



Facultad de Ingeniería  
Escuela de Construcción Civil

## Evaluación de la utilización de hormigones con incorporación de caucho para pavimentos urbanos de tráfico liviano.

Por:  
Joselin Arancibia Fa

Tesis para optar al Grado de Licenciado en Ciencias de la Construcción  
y Título de Ingeniero Constructor.

Prof. Guía: Juan Egaña Ramos

Junio, 2017

## ***DEDICATORIA***

*Esta tesis va especialmente dedicada a mi familia, que en todos los años de universidad he recibido su apoyo.*

*“La diferencia entre ganar y perder a menudo consiste en no abandonar”*

## AGRADECIMIENTOS

*En primer lugar, agradecer a mi familia por apoyarme en todos estos años, desde el comienzo hasta el final de esta etapa en especial en los momentos más difíciles, a mi mama Paola, a mi papi Enrique y en especial a mi mami Tina, los quiero mucho y siéntanse parte de este logro.*

*A lo largo de estos años, he tenido muy buenos amigos a mi lado dándome apoyo y contención. Alejo, Maca, Paloma y Valeska, les agradezco por ser parte de mi vida, sin personas que te hagan pasar tan buenos momentos en lo personal no se puede ir a estudiar con la misma fuerza, los quiero mucho.*

*En este último año, pero no menos importante la ayuda que me ha brindado mi pololo Javier, quien me ha incentivado todos los días a terminar con esta etapa, en los momentos que más desanimada me sentí. Gracias amor.*

*Dar las gracias a mi profe Guía Juan Egaña, por su buena disposición siempre que se le necesité, su amabilidad y tiempo entregado para hacer esta tesis posible.*

*A los demás profesores que aportaron con sus conocimientos, que se encargaron de revisarme y aportar críticas constructivas, que hicieron crecer mi tesis. Profe Nelson Valdés, profe Gina, y en especial al profe Uriel Padilla, que además de eso me ayudó anímicamente y le tuvo fe a mi tesis cuando estaba pasando un mal momento, me animó para seguir adelante. Además, en especial un agradecimiento al profesor Gastón Soto (Q.E.P.D), que también me ayudó con sus conocimientos, cada vez que fui a hablar con él, recibí su amabilidad y buena disposición.*

*Agradecer también a quienes me ayudaron en el trabajo de laboratorio, don Enrique y don Víctor, por su amabilidad, simpatía y buena disposición.*

*A mis compañeros y amigos que no fueron muchos, pero personas valiosas que me acompañaron a lo largo de este camino, a mis primeros amigos Sergio bueno, Sergio malo y el flaco, siempre los he llevado en mi corazón. A mis amigos más recientes que hemos pasado buenos momentos y cualquier ayuda que me dieron de cualquier tipo hacen que yo este hoy cerca de la meta Felipe Monsalve, Fabrizio Manríquez y Fabiola Gutiérrez, espero seguirnos viendo ya como colegas.*

## INDICE GENERAL

|                                                  |    |
|--------------------------------------------------|----|
| DEDICATORIA.....                                 | 1  |
| AGRADECIMIENTOS.....                             | 2  |
| INDICE GENERAL.....                              | 3  |
| LISTADO DE ABREVIATURAS Y SIGLAS .....           | 7  |
| LISTADO DE TABLAS .....                          | 9  |
| LISTADO DE FIGURAS .....                         | 10 |
| RESUMEN.....                                     | 11 |
| ABSTRACT .....                                   | 12 |
| CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES.....          | 13 |
| 1.1 Planteamiento del problema .....             | 14 |
| 1.2 Objetivos .....                              | 15 |
| 1.2.1 General .....                              | 15 |
| 1.2.2 Específicos. ....                          | 15 |
| 1.3 Hipótesis .....                              | 15 |
| 1.4 Alcances de la investigación .....           | 15 |
| 1.5 Metodología de la investigación .....        | 16 |
| 1.6 Descripción de metodología .....             | 17 |
| CAPÍTULO 2: HORMIGÓN, CAUCHO Y PAVIMENTOS. ....  | 18 |
| 2.1 Generalidades.....                           | 19 |
| 2.2 El hormigón.....                             | 19 |
| 2.2.1 Características del Hormigón .....         | 19 |
| 2.2.2 Hormigón fresco.....                       | 20 |
| 2.2.2.1 Consistencia del Hormigón Fresco. ....   | 20 |
| 2.2.2.2 Docilidad del Hormigón Fresco. ....      | 21 |
| 2.2.2.3 Homogeneidad del Hormigón Fresco.....    | 21 |
| 2.2.2.4 Masa Específica del Hormigón Fresco..... | 21 |
| 2.2.3 Hormigón endurecido .....                  | 21 |
| 2.2.3.1 Densidad aparente .....                  | 22 |
| 2.2.3.2 Resistencia.....                         | 22 |
| 2.2.3.3 Variaciones de volumen .....             | 23 |

|                                                                                        |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.2.3.4 Propiedades elásticas y plásticas .....                                        | 24        |
| 2.2.3.5 Permeabilidad del hormigón.....                                                | 25        |
| 2.2.3.6 Durabilidad del hormigón .....                                                 | 25        |
| <b>2.3 Caucho reciclado de neumáticos en desuso .....</b>                              | <b>26</b> |
| 2.3.1 Generalidades .....                                                              | 26        |
| 2.3.2 Componentes del caucho.....                                                      | 26        |
| 2.3.3 Tipos de caucho.....                                                             | 27        |
| 2.3.3.1 Caucho natural .....                                                           | 27        |
| 2.3.3.2 Caucho sintético.....                                                          | 27        |
| 2.3.4 Propiedades del caucho .....                                                     | 27        |
| 2.3.4.1 Propiedades físicas del caucho.....                                            | 27        |
| 2.3.4.2 Propiedades químicas del caucho .....                                          | 28        |
| 2.3.5 Proceso productivo .....                                                         | 28        |
| 2.3.6 Hormigón con caucho .....                                                        | 29        |
| 2.3.6.1 Características del hormigón con caucho .....                                  | 29        |
| 2.3.6.2 Comportamiento de la mezcla .....                                              | 29        |
| 2.3.6.2.1 Consistencia .....                                                           | 29        |
| 2.3.6.2.2. Absorción capilar.....                                                      | 29        |
| 2.3.6.2.3 Contenido de aire y porosidad .....                                          | 30        |
| 2.3.6.2.4 Resistencia a la compresión .....                                            | 30        |
| 2.3.6.2.5 Resistencia a la tracción .....                                              | 30        |
| 2.3.6.2.6 Velocidad de pulso ultrasónico .....                                         | 30        |
| 2.3.6.2.7 Elasticidad .....                                                            | 30        |
| 2.3.6.2.8 Acústica .....                                                               | 30        |
| 2.3.6.2.9 Resistencia a impactos y vibraciones .....                                   | 30        |
| <b>2.4 Pavimentos urbanos de tráfico liviano .....</b>                                 | <b>31</b> |
| 2.4.1 Generalidades .....                                                              | 31        |
| 2.4.2 Definición Pavimento Urbano de tráfico liviano .....                             | 32        |
| 2.4.3 Sobre los pavimentos .....                                                       | 32        |
| 2.4.3.1 Ciclovías (según Construcción de ciclovías: Estándar técnico, del MINVU) ..... | 32        |
| 2.4.3.1.1 Pavimento de Hormigón .....                                                  | 32        |
| 2.4.3.1.2 Materiales .....                                                             | 32        |

|                                                                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.4.3.2 Aceras y otros (según Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación, Minvu) ..... | 33        |
| 2.4.3.2.1 Pavimento de hormigón.....                                                                               | 33        |
| 2.4.3.2.2 Materiales .....                                                                                         | 33        |
| 2.4.3.2.3 Dosificación del hormigón.....                                                                           | 33        |
| 2.4.3.2.4 Especificaciones del hormigón .....                                                                      | 34        |
| <b>2.5 Resumen para diseñar hormigón pavimento urbano tráfico liviano .....</b>                                    | <b>35</b> |
| <b>CAPITULO 3: DISEÑO EXPERIMENTAL.....</b>                                                                        | <b>36</b> |
| <b>3.1 Generalidades.....</b>                                                                                      | <b>37</b> |
| <b>3.2 Planteamiento y definición de variables .....</b>                                                           | <b>37</b> |
| 3.2.1 Variables Independientes.....                                                                                | 37        |
| 3.2.2 Variables Dependientes .....                                                                                 | 37        |
| 3.2.3 Variables de control .....                                                                                   | 37        |
| <b>3.3 Factorial del experimento.....</b>                                                                          | <b>38</b> |
| <b>3.4 Ensayos.....</b>                                                                                            | <b>38</b> |
| 3.4.1 Resistencia a compresión .....                                                                               | 38        |
| 3.4.2 Resistencia a flexo-tracción.....                                                                            | 39        |
| 3.4.3 Absorción de agua .....                                                                                      | 39        |
| <b>CAPÍTULO 4: DESARROLLO EXPERIMENTAL .....</b>                                                                   | <b>40</b> |
| <b>4.1 Generalidades.....</b>                                                                                      | <b>41</b> |
| <b>4.2 Materiales .....</b>                                                                                        | <b>41</b> |
| <b>4.3 Caracterización de los áridos .....</b>                                                                     | <b>42</b> |
| 4.3.1 Granulometría Grava.....                                                                                     | 42        |
| 4.3.2 Densidades Grava.....                                                                                        | 44        |
| 4.3.3 Granulometría arena.....                                                                                     | 46        |
| 4.3.4 Densidades Arena.....                                                                                        | 48        |
| <b>4.4 Caracterización del caucho.....</b>                                                                         | <b>50</b> |
| 4.4.1 Granulometría del caucho.....                                                                                | 50        |
| 4.4.2 Densidad aparente caucho.....                                                                                | 50        |
| <b>4.5 Proporción de áridos .....</b>                                                                              | <b>51</b> |
| <b>4.6 Granulometría grava/ arena (HP) .....</b>                                                                   | <b>51</b> |
| <b>4.7 Granulometría grava/caucho/ arena (HC10) .....</b>                                                          | <b>52</b> |
| <b>4.8 Granulometría grava/caucho/ arena (HC20) .....</b>                                                          | <b>53</b> |

|                                                          |           |
|----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4.9 Granulometría grava/caucho/ arena (HC30).</b>     | <b>53</b> |
| <b>4.10 Dosificación del hormigón</b>                    | <b>54</b> |
| 4.10.1 Parámetros de dosificación                        | 54        |
| 4.10.2 Dosificación final                                | 54        |
| 4.10.3 Dosificación hormigones con caucho                | 54        |
| <b>4.11 Fabricación del hormigón</b>                     | <b>55</b> |
| <b>CAPÍTULO 5: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> | <b>57</b> |
| <b>5.1 Generalidades</b>                                 | <b>58</b> |
| <b>5.2 Asentamiento</b>                                  | <b>58</b> |
| <b>5.3 Resistencia a compresión</b>                      | <b>60</b> |
| <b>5.4 Resistencia a flexo-tracción</b>                  | <b>63</b> |
| <b>5.5 Absorción de agua</b>                             | <b>67</b> |
| <b>CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES</b>                          | <b>68</b> |
| <b>6.1 Generalidades</b>                                 | <b>69</b> |
| <b>6.2 Relación con objetivos específicos</b>            | <b>69</b> |
| <b>6.3 Relación con objetivo general e hipótesis</b>     | <b>69</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b>                                      | <b>70</b> |
| <b>ANEXOS</b>                                            | <b>72</b> |

## LISTADO DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

°C: Grados Celsius

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials

ASTM: American Society for Testing and Materials

C3A: Componente químico del cemento

Dn: Tamaño máximo nominal del árido

Dm: Decímetros

E: Módulo de elasticidad

Fc: Resistencia a la compresión

G: Gramos

G20: Gránulo de caucho tamaño 20 mm

HP: Hormigón patrón

H10: Hormigón con 10% de caucho en reemplazo de grava

H20: Hormigón con 20% de caucho en reemplazo de grava

H30: Hormigón con 30% de caucho en reemplazo de grava

ICH: Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile

IDIEM: Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales

KG: Kilogramos

M: Metros

M2: Metros cuadrados

M3: metros cúbicos

MINVU: Ministerio de Vivienda y Urbanismo

MM: Milímetros

MPA: Mega Pascales

MOP: Ministerio de Obras Públicas



NCH: Norma Chilena

NFU: Neumático fuera de uso

Rc: Resistencia a la compresión

Rf: Resistencia a la flexo-tracción

Rt: Resistencia a la tracción

## LISTADO DE TABLAS

|                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 2.1 Requisitos pavimentos de hormigón.....                                     | 344 |
| Tabla 2.2 Cuadro resume para diseño de hormigón.....                                 | 355 |
| Tabla 3.1. Determinación de hormigones de ensayo.....                                | 388 |
| Tabla 4.1 Caracterización áridos. ....                                               | 42  |
| Tabla 4.2 Granulometría de grava.....                                                | 42  |
| Tabla 4.3 Densidades y absorción de la grava.....                                    | 444 |
| Tabla 4.4 Densidad aparente grava.....                                               | 455 |
| Tabla 4.5 Granulometría de arena. ....                                               | 466 |
| Tabla 4.6 Densidades y absorción de la arena. ....                                   | 488 |
| Tabla 4.7 Densidad aparente arena .....                                              | 499 |
| Tabla 4.8 Granulometría del caucho. ....                                             | 50  |
| Tabla 4.9 Densidad aparente caucho. ....                                             | 50  |
| Tabla 4.10 Granulometría combinada.....                                              | 51  |
| Tabla 4.11 Granulometría combinada con 10% de caucho,.....                           | 52  |
| Tabla 4.12 Granulometría combinada con 20% de caucho. ....                           | 53  |
| Tabla 4.13 Granulometría combinada con 30% de caucho. ....                           | 533 |
| Tabla 4.14 Dosificación base, hormigón patrón.....                                   | 544 |
| Tabla 4.15 Dosificación de los hormigones. ....                                      | 544 |
| Tabla 5.1 Resultados de asentamiento de cono. ....                                   | 599 |
| Tabla 5.2 Resultados ensayo a compresión. ....                                       | 60  |
| Tabla 5.3 Variación de resistencia a compresión en hormigones.....                   | 61  |
| Tabla 5.4 Evaluación estadística a probetas a compresión.....                        | 62  |
| Tabla 5.5 Resultados densidad aparente. ....                                         | 62  |
| Tabla 5.6 Datos ensayo de resistencia a flexo-tracción. ....                         | 64  |
| Tabla 5.7 Variación de resistencia a flexo-tracción en hormigones.....               | 66  |
| Tabla 5.8 Desviación estándar y coeficiente de variación de probetas ensayadas. .... | 66  |
| Tabla 5.9 Resultados de absorción.....                                               | 677 |

## LISTADO DE FIGURAS

|                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 2.1 Descomposición de neumático. ....                                                          | 266 |
| Figura 2.2 Proceso de recuperación del caucho. ....                                                   | 288 |
| Figura 2.3 Obras de pavimentación MINVU (Urbanas) y MOP. ....                                         | 31  |
| Figura 3.1: Prensa de ensayo a compresión laboratorio de hormigones Universidad de Valparaíso .....   | 388 |
| Figura 3.2 Prensa de ensayo a flexo-tracción laboratorio de hormigones Universidad de Valparaíso..... | 399 |
| Figura 4.1 Caucho granulado.....                                                                      | 411 |
| Figura 4.2 Granulometría grava. ....                                                                  | 433 |
| Figura 4.3 Granulometría arena corregida.....                                                         | 47  |
| Figura 4.4 Granulometría áridos combinados.....                                                       | 522 |
| Figura 4.5 Betonera utilizada .....                                                                   | 555 |
| Figura 4.6 Probetas en piscina de curado. ....                                                        | 566 |
| Figura 5.1 Ensayo de Cono de Abrams.....                                                              | 588 |
| Figura 5.2 Gráfico de asentamiento de cono. ....                                                      | 599 |
| Figura 5.3 Ensayo a compresión.....                                                                   | 60  |
| Figura 5.4 Resistencia a compresión. ....                                                             | 611 |
| Figura 5.5 Ensayo resistencia a flexo-tracción. ....                                                  | 633 |
| Figura 5.6 Rotura hormigón patrón. ....                                                               | 633 |
| Figura 5.7 Rotura hormigones con caucho. ....                                                         | 644 |
| Figura 5.8 Gráfico resistencia flexo-tracción.....                                                    | 655 |

## RESUMEN

La presente investigación tiene como objeto determinar si un material de desecho como el caucho, puede ser utilizados para pavimentos, en este caso para pavimentos urbanos de tráfico liviano, como aceras, plazas, ciclovías (tránsito de personas y bicicletas), donde sabemos que las solicitaciones son menores que un pavimento destinado al tránsito de vehículos.

Se utilizan gránulos de caucho reciclado de neumáticos fuera de uso, para reemplazo en porcentajes de 10%, 20% y 30% a la grava del hormigón. Se preparan estos hormigones y se ensayan en laboratorio a compresión, flexo-tracción, absorción, densidad aparente y asentamiento de cono.

Se comparan los resultados de estos ensayos con un hormigón convencional que puede ser utilizado en pavimentos urbanos de tráfico liviano (hormigón patrón). En esta comparación vemos que la resistencia a compresión (que es el parámetro de comparación principal) baja a mayor porcentaje de caucho incorporado. La resistencia a flexo-tracción también disminuye en una relación similar a la compresión. La densidad y la absorción de agua también se ven disminuidas, aunque no en porcentajes tan significativos.

Si bien, los pavimentos urbanos de tráfico liviano no tienen las mismas exigencias que los pavimentos donde circulan vehículos, no todos los hormigones ensayados sirven para pavimentos urbanos. Se determina que los pavimentos con 10% de reemplazo de caucho es óptimo para ser utilizado los denominados pavimentos urbanos de tráfico liviano. Sin embargo, el hormigón con 20% de reemplazo de caucho podría ser utilizado para aceras, plazas, pasarelas con fines de tránsito de personas, pero no para las ciclovías, que estas tienen una exigencia de resistencia a compresión un poco mayor a las anteriormente mencionadas. Y por otra parte el reemplazo de caucho de 30%, se descarta para la utilización de todos estos pavimentos, ya que la resistencia baja en este caso hasta un 24,6% respecto al hormigón patrón.

Palabras Claves: *Caucho reciclado, hormigón, pavimentos urbanos, ciclovías.*

## ABSTRACT

The purpose of this research is to determine if a waste material such as rubber can be used for pavements, specifically for light traffic pavements, such as sidewalks, squares, bicycle lanes, the requirements in this case are less strict than the requirements for urban pavements used for heavy traffic.

Granules of recycled rubber from tires are used to replace the gravel of the concrete in percentages of 10%, 20% and 30%. These concretes are prepared and tested in the laboratory for compression, flexure-traction, absorption, bulk density and cone settling.

The results of these tests are compared with conventional concrete that can be used in urban light traffic pavements (standard concrete). In this comparison we see that the compressive strength (which is the main comparison parameter) falls to a higher percentage of rubber incorporated. The flexural-tensile strength also decreases in a percentage related with compression. The density and the absorption of water are also diminished, although not in such significant percentages.

Although urban light traffic pavements do not have the same requirements as pavements where vehicles circulate, not all concrete tested are suitable for urban pavements. It is determined that the pavements with 10% of rubber replacement are optimal to be used in the urban light traffic pavements. However, concrete with a 20% rubber replacement could be used for sidewalks, squares, walkways for people transit purposes, but not for bike lanes, which have a demand for compressive strength a little higher than those mentioned above. On the other hand, the rubber replacement of 30% is discarded for the use of all these pavements, since the resistance in this case falls to 24.6% with respect to the standard concrete.

Keywords: *Rubber recycled, concrete, urban pavements, bicycles lanes.*

## **CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES**

## 1.1 Planteamiento del problema

Lentamente en nuestro país se ha estado incorporando para diferentes usos, materiales de desecho que, en lugar de ocupar espacios en vertederos, son reciclados transformándolos en productos nuevamente utilizables, lo que impacta la economía y, a la vez, en contribuir a descontaminar nuestro ambiente.

Uno de los materiales de desecho que se observa en gran cantidad son los neumáticos de vehículos que han quedado fuera de uso. En Chile se desechan 21000 toneladas de neumáticos al año. La acumulación y quema en basurales, son las acciones más contaminantes de nuestra sociedad. Los neumáticos duran alrededor de 500 años sin descomponerse. Buscando solucionar el problema de contaminación que provocan estos neumáticos, se ha empezado a investigar hace un tiempo como disponer de estos desechos, ya sea en su forma original o, reciclándolos para aprovechar su principal componente: El caucho. Es tal la importancia que se ha dado a este tema, que se ha llegado a crear instituciones que están dedicadas exclusivamente al estudio del material obtenible a partir de los neumáticos fuera de uso (NFU).

En nuestro país, un ejemplo de esto es la planta recicladora de NFU POLAMBIENTE, ellos compran los NFU, obtienen de ellos el caucho, lo procesan y lo venden en gránulos de diferentes tamaños. Estos pueden ser utilizados para relleno de canchas con césped artificial, pistas para atletismo, pisos de multicanchas, etc, y no se descarta usarlo también en la construcción.

En la Universidad de Valparaíso, en particular en la Escuela de Construcción Civil, se han desarrollado algunas tesis que han demostrado la factibilidad de incorporar gránulos de caucho procedentes del reciclado de neumáticos en morteros de cemento y en mezclas asfálticas. Por otra parte, existen antecedentes de experiencias realizadas en otros países con la intención de emplear caucho en hormigones. Pensando en continuar los estudios tendientes a la utilización de este posible material en el ámbito de la construcción, se propone como tema de tesis estudiar el emplear gránulos de caucho reciclado en pavimentos de tipo tráfico liviano, tales como ciclovías, plazas, aceras u otros similares que no presenten grandes solicitaciones, ya que por las investigaciones sabemos que la resistencia podría verse afectada, pero a pesar de esto, podrían lograrse superficies menos rígidas con un material que permitiría resistencias suficientes, respuestas satisfactorias a esfuerzos de tracción y solicitaciones de impacto, con durabilidad razonable, por lo menos manteniendo el costo y, por último, contribuyendo a disminuir la contaminación ambiental.

Algunas exigencias numéricas para este tipo de pavimentos, que definiremos como “PAVIMENTOS URBANOS DE TRÁFICO LIVIANO”, sería; en aceras y ciclovías la resistencia a compresión no sea menor a 250 kgf/cm<sup>2</sup>, y en pavimentos en general una resistencia a flexo tracción adecuada está entre 30 a 50 kgf/cm<sup>2</sup>, según códigos de normas MINVU. Trataremos de demostrar que el caucho incorporado en el hormigón puede cumplir con estas especificaciones a través de los ensayos correspondientes hechos en laboratorio, ensayando hormigones con distinto volumen de reemplazo de caucho, para encontrar en lo posible un reemplazo óptimo y analizar la conveniencia de usar caucho para este tipo de pavimentos, así se podría dejar estandarizado como producto, hacerlo y utilizarlo o incluso tomar como referencia para investigaciones futuras de hormigón con caucho para otros usos.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 General.**

- ❖ Evaluar la incorporación de caucho en distintos porcentajes como reemplazo de volumen de grava en el hormigón, para ser utilizado en pavimentos urbanos de tráfico liviano.

### **1.2.2 Específicos.**

- ❖ Diseñar hormigones con inclusiones variables de caucho reciclado como reemplazo en volumen de grava para evaluar las siguientes propiedades:
  - I. Asentamiento de las mezclas frescas.
  - II. Resistencias mecánicas a compresión y a flexotracción.
  - III. Absorción de agua.
  - IV. Densidad aparente en mezclas endurecidas.
- ❖ Comparar propiedades como docilidad, porosidad, resistencias mecánicas, de los hormigones con caucho, con las de un hormigón patrón.
- ❖ Seleccionar, contenido óptimo de reemplazo de grava por caucho para que cumpla con los requisitos de un pavimento urbano de tráfico liviano.

## **1.3 Hipótesis**

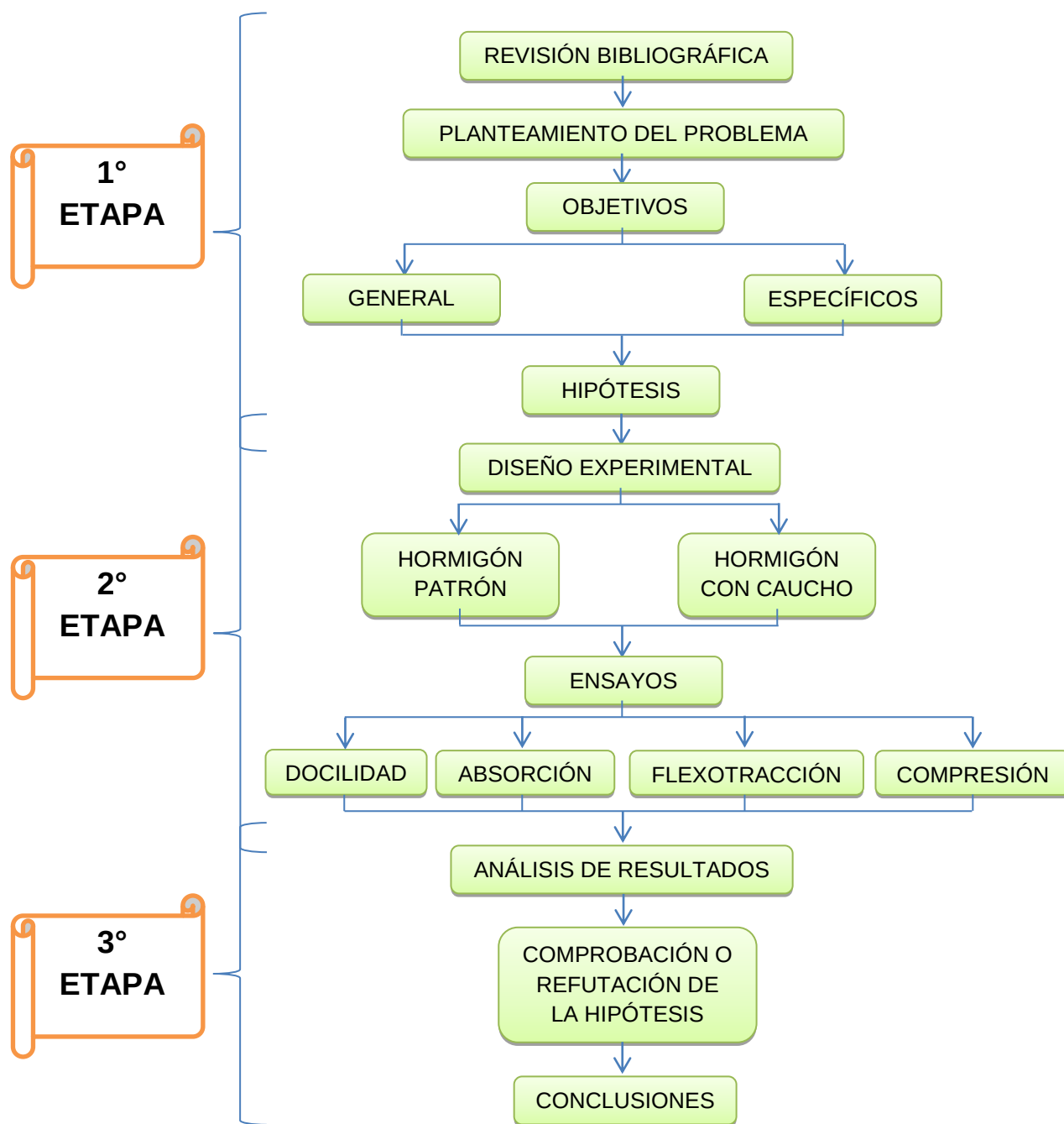
- El empleo de caucho reciclado como reemplazo en volumen parcial de grava, permite obtener un hormigón con propiedades que pueda ser empleado en pavimentos urbanos de tráfico liviano.

## **1.4 Alcances de la investigación**

- Los ensayos requeridos se realizarán en el Laboratorio de Hormigones de la Universidad de Valparaíso.
- Los distintos ensayos a realizar al hormigón con caucho y al hormigón patrón se realizarán según digan las normas chilenas pertinentes (Nch170, Nch1037, Nch1038, Nch1019, Nch2184)
- El caucho utilizado se traerá de la planta recicladora POLAMBIENTE, ubicada en la Región Metropolitana. El granulo de caucho será del tipo Gránulos G20 (15 a 25 mm. Negro), sus reemplazos en volumen de la grava serán, 10%, 20% y 30%.
- Para fabricación del hormigón se utilizará cemento Melón portland puzolánico grado corriente.
- Los áridos serán traídos de la planta Conovia, cuyo tamaño máximo nominal del árido grueso será 20 mm.



## 1.5 Metodología de la investigación



## **1.6 Descripción de metodología**

**1° Etapa:** En esta primera parte del trabajo, se recopila toda la información posible proveniente de la bibliografía que nos ayude a dar respuesta a la hipótesis, cumplir con los objetivos propuestos en esta misma etapa, esto se hace paso a paso. Con toda la información se construye el marco teórico a ser consultado para todo el desarrollo de la investigación.

**2° Etapa:** Se diseña y se ejecutan los ensayos con ayuda de toda la fuente bibliográfica recopilada en la etapa anterior. Se identifican las variables dependientes e independientes, los materiales y cantidades a utilizar.

**3° Etapa:** Con toda la información de los ensayos ya realizados se analizan estos resultados haciendo un contraste con los objetivos, veremos si la hipótesis es correcta o no. Y finalmente las conclusiones y proposiciones de próximas investigaciones.

## **CAPÍTULO 2: HORMIGÓN, CAUCHO Y PAVIMENTOS.**

## 2.1 Generalidades

En este capítulo se presenta la recopilación de los antecedentes para la realización de la presente tesis. El siguiente estudio se basa en el conocimiento de temas relacionados con el hormigón, su composición y sus propiedades en estado fresco y endurecido, como los ensayos que se le realizan a este.

En esta investigación se propone la mezcla del hormigón con el caucho, para ellos es necesario saber sus propiedades, como es el método de obtención y principalmente según las experiencias anteriores de como resultaría esta mezcla.

Finalmente, necesitamos saber acerca de los requerimientos que tienen los pavimentos que consideraremos en este estudio (pavimento urbano de tráfico liviano), de cómo se fabrican estos pavimentos en Chile, para definir parámetros de comparación, y así determinar si el hormigón con caucho podría ser utilizado para este fin.

## 2.2 El hormigón

### 2.2.1 Características del Hormigón

Es una piedra artificial formada al mezclar apropiadamente cuatro componentes básicos: cemento, arena, grava y agua.

Las propiedades del hormigón dependen en gran medida de la calidad y proporciones de los componentes en la mezcla, y de las condiciones de humedad y temperatura, durante los procesos de fabricación y de fraguado.

Para conseguir propiedades especiales del hormigón (mejor trabajabilidad, mayor resistencia, baja densidad, etc.), se pueden añadir otros componentes como aditivos químicos, micro-sílice, limallas de hierro, etc., o se pueden reemplazar sus componentes básicos por componentes con características especiales como agregados livianos, agregados pesados, cementos de fraguado lento, etc.

El hormigón ha alcanzado importancia como material estructural debido a que puede adaptarse fácilmente a una gran variedad de moldes, adquiriendo formas arbitrarias, de dimensiones variables, gracias a su consistencia plástica en estado fresco.

Al igual que las piedras naturales no deterioradas, el hormigón es un material sumamente resistente a la compresión, pero extremadamente frágil y débil a sollicitaciones de tracción. Para aprovechar sus fortalezas y superar sus limitaciones, en estructuras se utiliza el hormigón combinado con barras de acero resistente a la tracción, lo que se conoce como hormigón armado. (Ruz, 2004)

**Áridos:** El árido utilizado es un material granular compuesto por partículas de origen pétreo de diferentes tamaños, duro y estable, cuyo objetivo básico es constituir un esqueleto inerte para el hormigón. Generalmente se integra mediante dos o más fracciones, cada una de las cuales contiene una gama diferente de tamaños de partículas.

Generalmente los áridos los podemos clasificar en gruesos y finos. Las arenas corresponden a un árido fino y la Nch 163 define como arena al árido que pasa a lo menos el 95 por ciento por el tamiz de abertura nominal 5 milímetros. Las gravas corresponden a un árido grueso y la norma ya mencionada considera grava como árido que es retenido en un 95 por ciento en la misma dicha malla. Su selección es muy importante, ya que no deben contener materiales que puedan causar deterioros como materia orgánica, arcillas y sales entre otros. (Zabaleta, 1992)

**Cemento:** La pasta de cemento está formada por la mezcla de cemento hidráulico y agua, constituye el aglomerante activo del hormigón.

Todos los materiales se mezclan homogéneamente en cantidades adecuadas para construir una masa plástica y trabajable, a la cual se le puede conferir propiedades apropiadas para ser moldeada en la forma que se desee.

En esta etapa el hormigón puede ser fácilmente transportado y depositado en el elemento del cual pasará a formar parte constituyente, recibiendo a continuación un tratamiento adecuado de consolidación y compactación, que le confiere su máxima densidad.

El cemento hidráulico más empleado en la construcción es el cemento portland, aun cuando existen otros cementos tales como el aluminoso, el sulfatado, el magnésico y otros. En nuestro país los cementos que se fabrican son portland puros y portland con agregados puzolánicos o siderúrgicos. La norma Nch 148 of 68 establece dos clasificaciones para los cementos según su composición y según su resistencia.

**Agua:** El agua en el hormigón es uno de sus componentes principales, condicionando el desarrollo de las propiedades en su estado fresco y en su etapa de endurecimiento, las funciones del agua como material componente del hormigón.

- Contribuir a proporcionar docilidad al hormigón fresco.
- Hidratar los componentes del cemento.

Cabe destacar el que el agua de amasado debe cumplir los requisitos establecidos en la norma Nch 1498.

**Aditivos:** Estos son productos (orgánicos e inorgánicos) que, introducidos en pequeñas porciones en el momento de la fabricación del hormigón, permiten modificar algunas de sus propiedades originales. Se presentan en forma de polvo, líquido o pasta y la dosis varía según el producto y el efecto deseado, respetando las indicaciones del fabricante, las dosis varían entre un 0,1% y 5% del peso del cemento.

## **2.2.2 Hormigón fresco**

El hormigón fresco es un material esencialmente heterogéneo, puesto que en él coexisten tres fases: la sólida (áridos y cemento), la líquida (agua) y la gaseosa (aire incluido). A su vez, la fase sólida es heterogénea entre sí, ya que sus granos son de naturaleza y dimensión variables.

Muchas de las propiedades exigibles a un hormigón endurecido dependen de las propiedades de éste cuando se encuentra en estado fresco. La característica que debe tener una mezcla fresca dependerán de las características de la estructura a construirse y de los métodos de colocación y compactación disponibles.

Entre las propiedades del hormigón fresco podemos citar, como más importantes, la consistencia, la docilidad, la homogeneidad y la masa específica o densidad.

### **2.2.2.1 Consistencia del Hormigón Fresco.**

Es la menor o mayor facilidad que tiene el hormigón fresco para deformarse. Varía con multitud de factores: cantidad de agua de amasado, granulometría y forma de los áridos, etc.; el que más influye es la cantidad de agua de amasado.

Existen varios procedimientos para determinar la consistencia, siendo los más empleados el cono de Abrams, la mesa de sacudidas y el consistómetro Vebe.

### **2.2.2.2 Docilidad del Hormigón Fresco.**

La docilidad, concepto de difícil definición, puede considerarse como la aptitud de un hormigón para ser puesto en obra con los medios de compactación de que se disponen. Esta trabajabilidad del hormigón está relacionada con su deformabilidad (consistencia), con su homogeneidad, con la trabazón de sus distintos componentes y con la mayor o menor facilidad que la masa presente para eliminar los huecos de la misma (aire ocluido), alcanzando una compacidad máxima.

La docilidad depende, entre otros factores, de los siguientes:

- De la cantidad de agua de amasado. Cuanto mayor sea ésta, mayor será la docilidad (hasta cierto límite).
- De la granulometría de los áridos, siendo más dóciles los hormigones cuyo contenido en arena es mayor. Pero por otra parte, a más cantidad de árido fino corresponde más agua de amasado necesaria y, por tanto, menor resistencia. Por ello las relaciones que indicamos no pueden extrapolarse más allá de ciertos límites.
- La docilidad es mayor con áridos redondeados que con áridos procedentes de machaqueo.
- El empleo de un plastificante aumenta la docilidad del hormigón, a igualdad de las restantes características.

### **2.2.2.3 Homogeneidad del Hormigón Fresco.**

Es la cualidad por la cual los diferentes componentes del hormigón aparecen regularmente distribuidos en toda la masa, de manera tal que dos muestras tomadas de distintos lugares de la misma resulten prácticamente iguales. La homogeneidad se consigue con un buen amasado y, para mantenerse, requiere un transporte cuidadoso y una colocación adecuada.

La homogeneidad puede perderse por segregación (separación de los gruesos por una parte y los finos por otra) O por decantación (los granos gruesos caen al fondo y el mortero queda en la superficie, cuando la mezcla es muy líquida). Ambos fenómenos aumentan con el contenido de agua, con el tamaño máximo del árido, con las vibraciones o sacudidas durante el transporte y con la puesta en obra en caída libre

### **2.2.2.4 Masa Específica del Hormigón Fresco.**

Un dato de gran interés como índice de la uniformidad del hormigón en el transcurso de una obra, es la masa específica (densidad) del hormigón fresco, sea sin compactar o sea compactado. La variación de cualquiera de ambos valores, que repercute en la consistencia, indica: una alteración de la granulometría de los áridos, del contenido en cemento o del agua de amasado, por lo que debe dar origen a las correcciones oportunas.

## **2.2.3 Hormigón endurecido**

El hormigón experimenta un endurecimiento progresivo, se transforma de un material plástico a un sólido, evolucionando también las propiedades del hormigón, dependiendo de las características y componentes, además de las condiciones ambientales a las que estará expuesto.

### **2.2.3.1 Densidad aparente**

La densidad del hormigón se define como el peso por unidad de volumen.

Depende de la densidad real y de la proporción en que participan cada uno de los diferentes materiales constituyentes del hormigón. Para los hormigones convencionales, formados por materiales granulares provenientes de rocas no mineralizadas de la corteza terrestre su valor oscila entre 2.35 y 2.55 kg/dm<sup>3</sup>.

La densidad normalmente experimenta ligeras variaciones con el tiempo, las que provienen de la evaporación del agua de amasado hacia la atmósfera y que en total puede significar una variación de hasta alrededor de un 7% de su densidad inicial.

Los hormigones livianos se obtienen por medio de la incorporación de aire, ya sea directamente en la masa del hormigón o incorporada en los áridos utilizando áridos livianos. Su densidad puede alcanzar valores tan bajos como 0.5 kg/dm<sup>3</sup> y se utilizan principalmente cuando se desea obtener mayor aislación térmica y acústica que las del hormigón convencional.

Los hormigones pesados se obtienen mediante el uso de áridos mineralizados, cuya densidad real es mayor que la de los áridos normales. Su densidad puede alcanzar valores hasta de 5.0 kg/dm<sup>3</sup> y se utilizan principalmente cuando se desea obtener aislamiento contra las partículas radiactivas.

### **2.2.3.2 Resistencia**

La resistencia es una de las propiedades más importantes del hormigón, principalmente cuando se le utiliza con fines estructurales. El hormigón, en su calidad de constituyente de un elemento estructural, queda sometido a las tensiones derivadas de las sollicitaciones que actúan sobre éste. Si sobrepasan su capacidad resistente se producirán fracturas, primero de origen local y posteriormente generalizadas, que podrán afectar la seguridad de la estructura.

Por este motivo, los elementos estructurales deben ser dimensionados de manera que las tensiones producidas no sobrepasen la capacidad resistente del material constituyente, lo cual muestra la importancia de conocer esa característica.

#### **A) RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN:**

Puede definirse como la capacidad del hormigón de resistir cargas por unidad de área especificada a los 28 días de edad. Esta se logra mediante el diseño de la mezcla y está en función de la relación agua/cemento, de manera que aumenta la resistencia a la compresión si esta relación disminuye, pero al modificar estos parámetros se puede ver afectada la resistencia a la flexión, resistencia a la tracción y la adherencia acero hormigón.

El procedimiento de ensayo para la determinación de la resistencia a la compresión del hormigón está establecido en NCh 1037.

#### **B) RESISTENCIA A LA TRACCIÓN:**

Teóricamente la resistencia a la tracción del hormigón es aproximadamente 1/8 a 1/12 de la resistencia a compresión, pero no existe una relación lineal; la relación de  $R_t/R_c$  ( $R_c$ : resistencia a la compresión;  $R_t$ : resistencia a la tracción) depende de la calidad del hormigón y es menor cuando mayor es  $R_c$  (Videla, 2010)

La resistencia a tracción del hormigón ha sido considerablemente menos estudiada que la resistencia a compresión, en parte debido a la mayor incertidumbre que existe para su determinación.

Esta incertidumbre empieza con la forma de ejecución del ensayo, existiendo tres formas distintas para efectuarlo: por tracción directa, por flexo-tracción y por hendimiento, cada uno de las cuales conduce a valores sensiblemente diferentes.

### 2.2.3.3 Variaciones de volumen

El hormigón experimenta variaciones de volumen, dilataciones o contracciones, durante toda su vida útil por causas físico - químicas.

El tipo y magnitud de estas variaciones están afectados en forma importante por las condiciones ambientales existentes de humedad y temperatura, y también por los componentes presentes en la atmósfera.

La variación de volumen derivada de las condiciones de humedad se denomina retracción hidráulica, y las que tienen por causa la temperatura, retracción térmica. Por su parte, de las originadas por la composición atmosférica, la más frecuente es la producida por el anhídrido carbónico y se denomina carbonatación.

#### A) RETRACCIÓN HIDRÁULICA

Los parámetros preponderantes en la retracción hidráulica son:

- Composición química del cemento: Influye principalmente en la variación de volumen, dado que ésta deriva del desarrollo del proceso de fraguado. En estas condiciones, si la composición del cemento favorece un fraguado rápido de la pasta, ella también será favorable para una más alta contracción inicial, si existen condiciones ambientales no saturadas de humedad. Por las razones indicadas, un alto contenido de C3A (componente químico del cemento) favorecerá una rápida y alta contracción.
- Finura del cemento: Una mayor finura del cemento favorece también una evolución rápida de sus propiedades, en particular de su fraguado.
- Dosis de cemento: Existe una relación casi directa entre la dosis de cemento y la retracción hidráulica por estas causas.
- Dosis de agua: Dado que un mayor contenido de agua en el interior del hormigón conducirá a una mayor cantidad de fisuras y poros saturados, desde donde se origina la tensión superficial.
- Porosidad de los áridos: El valor de la retracción por esta causa queda condicionado por la finura del árido, siendo mayor cuando ésta aumenta, puesto que ello implica una mayor cantidad de discontinuidades en la masa del árido.
- Humedad: Puesto que ella condiciona la velocidad de evaporación del agua interior del hormigón.

#### B) RETRACCIÓN TÉRMICA:

El hormigón puede experimentar variaciones de volumen causadas por la temperatura, las cuales pueden provenir tanto externamente de la temperatura ambiente como internamente de la generada durante el fraguado y endurecimiento de la pasta de cemento.

Como consecuencia de lo expresado, los principales factores que condicionarán la magnitud de la retracción térmica son los siguientes:

- Variaciones derivadas de causas externas: Magnitud y velocidad de las variaciones de temperatura ambiental
- Variaciones por causas internas:
  - Características del cemento
  - Contenido de C3A
  - Finura de molienda
  - Temperatura en el momento de su incorporación en el hormigón

#### C) RETRACCIÓN POR CARBONATACIÓN:

El proceso de hidratación de la pasta de cemento deja una cierta proporción de cal libre, es decir, sin participar en el proceso químico de fraguado.

Esta cal libre es susceptible de combinarse con el anhídrido carbónico del aire, produciendo carbonato de calcio, combinación química que tiene un carácter contractivo, por lo cual el espesor de hormigón afectado por él disminuye su volumen inicial, generándose la denominada retracción por carbonatación.



En general, el espesor afectado es pequeño, alcanzando sólo algunos milímetros en la zona cercana a la superficie en contacto con el aire. Sin embargo, por el confinamiento que produce el hormigón interior adyacente, esa capa queda sometida a tensiones de tracción, pudiendo fisurarse.

El proceso alcanza mayor magnitud si el hormigón se presenta superficialmente seco, la humedad relativa del aire tiene un grado de humedad intermedio, alrededor de 50%, y el hormigón es poco compacto. Disminuye, en cambio, significativamente si el hormigón está saturado, pues el agua impide la difusión del anhídrido carbónico en los poros del hormigón, o la humedad ambiente es muy baja, inferior a 25%, pues el desarrollo de la carbonatación requiere de un cierto. Grado de humedad mínimo.

En consecuencia, para atenuar los efectos de la carbonatación es necesario efectuar un buen curado del hormigón.

#### D) RETRACCIÓN PLÁSTICA:

Cuando la pasta de cemento es plástica experimenta una retracción volumétrica, cuya magnitud es del orden de 1% del volumen total del cemento seco.

Esta reducción se conoce como retracción plástica, porque se presenta mientras el hormigón está todavía en estado plástico, la pérdida de agua por evaporación de la superficie del hormigón agrava la retracción plástica y puede llevar a un agrietamiento superficial.

Sin embargo, si se evita por completo la evaporación inmediatamente después de la colocación del hormigón, se elimina el agrietamiento.

Por el lado de los materiales, se ha encontrado que la retracción plástica aumenta junto con el contenido de componentes finos en la mezcla de hormigón, de esta forma si agregamos más cemento en la mezcla, si se usa cemento fino o se incorpora polvo de sílice incrementa la tendencia del hormigón a tener fisuras por retracción plástica. El efecto del polvo de sílice fue establecido por Bloom y Bentur en 1995.

#### **2.2.3.4 Propiedades elásticas y plásticas**

Los conocimientos de las propiedades elásticas del hormigón son necesarias para establecer la relación entre tensiones y deformaciones, aspecto que adquiere gran importancia en algunos problemas de tipo estructural, particularmente cuando el cálculo de deformaciones es determinante.

#### A) PROPIEDADES ELÁSTICAS:

El módulo de elasticidad denominado por el símbolo  $E$ , se puede definir como la razón entre el esfuerzo normal a la deformación correspondiente para el esfuerzo de tensión o compresión bajo el límite de proporcionalidad del hormigón (Zabaleta, 1992). Un hormigón con mayor módulo elástico es un material más rígido y menos deformable, por el contrario, con menor módulo elástico manifiesta una mayor deformación bajo acción de cargas.

Lo más frecuente, sin embargo, es que los materiales presenten una combinación de ambos comportamientos, inicialmente elástico y posteriormente inelásticos al aumentar la tensión aplicada.

**B) PROPIEDADES PLÁSTICAS:**

A pesar del carácter frágil señalado para el hormigón para las cargas de velocidad normal de aplicación, éste presenta un comportamiento plástico cuando una determinada carga permanece aplicada un largo tiempo, produciéndose en este caso una deformación denominada fluencia del hormigón.

El conocimiento de la fluencia es necesario para el análisis estructural en el caso del cálculo de deformaciones en elementos de hormigón armado, determinar la pérdida de la tensión aplicada en una estructura de hormigón pretensado o para el cálculo de tensiones a partir de la medición de deformaciones.

El mecanismo que genera la fluencia en el hormigón no es bien conocido, estimándose actualmente que es causado por la combinación de dos tipos de fenómenos: uno derivado de la acomodación de la estructura cristalina de la pasta de cemento, que se denomina fluencia básica, y otro proveniente de la migración interna de la humedad, que se traduce en una retracción hidráulica adicional.

Los principales factores que condicionan la fluencia del hormigón son las características del hormigón, principalmente el tipo y la dosis de cemento, la humedad ambiente, la magnitud de la tensión aplicada y la edad del hormigón en el momento de su aplicación.

**2.2.3.5 Permeabilidad del hormigón**

Corresponde a la factibilidad con la cual los líquidos y los gases pueden viajar a través del hormigón debido a la existencia de un gradiente de presión entre dos caras del mismo (Fernández, 2003)

El hormigón es un material permeable, es decir que, al estar sometido a presión de agua exteriormente, se produce escurrimiento a través de su masa.

El grado de permeabilidad del hormigón depende de su constitución. Las medidas que pueden esbozarse para lograr un mayor grado de impermeabilidad son:

- Utilizar la razón agua/cemento más baja posible, compatible con la obtención de una trabajabilidad adecuada para el uso en obra del hormigón.
- Emplear un contenido apropiado de granos finos, incluido los aportados por el cemento, para lograr un buen relleno del esqueleto de áridos del hormigón. La cantidad ideal de granos finos puede establecerse a partir de los métodos de dosificación granulométricos.

**2.2.3.6 Durabilidad del hormigón**

La durabilidad del hormigón es la capacidad para comportarse satisfactoriamente frente a las acciones físicas y químicas agresivas a lo largo de la vida útil de la estructura, protegiendo también las armaduras y elementos metálicos embebidos en su interior.

Durante toda su vida útil, el hormigón está permanentemente expuesto a las acciones provenientes de agentes externos e internos, que pueden afectar su durabilidad si no se les tiene debidamente en cuenta.

**A) ACCIÓN AGENTES FÍSICOS:**

Producen efectos de mayor importancia sobre el hormigón, son los derivados de las condiciones de tipo ambiental y los procesos erosivos a que pudiera estar expuesto.

**B) ACCIÓN AGENTES QUÍMICOS:**

Puede ser generada internamente en el hormigón o bien provenir de acciones agresivas externas.

## 2.3 Caucho reciclado de neumáticos en desuso

### 2.3.1 Generalidades

Para que el ciclo de vida del neumático sea considerado como modelo de desarrollo sostenible, es necesario fomentar el aprovechamiento del potencial material o energético del mismo tras su vida útil. Los neumáticos fuera de uso se pueden valorizar con aplicaciones diferentes, que van desde reutilización tras el recauchatado, hasta la valoración energética o la obtención de caucho pulverizado o granulado para fabricar diferentes productos (suelas para el calzado, pistas de atletismo, en betunes asfálticos, etc)

### 2.3.2 Componentes del caucho

El neumático de un automóvil pesa aproximadamente 8,6 kg. Y está compuesto de un 14% de caucho natural; 27% de caucho sintético; 28% de humo negro; 14 a 15% de acero; 16 a 17% de fibra textil, suavizantes, óxidos, antioxidantes, etc. Los neumáticos radiales (aquellos que poseen telas metálicas en dirección perpendicular al eje de rotación) son del tipo más utilizado en la actualidad (Castro, 2008)

El caucho es un polímero elástico de origen sudamericano producido por varias plantas tropicales que, después de coagulado para separar el caucho del látex, se transforma en una masa impermeable muy elástica que tiene muchas aplicaciones en la industria.

Químicamente hablando el caucho es un hidrocarburo de naturaleza olefinica, con gran número de enlaces etílicos que forman una cadena de isoprenos ( $C_5H_8$ ). Cisc-1,4-polisopreno, polímero del isopreno o 2 metibutadieno.

Figura 2.1 Descomposición de neumático.



Fuente: Revista Química viva (2012)

### **2.3.3 Tipos de caucho**

#### **2.3.3.1 Caucho natural**

El caucho natural aparece en forma de suspensión coloidal en el látex de plantas productoras de caucho. Una de estas plantas es el árbol de la especie *Hevea Brasiliensis*, de la familia de las Euforbiáceas, originario del Amazonas (Davis, 2001). Otra planta productora de caucho es el árbol del Hule, *Castilloa elástica*, originario de México, muy utilizado desde la época prehispánica para la fabricación de pelotas, instrumento primordial del juego de pelota, deporte religioso y simbólico que practicaban los antiguos mayas. Indonesia, Malasia, Tailandia, China y la India producen actualmente alrededor del 90% del caucho natural.

#### **2.3.3.2 Caucho sintético**

El caucho sintético es aquella sustancia elaborada artificialmente que se parezca al caucho natural. Se obtiene por reacciones químicas conocidas como condensación o polimerización, a partir de determinados hidrocarburos insaturados. Entre los más destacados están el neopreno, buna y caucho de butilo. Los compuestos básicos del caucho sintético llamados monómeros, tienen una masa molecular relativamente baja y forman moléculas gigantes denominadas polímeros. Después de su fabricación, el caucho sintético se vulcaniza.

### **2.3.4 Propiedades del caucho**

#### **2.3.4.1 Propiedades físicas del caucho**

En estado natural el caucho es un hidrocarburo incoloro, sus propiedades físicas varían con la temperatura, a  $-195^{\circ}\text{C}$  es un sólido duro y transparente y en estado de extensión adquiere estructura fibrosa. De  $0$  a  $10^{\circ}\text{C}$  es frágil y opaco, y por encima de  $20^{\circ}\text{C}$  se vuelve blando, flexible y translúcido. Al amasarlo mecánicamente, o al calentarlo por encima de  $50^{\circ}\text{C}$ , el caucho adquiere una textura de plástico pegajoso.

La plasticidad del caucho varía de un árbol a otro y también depende de la cantidad de trabajo dado al caucho desde el estado látex, de las bacterias que lo acompañan e influyen en su oxidación y de otros factores. La plasticidad puede modificarse dentro de ciertos límites por la acción de productos químicos. Cuando el caucho bruto ha sido estirado y deformado durante algún tiempo, no vuelve completamente a su estado original. Si entonces se calienta, la recuperación es mayor que a la temperatura ordinaria. Este fenómeno se denomina deformación residual o estiramiento permanente y es propio del caucho.

El caucho absorbe agua. Los coagulantes usados en el látex al preparar el caucho afectan al grado de absorción de agua; usando ácido clorhídrico, sulfúrico o alumbre se obtienen cauchos con poder de absorción relativamente elevados. El poder de absorción de agua del caucho purificado es muy bajo.

### 2.3.4.2 Propiedades químicas del caucho

La solubilidad del caucho natural en sus disolventes más comunes no es muy elevada. Para hacer una solución de 10% es necesaria cierta disociación, ya sea por medios químicos, empleando un oxidante o por medios físicos, utilizando un molino.

Los disolventes más usados son el benceno y la nafta. Otros buenos disolventes son el tricloroetileno, tetracloroetano, pentacloroetano, tetracloruro de carbono, cloroformo, tolueno, xileno, keroseno y éter. El caucho se hincha primero poco a poco hasta las consistencias de gel y después éste se dispersa formando una solución. El caucho bruto aumenta de 10 a 40 veces su propio peso en disolventes que a la temperatura ordinaria forman gel con el caucho.

La viscosidad de la solución del caucho natural es grande, sin embargo, si es calentado hasta los 200 °C se ablanda reduciendo su viscosidad, pero el número de dobles enlaces se conservan sin alteración. Cuando la temperatura se eleva hasta los 250 °C, los enlaces dobles se separan y tiene lugar la formación de anillos. El cambio a caucho cíclico eleva la densidad y la solubilidad, el producto obtenido es una dura y frágil resina.

### 2.3.5 Proceso productivo

Existen variadas formas de reciclar el neumático como: Incineración, trituración criogénica, trituración mecánica, neumáticos convertidos en energía eléctrica, etc.

Hoy en día existe en Chile, una planta de reciclado de neumáticos. La planta cuenta con moderna tecnología italiana especialmente diseñada para el reciclaje de neumáticos fuera de uso que permite triturarlos y granularlos separando el caucho del acero y la fibra textil, convirtiéndolos en materiales reutilizables.

El proceso productivo utilizado es por medio de trituración mecánica, el cual es un proceso para el reciclaje de neumáticos puramente mecánico y por tanto los productos resultantes son de alta calidad, limpios de todo tipo de impurezas, lo que facilita la utilización de estos materiales en nuevos procesos y aplicaciones. La trituración con sistemas mecánicos es, casi siempre, el paso previo en los diferentes métodos de recuperación y rentabilización de los residuos de neumáticos.

En la figura 2.2 se muestra el proceso de la planta Polambiente. Se separan los neumáticos, extrayendo el caucho donde se obtienen 3 diferentes tamaños para sus distintos usos.

Luego la materia prima ya procesada se almacena en recipientes de aproximadamente una tonelada para ser distribuida.

La planta almacena 700 neumáticos al día, lo que se traduce a 2 toneladas de caucho granulado o en polvo.

Figura 2.2 Proceso de recuperación del caucho.



Fuente: POLAMBIENTE (2014)

## **2.3.6 Hormigón con caucho**

### **2.3.6.1 Características del hormigón con caucho**

Los desechos de caucho han recibido gran atención en los últimos años debido al gran volumen que se genera (en Chile 21000 toneladas al año) y a su dificultad para eliminarlos y/o reutilizarlos.

Existen diversas vías para que el caucho recuperado sea útil (Hernández-Olivares et al. 2002; Segre y Joeques, 2000; Segre y Monteiro, 2002; Chung y Hong, 1999; Guneyisi et al. 2004). Sin embargo, para que armonicen con el ambiente, los desechos de caucho deben ser convertidos a una forma óptima para su mejor utilización.

Existen diferentes métodos o vías de disposición de los desechos de caucho. El método de mezclar hormigón con caucho conlleva a la necesidad de una continua búsqueda de mejorar sus propiedades tanto para un hormigón en estado endurecido, para sus propiedades mecánicas, como en estado fresco, para su trabajabilidad.

En general, el compuesto hormigón-caucho presenta homogeneidad, no observándose segregación del agregado y el caucho se distribuye uniformemente dentro de la mezcla.

Se observó también, que en el concreto sin caucho la primera grieta se propaga inmediatamente provocando una falla instantánea, mientras que en los compuestos hormigón-caucho, este último mantiene ambos lados de la grieta juntos permitiendo que el material soporte parte de la carga a grandes deformaciones. Esta característica representa un aspecto importante para determinadas aplicaciones como concreto para pavimentos, defensas de concreto para autopistas, etc. Resultados similares fueron obtenidos por Huynh y Raghavan (1998) y Hernández y Barluenga (2002).

Ante eso, se han realizado diversos estudios sobre ésta mezcla tan particular, que además se involucra directamente con la problemática ambiental de que grandes cantidades de neumáticos en desuso son desechadas contaminando de una u otra forma el medio ambiente.

### **2.3.6.2 Comportamiento de la mezcla**

#### **2.3.6.2.1 Consistencia**

El hormigón con caucho presenta un asentamiento de cono mayor que hormigones convencionales debido a la baja porosidad del caucho en comparación con los áridos. También se puede afirmar que el hormigón con adiciones de neumáticos fuera de uso fino es más fluido que el hormigón con adiciones de neumáticos grueso, esto se debe a que la partícula de neumático grueso tiene una geometría mucho más angulosa y laminar que la grava, esto dificulta el desplazamiento entre las partículas dentro de la mezcla (Barra, 2009). Un factor importante también que se debe destacar, que esta medida del hormigón está condicionada respecto a la cantidad, tamaño y forma de las partículas. A esto se debe agregar lo expuesto por algunos investigadores (Naik y Rafar, 2002; Barra, 2009) sobre el aumento del contenido de aire que agrega el caucho al hormigón en estado fresco.

#### **2.3.6.2.2. Absorción capilar**

La absorción aumenta con hormigones fabricados con caucho y es mayor cuando mayor es el diámetro de las partículas de caucho (Barra, 2009). Esto puede ser debido a la acción de dos factores: por un lado, la baja adherencia entre el caucho y la pasta de cemento, quedando huecos entre ambos por donde puede circular el agua con mayor facilidad, y por otro lado, a las fisuras producidas por el corte de las probetas.

#### **2.3.6.2.3 Contenido de aire y porosidad**

Al adicionar caucho al hormigón se favorece la aparición de aire en estado fresco a este debido a la baja adherencia entre los granos de caucho y la pasta de cemento. Al igual que con la consistencia el tamaño de las partículas va a producir variaciones de manera que el caucho de menor tamaño tiene una mejor adherencia con la pasta de cemento debido a que su granulometría es mucho más esférica pero nunca mejor que la del árido convencional.

#### **2.3.6.2.4 Resistencia a la compresión**

Según un estudio realizado por la Universidad Central de Venezuela, los valores de resistencia a la compresión de las mezclas a la edad de 28 días y para diferentes tamaños de partícula, se ha observado que los compuestos con tamaños de partículas de caucho denominados fino y grueso muestran una disminución bastante pronunciada al compararlos con los valores del concreto tradicional, siendo el porcentaje de disminución entre 26 y 36%. Además, la utilización del tamaño de partícula denominado grueso del caucho en el compuesto produce un menor valor de la resistencia a la compresión al compararlo con el compuesto que contiene caucho del tamaño denominado fino. En cambio, cuando el tamaño de la partícula es el denominado al azar o mezclado entre sí, el valor de esta propiedad, para el compuesto de concreto, es ligeramente inferior al del concreto tradicional, siendo la variación menor al 8%.

#### **2.3.6.2.5 Resistencia a la tracción**

La resistencia tracción presenta un comportamiento análogo al de la compresión, puesto que el caucho afecta de manera similar a ambas propiedades. Siendo las variaciones entre el valor del concreto tradicional, con los diferentes tamaños de partículas de caucho utilizados, azar, fino y grueso, de 5, 33 y 29% respectivamente. Topcu (1995); Witoszek et al. (2004); y Hernández y Barluenga (2002) encontraron resultados equivalentes.

#### **2.3.6.2.6 Velocidad de pulso ultrasónico**

Se concluye que la velocidad de pulso ultrasónico en el compuesto con tamaño de partículas de caucho al azar, son las que presentan un mejor comportamiento a los 28 días de curado, siendo similar al concreto tradicional.

#### **2.3.6.2.7 Elasticidad**

En el comportamiento del módulo de elasticidad, los valores para el compuesto con caucho con tamaño al azar son muy similares al concreto tradicional, registrando una disminución del 1%. En cambio, en el caso de los compuestos con caucho de tamaño denominado fino la disminución ha sido de 26% y con grueso de 38%, ya que estos compuestos presentan en su estructura interna mayor número de espacios vacíos debido a una distribución menos eficiente en las partículas del agregado, lo que trae como consecuencia un decremento en la velocidad del pulso y por ende en el módulo de elasticidad.

#### **2.3.6.2.8 Acústica**

El mismo comportamiento lo presentan los valores de la impedancia acústica que indica la capacidad de aislamiento acústico, siendo menor para los compuestos que contienen caucho del tamaño fino y grueso y, mayor para los de tamaño al azar.

#### **2.3.6.2.9 Resistencia a impactos y vibraciones**

El contenido de goma en los elementos de hormigón aumenta su resistencia al impacto. Las propiedades elásticas de la goma ayudan a absorber la energía del impacto y a suprimir el sonido del mismo confiriendo al hormigón una capacidad de mitigar energía elástica (Botero et al, 2005)

## 2.4 Pavimentos urbanos de tráfico liviano

### 2.4.1 Generalidades

El pavimento, en arquitectura, es la base horizontal de una determinada construcción (o las diferentes bases de cada nivel de un edificio) que sirve de apoyo a las personas, animales o cualquier pieza de mobiliario. Un pavimento puede tener diversos tipos de revestimiento (madera, cerámica, etc.). También se denomina pavimento a los conectores de vías de comunicación con asfaltos combinados naturales.

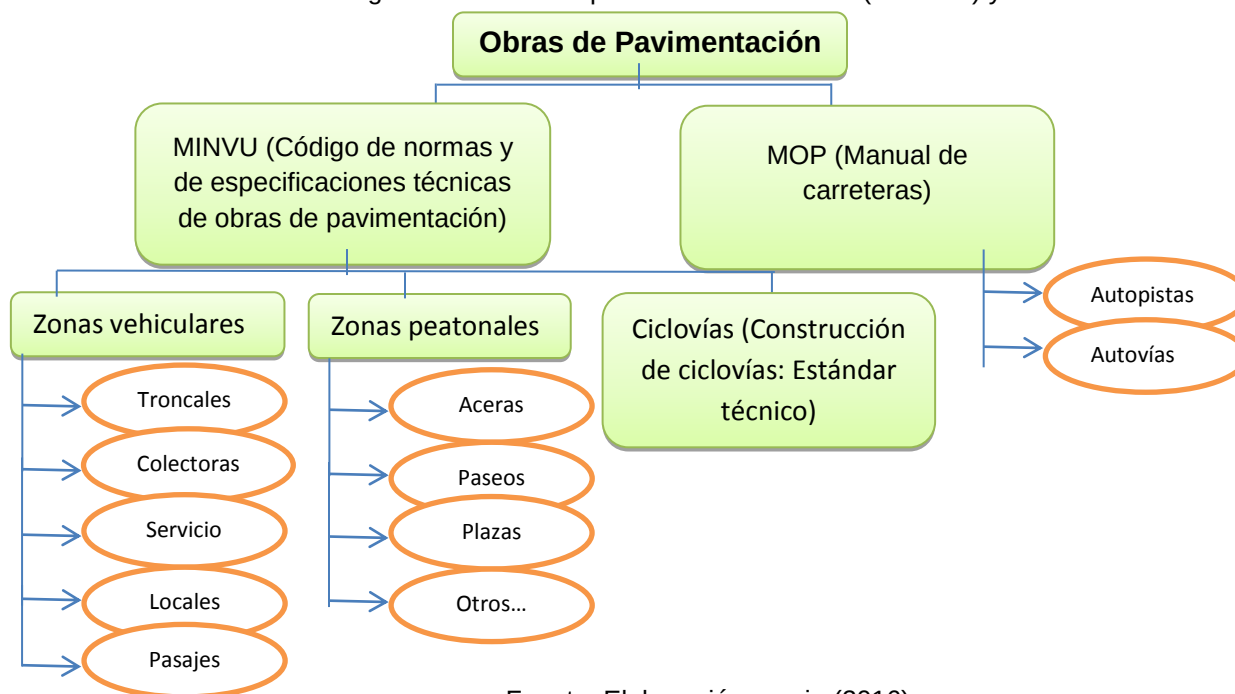
En ingeniería civil, el pavimento forma parte del firme y es la capa constituida por uno o más materiales que se colocan sobre el terreno natural o nivelado, para aumentar su resistencia y servir para la circulación de personas o vehículos. Entre los materiales utilizados en la pavimentación urbana, industrial o vial están los suelos con mayor capacidad de soporte, los materiales rocosos, el hormigón y las mezclas asfálticas.

Como decía la definición anterior, pavimento no es sólo el lugar donde circulan vehículos como camiones, buses, automóviles, etc. Existen pavimentos de hormigón y asfalto, que se encuentran en la vía pública, pero transitan personas (como las aceras, plazas, accesos peatonales), bicicletas (como es el caso de las ciclovías). Los cuales no son exigentes como pavimentos para uso de vehículos (normalizados por el Ministerio de Obras públicas MOP). Los tipos de pavimentos para tráfico de personas y bicicletas están también regulados, pero el organismo competente en este caso es el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU).

En toda obra de pavimentación existen normas de procedimientos que tienen por objeto alcanzar los mejores resultados en los diversos aspectos relacionados con ella, como son: la estética, la funcionalidad, la resistencia estructural y la duración. Cada especialidad de la construcción posee, en tal sentido, normas o especificaciones propias.

Las obras de pavimentación del MINVU se separan en zonas vehiculares y zonas peatonales, como muestra el esquema 2.3, donde el Código de Normas y Especificaciones Técnicas de obras de Pavimentación reúne las especificaciones aplicables a estas Obras de Pavimentación Urbanas, en el caso de las ciclovías existe un manual especial llamado Construcción de ciclovías: Estandar técnico.

Figura 2.3 Obras de pavimentación MINVU (Urbanas) y MOP.



Fuente: Elaboración propia (2016).



El Código de Normas y Especificaciones Técnicas de obras de Pavimentación reúne las especificaciones aplicables a las Obras de Pavimentación Urbana, es decir, a las que se ejecutan dentro del radio urbano de todas las Comunas del país (con excepción de la Comuna de Santiago), en todos los casos en que, de acuerdo a la legislación vigente, están sometidas a la Supervisión de los Servicios de Vivienda y Urbanización (SERVIU).

Dentro de estas obras de pavimentación urbana están las antes mencionadas destinadas al tránsito de personas y bicicletas, para fines de esta tesis, se considerarán los pavimentos de competencia del MINVU que son destinados para el tránsito de peatones y bicicletas, no vehículos motorizados. Se les llamará a estos pavimentos urbanos para englobar lo peatonal más las ciclovías “Pavimentos Urbanos de Tráfico Liviano”

## **2.4.2 Definición Pavimento Urbano de tráfico liviano**

Se le llamará así a todo pavimento urbano regulado por el MINVU, que no esté destinado al tránsito de vehículos de ningún tipo, según la clasificación de vehículos del MOP (Esquema 2.3)

## **2.4.3 Sobre los pavimentos**

### **2.4.3.1 Ciclovías (según Construcción de ciclovías: Estándar técnico, del MINVU)**

Con el objeto de definir criterios técnicos adecuados para la construcción de los proyectos de ciclovías comprometidos, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo, a través de su División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional, elaboró el presente documento que establece especificaciones mínimas para la infraestructura de las ciclovías, en términos de durabilidad, seguridad y funcionalidad, de manera de contribuir a la habilitación de redes viales que posibiliten un tránsito seguro, cómodo y expedito para los ciclistas.

#### **2.4.3.1.1 Pavimento de Hormigón**

Cuando se defina que el pavimento de la ciclovía sea hormigón, éste debe consistir en losas de hormigón de longitud, espesor y ancho estipulados en el proyecto, considerando un espesor mínimo de 10 cm.

#### **2.4.3.1.2 Materiales**

**Cemento:** El cemento debe ser Portland Puzolánico conforme a los requisitos establecidos por la NCh 148. El cemento se debe medir en peso, ya sea con básculas o usando como unidad el saco entero de 42,5 Kg. Se acepta una tolerancia máxima de + - 1%.

**Áridos:** Los áridos deben ser chancados y cumplir con los requisitos establecidos por la Norma NCh 163. Los áridos se deben medir en peso, ya sea con básculas o romanas. Se acepta una tolerancia máxima de un + - 3% para cada fracción.

**Agua:** El agua de amasado debe ser potable; en caso contrario, debe cumplir con los requisitos establecidos por la Norma NCh 1498.

Se debe preparar usando los materiales indicados anteriormente, considerando dosis de cemento mínima de 297,5 Kg./m<sup>3</sup> de hormigón elaborado en base a cemento corriente. Se acepta un 10% menos de dosificación con el uso de cementos de alta resistencia debidamente certificados por una planta que cumpla con las normas NCh.

Su confección debe ser tal que a los 28 días alcance una resistencia media a la compresión de 280kg/cm<sup>2</sup> y una resistencia mínima individual no inferior a 250kg/cm<sup>2</sup>; para efectos del diseño de la dosificación respectiva ha de considerarse la resistencia característica con un 20% de fracción defectuosa, y un coeficiente de variación máximo de 10% para hormigones preparados en plantas que cumplan la NCh 170.

El compuesto de curado debe cumplir con las Normas ASTM C309-58 o AASHTO M148-62, y estar fabricado en base a resinas, reflejar más del 60% de la luz solar, poseer alta viscosidad y capacidad de secado en tiempo máximo de 30 min.; además, debe poderse aplicar sin desmedro de sus propiedades aún en presencia de agua superficial. No se aceptan compuestos de curado en base a emulsiones.

### **2.4.3.2 Aceras y otros (según Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación, Minvu)**

#### **2.4.3.2.1 Pavimento de hormigón**

Los pavimentos de hormigón, pueden ser con juntas simples, con barras en juntas o continuamente armados, se construirán sobre una base preparada, de acuerdo a las especificaciones de este código, además de las Especificaciones Técnicas Especiales de cada proyecto, y en conformidad a las dimensiones, espesores y perfiles de los Planos respectivos.

Se debe cumplir con las disposiciones de las Normas Técnicas Oficiales del Instituto Nacional de Normalización u otras que se indiquen y en especial de la norma NCh. 170 Of. 1985.

#### **2.4.3.2.2 Materiales**

Los materiales que se usen en la preparación del hormigón y en la construcción de los pavimentos, deberán cumplir con los requisitos de las normas que apliquen a cada material y, de ser el caso, de las Especificaciones Técnicas Generales del proyecto. Para asegurar la calidad de los materiales se utilizan las siguientes normas o recomendaciones:

**Cemento:** Según Norma Chilena NCh. 148.Of.1968.

**Áridos:** Según Norma Chilena NCh. 163.Of.1979.

**Agua:** Según Norma Chilena NCh. 1498.Of.1982.

**Aditivos y adiciones:** Según Norma Chilena NCh. 2182.Of.1995.

El sistema de curado deberá estar certificado, y los materiales que se utilicen tendrán probada eficiencia en la protección del hormigón, de manera que éste, logre obtener todas las propiedades especificadas.

Los materiales de sello de juntas pueden ser a base de asfalto, poliuretanos, materiales pre moldeados, elastoméricos, u otros. Se considera el tiempo de deterioro del material en servicio y se preserva de forma de garantizar la continuidad de su función sellante, según indicaciones de aplicación y conservación del fabricante.

Las armaduras en elementos de hormigón armado deberán cumplir con las exigencias que se establecen a continuación, según el tipo y calidad del acero especificado:

A) BARRAS DE ACERO: Según Norma Chilena NCh. 204.Of.2006.

B) BARRAS DE ACERO CON RESALTE: Según Normas Chilenas NCh. 204.Of.2006 y NCh. 211.Of.1970.

C) MALLA ESTRUCTURAL: Según Norma Chilena NCh. 218.Of.1977.

D) MALLA ESTRUCTURAL CON RESALTE: Según Norma Chilena NCh. 219.Of.1977.

E) BARRAS DE REFUERZO: Según Norma Chilena NCh. 434.Of.1970.

Adicionalmente, es aconsejable que las armaduras estén libres de suciedad, lodo, escamas sueltas, aceite u otra sustancia extraña, al momento de la colocación del hormigón.

#### **2.4.3.2.3 Dosificación del hormigón**

La dosificación de los componentes del hormigón para pavimentos, consiste en determinar las cantidades mínimas de cemento, razón agua / cemento, proporción de áridos que se adecúen para cumplir con los valores de resistencias y otras propiedades que señalen las Especificaciones Técnicas del proyecto.

#### 2.4.3.2.4 Especificaciones del hormigón

Los requisitos mínimos recomendados para el hormigón en pavimentos, son los entregados en la siguiente tabla:

Tabla 2.1 Requisitos pavimentos de hormigón.

| REQUISITOS                                                                        | PAVIMENTOS DE HORMIGÓN |        |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------|--------|
|                                                                                   | CALZADAS               | ACERAS |
| Mínima resistencia especificada a compresión a 28 días $f_c$ (MPa) <sup>(1)</sup> | 35                     | 25     |
| Fracción defectuosa (%)                                                           | 20                     | 20     |
| Dosis mínima de cemento ( $\text{kg/m}^3$ ) <sup>(2)</sup>                        | 320                    | 280    |

Fuente: Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación Minvu (2008).

(1) Este valor, es un valor medio y está expresado sobre la base de probetas cúbicas de 20 cm, pero puede ser determinado en probetas cilíndricas o de otras formas geométricas, convirtiéndolo a continuación a cubos de 20 cm, acorde al Anexo A de la NCh. 170 Of.1985. La resistencia a compresión especificada del proyecto, se considera como la resistencia a la flexotracción de diseño del pavimento multiplicada por el valor 7,8.

(2) El valor de la dosis mínima corresponde al uso de cemento de grado corriente. En caso de emplear un cemento con un grado alto de resistencia, la dosis puede reducirse hasta en un 10%, cumpliendo necesariamente la resistencia a compresión especificada para el hormigón resultante.

El valor del tamaño máximo del árido, es el mayor posible que cumpla:  $D_n \leq 1/3$  del espesor de la losa y que la profundidad del corte sea mayor al tamaño máximo del árido.

El asentamiento de cono del hormigón se determina sobre la base de las necesidades de los equipos y maquinarias que se utilizarán en la construcción del pavimento y que asegure una buena calidad de terminación. De ser requerido se puede utilizar aditivos incorporadores de aire, sobre todo para equipos con molde deslizante.

## 2.5 Resumen para diseñar hormigón pavimento urbano tráfico liviano

La tabla 2.5 muestra un resumen que servirá de referencia para diseñar el hormigón, este es un extracto de los manuales y normas estudiadas en la parte teórica.

Tabla 2.2 Cuadro resume para diseño de hormigón.

| Propiedad                       | CICLOVIAS              | ACERAS                 | PAVIMENTOS EN GENERAL    | Se utilizará                   | Observación                         |
|---------------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| Resistencia media a compresión  | 280 kg/cm <sup>2</sup> | 250 kg/cm <sup>2</sup> | Según proyecto           | 280 kg/cm <sup>2</sup>         | Peor de los casos                   |
| Resistencia media flexotracción | No especifica          | No especifica          | 30-50 kg/cm <sup>2</sup> | No determinante para el diseño | Ensayo debe estar en este rango     |
| Fracción defectuosa             | 20%                    | 20%                    | 10-20%                   | 20%                            | 80% nivel de confianza              |
| Asentamiento de cono            | No especifica          | No especifica          | 2-15 cm según proyecto   | 6 cm                           | Valor medio                         |
| Tamaño máximo nominal           | No especifica          | No especifica          | 40-20 mm                 | 20 mm                          | Tamaño máximo de gránulos de caucho |

Fuente: Elaboración propia (2016)

## **CAPITULO 3: DISEÑO EXPERIMENTAL**

### **3.1 Generalidades**

En este capítulo se presentan los antecedentes para la aplicación y desarrollo de la investigación. Se definirán conceptos, términos y los materiales elegidos para la elaboración de los distintos tipos de hormigón a estudiar, se describirán también los ensayos a realizar a las distintas probetas sin caucho y con variables reemplazo de caucho por grava,

El desarrollo experimental parte con el diseño de un hormigón sin caucho (Hormigón patrón, en adelante HP), que servirá de referencia en el estudio de hormigones con diferentes dosis de caucho.

Se prepararán cuatro grupos de probetas de hormigón con caucho con dosis de caucho de 10%, 20% y 30%, respectivamente, estos porcentajes de reemplazo del volumen de grava en el hormigón.

### **3.2 Planteamiento y definición de variables**

#### **3.2.1 Variables Independientes**

- a) Cantidades de caucho a sustituir: En la línea de investigación del presente estudio, las variables independientes empleadas corresponden al porcentaje de caucho a sustituir, en rango de 10 a 30%, sustituido en el volumen del árido grueso.
- b) Tamaño del caucho: El tamaño de caucho a utilizar será el gránulo de 15-25 mm, que es el que se puede reemplazar el árido grueso.

#### **3.2.2 Variables Dependientes**

- a) Resistencia a la compresión: Esta propiedad mecánica será evaluada de acuerdo a la NCh1037.of.77.
- b) Resistencia a la flexotracción: La NCh 1038.of.77 describe el procedimiento de este ensayo.
- c) Absorción de agua: La absorción se relaciona con la resistencia del hormigón a la acción de agentes atmosféricos

#### **3.2.3 Variables de control**

- a) Tipo de cemento: Se utilizó cemento portland puzolánico grado corriente, según la NCh 148.of.68. Este tipo de cemento se recomienda en los manuales técnicos de pavimentos que son motivo de estudio de esta tesis.
- b) Tamaño máximo nominal del árido: Este tamaño será 20mm, ya que corresponde al tamaño del caucho que se puede conseguir en gránulo para reemplazo de gravilla.
- c) Razón agua/cemento:0,5

### 3.3 Factorial del experimento

Con las variables independientes (factores) se realizó el factorial de experimento, el cual determinó los hormigones fabricados con distintas cantidades de caucho. La tabla 3.1 identifica los tipos de hormigón.

Tabla 3.1. Determinación de hormigones de ensayo.

| Porcentaje de caucho | 0                                   | 10                                                    | 20                                                   | 30                                                   |
|----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Sigla                | HP                                  | HC10                                                  | HC20                                                 | HC30                                                 |
| Definición           | Hormigón patrón, no contiene caucho | Hormigón 10% de caucho 15-25 mm en reemplazo de grava | Hormigón 20% de caucho 15-25mm en reemplazo de grava | Hormigón 30% de caucho 15-25mm en reemplazo de grava |

Fuente: Elaboración propia (2016)

Se fabricarán 4 tipos de hormigones en total. Cada ensayo constará de 3 probetas por hormigón. Un total de 36 probetas.

### 3.4 Ensayos

#### 3.4.1 Resistencia a compresión

La resistencia a la compresión se mide por el ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas (en nuestro caso cúbicas), según la NCh 1037.of.77. Esta norma establece el método para efectuar el ensayo a la rotura de estas probetas, mediante el ensayo de prensa.

Figura 3.1: Prensa de ensayo a compresión laboratorio de hormigones Universidad de Valparaíso



Fuente: Elaboración propia (2016)

### 3.4.2 Resistencia a flexo-tracción

Este tipo de resistencia se mide utilizando el ensayo de la NCh 1038.of.77 “Hormigón - Ensayo de tracción por flexión”. Esta norma establece los procedimientos para efectuar el ensayo de tracción por flexión a la rotura de probetas prismáticas de hormigón simplemente apoyadas.

Figura 3.2 Prensa de ensayo a flexo-tracción laboratorio de hormigones Universidad de Valparaíso.



Fuente: Elaboración propia (2016)

### 3.4.3 Absorción de agua

El método para medir la absorción de agua del hormigón endurecido, se realiza sumergiendo las probetas al agua durante 24 horas, cumpliendo el plazo se seca superficialmente y se pesa. Luego de eso las probetas se dejan en un horno, se dejan ahí 24 horas más. Después de este tiempo se pesan nuevamente y se determina la absorción de agua de las probetas con la siguiente expresión:

$$A = 100 (P_{ss} - P_s) / P_s \%$$

A: Absorción del hormigón

P<sub>ss</sub>: Peso saturado superficialmente seco, en gramos.

P<sub>s</sub>: Peso seco al horno, en gramos.



## **CAPÍTULO 4: DESARROLLO EXPERIMENTAL**

## 4.1 Generalidades

Este capítulo presenta la fase operativa que implica todo el trabajo desarrollado en el laboratorio para determinar las variables descritas en el capítulo anterior. Este consiste en describir todo el proceso para caracterizar los áridos, el cual permitió la determinación de la dosificación del hormigón patrón. En función de ésta se elaboró las dosificaciones para cada tipo de hormigón con caucho.

Luego se describen los procesos relacionados con la fabricación, colocación, desmolde, curado y almacenamiento de las probetas para los ensayos.

## 4.2 Materiales

- a) CEMENTO: Se utilizó cemento portland puzolánico marca Melón grado corriente. La NCh 148.of.68 “Cemento - Terminología, clasificación y especificaciones generales” se refiere a este tipo de cemento y menciona que posee un contenido de puzolana menos a 30% por lo que presenta un moderado calor de hidratación y velocidad de endurecimiento.
- b) AGUA: Para la fabricación del hormigón se utilizó agua potable cumpliendo con los requerimientos de la norma NCh 1498.of.82 “Hormigón – Agua de amasado – Requisitos”
- c) ARIDOS: Los áridos, tanto los finos como los gruesos que se utilizaron para la fabricación de hormigones, deben cumplir con las exigencias de la NCh 163. “Áridos para morteros y hormigones – requisitos generales” Los áridos para la fabricación de las probetas será chancado proveniente de la planta Conovia.
- d) CAUCHO: Se utilizó caucho reciclado de neumáticos fuera de uso obtenido mediante trituración mecánica por la planta de reciclaje Polambiente. Este material posee también pequeñas cantidades de fibra debido a la composición de los neumáticos.

Figura 4.1 Caucho granulado



Fuente: Elaboración propia (2016)

### 4.3 Caracterización de los áridos

Los áridos utilizados provenientes de la planta de áridos Conovia, tienen las siguientes propiedades físicas.

Tabla 4.1 Caracterización áridos.

| ARIDOS          | GRAVA             | ARENA            |
|-----------------|-------------------|------------------|
| CARACTERÍSTICAS | Tamaño máx. 20 mm | Tamaño máx. 5 mm |
| FORMA DEL ARIDO | Chancado          | Mixta            |

Fuente: elaboración propia (2016)

#### 4.3.1 Granulometría Grava.

Este procedimiento se ejecutó de acuerdo a lo establecido por la NCh 165.of.77 “Áridos para morteros y hormigones - Tamizado y determinación de la granulometría”.

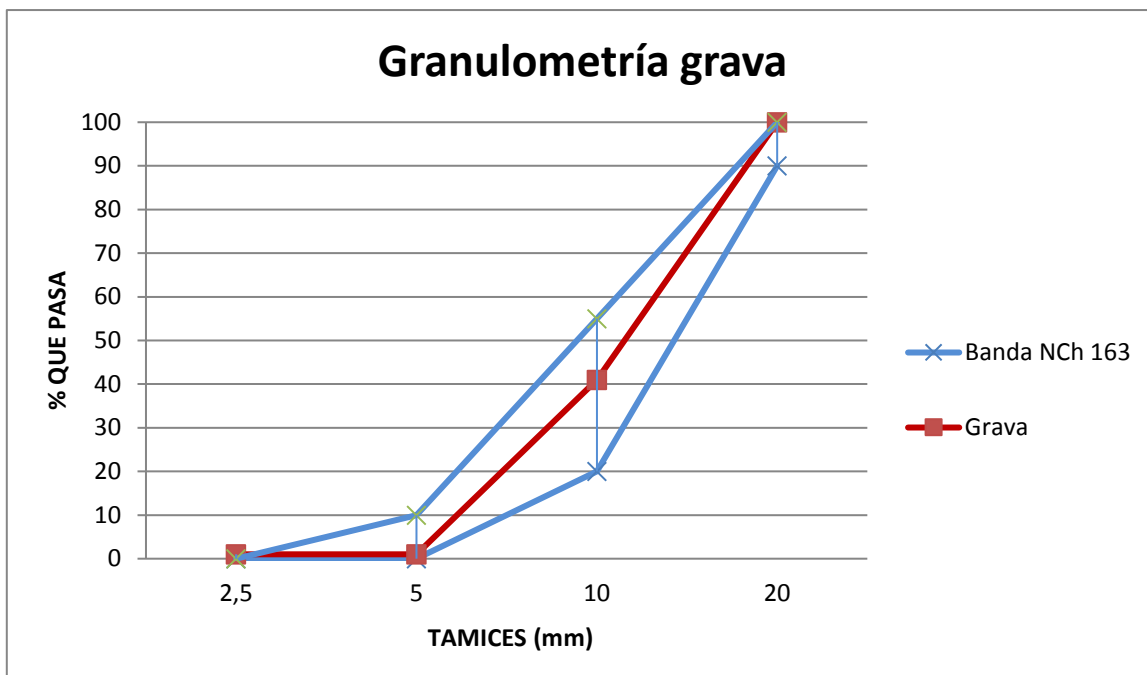
Tabla 4.2 Granulometría de grava

| MASA SECA (gr) | TAMIZ (mm) | MASA RETENIDA (gr) | % RETENIDO | % QUE PASA | BANDA NCH 163 |
|----------------|------------|--------------------|------------|------------|---------------|
| 5023           | 20         | 0                  | 0          | 100        | 90 - 100      |
|                | 12.5       | 1174               | 23         | 77         | -             |
|                | 10         | 1786               | 36         | 41         | 20 - 55       |
|                | 5          | 1998               | 40         | 1          | 0 - 10        |
|                | <5         | 59                 | 1          | 0          |               |
|                |            |                    |            |            |               |
| SUMATORIA      |            | 5017               | 100        |            |               |
| % ERROR        |            | 0,12               |            |            |               |

Fuente: Elaboración propia (2016).

La figura 4.2 muestra la granulometría y banda granulométrica requerida para la grava en la NCh 163. La curva de la grava utilizada no sobrepasa las curvas de la banda, por lo tanto, cumple para ser utilizada

Figura 4.2 Granulometría grava.



Fuente: Elaboración propia (2016)

### 4.3.2 Densidades Grava

#### a) Densidades Reales, Neta y Absorción

Para determinar densidad real y neta se utilizó el protocolo dispuesto por la NCh 1117.of.1977 “Áridos para morteros y hormigones – Determinación de las densidades real y neta de la absorción de agua de las gravas”

##### i) Densidad real del árido saturado superficialmente seco:

$$\rho_{RT} = \frac{M_{SSS}}{M_{SSS} - M_{SUM}} \times 1000 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

##### ii) Densidad real del árido seco:

$$\rho_{RS} = \frac{M_S}{M_{SSS} - M_{SUM}} \times 1000 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

##### iii) Densidad neta:

$$\rho_N = \frac{M_S}{M_S - M_{SUM}} \times 1000 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

##### iv) Absorción:

$$\alpha = \frac{M_{SSS} - M_S}{M_S} \times 100 \text{ (\%)}$$

Dónde:

Ms: Masa seca

Msss: Masa saturada superficialmente seca

Msum: Masa sumergida

La tabla 4.3 muestra las densidades y absorción de la grava en función de los conceptos definidos anteriormente

Tabla 4.3 Densidades y absorción de la grava.

| MASA (gr) |     | $\rho_{RT} \text{ (Kg/m}^3\text{)}$ | $\rho_{RS} \text{ (Kg/m}^3\text{)}$ | $\rho_N \text{ (Kg/m}^3\text{)}$ | $\alpha \text{ \%}$ |
|-----------|-----|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|---------------------|
| Sumergida | 284 | 2690                                | 2649                                | 2764                             | 1.57                |
| SSS       | 452 |                                     |                                     |                                  |                     |
| Seca      | 445 |                                     |                                     |                                  |                     |

Fuente: Elaboración propia (2016).

b) Densidad aparente

Para obtener las densidades aparentes de la grava, los ensayos se realizan de acuerdo a la norma NCh 1116.of.77.

i) Densidad aparente suelta

$$\rho_{as} = \frac{ms}{v} \times 1000 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

Donde

ms: Masa del árido suelto que llena el recipiente (kg)

v: Capacidad volumétrica del recipiente ( $m^3$ )

ii) Densidad aparente compactada

$$\rho_{ac} = \frac{mc}{v} \times 1000 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

Donde

mc: Masa del árido compactado que llena el recipiente (kg)

v: Capacidad volumétrica del recipiente ( $m^3$ )

Tabla 4.4 Densidad aparente grava

| CARACTERÍSTICAS                        | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 | Densidad promedio |
|----------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-------------------|
| Masa árido suelto + recipiente (kg)    | 11,286    | 11,330    | 11,373    |                   |
| Masa árido compactado+ recipiente (kg) | 11,910    | 11,923    | 11,912    |                   |
| Masa recipiente (kg)                   | 3,675     | 3,675     | 3,675     |                   |
| Volumen recipiente (cm3)               | 5033      | 5033      | 5033      |                   |
| $\rho_{as} \text{ (Kg/m}^3\text{)}$    | 1512      | 1520      | 1529      | 1520              |
| $\rho_{ac} \text{ (Kg/m}^3\text{)}$    | 1636      | 1639      | 1637      | 1637              |

Fuente: Elaboración propia (2016)

#### 4.3.3 Granulometría arena.

Este procedimiento se ejecutó de acuerdo a lo establecido por la NCh 165.of.77 “Áridos para morteros y hormigones - Tamizado y determinación de la granulometría”.

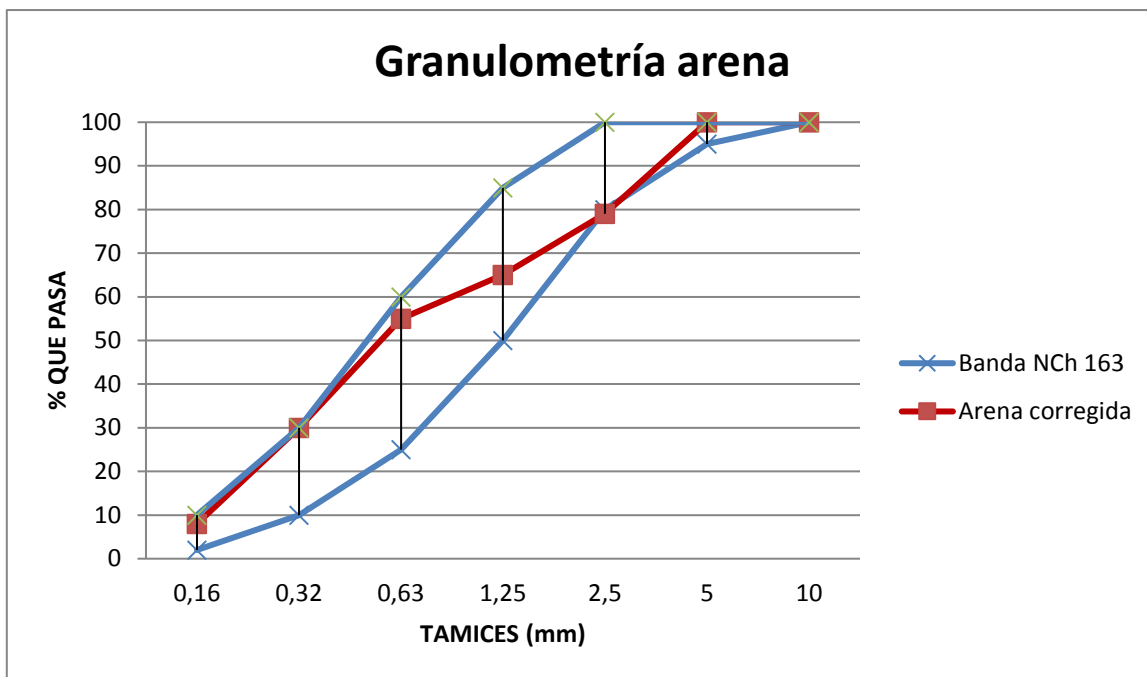
Tabla 4.5 Granulometría de arena.

| MASA SECA (gr) | TAMIZ (mm) | MASA RETENIDA (gr) | % RETENIDO | % QUE PASA | % QUE PASA CORREGIDO | BANDA NCH 163 |
|----------------|------------|--------------------|------------|------------|----------------------|---------------|
| 556            | 10         | 0                  | 0          | 100        | 100                  | -             |
|                | 5          | 14                 | 3          | 97         | 100                  | 95 - 100      |
|                | 2.5        | 113                | 20         | 77         | 79                   | 80 - 100      |
|                | 1.25       | 75                 | 13         | 64         | 65                   | 50 - 85       |
|                | 0.63       | 55                 | 10         | 54         | 55                   | 25 - 60       |
|                | 0.32       | 139                | 25         | 29         | 30                   | 10 - 30       |
|                | 0.16       | 114                | 21         | 8          | 8                    | 2-10          |
|                | < 0.16     | 44                 | 8          | 0          | -                    |               |
| SUMATORIA      |            | 554                | 100        |            |                      |               |
| % ERROR        |            | 0,34               |            |            |                      |               |
| MÓDULO FINURA  |            |                    |            | 2,71       | 2,63                 |               |

Fuente: Elaboración propia (2016).

La figura 4.3 muestra la granulometría y banda granulométrica correspondiente a la arena fina descrita por la NCh 163.

Figura 4.3 Granulometría arena corregida.



Fuente: Elaboración propia (2016).

En el gráfico se aprecia la arena corregida, esta pasa casi en su totalidad por las bandas recomendadas por la NCh 163 solo en la malla 2,5 esta fuera por 1%.



#### 4.3.4 Densidades Arena

##### c) Densidades Reales, Neta y Absorción

Para determinar densidad real y neta se utilizó el protocolo dispuesto por la NCh 1239.of.1977 “Áridos para morteros y hormigones – Determinación de las densidades real y neta de la absorción de agua de las arenas”

##### v) Densidad real del árido saturado superficialmente seco

$$\rho_{Rss} = \frac{m_{SSS}}{Ma + m_{SSS} - Mm} \times 1000 \left( \frac{Kg}{m^3} \right)$$

##### vi) Densidad real del árido seco:

$$\rho_{RS} = \frac{ms}{Ma + m_{SSS} - Mm} \times 1000 (Kg/m^3)$$

##### vii) Densidad neta:

$$\rho_N = \frac{ms}{Ma + ms - Mm} \times 1000 (Kg/m^3)$$

##### viii) Absorción:

$$\alpha = \frac{m_{SSS} - ms}{ms} \times 100 (\%)$$

Dónde:

Ma: Masa del matraz con agua.

Mm: Masa del matraz con agua y arena

ms: Masa seca

msss: Masa saturada superficialmente seca

La tabla 4.6 muestra las densidades y absorción de la grava en función de los conceptos definidos anteriormente

Tabla 4.6 Densidades y absorción de la arena.

| MASA (gr)     |     |      | $\rho_{Rss} (Kg/m^3)$ | $\rho_{RS}(Kg/m^3)$ | $\rho_N(Kg/m^3)$ | $\alpha \%$ |
|---------------|-----|------|-----------------------|---------------------|------------------|-------------|
| Matraz + agua | 664 | Ma   | 2632                  | 2579                | 2722             | 2.04        |
| Ma + Arena    | 726 | Mn   |                       |                     |                  |             |
| SSS           | 100 | Msss |                       |                     |                  |             |
| Seca          | 98  | Ms   |                       |                     |                  |             |

Fuente: Elaboración propia (2016).

d) Densidad aparente

Para obtener las densidades aparentes de la arena, los ensayos se realizan de acuerdo a la norma NCh 1116.of.77.

iii) Densidad aparente suelta

$$\rho_{as} = \frac{ms}{v} \times 1000 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

Donde

ms: Masa del árido suelto que llena el recipiente (kg)

v: Capacidad volumétrica del recipiente ( $m^3$ )

iv) Densidad aparente compactada

$$\rho_{ac} = \frac{mc}{v} \times 1000 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

Donde

mc: Masa del árido compactado que llena el recipiente (kg)

v: Capacidad volumétrica del recipiente ( $m^3$ )

Tabla 4.7 Densidad aparente arena

| CARACTERÍSTICAS                        | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 | Densidad promedio |
|----------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-------------------|
| Masa árido suelto + recipiente (kg)    | 2,956     | 2,979     | 2,981     |                   |
| Masa árido compactado+ recipiente (kg) | 3,176     | 3,166     | 3,171     |                   |
| Masa recipiente (kg)                   | 1,312     | 1,312     | 1,312     |                   |
| Volumen recipiente (cm3)               | 1040      | 1040      | 1040      |                   |
| $\rho_{as} \text{ (Kg/m}^3\text{)}$    | 1581      | 1603      | 1605      | 1596              |
| $\rho_{ac} \text{ (Kg/m}^3\text{)}$    | 1792      | 1783      | 1788      | 1788              |

Fuente: Elaboración propia (2016).

#### 4.4 Caracterización del caucho

A pesar de este no ser un árido se le hizo la granulometría del caucho tratándolo como árido grueso, debido a que se incorporará en reemplazo de este árido. Para poder dosificarlo se calcula su densidad aparente.

##### 4.4.1 Granulometría del caucho

El procedimiento para realizarla es el mismo de la grava, a excepción de su secado al horno, ya que el material se desintegra a esas temperaturas. Como el caucho adquirido contenía una gran cantidad de fino, se cortó el material en la malla n° 5.

Tabla 4.8 Granulometría del caucho.

| MASA SECA (gr) | TAMIZ (mm) | MASA RETENIDA (gr) | % RETENIDO | % QUE PASA | BANDA NCH 163 |
|----------------|------------|--------------------|------------|------------|---------------|
| 2026           | 20         | 0                  | 0          | 100        | 90 - 100      |
|                | 12.5       | 426                | 20         | 80         | -             |
|                | 10         | 886                | 45         | 35         | 20 - 55       |
|                | 5          | 712                | 35         | 0          | 0 - 10        |
|                | <5         | 0                  | 0          | 0          | 0 - 5         |
| SUMATORIA      |            | 2024               | 100        |            |               |
| % ERROR        |            | 0,10               |            |            |               |

Fuente: Elaboración propia (2016).

##### 4.4.2 Densidad aparente caucho

Se calcula la densidad aparente del caucho.

Tabla 4.9 Densidad aparente caucho.

| CARACTERÍSTICAS                        | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 | Densidad promedio |
|----------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-------------------|
| Masa árido suelto + recipiente (kg)    | 5,894     | 5,911     | 5,936     |                   |
| Masa árido compactado+ recipiente (kg) | 6,269     | 6,264     | 6,267     |                   |
| Masa recipiente (kg)                   | 3,675     | 3,675     | 3,675     |                   |
| Volumen recipiente (cm3)               | 5033      | 5033      | 5033      |                   |
| $\rho_{as}(Kg/m^3)$                    | 441       | 444       | 449       | 445               |
| $\rho_{ac}(Kg/m^3)$                    | 515       | 514       | 515       | 515               |

Fuente: Elaboración propia (2016).

##### 4.4.3 Densidad neta caucho

$$\rho_{NC} = 1140 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

#### 4.5 Proporción de áridos

Según el método idiem, para aceras y grava chancada con tamaño máximo nominal 20mm, el porcentaje de arena es 44%, pero como la dosis de cemento está entre 300 y 400 kg/m<sup>3</sup> se disminuye 2%. Para determinar el correcto porcentaje de áridos se ocupa la ecuación en la malla #5 ocupando este 42%, la ecuación queda así:

$$97A + 5G = 42 (A + G)$$

$$55A = 37G$$

$$A = 37/(37+55) = 0,40$$

$$G = 55/(37+55) = 0,60$$

Grava = 60%

Arena = 40%

#### 4.6 Granulometría grava/ arena (HP)

La tabla 4.10 muestra la granulometría de los áridos combinados arena y grava, esta es la utilizada para diseñar el hormigón patrón.

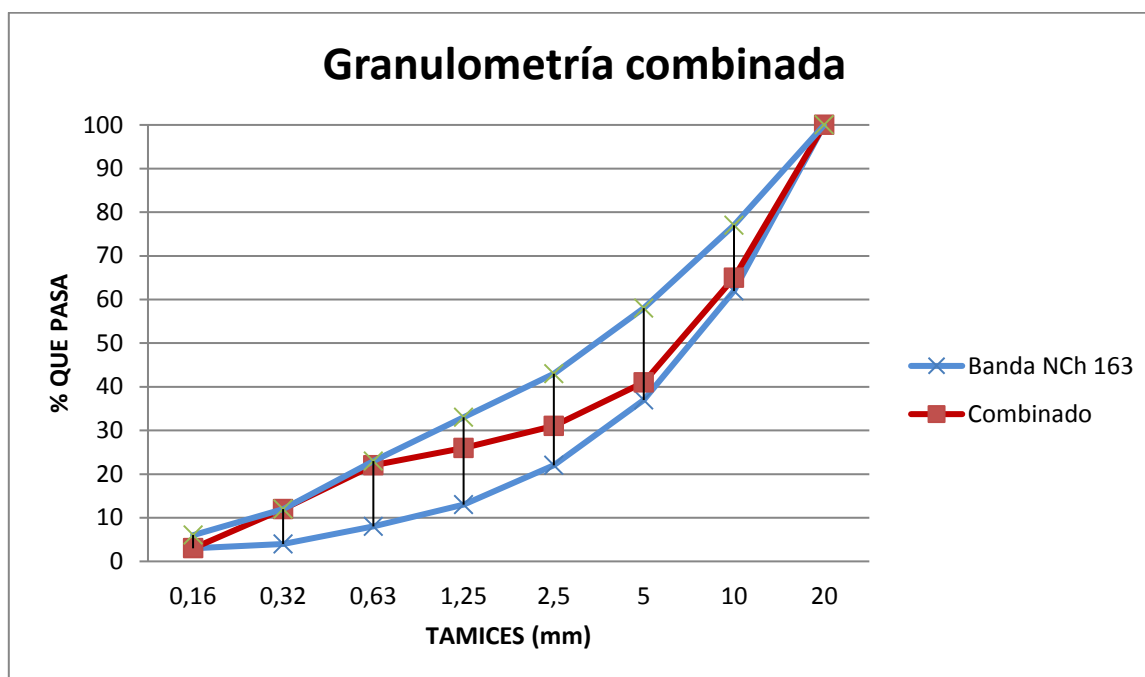
Tabla 4.10 Granulometría combinada

| TAMIZ<br>(mm) | Grava | Arena | 60% G | 40%<br>A | Mezcla | BANDA<br>NCH 163 |
|---------------|-------|-------|-------|----------|--------|------------------|
| 20            | 100   | 100   | 60    | 40       | 100    | 100              |
| 12.5          | 77    | 100   | 46    | 40       | 86     | -                |
| 10            | 41    | 100   | 25    | 40       | 65     | 62 - 77          |
| 5             | 5     | 97    | 3     | 38       | 41     | 37 - 58          |
| 2.5           | 0     | 77    | 0     | 31       | 31     | 22 - 43          |
| 1,25          | 0     | 64    | 0     | 26       | 26     | 13 - 33          |
| 0,63          | 0     | 54    | 0     | 22       | 22     | 8 - 23           |
| 0,32          | 0     | 29    | 0     | 12       | 12     | 4 - 12           |
| 0,16          | 0     | 8     | 0     | 3        | 3      | 3 - 6            |

Fuente: Elaboración propia (2016)

La figura 4.4 muestra la granulometría y banda granulométrica recomendada en la NCh 163, para el árido combinado. A pesar que en la granulometría de la arena no paso en su totalidad por las bandas, el árido combinado si pasa por las bandas que la norma recomienda.

Figura 4.4 Granulometría áridos combinados



Fuente: Elaboración propia (2016)

#### 4.7 Granulometría grava/caucho/ arena (HC10)

Se analizó la granulometría de los áridos combinados arena, grava y reemplazo de caucho 10%. Se muestra en la tabla 4.11 las proporciones de los áridos, comparado con el de hormigón patrón la arena sigue siendo la misma, solo se reduce la grava un 10% para dar paso al caucho. Como los que varían son los porcentajes de los volúmenes de áridos y caucho, la gráfica es la misma para el hormigón patrón (figura 4.4)

Tabla 4.11 Granulometría combinada con 10% de caucho,

| TAMIZ (mm) | Grava | Caucho | Arena | 51,3% G | 5,7% C | 43% A | Mezcla | BANDA NCH 163 |
|------------|-------|--------|-------|---------|--------|-------|--------|---------------|
| 20         | 100   | 100    | 100   | 51      | 6      | 43    | 100    | 100           |
| 12.5       | 77    | 80     | 100   | 40      | 5      | 43    | 88     | -             |
| 10         | 41    | 35     | 100   | 21      | 2      | 43    | 66     | 62 - 77       |
| 5          | 5     | 0      | 97    | 3       | 0      | 43    | 46     | 37 - 58       |
| 2.5        | 0     | 0      | 77    | 0       | 0      | 33    | 33     | 22 - 43       |
| 1,25       | 0     | 0      | 64    | 0       | 0      | 27    | 27     | 13 - 33       |
| 0,63       | 0     | 0      | 54    | 0       | 0      | 23    | 23     | 8 - 23        |
| 0,32       | 0     | 0      | 29    | 0       | 0      | 12    | 12     | 4 - 12        |
| 0,16       | 0     | 0      | 8     | 0       | 0      | 4     | 4      | 3 - 6         |

Fuente: Elaboración propia (2016).

#### 4.8 Granulometría grava/caucho/ arena (HC20)

Se analizó las granulometrías de la grava con el reemplazo de caucho 20% más arena.

Tabla 4.12 Granulometría combinada con 20% de caucho.

| TAMIZ<br>(mm) | Grava | Caucho | Arena | 45,6% G | 11,4%<br>C | 43%<br>A | Mezcla | BANDA<br>NCH 163 |
|---------------|-------|--------|-------|---------|------------|----------|--------|------------------|
| 20            | 100   | 100    | 100   | 46      | 11         | 43       | 100    | 100              |
| 12.5          | 77    | 80     | 100   | 35      | 9          | 43       | 88     | -                |
| 10            | 41    | 35     | 100   | 19      | 4          | 43       | 66     | 62 - 77          |
| 5             | 5     | 0      | 97    | 2       | 0          | 43       | 46     | 37 - 58          |
| 2.5           | 0     | 0      | 77    | 0       | 0          | 33       | 33     | 22 - 43          |
| 1,25          | 0     | 0      | 64    | 0       | 0          | 27       | 27     | 13 - 33          |
| 0,63          | 0     | 0      | 54    | 0       | 0          | 23       | 23     | 8 - 23           |
| 0,32          | 0     | 0      | 29    | 0       | 0          | 12       | 12     | 4 - 12           |
| 0,16          | 0     | 0      | 8     | 0       | 0          | 4        | 4      | 3 - 6            |

Fuente: Elaboración propia (2016).

#### 4.9 Granulometría grava/caucho/ arena (HC30).

Se analizó las granulometrías de la grava con el reemplazo de caucho 30% más arena.

Tabla 4.13 Granulometría combinada con 30% de caucho.

| TAMIZ<br>(mm) | Grava | Caucho | Arena | 39,9% G | 17,1%<br>C | 43%<br>A | Mezcla | BANDA<br>NCH 163 |
|---------------|-------|--------|-------|---------|------------|----------|--------|------------------|
| 20            | 100   | 100    | 100   | 40      | 17         | 43       | 100    | 100              |
| 12.5          | 77    | 80     | 100   | 31      | 14         | 43       | 88     | -                |
| 10            | 41    | 35     | 100   | 16      | 6          | 43       | 66     | 62 - 77          |
| 5             | 5     | 0      | 97    | 2       | 0          | 43       | 46     | 37 - 58          |
| 2.5           | 0     | 0      | 77    | 0       | 0          | 33       | 33     | 22 - 43          |
| 1,25          | 0     | 0      | 64    | 0       | 0          | 27       | 27     | 13 - 33          |
| 0,63          | 0     | 0      | 54    | 0       | 0          | 23       | 23     | 8 - 23           |
| 0,32          | 0     | 0      | 29    | 0       | 0          | 12       | 12     | 4 - 12           |
| 0,16          | 0     | 0      | 8     | 0       | 0          | 4        | 4      | 3 - 6            |

Fuente: Elaboración propia (2016)

## 4.10 Dosificación del hormigón

### 4.10.1 Parámetros de dosificación

El diseño del hormigón patrón se realizó con el método de dosificación propuesto por IDIEM y se consideraron los siguientes parámetros de dosificación:

- R28: 28 MPa
- Nivel de confianza: 80%
- Tamaño máximo: 20 mm
- Asentamiento de cono: 6 cm
- Tipo de cemento: corriente
- Condiciones de ejecución: Hormigón pre-mezclado
- Árido grueso: 60%
- Árido fino: 40%
- $\rho_{SSS}$ - Grava: 2649 kg/m<sup>3</sup>
- $\rho_{SSS}$ - Arena: 2632 kg/m<sup>3</sup>

### 4.10.2 Dosificación final

Esta es la dosificación que se utilizará para fabricar el hormigón, cabe señalar que esta puede ser modificada en el momento de la fabricación con la corrección de los áridos debido a la humedad de estos. La densidad teórica del hormigón se consideró para hormigones de aceras.

Tabla 4.14 Dosificación base, hormigón patrón.

| MATERIALES                    | CANTIDADES/m <sup>3</sup> |
|-------------------------------|---------------------------|
| CEMENTO (kg)                  | 388                       |
| AGUA (lts)                    | 196                       |
| GRAVA (kg)                    | 1101                      |
| ARENA (kg)                    | 735                       |
| DENSIDAD TEÓRICA DEL HORMIGÓN | 2420 kg/m <sup>3</sup>    |

Fuente: Elaboración propia (2016)

### 4.10.3 Dosificación hormigones con caucho

Resumen de las dosificaciones finales antes de preparar el hormigón. Considerando las densidades aparentes de la grava y el caucho se determina la cantidad en kilogramos.

Tabla 4.15 Dosificación de los hormigones.

| HORMIGÓN | CEMENTO (KG/M3) | AGUA (LT/M3) | ARENA (KG/M3) | GRAVA (KG/M3) | CAUCHO (KG/M3) |
|----------|-----------------|--------------|---------------|---------------|----------------|
| HP       | 388             | 196          | 735           | 1101          | 0              |
| HC10     | 388             | 196          | 735           | 990           | 32             |
| HC20     | 388             | 196          | 735           | 881           | 65             |
| HC30     | 388             | 196          | 735           | 771           | 97             |

Fuente: Elaboración propia (2016)

#### 4.11 Fabricación del hormigón

La fabricación de los distintos tipos de hormigón se ejecutó en el Laboratorio de Hormigones de la Escuela de Construcción. Se fabricó una colada por día (un tipo de hormigón por día), se utilizó una betonera de capacidad app 80 litros, se sigue el procedimiento especificado en la NCh 1018, Of 1977 Hormigón - Preparación de mezclas de prueba en laboratorio.

Figura 4.5 Betonera utilizada



Elaboración propia (2016)

El procedimiento desarrollado fue el mismo para todos los hormigones destacando lo siguiente:

- a) En cada fabricación de hormigón se efectuó la correspondiente corrección de la dosificación por humedad y absorción de los áridos en el instante previo a la fabricación, esto modifica los contenidos de cada árido y contenido de agua. Para esto se toman dos muestras una de grava y otra de arena 24 horas antes, estas se pesan y luego se dejan en el horno las 24 horas, donde son pesadas y se calcula la humedad libre con la expresión:

$$H = ((Ph - Ps) / Ps) \times 100$$

H: Humedad en los áridos

Ps: Peso seco

Ph: Peso húmedo

Con esta humedad y la absorción de cada árido determinada con anterioridad, se hacen las correcciones por humedad.



- b) Se pesó y cargó la mezcladora con los materiales llevando los áridos (de grueso a fino), caucho (a excepción del hormigón patrón) y cemento, luego se revolvió en seco con el objeto de homogeneizar la mezcla de materiales. Posteriormente se vertió el agua de amasado y revolvió por 3 minutos dejando reposar por 2 minutos para terminar el mezclado con otros 3 minutos.
- c) Una vez finalizada la fabricación del hormigón se realizó la prueba de asentamiento de cono para determinar la docilidad de cada tipo de hormigón.
- d) Para terminar, se coloca el hormigón en los distintos moldes, estos deben estar completamente limpios, se les aplica desmoldante en todas las caras. Luego del vaciado, se vibra con vibrador de inmersión dispuesto en el laboratorio.
- e) Pasadas al menos 24 horas, se procede a desmoldar, se aflojan los tornillos de los moldes y se retiran las caras con mucho cuidado de no golpear las probetas para no producir imperfecciones en su geometría que vaya a afectar el área que recibe la carga en la ejecución del ensayo.
- f) Se llevan las probetas a la piscina de curado, donde quedarán hasta el día de ejecución del ensayo.

Figura 4.6 Probetas en piscina de curado.



Elaboración propia (2016)

## **CAPÍTULO 5: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

## 5.1 Generalidades

En el presente capítulo se exponen y analizan los resultados obtenidos de la aplicación de los distintos ensayos considerados para esta investigación (asentamiento, compresión, flexotracción y absorción), según procedimientos ya descritos.

De manera gráfica se tratará de comparar el hormigón patrón con los hormigones con distintas cantidades de caucho, para analizar finalmente la influencia de este material en el hormigón.

## 5.2 Asentamiento

Para determinar la docilidad del hormigón, al momento de realizar cada mezcla se realizó la medición de asentamiento mediante el Cono de Abrams, un sistema sencillo que no requiere costo.

Para su realización se requiere utilizar poruña de llenado, el molde en forma de cono de 30 cm de largo de diámetros 10 y 20 cm en sus extremos, placa base metálica, huincha de medir y varilla – pisón.

El ensayo se realiza de acuerdo a lo descrito en la NCh 1019. Of 74.

Figura 5.1 Ensayo de Cono de Abrams



Fuente: Elaboración propia. (2016)

En la tabla 5.1 se expresan los resultados del ensayo.

Tabla 5.1 Resultados de asentamiento de cono.

| HORMIGÓN | FECHA DE ENSAYO | ASENTAMIENTO DE CONO |
|----------|-----------------|----------------------|
| HP       | 27-04-2016      | 7,5 cm               |
| HC10     | 28-04-2016      | 7 cm                 |
| HC20     | 29-04-2016      | 6 cm                 |
| HC30     | 02-05-2016      | 3,5 cm               |

Fuente: Elaboración propia (2016).

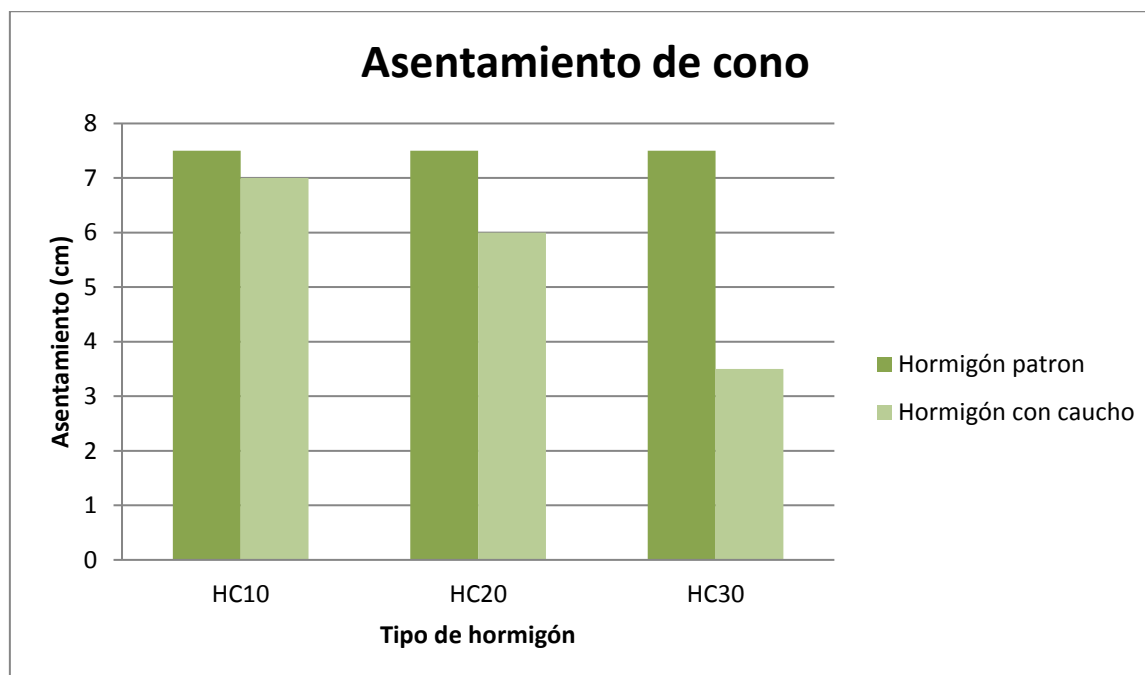
Se puede ver como el asentamiento de cono disminuye a medida que aumenta la dosis de caucho en el hormigón debido a la baja porosidad que tiene el caucho.

La bibliografía dice que el hormigón con caucho presenta un asentamiento de cono mayor que un hormigón convencional (en este caso el patrón), pero también depende del tamaño de las partículas de caucho, mientras más gruesas menos es el asentamiento obtenido, debido a que estas partículas gruesas poseen una baja adherencia con la pasta de cemento favoreciendo la incorporación de aire y la capilaridad (Barra, 2009).

Aun así, en los ensayos realizados por los autores que concluyen esto, se esperaba que el asentamiento de igual forma aumentara en vez de disminuir. Pero los ensayos realizados por estos autores utilizaban tamaño de caucho 10 a 16 mm y los porcentajes de reemplazo eran de 5, 10 y 15%, condiciones distintas a las utilizadas en este ensayo.

Se puede concluir entonces que para reemplazos de 10% hacia arriba y tamaño de caucho 20mm el asentamiento de cono del hormigón baja. Por lo tanto, su consistencia, su trabajabilidad bajan a medida que aumenta la dosis de caucho.

Figura 5.2 Gráfico de asentamiento de cono.



Fuente: Elaboración propia (2016)

### 5.3 Resistencia a compresión

En esta sección se presentan los resultados de resistencia a compresión en probetas cúbicas de 20 cm, para los distintos tipos de hormigón a los 28 días. Cada serie de hormigón está compuesta de 3 probetas.

Figura 5.3 Ensayo a compresión.



Fuente: Elaboración propia (2016).

En la figura 5.3 se muestra una probeta ensayada en la prensa. En la tabla 5.2 están los valores entregados por este ensayo, que correspondería a la carga máxima resistida por la probeta aplicada por la máquina. Teniendo este dato más la sección de la probeta se determina la tensión de rotura. Se utiliza la siguiente fórmula.

$$R = \frac{P}{S}$$

Dónde:

R = Tensión de rotura, (Kgf/cm<sup>2</sup>)

P = Carga máxima aplicada por la máquina de ensayo, (Kgf)

S = Sección de ensayo, (cm<sup>2</sup>)

Tabla 5.2 Resultados ensayo a compresión.

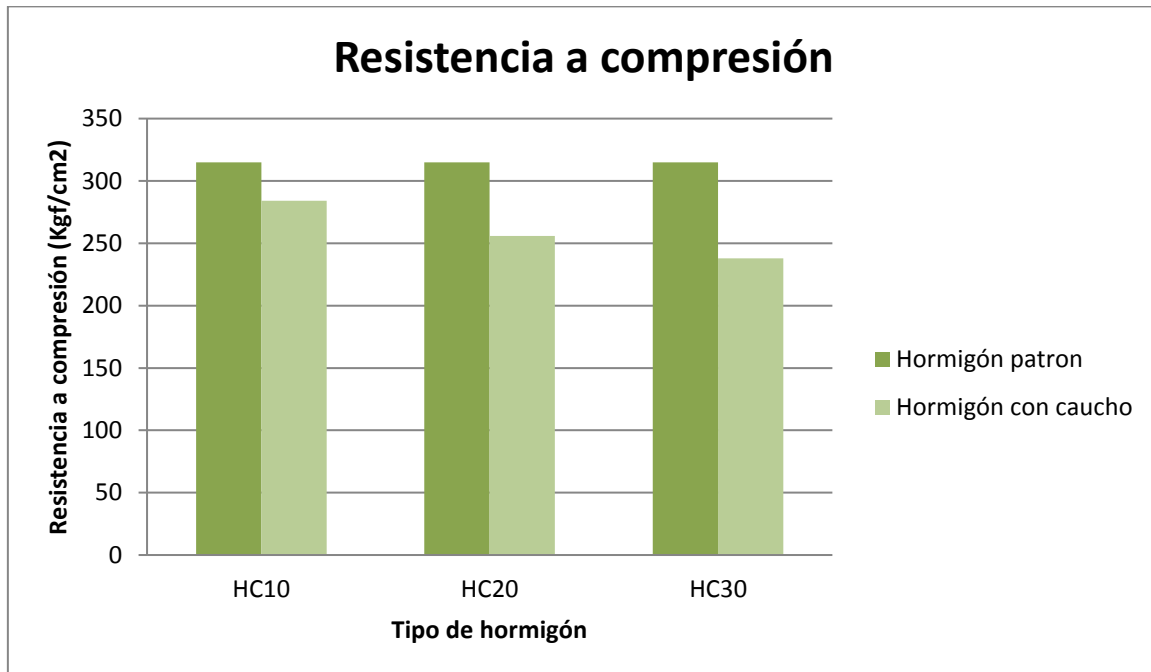
| PROBETA | CARGA MÁX<br>P (Kgf) | TENSIÓN DE ROTURA        |     |
|---------|----------------------|--------------------------|-----|
|         |                      | R (Kgf/cm <sup>2</sup> ) | (%) |
| HP      | 126000               | 315,0                    | 100 |
| HC10    | 113500               | 283,8                    | 90  |
| HC20    | 102500               | 256,3                    | 81  |
| HC30    | 95000                | 237,5                    | 75  |

Fuente: Elaboración propia (2016).

La resistencia relativa es 90, 81 y 75% a medida que aumenta la dosis de caucho.

La resistencia a la compresión disminuye al aumentar el contenido de caucho, en la figura 5.4 se muestra el gráfico donde se compara la disminución respecto al hormigón patrón.

Figura 5.4 Resistencia a compresión.



Fuente: Elaboración propia (2016).

Se esperaba una disminución de la resistencia a compresión del hormigón con caucho debido a la menor adherencia que tiene el caucho en comparación a la grava con el cemento y el peso que aporta el caucho es mucho menor. Sin embargo, los hormigones H10 y H20 son aceptables para los usos de pavimentos livianos. H10 para ciclovías y aceras, H20 solo para aceras, H30 queda absolutamente descartado para estos usos.

La tabla 5.3 se muestra la variación de resultados de los hormigones con caucho con respecto al hormigón patrón.

Tabla 5.3 Variación de resistencia a compresión en hormigones.

| HORMIGONES | RESISTENCIA (Kg/cm <sup>2</sup> ) | VARIACIÓN (%) |
|------------|-----------------------------------|---------------|
| HP         | 315,0                             | 0             |
| HC10       | 283,8                             | -9,9          |
| HC20       | 256,3                             | -18,6         |
| HC30       | 237,5                             | -24,6         |

Fuente: Elaboración propia (2016).

En la tabla 5.4 se muestra la desviación estándar y coeficiente de variación de las probetas ensayadas. Según la Nch 1998 of 1989 Hormigón – Evaluación estadística de la resistencia mecánica. Aparece el coeficiente de variación como un número de evaluación de control de los ensayos. Comparado con resultados de este coeficiente que se da en los ensayos de esta experiencia, podemos decir que el control de ensayo del hormigón patrón es excelente, el de HC10 Y HC20 es muy bueno y el de HC30 es bueno.

Tabla 5.4 Evaluación estadística a probetas a compresión.

| PROBETA | RESISTENCIA<br>PROMEDIO<br>(Kg/cm <sup>2</sup> ) | DESVIACIÓN<br>ESTANDAR<br>(Kg/cm <sup>2</sup> ) | COEFICIENTE<br>DE<br>VARIACIÓN (%) |
|---------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------|
| HP      | 315,0                                            | 3,5                                             | 1,1                                |
| HC10    | 283,8                                            | 5,9                                             | 3,3                                |
| HC20    | 256,3                                            | 9,4                                             | 4,2                                |
| HC30    | 237,5                                            | 5,1                                             | 3,4                                |

Fuente: Elaboración propia (2016).

Con las mismas probetas cúbicas que ocupamos para el ensayo a compresión, determinamos la densidad aparente del hormigón. En la tabla 5.5 están expresados los resultados.

Tabla 5.5 Resultados densidad aparente.

| PROBETA | PESO<br>(KG) | SECCIÓN<br>(CM <sup>2</sup> ) | VOLUMEN<br>(CM <sup>3</sup> ) | DENSIDAD<br>APARENTE |     | VARIACIÓN<br>(%) |
|---------|--------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|-----|------------------|
|         |              |                               |                               | (KG/M <sup>3</sup> ) | (%) |                  |
| HP      | 19,14        | 400                           | 8000                          | 2392,5               | 100 | 0                |
| HC10    | 18,66        | 400                           | 8000                          | 2332,5               | 97  | -2,5             |
| HC20    | 18,32        | 400                           | 8000                          | 2290,0               | 96  | -4,3             |
| HC30    | 18,03        | 400                           | 8000                          | 2253,8               | 94  | -5,8             |

Fuente: Elaboración propia (2016).

La densidad aparente del hormigón va disminuyendo a medida que el contenido de caucho va aumentando. Es una variación marginal debido a lo que influye este porcentaje de caucho en el peso total del hormigón. La disminución se debe a que el hormigón con caucho incorpora más aire que un hormigón convencional, y a la baja densidad del caucho comparado con el de la grava.

#### 5.4 Resistencia a flexo-tracción

Este ensayo se realiza según lo establecido en la NCh 1038 of.77. Se elaboraron 3 probetas de cada tipo de hormigón para ensayar a flexo-tracción, con dimensiones 15 x 15 x 55 cm. Estas probetas fueron confeccionadas y curadas según lo describe la NCh 1017 of.75.

Figura 5.5 Ensayo resistencia a flexo-tracción.



Fuente: Elaboración propia (2016).

Una observación que se pudo apreciar en este ensayo, es que solo el hormigón patrón al ensayarlo se partió por la mitad en dos partes, quedo como en la figura 5.6, pero los siguientes hormigones sólo se agrietaron en el medio no separándose las mitades, se muestra en la figura 5.7. En este último caso las mitades quedan unidas entre sí, por medio de partículas de caucho que al ser más extensibles no se rompen con la propagación de la grieta inducida por la carga máxima.

Figura 5.6 Rotura hormigón patrón.



Fuente: Elaboración propia (2016)



Figura 5.7 Rotura hormigones con caucho.



Fuente: Elaboración propia (2016).

En la tabla 5.6 se muestran los datos obtenidos en promedio de las 3 probetas de cada hormigón, y se establece la resistencia a flexo-tracción con la siguiente fórmula:

$$R_f = \frac{P \times L}{b \times h^2} \text{ (Kgf/cm}^2\text{)}$$

Dónde:

Rf: Resistencia a flexo-tracción (Kgf/cm<sup>2</sup>)

P: Carga máxima registrada por la máquina(Kg)

L: Luz de ensayo, distancia entre los apoyos (cm)

b: Ancho de la probeta en la sección de rotura (cm)

h: Altura de la probeta en la sección de rotura (cm)

Tabla 5.6 Datos ensayo de resistencia a flexo-tracción.

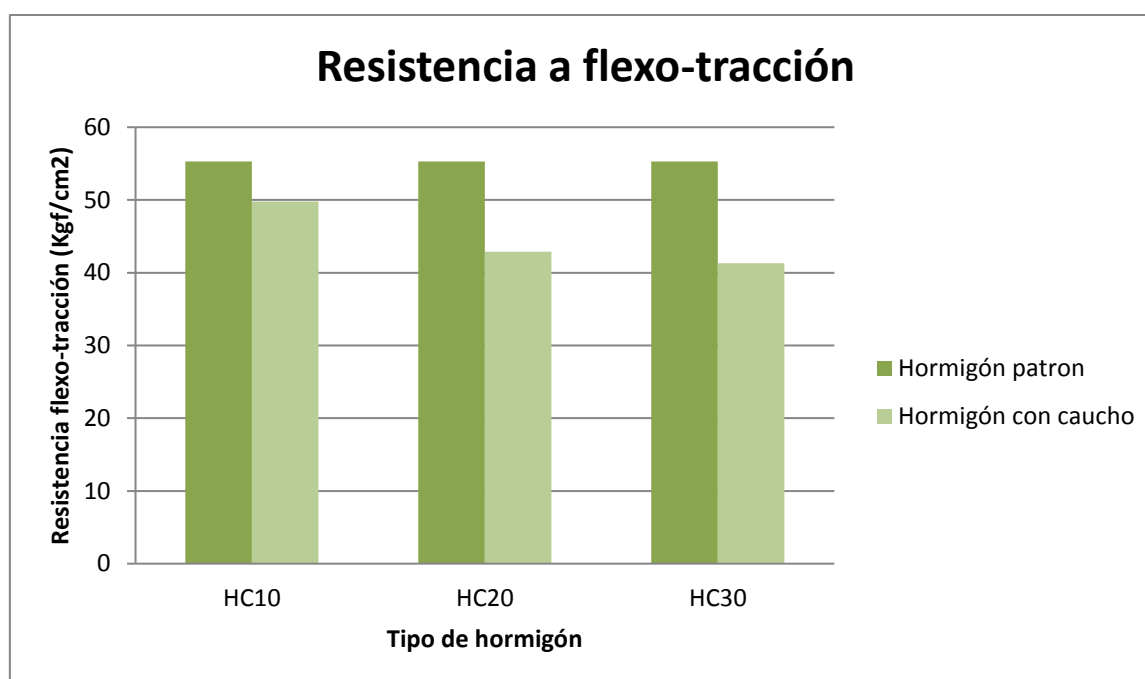
| PROBETA | b (cm) | h (cm) | L (cm) | P (Kg) | RESISTENCIA PROMEDIO     |     |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------------------------|-----|
|         |        |        |        |        | R (Kgf/cm <sup>2</sup> ) | (%) |
| HP      | 15     | 15     | 45     | 4150   | 55,3                     | 100 |
| HC10    | 15     | 15     | 45     | 3730   | 49,8                     | 90  |
| HC20    | 15     | 15     | 45     | 3217   | 42,9                     | 78  |
| HC30    | 15     | 15     | 45     | 3100   | 41,3                     | 75  |

Fuente: Elaboración propia (2016).

Hay una baja de la resistencia a flexo-tracción a medida que aumento la dosis de caucho en el hormigón, disminución esperada y que es similar a la disminución en la resistencia a compresión, por las mismas razones la poca adherencia del caucho y el cemento. Sin embargo, a pesar de romperse las probetas el caucho impidió que se separara en dos partes (como es de esperarse), debido a que el caucho funciona como una fibra de unión entre los componentes de la mezcla, facilitando la deformación del hormigón antes de su separación. Esta característica puede ser ventajosa para los pavimentos, ya que no se romperían tan fácilmente sometido a una situación de impacto, ayudando a su durabilidad.

Relacionando los resultados obtenidos, con los que se querían obtener, si bien disminuyó la resistencia a tracción, estas cumplen con las especificaciones de pavimentos definidos en esta tesis, y se pudo observar una característica no mencionada que le daría una ventaja a nuestro hormigón. Por lo tanto, H10, H20 y H30 cumplirían con satisfacer a la resistencia a flexo-tracción.

Figura 5.8 Gráfico resistencia flexo-tracción.



Fuente: Elaboración propia (2016).

En la figura 5.8 se muestra un gráfico donde se pueden comparar los valores de los hormigones con distinto porcentaje de caucho versus el hormigón patrón. En la tabla 5.7 se muestra una variación porcentual con respecto al hormigón patrón.

Tabla 5.7 Variación de resistencia a flexo-tracción en hormigones.

| HORMIGONES | RESISTENCIA<br>(Kgf/cm <sup>2</sup> ) | VARIACIÓN<br>(%) |
|------------|---------------------------------------|------------------|
| HP         | 55,3                                  | 0                |
| HC10       | 49,8                                  | -9,9             |
| HC20       | 42,9                                  | -22,4            |
| HC30       | 41,3                                  | -25,3            |

Fuente: Elaboración propia (2016).

En la tabla 5.8 se muestra la resistencia con su coeficiente de variación y desviación estándar.

Tabla 5.8 Desviación estándar y coeficiente de variación de probetas ensayadas.

| PROBETA | RESISTENCIA<br>PROMEDIO<br>(Kgf/cm <sup>2</sup> ) | DESVIACIÓN<br>ESTANDAR<br>(Kgf/cm <sup>2</sup> ) | COEFICIENTE<br>DE<br>VARIACIÓN (%) |
|---------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------|
| HP      | 55,3                                              | 1,0                                              | 2,4                                |
| HC10    | 49,8                                              | 1,8                                              | 3,2                                |
| HC20    | 42,9                                              | 2,7                                              | 6,4                                |
| HC30    | 41,3                                              | 2,2                                              | 3,5                                |

Fuente: Elaboración propia (2016).

Con el mismo procedimiento y misma norma NCh 1998 of 1989, se determinan los valores de desviación estándar y coeficiente de variación, en conclusión, se puede decir que es una medición precisa de la resistencia a flexo-tracción y que el promedio es representativo de la muestra.

## 5.5 Absorción de agua

Para este ensayo se ocuparon probetas cilíndricas de diámetro 7 cm y altura 10 cm. Al sacar las probetas del curado se secan superficialmente y se pesan. Luego se introducen en un horno a 110°C por 24 horas, pasado este tiempo se vuelven a pesar y con la siguiente fórmula se determina la absorción:

$$A = 100 \times (P_{ss} - P_s) / P_s (\%)$$

A: Absorción de agua del hormigón (%)

P<sub>ss</sub>: Peso saturado superficialmente seco (Kg)

P<sub>s</sub>: Peso seco al horno (Kg)

En la tabla 5.9 se muestran los resultados de absorción promedio realizados a las probetas.

Tabla 5.9 Resultados de absorción.

| PROBETAS | P <sub>ss</sub> (kg) | P <sub>s</sub> (kg) | ABSORCIÓN (%) | ABS. REL. AL HP (%) | VARIACIÓN (%) |
|----------|----------------------|---------------------|---------------|---------------------|---------------|
| HP       | 0.960                | 0,875               | 9,71          | 100                 | 0             |
| HC10     | 0,930                | 0,851               | 9,28          | 96                  | -4,3          |
| HC20     | 0,896                | 0,824               | 8,74          | 90                  | -10,0         |
| HC30     | 0,882                | 0,811               | 8,75          | 90                  | -9,9          |

Fuente: Elaboración propia (2016)

La absorción baja a medida que aumenta el contenido de caucho, pero en HC30 aumenta mínimamente. Esta disminución en la absorción está dada por la baja porosidad del caucho que se impone versus la absorción de agua de sus capilares, se podría pensar que sobrepasado el 30% de caucho esto podría empezar a revertirse.

La absorción está relacionada con la resistencia del hormigón a la acción de los agentes atmosféricos, puesto que, si no hay acceso del agua a sus poros, no hay intromisión de estos agentes que pueden deteriorar el hormigón.

## **CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES**

## **6.1 Generalidades**

En el presente capítulo, se sintetizan todos los procedimientos, análisis y razonamientos inherentes a la ejecución de esta investigación.

Las conclusiones se estructuran de acuerdo al planteamiento de objetivos e hipótesis y luego con la vinculación de variables medidas.

## **6.2 Relación con objetivos específicos**

Con los ensayos realizados se evaluaron las propiedades de los hormigones H10, H20 y H30, se puede decir que:

- Respecto al asentamiento podemos decir que esta disminuye a medida que aumenta el contenido de caucho, pero aun así sus números son aceptables, estos varían de 7 a 3,5 cm lo que quiere decir que están en los márgenes para ser este hormigón trabajable para un proyecto de pavimentación.
- La resistencia a la compresión baja, en el peor de los casos baja un 24,6% respecto al hormigón patrón. Esta es la característica más determinante en nuestro estudio, con este resultado se determina que un hormigón con 30% de caucho en reemplazo de grava no es óptimo para ser utilizado en pavimentos livianos, así con las características utilizadas en esta tesis. El hormigón H20 cumple para ser utilizado en aceras, pero no en ciclovías, no alcanza los 280 kgf/cm<sup>2</sup>. Por lo tanto, el hormigón H10 sería el ideal para ser utilizado en estos pavimentos, su disminución de resistencia fue de un 10%.
- En la resistencia a la flexo-tracción, lo que ocurre acá es similar que, con la resistencia a compresión respecto a los números, sus variaciones son similares, aunque en este caso por no ser una característica determinante del diseño cumple con el rango y además proporciona al hormigón una característica que le otorga un poco más durabilidad, a diferencia de un hormigón convencional.
- Por ser los porcentajes de reemplazo no tan significativos en comparación al volumen total del hormigón, su densidad no disminuye tan significativamente, en el caso de H30 solo 6% de disminución. Pero queda como alternativa, si queremos que una de las características de nuestro hormigón sea ser más liviano que el convencional, se podría aumentar el porcentaje de caucho, pero teniendo en cuenta que perderemos en resistencia.
- La absorción de agua en el hormigón con caucho disminuye mientras aumenta el contenido de caucho. Podemos decir que levemente con esto el caucho ayuda a la durabilidad del hormigón.

## **6.3 Relación con objetivo general e hipótesis**

Respondiendo la pregunta que da origen a esta investigación: Si se puede utilizar el caucho para pavimentos urbanos de tráfico liviano, como gran característica estos pavimentos no requieren gran resistencia, y el hormigón con 10% de reemplazo de caucho por grava cumple con las resistencias y la consistencia que se necesita, además aunque ligeramente es un hormigón más durable que uno convencional, su forma de deformarse al ser ensayado a flexo-tracción y la disminución en la absorción, muestran un comportamiento del hormigón más resistente a acciones físicas y químicas.

## BIBLIOGRAFÍA

- **Barra, M. et all. (2009).** *Realización de Ensayos de Laboratorio de hormigón con Caucho procedente de Neumáticos Fuera de Uso (NFU)*. Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España.
- **Botero et all. (2005).** *Gomas Trituradas: Estado del Arte, Situación Actual y Posibles usos como materia prima en Puerto Rico*. Revista Int. De Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 5, Universidad de Puerto Rico.
- **Chung, K., Hong, Y., (1999)** *Introductory Behavior of rubber concrete*, JAPS, 72, 35-40.
- **Fernandez M E (2003)** *Durabilidad de estructuras de hormigón armado*.
- **Hernández-Olivares et all. (2002).** *Static and dynamic behavior of recycled tire rubbed-filled concrete*, *Cement and Concrete Research*, 32, 1587-1596.
- **Hernandez, F., G., Barluenga (2002)** *Static and dynamic behavior of recycled tire rubbed-filled concrete*, *Cement and Concrete Research*, 34, 2309-2317.
- **Huynh. H, Raghavan (1998).** *Workability, Mechanical properties and Chemical Stability of a Recycled type rubber-filled Cementitious composite*, *J. Materials Sci*, 33, 1745-1752.
- **INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile).** *Ensayo a compresión de probetas cúbicas y cilíndricas*. NCH1037:Of.2009. Santiago, Chile, 2009.
- **INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile).** *Ensayo de tracción por flexión*. NCH1038:Of.2009. Santiago, Chile, 2009.
- **INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile).** *Áridos para morteros – Requisitos generales* NCH1163:Of.1979. Santiago, Chile, 1979.
- **INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile).** *Método de asentamiento de cono de abrams*. NCH1019:Of.1974. Santiago, Chile, 1974.
- **INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile).** *Determinación de las densidades real y neta y absorción de agua de las gravas*. NCH1117:Of.1977. Santiago, Chile, 1977.
- **INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile).** *Preparación de las mezclas de prueba en laboratorio* NCH1018:Of.1977. Santiago, Chile, 1977.
- **INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile).** *Tamizado y determinación de la granulometría*. NCH165:Of.1977. Santiago, Chile, 1977.
- **INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile).** *Hormigón – Requisitos generales*. NCH170:Of.1985. Santiago, Chile, 1985.
- **INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile).** *Determinación de las densidades real y neta y absorción de agua en las arenas*. NCH1239:Of.1977. Santiago, Chile, 1977.
- **INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile).** *Determinación de la densidad aparente*. NCH1116:Of.1977. Santiago, Chile, 1977.
- **Marín, C. (2013)** *Verificación experimental del efecto de temperaturas ambientales extremas sobre las resistencias mecánicas de hormigón con adición de caucho reciclado*. Universidad de Valparaíso. Valparaíso, Chile.
- **Minvu, (2008)** *Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación*. Santiago, Chile.
- **Minvu, (2015)** *Construcción de Ciclovías: Estándar Técnico*. Santiago, Chile.
- **Muñoz, D (2013)** *Estudio de la permeabilidad de hormigón con cucho reciclado*. Universidad de Valparaíso. Valparaíso, Chile.
- **Naik, T., & Rafat, S. (2002).** *Properties of Concrete Containing scrap type Rubber- an overview*. Journal Science Direct, University of Wisconsin. Gren Bay, Estados Unidos.
- **Pino, N. (2012)** *Factibilidad técnica de usos de hormigón caucho para minimizar la retracción en el hormigón*. Tesis de Pregrado, Universidad de Valparaíso. Valparaíso, Chile.
- **Polambiente, (2009).** <http://www.polambiente.cl/home.html>, Empresa de Reciclaje de Neumáticos fuera de uso.
- **Ruz (2004)** *Estudio de permeabilidad de hormigones autocompactantes*. Universidad de Valparaíso. Valparaíso, Chile.

- **Segre, N., Joeke, I., (2000)** *Use of tyre rubber particles as addition to cement paste*, *Cement and Concrete Research*, 30, 1421-1425.
- **Segre, N., Monteiro, P.J.M., Sposito, G., (2002).** *Surface characterization of recycled type rubber to use in cement paste matrix*, *J. Colloid and Interface Science*, 248, 521-523.
- **Topcu, I.B., (2005).** *The properties of rubberized concretes* *Cement and Concrete research*, 25(2), 304-310.
- **Urra, I (2006)** *Hormigón con caucho: determinación del módulo de elasticidad*. Tesis de pregrado Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
- **Videla, C. (2010).** *Curso de Tecnología del Hormigón*. Apuntes de clases. Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.
- **Witoszek. Et. Al. (2004)** *Hormigón con fibras de caucho de recuperación de neumáticos usados y de polipropileno diseño del firme hormigón con caucho*. VI Congreso Nacional fr Firmes, León, España 641-656.
- **Zabaleta, H. (1992).** *Compendio de Tecnología del Hormigón (2° Edición)*. Editorial: Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile. Santiago, Chile.



## ANEXOS

### A- Datos de las probetas ensayadas a resistencia a compresión

| <b>PROBETAS<br/>HP</b> | <b>Peso (kg)</b> | <b>Carga máx<br/>P (Kgf)</b> | <b>Sección de<br/>ensayo S (cm2)</b> | <b>Resistencia<br/>(Kg/cm2)</b> |
|------------------------|------------------|------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| Probeta 1              | 19,19            | 120500                       | 400                                  | 301,25                          |
| Probeta 2              | 19,09            | 123000                       | 400                                  | 307,50                          |
| Probeta 3              | 19,13            | 134500                       | 400                                  | 336,25                          |
| <b>Promedio</b>        | <b>19,14</b>     | <b>126000</b>                | <b>400</b>                           | <b>315,00</b>                   |

| <b>PROBETAS<br/>H10</b> | <b>Peso (kg)</b> | <b>Carga máx<br/>P (Kgf)</b> | <b>Sección de<br/>ensayo S (cm2)</b> | <b>Resistencia<br/>(Kg/cm2)</b> |
|-------------------------|------------------|------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| Probeta 1               | 18,72            | 115500                       | 400                                  | 288,75                          |
| Probeta 2               | 18,61            | 107500                       | 400                                  | 268,75                          |
| Probeta 3               | 18,66            | 117500                       | 400                                  | 293,75                          |
| <b>Promedio</b>         | <b>18,66</b>     | <b>113500</b>                | <b>400</b>                           | <b>283,75</b>                   |

| <b>PROBETAS<br/>H20</b> | <b>Peso (kg)</b> | <b>Carga máx<br/>P (Kgf)</b> | <b>Sección de<br/>ensayo S (cm2)</b> | <b>Resistencia<br/>(Kg/cm2)</b> |
|-------------------------|------------------|------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| Probeta 1               | 18,30            | 93500                        | 400                                  | 233,75                          |
| Probeta 2               | 18,35            | 103500                       | 400                                  | 258,75                          |
| Probeta 3               | 18,30            | 110500                       | 400                                  | 276,25                          |
| <b>Promedio</b>         | <b>18,32</b>     | <b>102500</b>                | <b>400</b>                           | <b>256,25</b>                   |

| <b>PROBETAS<br/>H30</b> | <b>Peso (kg)</b> | <b>Carga máx<br/>P (Kgf)</b> | <b>Sección de<br/>ensayo S (cm2)</b> | <b>Resistencia<br/>(Kg/cm2)</b> |
|-------------------------|------------------|------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| Probeta 1               | 18,04            | 92500                        | 400                                  | 231,25                          |
| Probeta 2               | 18,16            | 92500                        | 400                                  | 231,25                          |
| Probeta 3               | 17,90            | 100000                       | 400                                  | 250,00                          |
| <b>Promedio</b>         | <b>18,03</b>     | <b>95000</b>                 | <b>400</b>                           | <b>237,50</b>                   |

**B- Datos de las probetas ensayadas a resistencia a flexo-tracción**

| <b>PROBETAS<br/>HP</b> | <b>Peso<br/>(kg)</b> | <b>Luz de ensayo<br/>(cm)</b> | <b>Ancho<br/>(cm)</b> | <b>Alto<br/>(cm)</b> | <b>Carga máx P<br/>(Kgf)</b> | <b>Resistencia<br/>(Kgf/cm2)</b> |
|------------------------|----------------------|-------------------------------|-----------------------|----------------------|------------------------------|----------------------------------|
| Probeta 1              | 29,85                | 45                            | 15                    | 15                   | 3950                         | 52,67                            |
| Probeta 2              | 29,49                | 45                            | 15                    | 15                   | 3850                         | 51,33                            |
| Probeta 3              | 29,70                | 45                            | 15                    | 15                   | 4650                         | 62,00                            |
| <b>Promedio</b>        | <b>29,68</b>         | <b>45</b>                     | <b>15</b>             | <b>15</b>            | <b>4150</b>                  | <b>55,33</b>                     |

| <b>PROBETAS<br/>H10</b> | <b>Peso<br/>(kg)</b> | <b>Luz de ensayo<br/>(cm)</b> | <b>Ancho<br/>(cm)</b> | <b>Alto<br/>(cm)</b> | <b>Carga máx P<br/>(Kgf)</b> | <b>Resistencia<br/>(Kgf/cm2)</b> |
|-------------------------|----------------------|-------------------------------|-----------------------|----------------------|------------------------------|----------------------------------|
| Probeta 1               | 28,72                | 45                            | 15                    | 15                   | 3560                         | 47,47                            |
| Probeta 2               | 28,67                | 45                            | 15                    | 15                   | 3647                         | 48,63                            |
| Probeta 3               | 28,91                | 45                            | 15                    | 15                   | 3984                         | 53,12                            |
| <b>Promedio</b>         | <b>28,77</b>         | <b>45</b>                     | <b>15</b>             | <b>15</b>            | <b>3730</b>                  | <b>49,74</b>                     |

| <b>PROBETAS<br/>H20</b> | <b>Peso<br/>(kg)</b> | <b>Luz de ensayo<br/>(cm)</b> | <b>Ancho<br/>(cm)</b> | <b>Alto<br/>(cm)</b> | <b>Carga máx P<br/>(Kgf)</b> | <b>Resistencia<br/>(Kgf/cm2)</b> |
|-------------------------|----------------------|-------------------------------|-----------------------|----------------------|------------------------------|----------------------------------|
| Probeta 1               | 28,13                | 45                            | 15                    | 15                   | 2871                         | 38,28                            |
| Probeta 2               | 28,18                | 45                            | 15                    | 15                   | 3589                         | 47,85                            |
| Probeta 3               | 28,28                | 45                            | 15                    | 15                   | 3190                         | 42,52                            |
| <b>Promedio</b>         | <b>28,20</b>         | <b>45</b>                     | <b>15</b>             | <b>15</b>            | <b>3217</b>                  | <b>42,88</b>                     |

| <b>PROBETAS<br/>H30</b> | <b>Peso<br/>(kg)</b> | <b>Luz de ensayo<br/>(cm)</b> | <b>Ancho<br/>(cm)</b> | <b>Alto<br/>(cm)</b> | <b>Carga máx P<br/>(Kgf)</b> | <b>Resistencia<br/>(Kgf/cm2)</b> |
|-------------------------|----------------------|-------------------------------|-----------------------|----------------------|------------------------------|----------------------------------|
| Probeta 1               | 27,97                | 45                            | 15                    | 15                   | 3125                         | 41,67                            |
| Probeta 2               | 28,34                | 45                            | 15                    | 15                   | 3125                         | 41,67                            |
| Probeta 3               | 28,06                | 45                            | 15                    | 15                   | 3050                         | 40,67                            |
| <b>Promedio</b>         | <b>28,12</b>         | <b>45</b>                     | <b>15</b>             | <b>15</b>            | <b>3100</b>                  | <b>41,34</b>                     |

**C- Datos de las probetas ensayadas a absorción de agua**

| <b>PROBETAS<br/>HP</b> | <b>Peso<br/>superficialmente<br/>seco (kg)</b> | <b>Peso<br/>seco<br/>(kg)</b> | <b>Diámetro<br/>(cm)</b> | <b>Altura<br/>(cm)</b> | <b>Absorción<br/>(%)</b> |
|------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|
| Probeta 1              | 0.970                                          | 0,884                         | 7                        | 10                     | 9,77                     |
| Probeta 2              | 0,940                                          | 0,857                         | 7                        | 10                     | 9,65                     |
| Probeta 3              | 0,970                                          | 0,884                         | 7                        | 10                     | 9,71                     |
| <b>Promedio</b>        | <b>0,960</b>                                   | <b>0,875</b>                  | <b>7</b>                 | <b>10</b>              | <b>9,71</b>              |

| <b>PROBETAS<br/>H10</b> | <b>Peso<br/>superficialmente<br/>seco (kg)</b> | <b>Peso<br/>seco<br/>(kg)</b> | <b>Diámetro<br/>(cm)</b> | <b>Altura<br/>(cm)</b> | <b>Absorción<br/>(%)</b> |
|-------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|
| Probeta 1               | 0.940                                          | 0,861                         | 7                        | 10                     | 9,14                     |
| Probeta 2               | 0,930                                          | 0,848                         | 7                        | 10                     | 9,61                     |
| Probeta 3               | 0,950                                          | 0,844                         | 7                        | 10                     | 9,09                     |
| <b>Promedio</b>         | <b>0,930</b>                                   | <b>0,851</b>                  | <b>7</b>                 | <b>10</b>              | <b>9,28</b>              |

| <b>PROBETAS<br/>H20</b> | <b>Peso<br/>superficialmente<br/>seco (kg)</b> | <b>Peso<br/>seco<br/>(kg)</b> | <b>Diámetro<br/>(cm)</b> | <b>Altura<br/>(cm)</b> | <b>Absorción<br/>(%)</b> |
|-------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|
| Probeta 1               | 0,913                                          | 0,836                         | 7                        | 10                     | 9,21                     |
| Probeta 2               | 0,905                                          | 0,832                         | 7                        | 10                     | 8,77                     |
| Probeta 3               | 0,869                                          | 0,804                         | 7                        | 10                     | 8,09                     |
| <b>Promedio</b>         | <b>0,896</b>                                   | <b>0,824</b>                  | <b>7</b>                 | <b>10</b>              | <b>8,74</b>              |

| <b>PROBETAS<br/>H30</b> | <b>Peso<br/>superficialmente<br/>seco (kg)</b> | <b>Peso<br/>seco<br/>(kg)</b> | <b>Diámetro<br/>(cm)</b> | <b>Altura<br/>(cm)</b> | <b>Absorción<br/>(%)</b> |
|-------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|
| Probeta 1               | 0,890                                          | 0,817                         | 7                        | 10                     | 8,94                     |
| Probeta 2               | 0,893                                          | 0,818                         | 7                        | 10                     | 9,17                     |
| Probeta 3               | 0,863                                          | 0,798                         | 7                        | 10                     | 8,15                     |
| <b>Promedio</b>         | <b>0,882</b>                                   | <b>0,811</b>                  | <b>7</b>                 | <b>10</b>              | <b>8,75</b>              |