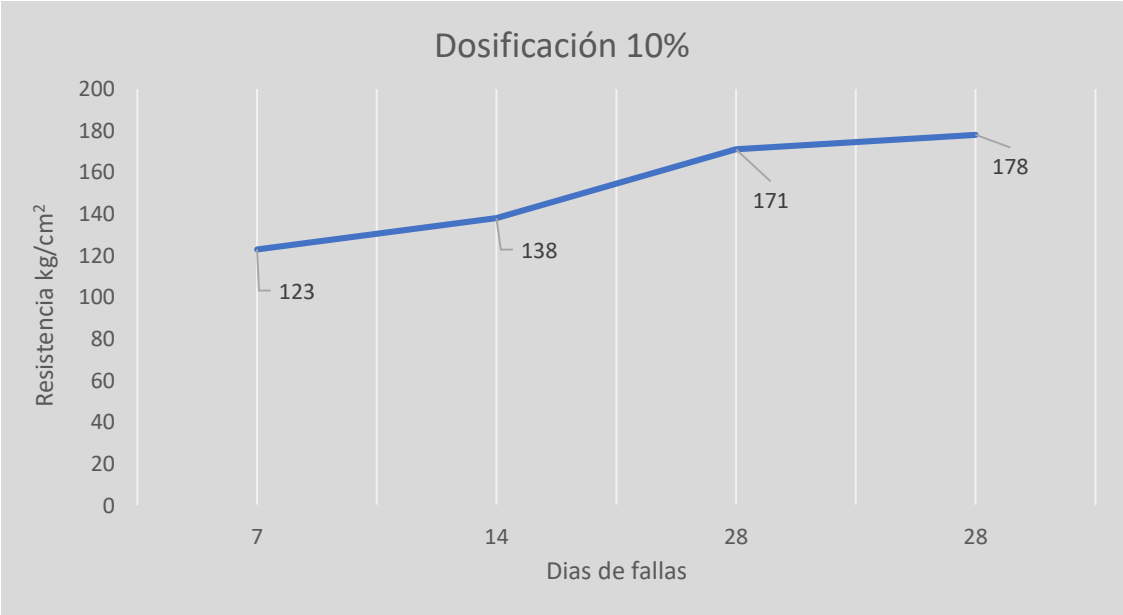

Fuente: Elaborado por: María Paula Barquero Delgado, Luis Felipe Rodríguez Solís (2024)

*Gráfico 3: Diseño de espécimen 5% de caucho triturado adicionado,*




***Fuente: Elaborado por: María Paula Barquero Delgado, Luis Felipe Rodríguez Solís (2024)***

***Gráfico 4: Diseño de espécimen 10% de caucho triturado adicionado.***




Fuente: Elaborado por: María Paula Barquero Delgado, Luis Felipe Rodríguez Solís (2024)

En base a los resultados se evidencia que las dosificaciones 5% y 10% no cumplen con la resistencia mínima requerida sin embargo la dosificación al 1% de caucho triturado sobrepasa la resistencia mínima e incluso supera las resistencias del concreto que se tomó como referencia, el peso total de agregado fino fue de 12579 kg siendo 0,0224g agregado de caucho triturado que corresponde a un 0,19% de una llanta de 66 kilogramos.

El espécimen que supero la resistencia del ensayo referencia cumplió con el rango permitido en el Marco Legal, mencionado en el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de carreteras, caminos y puentes CR-2020 del MOPT, misma que indica que el mínimo requerido para la construcción de estructuras menores de concreto hidráulico es de 25MPa, o 254 $kg/cm^2$.

También el diseño cumple con el Código Sísmico de Costa Rica CSCR-2020, donde dicha resistencia indica que debe de ser mínima de 210 $kg/cm^2$ y máxima de 280 $kg/cm^2$

Con los resultados se obtiene una base para el desarrollo de la construcción de cunetas con caucho reciclado triturado, el cual cumple con la capacidad mínima requerida 210 $kg/cm^2$ con el cual se realiza un modelo para visualizar las cantidades a utilizar.




***Figura 22: Dimensiones de cuneta***

***Fuente: María Paula Barquero Delgado, Luis Felipe Rodríguez Solís (2024)***

***Tabla 10: Proporciones de concreto hidráulico para la construcción de 100m de cuneta,***

| Concreto Hidráulico ($m^3$) | Cemento (kg) | Arena ($m^3$) | Grava ($m^3$) | Agua (Litros) | Caucho triturado (m3) | Equivalente llantas |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 350 | 0,56 | 0,84 | 180 | 0,0056 | 15,7 unidades |
| 23 | 8050 | 12,88 | 19,32 | 4140 | 0,1288m3 | |
| Concreto Hidráulico ($m^3$) | Cemento (kg) | Arena (kg) | Grava (kg) | Agua (Litros) | Caucho triturado (Kg) | Equivalente llantas |
| 23 | 8050 | 20608 | 32844 | 4140 | 141,68 | 15,7 unidades |

***Fuente: Elaborado por: María Paula Barquero Delgado, Luis Felipe Rodríguez Solís (2024)***

### 3.3 Aceptación o rechazo de la Hipótesis

La hipótesis planteada de diseñar un concreto hidráulico modificado con caucho triturado reciclado, es aprobada con éxito, se cumplieron todos los requisitos de la norma técnica para ensayos de laboratorio, donde se puede comprobar la capacidad de resistencia a la compresión del

concreto hidráulico y sus resultados cumplen con las normas de Costa Rica respecto al Código Sísmico, CSCR-2020.

Es importante señalar que se considera aceptable si las cantidades añadidas no aumentan del 1% siendo riesgoso de perder resistencia si estas se superan, por lo cual al mantenerse en el rango sugerido conserva la resistencia base de 210 $kg/cm^2$ que cumple con la normativa.

El enfoque principal del proyecto consiste en dosificar un concreto hidráulico con caucho reciclado triturado para la construcción de cunetas, Esto tiene el propósito de eliminar el caucho de llantas del entorno, al mismo tiempo se crean oportunidades para emplear esta mezcla en otros proyectos de construcción, como es planteado en el Marco Legal mencionadas por:

- Reglamento sobre la protección, uso y mantenimiento de parques y espacios públicos de competencia.
- Ley 833, Ley de Construcciones.
- (CR-2020) Manual de Especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes.
- (CSCR-2020) Código sísmico de Costa Rica.

Es fundamental tener en cuenta que este proyecto se centró en aplicar un enfoque de economía sostenible solicitando los materiales a la empresa Cementos Progreso Costa Rica S,A, la cual tritura y luego coprocesa el caucho de llantas para obtener combustible a partir de este, aportando al correcto manejo de materiales, sin embargo, para el desarrollo de esta investigación solo se requirió el caucho triturado reciclado.

En el campo ambiental se logra aceptar la hipótesis ya que alcanza con efectividad encapsular el caucho reciclado dentro del concreto hidráulico, dando lugar a la reutilización de

este material el cual es de difícil degradación, aportando a su vez a reducir la huella de carbono y el alcance del país para lograrlo desechar de forma sostenible sin aquejar a la población por su alta probabilidad de contaminar mantos acuíferos o almacenar agua favoreciendo el crecimiento de mosquitos trasmisores de enfermedades perjudiciales para la salud humana.

# Capítulo 4: Limitaciones, Conclusiones y Recomendaciones,

## 4.1 Limitaciones

El proceso para triturar el caucho se vio afectado ya que no contábamos con la maquinaria necesaria para reducir la muestra a una granulometría aceptable, por lo tanto, se tuvo que recurrir a Cementos Progreso que ellos trituran el caucho, pero solo para coprocesarlo y utilizarlo como combustible, por esta razón se imposibilitó obtener tamaños del caucho triturado más pequeños y uniformes.

No se logró aplicar el concreto hidráulico modificado con caucho reciclado a una obra civil para observar y realizar una bitácora de su comportamiento a sucesos ambientales y de índole humana que lo pusieran a prueba y así obtener resultados respecto a su eficacia como material innovador.

## 4.2 Conclusiones

El comportamiento de las pruebas realizadas en las cuales se modifica el concreto hidráulico con caucho reciclado triturado arrojan que su resistencia disminuye al aumentar la dosificación, perdiendo propiedades mecánicas.

La dosificación de caucho reciclado al 1% en las pruebas sorprende ya que la resistencia sobrepasa el modelo referencia dando lugar a realizar más pruebas para comprobar esta resistencia, sin embargo, se concluye que esta es la dosificación cumple de forma eficaz con el CSCR-2020 para su uso en cunetas.

La dosificación del 5% en su resistencia a los 7 y 14 días disminuye considerablemente en relación con la dosificación del 10% pero a los 28 días ocurre lo contrario obteniendo la

dosificación mayor un aumento de la resistencia a la compresión, esto sucede porque la cantidad de concreto hidráulico en la adicción de 10% de caucho tiene menos área la cual lograr fraguar y a su vez endurecerlo aumentando su resistencia más rápido, mientras que en el de 5% toma más tiempo en fraguar pero alcanza una resistencia superior a los 28 días.

Se aporta una huella de carbono más limpia ya que no desecharíamos las llantas si no que las reutilizaríamos.

### *4.3 Recomendaciones*

Se recomienda realizar pruebas en adición de caucho reciclado triturado al concreto hidráulico para porcentajes del 2% y 3% para descartar si sumar más caucho en cantidades reducidas, pero más que el 1% logre una resistencia mayor o resulte menor,

Es importante someter el concreto hidráulico modificado con caucho reciclado triturado a condiciones ambientales y de cargas cíclicas para observar su comportamiento.

Es recomendable realizar un análisis de presupuestos en cuanto al proceso de triturado y trasporte a la planta que se encargará de realizar la adición del caucho triturado reciclado al concreto hidráulico.

Para el tamaño granulométrico del caucho se recomienda realizar más ensayos con tamaños más pequeños, esto con el fin de verificar si en diferentes tamaños el caucho triturado reciclado le suma resistencia al concreto hidráulico.

**Bibliografía**

Barón y Sánchez (s.f.) Estabilización de Taludes por Medio de Muros de Llantas en el Barrio la Capilla – Soacha Cundinamarca. Obtenido de: https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/31b7fae8-6a3d-4b5a-b80f-f22b6a7bd286/content

Cementos Progreso Costa Rica S.A. (2024) Caucho triturado reciclado Obtenido de https://www.cempro.co.cr/

Comisión Guatemalteca de Normas Ministerio de Economía, (2024) Ensayos de Laboratorio Obtenido de: https://www.mineco.gob.gt/

Comisión Guatemalteca de Normas Ministerio de Economía, (2018) Norma ASTM D75. Obtenido de: https://conred.gob.gt/normas/NRD3/3_agregados/NTG_41009_ASTM_D75_Prctica_estndar_para_el_muestreo_de_los_agregados.pdf

Continental, (s.f.) ¿Qué hay en sus neumáticos? Obtenido de: https://www.continental-tires.com/products/b2c/tire-knowledge/tire-mixture/

Contreras, (2018) influencia del tamaño y porcentaje de caucho reciclado en un concreto estructural sobre su compresión, asentamiento, peso unitario y deformación, Obtenido de: https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/13858/Contreras%20Gonzales.%20Rodrigo%20Jose.pdf?sequence=8

Cowart. (2018) Análisis de la prefactibilidad técnica y financiera del uso de llantas recicladas para la elaboración de concreto. Obtenido de: http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/8949/1/42951.pdf

CR, (2020), Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes, San José.

CSCR, (2020), Código Sísmico de Costa Rica, San José: Tecnológica de Costa Rica,

El comercio, (2012) Historia de la llanta, obtenido de: https://www.elcomercio.com/deportes/carburando/historia-llanta.html

Fundellantas, (2022). https://fundellantas.org/. Obtenido de: https://fundellantas,org/normativa/

Geocax.com. (s.f.) https://geocax.com/construyendo-estructuras-con-llantas-recicladas-y-mamposteria-de-caucho.html

González, (2024), https://adiariocr.com/. obtenido de: 12 toneladas de llantas de desecho serán procesadas y utilizadas como combustible | aDiarioCR.com

Instituto Ecuatoriano de Normalización, (2010) Método de ensayo para el asentamiento en el concreto del cemento hidráulico, Obtenido de: https://ia802905.us.archive.org/31/items/ec.nte.1578.2010/ec.nte.1578.2010.pdf

Instituto Nacional de Vías, (2012) Reducción de muestras de agregados por cuarteo norma ASTM C702. Obtenido de: https://www.da-lab.co/wp-content/uploads/2021/04/INV-202-13.pdf

LANAMME UCR, (s.f.), Ensayos de laboratorio Obtenido de: https://www,lanamme,ucr,ac,cr/images/ensayos/3-concreto/3,01,pdf

LANAMME UCR, (s.f.), Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Obtenido de lanamme.ucr.ac.c: https://www.lanamme.ucr.ac.cr/labs/ensayos-laboratorios.

Marvin Gutiérrez, (2024) Tesis propuesta de diseño de concreto hidráulico modificada con residuos de plásticos (pet) para la construcción de aceras y corredores de uso recreacional en parques públicos.

Ministerio de Salud, (2022), Campaña de llantas ha logrado evitar unas 3,140 toneladas de CO2O, Obtenido de: https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/prensa/43-noticias-2021/853-se-han-recuperado-81-908-llantas-campana-de-llantas-ha-logrado-evitar-unas-3-140-toneladas-de-co2

Normas y especificaciones INVIAS (2012) Ensayos de laboratorio, Obtenido de: https://www.da-lab.co/wp-content/uploads/2021/04/INV-202-13.pdf

Puro Motor, (2024) https://puromotor.com/ Obtenido de: https://puromotor.com/industria/los-neumaticos-tardan-1000-anos-desaparecer-la-naturaleza-usted/

Sistema Costarricense de información jurídica, (2024) Reglamento sobre la Protección, Uso y Mantenimiento de Parques y Espacios Públicos de Competencia / Ley de construcciones, Obtenido de: https://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=66304&nValor3=77919

Soto y Marín, (2019) Análisis del concreto con caucho como aditivo para aligerar elementos estructurales, Obtenido de: https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/17858/ANALISIS%20DEL%20CONCRETO%20CON%20CAUCHO.pdf?sequence=1

Universidad Centroamericana José Simeón (s.f.) Ensayos de laboratorio, Obtenido de :https://uca.edu.sv/

Universidad Centroamericana José Simeón (s.f.) Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso, Obtenido de: https://uca.edu,sv/mecanica-estructural/materias/materialesCostruccion/guiasLab/ensayoAgregados/Densidad%20gravedad%20especifica%20y%20absorcion%20de%20agregado%20grueso.pdf

Universidad La Gran Colombia (2016) Determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo. https://repository.ugc.edu.co/bitstream/handle/11396/5172/PROPUESTA%20CARTILLA.pdf?sequence=3