



**ESTUDIO COMPARATIVO DE MEZCLAS DE CONCRETO  
POROSO USANDO MATERIALES DISPONIBLES EN  
CARTAGENA DE INDIAS PARA USO DE PAVIMENTOS EN  
PARQUEADEROS**



JOSÉ ANTONIO LAGUNA ALEMÁN

ORLANDO JAVIER PIEDRAHITA GONZALEZ

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

CARTAGENA DE INDIAS D. T. Y C.

2017

**ESTUDIO COMPARATIVO DE MEZCLAS DE CONCRETO POROSO USANDO  
MATERIALES DISPONIBLES EN CARTAGENA DE INDIAS PARA USO DE  
PAVIMENTOS EN PARQUEADEROS**

GRUPO DE INVESTIGACIÓN:

ESCONPAT

LINEA DE INVESTIGACIÓN:

MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

JOSÉ ANTONIO LAGUNA ALEMÁN

ORLANDO JAVIER PIEDRAHITA GONZALEZ

Trabajo de Grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero Civil

DIRECTOR:

MSC. JORGE LUIS ALVAREZ CARRASCAL

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
CARTAGENA DE INDIAS D. T. Y C.

2017



## **DEDICATORIA**

*Este nuevo triunfo se lo dedico a Dios que me acompaño durante todo este camino  
dándome la sabiduría para que todo esto fuese posible  
A mis padres, José Antonio Laguna Peñalosa y Martha Elena Alemán Romero que sin duda  
alguna siempre me apoyaron y me aconsejaron en uno de las nuevas etapas  
Que me ha brindado la vida.  
A mis hermanas, Martha Elena y Adriana Sofía, que me han acompañado  
Durante toda mi vida.  
**José Antonio Laguna Alemán***

*Dios, el autor y consumidor de cada palabra de este proyecto, a Él le dedicó este triunfo,  
porque sin Él no hubiese sido posible.  
A mis padres, Orlando Piedrahita y Kelly González, que son las personas que durante  
estos 22 años me han respaldado, apoyado y aconsejado, de ellos también es este logro.  
A mis hermanos, Carlos y Mayra, que los amo.*

**Orlando Javier Piedrahita González**



## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios primeramente por darnos la vida y la oportunidad de haber estudiado esta maravillosa carrera, por regalarnos la inteligencia, la sabiduría y la salud, para así alcanzar este logro: Ser Ingeniero Civil.

A nuestras familias, por el apoyo incondicional durante toda esta etapa.

A nuestros profesores de toda la carrera, en especial a nuestro director Jorge Álvarez Carrascal y nuestros evaluadores Modesto Barrios Fontalvo y Ramón Torres Ortega, por guiarnos y brindarnos todo su conocimiento durante estos cinco años.

A Barrios Padilla Ingeniería, quienes nos brindaron toda su colaboración y servicios, al momento de realizar los ensayos en su laboratorio.

A la empresa Cantera Colon, por ofrecernos su ayuda para el desarrollo de la investigación, suministrando material usado en esta misma.

A los estudiantes de la asignatura taller de ingeniería que nos brindaron su ayuda, para la realización de algunos ensayos

A la Universidad de Cartagena, nuestra Alma Mater, por brindarnos las instalaciones, en especial al equipo del laboratorio de suelos y geotecnia del campus Piedra Bolívar.

A nuestros compañeros y amigos de carrera, que cada día estuvimos juntos respaldándonos mutuamente en esta maravillosa parte de nuestras vidas.

A nuestros amigos y novias por sus grandes deseos y apoyo durante este proyecto.



## **TABLA DE CONTENIDO**

<b>RESUMEN.....</b>	<b>12</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>15</b>
<b>2. MARCO DE REFERENCIA .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1. Antecedentes .....</b>	<b>18</b>
<b>2.2. Estado del arte .....</b>	<b>21</b>
<b>2.3. Marco teórico.....</b>	<b>24</b>
<b>2.3.1. Pavimentos permeables.....</b>	<b>25</b>
<b>2.3.2. Pavimentos porosos .....</b>	<b>25</b>
<b>2.3.3. Agregados gruesos .....</b>	<b>26</b>
<b>2.3.3.1. Propiedades de los agregados gruesos .....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.4. Concreto poroso.....</b>	<b>31</b>
<b>2.3.4.1. Propiedades en estado fresco .....</b>	<b>31</b>
<b>2.3.4.2. Propiedades en estado endurecido .....</b>	<b>33</b>
<b>3. OBJETIVOS .....</b>	<b>39</b>
<b>3.1. Objetivo general .....</b>	<b>39</b>
<b>3.2. Objetivos específicos.....</b>	<b>39</b>
<b>4. ALCANCE .....</b>	<b>40</b>
<b>5. METODOLOGIA .....</b>	<b>42</b>
<b>5.1. Recopilación de la información secundaria .....</b>	<b>43</b>
<b>5.2. Procedimiento experimental.....</b>	<b>44</b>
<b>5.2.1. Recolección de agregado .....</b>	<b>44</b>



<b>5.2.2.</b>	<b>Ensayos para el agregado grueso .....</b>	<b>48</b>
5.2.2.1.	Ensayo para determinar la resistencia al desgaste de agregados grueso....	48
5.2.2.2.	Ensayo de gravedad específica y absorción de agua del agregado grueso .	50
5.2.2.3.	Ensayo de granulometría para agregado grueso. ....	52
<b>5.2.3.</b>	<b>Diseño de mezclas de concreto poroso .....</b>	<b>54</b>
<b>5.2.4.</b>	<b>Ensayos para las mezclas de concreto poroso .....</b>	<b>58</b>
5.2.4.1.	Ensayo de asentamiento .....	58
5.2.4.2.	Ensayo de resistencia a la compresión .....	58
5.2.4.3.	Ensayo de módulo de rotura .....	60
5.2.4.4.	Ensayo de permeabilidad .....	61
<b>5.3.</b>	<b>Estimación, análisis y comparación de costos del concreto poroso .....</b>	<b>63</b>
<b>5.4.</b>	<b>Selección de la mezcla más optima.....</b>	<b>63</b>
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>64</b>
<b>6.1.</b>	<b>Ensayos para el agregado grueso .....</b>	<b>64</b>
6.1.1.	Ensayo para determinar la resistencia al desgaste del agregado grueso.....	64
6.1.2.	Ensayo de granulometría para agregados gruesos.....	65
6.1.3.	Ensayo de gravedad específica y absorción de agua del agregado grueso .....	69
<b>6.2.</b>	<b>Ensayos para las mezclas de concreto poroso.....</b>	<b>71</b>
6.2.1.	Ensayo de asentamiento.....	72
6.2.2.	Ensayo de resistencia a la compresión.....	74
6.2.3.	Ensayo de módulo de rotura.....	80
6.2.4.	Ensayo de permeabilidad.....	87
<b>6.3.</b>	<b>Análisis y comparación de costos .....</b>	<b>92</b>



<b>6.4.</b>	<b>Selección de las mezclas adecuadas para aplicar en parqueaderos .....</b>	<b>100</b>
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>103</b>
<b>8.</b>	<b>LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>106</b>
<b>8.1.</b>	<b>Limitaciones .....</b>	<b>106</b>
<b>8.2.</b>	<b>Recomendaciones.....</b>	<b>107</b>
<b>9.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>	<b>108</b>
<b>10.</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>114</b>



## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1. Modelo de Weymouth para partículas de interferencia.....	28
Figura 2. Desgaste abrasivo a dos cuerpos y desgaste abrasivo a tres cuerpos .....	30
Figura 3. Prueba de permeabilidad bajo carga variable .....	35
Figura 4. Esquema de ensayo de resistencia a la flexión .....	37
Figura 5. Esquema de metodología aplicado en el desarrollo del estudio. ....	42
Figura 6. Ubicación geográfica de la cantera AGRECAR S.A.....	45
Figura 7. Ubicación de la cantera Coloncito.....	46
Figura 8. Cantera de AGRECAR S.A.....	46
Figura 9. Recolección del material de parte de los investigadores en la cantera AGRECAR S.A.....	47
Figura 10. Cantera Coloncito. ....	47
Figura 11. Recolección del material de parte de los investigadores en la cantera Coloncito .....	47
Figura 12. Máquina de los ángeles.....	49
Figura 13. Montaje para determinar el peso sumergido en el ensayo de gravedad específica .....	51
Figura 14. Serie de tamices a la cual es pasada la muestra. ....	53
Figura 15. Relación del contenido de vacíos y el contenido de pasta para agregado No. 8	56
Figura 16. Ensayo de asentamiento para las mezclas CR1 (izquierda) y TC2 (derecha) ....	59
Figura 17. Especímenes cilíndricos usados para determinar la resistencia a la compresión	59
Figura 18. Especímen antes de ser ensayado (izquierda), durante el ensayo (centro) y después de ser ensayado (derecha).....	60
Figura 19. Especímenes prismáticos usados para determinar la resistencia a la flexión .....	61
Figura 20. Vigüeta ante de ser ensayada (izquierda) y después de ser ensayada (derecha)	61
Figura 21. Permeámetro de carga variable usado durante la investigación .....	62
Figura 22. Muestras usadas durante el ensayo de permeabilidad .....	62





Figura 23. Curva granulométrica agregado grueso tipo canto rodado. ....	67
Figura 24. Curva granulométrica agregado grueso tipo triturado de caliza. ....	69
Figura 25. Asentamiento de mezclas con poca agua. ....	73
Figura 26. Resistencia a la compresión contra porcentaje de vacíos. ....	75
Figura 27. Resistencia a la compresión contra relación A/C. ....	76
Figura 28. Resistencia a la compresión contra porcentaje de vacíos. ....	78
Figura 29. Resistencia a la compresión contra relación A/C. ....	79
Figura 30. Módulo de rotura contra porcentaje de vacíos. ....	81
Figura 31. Módulo de rotura contra relación A/C. ....	82
Figura 32. Módulo de rotura contra porcentaje de vacíos. ....	84
Figura 33. Módulo de rotura contra relación A/C. ....	85
Figura 34. Resistencia a la compresión contra módulo de rotura (triturado de caliza). ....	86
Figura 35. Resistencia a la compresión contra módulo de rotura (canto rodado). ....	86
Figura 36. Relación del coeficiente de permeabilidad con el porcentaje de vacíos para mezclas hechas con canto rodado. ....	90
Figura 37. Relación del coeficiente de permeabilidad con el porcentaje de vacíos para mezclas hechas con triturado de caliza. ....	90
Figura 38. Relación de la resistencia a la compresión a 28 días con el coeficiente de permeabilidad para mezclas hechas con canto rodado. ....	91
Figura 39. Relación de la resistencia a la compresión a 28 días con el coeficiente de permeabilidad para mezclas hechas con triturado de caliza. ....	92
Figura 40. Comparación de los diferentes costos teniendo en cuenta las diferentes variables independientes. ....	99



## **LISTAS DE TABLAS**

Tabla 1. Granulometría de la muestra de agregado en cada ensayo .....	48
Tabla 2. Carga abrasiva.....	49
Tabla 3. Tabla para distribución por tamices de la muestra.....	53
Tabla 4. Mezclas de concreto poroso estudiados .....	55
Tabla 5. Resultados obtenidos durante el ensayo en la máquina de Los Ángeles .....	65
Tabla 6. Requisitos de gradación para agregado grueso .....	66
Tabla 7. Resultado de material retenido en la serie de tamices para canto rodado.....	66
Tabla 8. Resultado de material retenido en la serie de tamices para triturado de caliza.....	68
Tabla 9. Resultados de gravedad específica y absorción. (canto rodado).....	70
Tabla 10. Resultados de gravedad específica y absorción. (triturado de caliza).....	71
Tabla 11. Resultados obtenidos durante el ensayo de asentamiento.....	72
Tabla 12. Resultados de esfuerzo y carga para cilindros de triturado de caliza.....	74
Tabla 13. Resultados de resistencia a la compresión canto rodado .....	77
Tabla 14. Resultados de módulo de rotura triturado de caliza.....	80
Tabla 15. Resultados de módulo de rotura canto rodado .....	83
Tabla 16. Resultados obtenidos durante los ensayos de permeabilidad.....	88
Tabla 17. Costo directo de 1 m <sup>3</sup> de la mezcla CR1, de concreto poroso.....	93
Tabla 18. Costo directo de 1 m <sup>3</sup> de la mezcla CR2, de concreto poroso.....	93
Tabla 19. Costo directo de 1 m <sup>3</sup> de la mezcla CR3, de concreto poroso.....	94
Tabla 20. Costo directo de 1 m <sup>3</sup> de la mezcla CR4, de concreto poroso.....	94
Tabla 21. Costo directo de 1 m <sup>3</sup> de la mezcla CR5, de concreto poroso.....	94
Tabla 22. Costo directo de 1 m <sup>3</sup> de la mezcla CR6, de concreto poroso.....	95
Tabla 23. Costo directo de 1 m <sup>3</sup> de la mezcla CR7, de concreto poroso.....	95
Tabla 24. Costo directo de 1 m <sup>3</sup> de la mezcla CR8, de concreto poroso.....	95
Tabla 25. Costo directo de 1 m <sup>3</sup> de la mezcla CR9, de concreto poroso.....	96
Tabla 26. Costo directo de 1 m <sup>3</sup> de la mezcla TC1, de concreto poroso.....	96



*Estudio comparativo de mezclas de concreto poroso usando materiales disponibles en Cartagena de Indias para uso de pavimentos en parqueaderos*

---

Tabla 27. Costo directo de 1 m <sup>3</sup> de la mezcla TC2, de concreto poroso.....	96
Tabla 28. Costo directo de 1 m <sup>3</sup> de la mezcla TC3, de concreto poroso.....	97
Tabla 29. Costo directo de 1 m <sup>3</sup> de la mezcla TC4, de concreto poroso.....	97
Tabla 30. Costo directo de 1 m <sup>3</sup> de la mezcla TC5, de concreto poroso.....	97
Tabla 31. Costo directo de 1 m <sup>3</sup> de la mezcla TC6, de concreto poroso.....	98
Tabla 32. Costo directo de 1 m <sup>3</sup> de la mezcla TC7, de concreto poroso.....	98
Tabla 33. Costo directo de 1 m <sup>3</sup> de la mezcla TC8, de concreto poroso.....	98
Tabla 34. Costo directo de 1 m <sup>3</sup> de la mezcla TC9, de concreto poroso.....	99
Tabla 35. Matriz de evaluación técnico económica.....	101



## **RESUMEN**

El crecimiento del desarrollo urbano ha traído la alteración de los diversos procesos que se llevan a cabo en el terreno de forma natural, debido a que cada vez se construyen nuevas carreteras y edificaciones, generando nuevas superficies impermeable, lo que provoca que los drenajes no tengan la capacidad de abastecer toda la demanda de agua que se genera por las lluvias.

El presente estudio evaluó técnica y económicamente a nivel de laboratorio diferentes mezclas de concreto poroso, utilizando materiales disponibles en la ciudad de Cartagena, para uso de pavimentos en parqueaderos en zonas residenciales, lo cual se logró estudiando cada una de las propiedades mecánicas e hidráulicas de las mezclas de concreto poroso diseñadas, usando los diferentes ensayos, a través de las normas que describen los procesos para determinar dichas propiedades, corroborando los resultados con revisiones literarias tanto nacionales como internacionales.

Los resultados obtenidos en la investigación nos presentan resistencias a la compresión en un rango de 0.02 a 6.11 MPA, para módulos de rotura de 0.13 a 2.73 MPa y para permeabilidades entre 0.478 a 1.913 cm/s, los cuales se encuentran en los rangos permisibles según las distintas literaturas.

Comparando los costos entre cada uno de los diseños de mezclas para cada tipo de agregado y analizando todas las propiedades se encontraron siete mezclas apropiadas para el uso de concreto poroso en parqueaderos residenciales, ya que cumplen con todos los requerimientos en cada una de las propiedades estudiadas, estas son: las mezclas con agregado tipo canto rodado CR1, CR2, CR4, CR5, CR7, CR8 y TC4, de las cuales la más factible económicamente sería la TC4 al presentar menor costo por unidad. Al analizar la resistencia a la compresión y a la flexión, la más conveniente es la mezcla CR7, en tanto que para la permeabilidad, la mezcla CR8 presenta mejores condiciones. De la misma manera, haciendo un recorrido general de todos los resultados, el canto rodado es el



*Estudio comparativo de mezclas de concreto poroso usando materiales disponibles en Cartagena de Indias para uso de pavimentos en parqueaderos*

---

material que presenta un mejor comportamiento para los diseños de mezclas estudiados en la investigación, lo cual se evidencia en el mayor número de mezclas que cumplen los requerimientos de la normatividad.



## **ABSTRACT**

The urban development has brought the alteration of the diverse processes that are carried out in the field of natural form, because each time new roads and buildings are constructed, generating new impermeable surfaces, which causes that the drains do not have the capacity of supply the entire water demand generated by the rains.

The present study evaluated technically and economically at laboratory level, different mixtures of porous concrete, using materials available in the city of cartagena, for use of pavements in parking lots, which was achieved by studying each of the mechanical and hydraulic properties of the mixtures of Porous concrete, using the different tests, through the norms that describe the processes to determine these properties, corroborating the results with national and international literary reviews.

The results of the investigation present compressive strength in a range of 0.02 to 6.11 MPA, for flex yak strength of 0.13 to 2.73 MPA and infiltration rate between 0.478 and 1.913 cm / s, which are in the permissible ranges according to the different literatures.

Comparing the costs between each one of the mix designs for each type of aggregate and analyzing all the properties, seven mixtures were found suitable for the use of porous concrete in residential parkings, since they fulfilled all the requirements for each one of the properties studied, these are: mixtures CR1, CR2, CR4, CR5, CR7, CR8 and TC4, of which the most economically feasible would be TC4, because this mixture present a lower cost per unit. Analyzing the compressive and flexural strength, the most suitable mixture is the CR7 mixture, while for the infiltration rate the CR8 mixture has better conditions. In the same way, with a general route of all the results, the canto rodado is the material that presents a better behavior for the designs of mixture studied in the investigation, which is evidenced in the greater number of mixtures that fulfill the requirements of the normativity.



## **1. INTRODUCCIÓN**

El crecimiento de las zonas de desarrollo urbano ha traído consigo alteración de diversos procesos que se llevan a cabo en el terreno natural, a causa de la construcción de carreteras y edificaciones (áreas impermeables) que no permiten la infiltración de las aguas pluviales en el terreno natural, la precipitación se convierte en su mayoría escorrentía superficial que se concentra rápidamente generando grandes caudales, la cual será drenada a través de los sistemas de drenaje pluviales.

Durante últimas décadas se ha hecho uso de pavimentos porosos como sistema urbano de drenaje sostenible, el cual tiene una mayor aplicación para la solución de problemas de drenaje, la implementación de las diferentes clases de pavimento poroso se ha dado de manera exitosa para solucionar problemas de manejo de aguas en parqueaderos, zonas residenciales con bajo tráfico, entradas para autos, parques, senderos peatonales (Metro, 2010). Existen una serie de desventajas como la limitación en el uso de los pavimentos porosos por causa del clima de la zona, ya sea en zonas con ciclo de hielo-deshielo y también no es conveniente en regiones áridas, con alta erosión o actividad eólica y poseen baja resistencia a los esfuerzos tangenciales del tráfico (Rodríguez Hernández, 2008). A pesar de estas desventajas, los pavimentos se han aplicado de manera satisfactoria en otros países, colaborando con la experiencia y el mejoramiento de esta tecnología, haciendo que los pavimentos porosos sean claves para el nuevo modelo de ciudad donde se conjuga el medio ambiente y la infraestructura urbana (Ferguson, 2010).

La ciudad de Cartagena de Indias ha presentado un notable crecimiento urbanístico en los últimos años, lo que ha llevado al aumento de la construcción de edificaciones y de infraestructura vial, de acuerdo al DANE se ha presentado un aumento de 46,87% en área construida del año 2011 a 2015, que a su vez ha traído el aumento de la escorrentía superficial, por ello se realizaron estudios que tienen por objeto ordenar y regular el sistema de drenajes en el casco urbano actual y la zona de expansión futura de la ciudad, en el cual



se determinaron múltiples alternativas para mitigar los problemas de inundaciones (Contraloría Distrital de Cartagena de Indias, 2013).

La ciudad ha presentado altas precipitaciones en épocas de invierno lo que ha causado inundaciones debido a la incapacidad del drenaje pluvial de esta, donde el 71% de los habitantes y el 69% de las viviendas han sido afectados por ello (Alcaldía de Cartagena, 2008), la mayor influencia se presenta en las zonas con topografía plana o de bajas pendientes, tal es el caso en la zonas de expansión la que en su mayoría es plana y a causa del aumento de zonas impermeables disminuye la capacidad de infiltración del agua pluvial, las consecuencias del cambio climático son inminentes, sumado al crecimiento urbano de la ciudad, provocan que haya riesgo de inundaciones en gran parte de la ciudad como no se desarrollen estrategias de adaptación y mitigación (Alcaldía de Cartagena de Indias *et al.*, 2014)

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, en este trabajo se investigó sobre los materiales y el comportamiento de los pavimentos porosos ante las condiciones climáticas de Cartagena, realizando la comparación de diferentes alternativas de solución basada en diseños experimentales de la estructura de concreto poroso utilizada en pavimentos y teniendo en cuenta que las investigaciones sobre el tema a nivel local son casi nulas, con el objetivo de evaluar técnica y económicamente los diferentes tipos de mezclas de concreto hidráulico poroso, utilizando materiales disponibles en la ciudad de Cartagena de Indias para que puedan ser usadas en zonas de estacionamiento.

En vista de lo anterior para la implementación de los pavimentos permeables en Cartagena de Indias se buscó complementar con este estudio, la información acerca de esta tecnología orientada a los materiales disponibles en la ciudad, la cual es muy poca y no se ha enfocado en la implementación de estos materiales en concreto poroso, faltando información sobre el comportamiento de los materiales disponibles en Cartagena. Es por esto que los resultados de investigación buscaron responder a las siguientes preguntas:





*¿Cuáles son los materiales más apropiados, disponibles en la ciudad de Cartagena de Indias, que permitan desarrollar mezclas de concreto poroso adecuadas para la implementación de pavimentos permeables en estacionamientos? ¿Cuáles son los diseños de mezclas de concreto poroso adecuados para pavimentos permeables usados en estacionamiento, utilizando materiales disponibles en la ciudad de Cartagena de Indias?*

Los resultados se obtuvieron gracias al estudio de las propiedades mecánicas e hidráulicas a nivel de laboratorio de distintas mezclas de concreto poroso, teniendo en cuenta las diferentes variables que permitieron obtener distintas dosificaciones, y estudiar de manera más amplia el comportamiento de estas mezclas junto al comportamiento de los distintos agregados utilizados para fabricarlas, y tomando como referencia estudios nacionales e internacionales, y normas que validen los resultados alcanzados.

La información recolectada en los resultados del proyecto de investigación juega un papel importante en el fomento de este tipo de concretos para la construcción de estacionamiento en el ámbito local, permitiendo que los constructores y las empresas concreteras utilicen de manera adecuada los tipos de agregados disponibles en Cartagena, fabricando concretos con buenos desempeños en todas sus propiedades, además con la evaluación económica se da una visión más amplia de cómo sacarle provecho a esta tecnología de manera menos costosa. Por otro lado, ayuda que futuras investigaciones complementarias mejoren las características de las mezclas estudiadas y permitiendo que usen con tráficos más pesados.

Este proyecto incentiva a que en la Universidad de Cartagena investigue acerca de nuevas técnicas de drenajes, también en el tema de pavimentos permeables y sobre estructuras innovadoras de pavimentos. Además esta investigación genera un aporte al conocimiento de la academia fomentando el estudio de los pavimentos porosos y complementando la información existente, en algunas investigaciones ya desarrolladas en el programa de Ingeniería Civil de la Universidad de Cartagena, sobre este tema.



## **2. MARCO DE REFERENCIA**

En este capítulo se recopila y analiza la información secundaria seleccionada referente a los pavimentos porosos, haciendo énfasis en los pavimentos rígidos de estas características, haciendo un análisis de las problemáticas que llevan al uso de este tipo de pavimento, así mismo se examinan los distintos estudios realizados sobre este tema y que sirven como base para el análisis de resultados de esta investigación. También en este capítulo encontramos las bases teóricas necesarias para entender el tema de investigación.

### **2.1. Antecedentes**

Los antecedentes son parte importante del análisis de la problemática que enmarca el proyecto y para describir por medio de información secundaria lo que lleva al estudio de dicha problemática, por lo cual a continuación se resaltan como los pavimentos permeables han tenido importancia en la solución de problemas de drenaje en el mundo, además de sus diferentes beneficios y las desventajas que esta tecnología tiene. Así mismo se enmarca el uso de concreto poroso, como una de los tipos de pavimentos permeables con mayor aceptación. Por ultimo como la aplicabilidad de los pavimentos permeables en Colombia y a nivel local es poca, se realiza una consulta de los estudios que conducen a la importancia que este tipo de tecnología se aplique como alternativa viable para mejorar el drenaje urbano.

Es conocido que los pavimentos permeables es uno de los tipos de SUDS que tienen mayor aplicación para la solución de problemas de drenajes, en Estados Unidos la utilización de las diferentes clases de pavimentos permeables se ha dado de manera exitosa para solucionar problemas manejo de aguas lluvias en parqueaderos, zonas residenciales con



bajo tráfico, puertos, entrada para autos, senderos peatonales, parques (Metro, 2010), esto ha llevado a que la Environmental Protection Agency (EPA) considere que los pavimentos permeables, son una de las mejores prácticas para la gestión de aguas pluviales (Tennis, Leming, & Akers, 2004). Así mismo en México, el uso de esta clase de pavimento ha llevado a que se disminuyan e inclusive se eliminen los drenajes pluvial en las zonas de aplicación, además del interés del Gobierno Mexicano para realizar proyectos con concreto permeable aplicado en pavimentos que permitan la recarga de acuíferos. (Teorema Ambiental, 2004)

Lo anterior ha permitido que esta tecnología se aplique de manera satisfactoria en otros países, colaborando con la experiencia y el mejoramiento de esta tecnología, de acuerdo con Ferguson (2010), los pavimentos permeables sean claves para el nuevo modelo de ciudad donde se conjugue el medio ambiente y la infraestructura urbana. Acorde con la National Ready Mixed Concrete Association (2004), el uso del concreto permeable trae muchos beneficios ambientales, entre estos la reducción de la escorrentía, la recarga de los acuíferos y la transferencia de agua a la raíces de los árboles.

Teniendo en cuenta que todo sistema tiene sus desventajas, en un estudio realizado por Universidad de Washington & CH2M HILL Inc. (2011), se identifica que los problemas que se presentan en la mayoría de los pavimentos permeable son la obstrucción de poros en estos, el uso restringido de este tipo de pavimento a cierta distancia de algunos acuíferos para evitar la contaminación y el uso en vías de alto tráfico. Además existen limitaciones en el uso de los pavimentos permeables en cuanto al clima de la zona, ya sea en zonas de abundantes ciclos hielo-deshielo y también no es conveniente en regiones áridas, con alta erosión o actividad eólica, igualmente poseen baja resistencia a los esfuerzos producidos por el tráfico (Rodríguez Hernández, 2008).

El concreto poroso presenta diversos beneficios desde el punto de vista técnico y económico, lo que hace viable su aplicación. Según Reyes & Torres (2002), el concreto poroso aplicado en pavimento rígido combina las ventajas del pavimento rígido



convencional con el mejoramiento de las desventajas que presentan este último, ya que son de superior durabilidad, confieren un pavimento liso aunque tenaz, están libres de hidroplaneo, se adhiere fácilmente a otras superficies de cemento, ayudan al drenaje y a la estabilización de condiciones de agua subterránea y ofrecen una mayor trabajabilidad del concreto, además poseen una mayor vida útil y resistencia a la deformación. Conforme a Concreto Ecológico de Mexico S.A. de C.V. (2012), los concretos porosos se caracteriza por no poseer finos, lo cual es un beneficio ya que la transmisión de cargas se realiza por puntos de contacto, originando que las cargas sean repartidas en forma aleatoria, dando como resultado que éstas sean distribuidas en una superficie mucho mayor. Para Kumar (2015), el desempeño del concreto poroso es mejor que el de los otros tipos de pavimento permeable, presentando mejores condiciones físicas en parqueaderos y con una mayor permeabilidad. Los anteriores estudios motivaron a la escogencia del concreto poroso como material de estudio para pavimentos permeables, pues de acuerdo a la información suministrada por estos estudios, el desempeño del concreto poroso es muy bueno en pavimentos permeables.

En Colombia, los problemas de drenajes urbanos han provocado que las ciudades adopten entre sus planes de gestión hacia futuro el uso de sistemas urbanos de drenaje sostenible, como es el caso de Bogotá, en esta ciudad se desarrolló una evaluación de los SUDS para el plan de ordenamiento territorial de la zona norte, en donde se busca que los espacios de parqueaderos en superficie, deben diseñarse de modo que al menos el 50% de la superficie total de aparcamiento sea permeable al agua de lluvia, usando pavimentos permeables (Hernandez & Macea, 2014), además para vías interiores de predios privados con velocidades de circulación de hasta 30 km/h y a zonas de andenes, todo con el fin de almacenar el agua lluvia percolada temporalmente disminuyendo así la cantidad de escorrentía que de otra manera quedaría en la superficie (Secretaria Distrital de Ambiente de Bogota, 2011). En el caso de Barranquilla, los problemas de escorrentía son muy graves, ya que los arroyos son corrientes superficiales urbanas que han provocado daños ambientales y pérdidas urbanas, y debido al aumento de las áreas impermeables el



problema aumenta, es por esto se plantea la alternativa de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenibles que disminuyan la escorrentía superficial. (Blogs Uninorte, 2014)

En cuanto al nivel local, las consecuencias del cambio climático son inminentes, sumado al crecimiento urbano de la ciudad, provocan que haya riesgo de inundaciones en gran parte de la ciudad como no se desarrollen estrategias de adaptación y mitigación (Alcaldía de Cartagena de Indias *et al.*, 2014). Por lo cual se ha propuesto disminuir la escorrentía superficial y las áreas impermeables, lo cual se lograría con el aumento de las zonas permeables en zonas consolidadas (Contraloría Distrital de Cartagena de Indias, 2013). Estudios como los de Marrugo Ramírez (2005) y Hernández Díaz & Martínez Llorente (2014), demuestran que los pavimentos porosos pueden llegar a ser una buena alternativa de aplicación para las necesidades que posee la ciudad, en cuanto al tema de drenaje urbano, para esto se necesita un mayor enfoque investigativo a este tema, aplicándolo a las condiciones particulares de la ciudad.

## **2.2. Estado del arte**

La recolección de información secundaria sobre estudios de concreto poroso es muy importante porque permite que el estudio enfoque su metodología hacia lo que realmente se necesita para analizar las variables estudiadas. Por lo anterior, a continuación se destacan diferentes estudios de carácter internacional e internacional donde se analizan los diferentes ensayos y pruebas que son importantes para el análisis técnico y económico del concreto poroso y su uso en los pavimentos.

Los concretos porosos usados en pavimentos, involucran tres variables de estudio importantes, que son la resistencia, la permeabilidad y la porosidad, por lo tanto es muy importante realizar la pruebas que determinen a esta, entre estas prueba se tiene el porcentaje de vacíos, ensayo de permeabilidad, medición de la resistencia a la compresión,



a la rotura y a la abrasión (Tennis *et al.*, 2004). Así mismo también es importante el diseño de la mezcla de concreto poroso, en la cual se encuentran dos procesos importantes, que son la dosificación de la mezcla y los ensayos de la mezcla; la dosificación de la mezcla permite determinar las propiedades de los agregados y su gradación, del cemento, la cantidad de agua, y si se debe utilizar aditivos (Wang & Wang, 2011). De acuerdo con (Perez, 2009), otro factor importante en los concretos porosos es la compactación, ya que esta debe ser de sumo cuidado, debido a que una elevada compactación puede reducir el contenido de vacíos y por lo tanto se obstruiría el paso del agua, lo que se evidenciaría en la baja permeabilidad, por otro lado si existe una baja compactación, se puede obtener un concreto con alto contenido vacíos, lo que disminuiría la resistencia.

De acuerdo a la National Ready Mixed Concrete Association, los concretos porosos tienen densidades típicas de  $1600 \text{ kg/m}^3$  a  $2000 \text{ kg/m}^3$ , además las proporciones de vacíos esta entre el 20% y el 25%, también se tiene que la resistencia a la compresión esta entre 3.5 MPa y 28 MPa y el módulo de rotura entre 1 MPa y 3.8 MPa (Obla, 2010). En cuanto a la permeabilidad normalmente se maneja en un rango 0.2 cm/s a 0.54 cm/s (Meininnger, 1988).

El diseño de las mezclas de concreto poroso va ligado a las propiedades de este, pues cada uno de los elementos que se dosifican en la mezcla pueden llegar a afectar o beneficiar las propiedades del concreto poroso. Características de los agregados como la angularidad de los agregados gruesos tiene influencia en propiedades como la resistencia a la compresión, la cual aumenta a medida que los agregados son más redondeados, y el coeficiente de permeabilidad, que aumenta a medida que los agregados son más angulares (Uma Magesvari & Narasimha, 2013). La relación agua/cemento juega un papel muy importante en la mezcla, ya que si la mezcla tiene una baja relación agua cemento presentan muy baja resistencia y apreciable desprendimiento superficial de áridos y para altas relaciones, ocurre escurrimiento de la pasta de cemento y disminución notoria del porcentaje de vacíos, por esto se recomienda una relación agua/cemento de 0.35 y 0.38 (Castro *et al.*, 2009). Así mismo la relación que existe entre la porosidad y la resistencia, es



que la primera a medida que aumente y disminuye la resistencia, lo contrario pasa con la permeabilidad, la cual aumenta cada vez que se aumente la porosidad; de igual forma al comparar la densidad con la porosidad, encontramos que son inversamente proporcionales, pero cuando comparamos resistencia contra la densidad, se obtiene una mejora en la resistencia si se aumenta la densidad de la mezcla de concreto (Ibrahim *et al.*, 2014)

El uso de pequeñas proporciones de finos en mezclas de concreto poroso puede traer beneficios para esta, pues al agregar más finos, el comportamiento de la mezcla mejora mecánicamente, pero las condiciones de permeabilidad disminuyen y también el costo unitario del concreto es más elevado (Perez, 2009), así mismo al comparar la adición de aditivos con la adición de finos, es una mejor alternativa usar aditivos pues se mejoran la condiciones de resistencia, sin perder permeabilidad (Massiel *et al.*, 2010).

En Colombia, los estudios acerca de los pavimentos con concreto poroso han tomado auge en los últimos años, en los cuales se han hecho revisiones literarias acerca los métodos de diseños hidráulicos de esta estructuras, estos métodos son de carácter internacional y algunos tienen en cuenta las condiciones medioambientales (Trujillo Lopez & Quiroz Lasprilla, 2013), así mismo se ha estudiado la aplicación de las diferentes metodologías de diseño hidráulicos de pavimentos porosos como alternativa de drenaje urbano en Bogotá, lo que permite estudiar la mejor metodología de acuerdo a las condiciones de la ciudad (Polanco Andrade & Sanchez Vega, 2012). De igual manera, también se han llevado a cabo estudios sobre el diseño de las mezclas de concreto poroso, en donde se ha comparado el uso de finos y el no uso de finos en concreto poroso, lo que ha llevado a determinar beneficios en ambos tipos de mezclas, aunque el uso de finos debe hacerse con sumo cuidado, ya que este puede provocar el taponamiento masivo de poros (Castañeda & Moujir, 2014), además la empresa de concreto Argos ha arrojado diferentes demostraciones de este tipo de mezcla, haciendo un estudio sobre las recomendaciones sobre el uso de este tipo de concreto, recomendado un curado especial, una descarga cercana del concreto y el uso de aspirado para mantenimiento (Cementos Argos, 2014).



En el ámbito local, el tratamiento ha sido muy poco, se ha revisado bibliográficamente el tema de los concretos porosos y su aplicación en los pavimentos, estableciendo los ensayos más importantes, las consideraciones de diseño y análisis de costos donde se evidencio la viabilidad económica del uso de esta tecnología (Marrugo Ramirez, 2005), además del diseño hidráulico de pavimentos permeables, en los cuales el concreto poroso es uno de los usados y los cuales presenta excelente comportamiento mecánico e hidráulico, de igual forma se hacen recomendaciones que son de importancia en este estudio como el uso y la fabricación necesaria de permeámetro de carga variable (Hernandez Diaz & Martinez Llorente, 2014)

### **2.3. Marco teórico**

El extenso uso de pavimentos impermeables trae consigo, sobre todo en áreas de un importante desarrollo urbano, considerables problemas en la evacuación de las aguas lluvias y en las condiciones de escurrimiento aguas abajo. El uso indiscriminado de estas estructuras en áreas urbanas, disminuye notoriamente la capacidad de recarga natural de agua en los terrenos, e incrementa de forma considerable el volumen y el caudal del escurrimiento superficial, aumentando el riesgo de provocar inundaciones en los sectores más bajos de las urbanizaciones (Castro, 2004). Además, cuando el agua de las lluvias escurre, arrastra consigo materiales sólidos y varios contaminantes depositados en calles y estacionamientos, contaminándola (Smith, 2001)

Sistemas de pavimento porosos son las prácticas de gestión de aguas pluviales beneficiosas que mejoran la calidad de las aguas pluviales y mitigan los efectos hidrológicos de la urbanización. (Drake & Bradford, 2013)

Los pavimentos drenantes se pueden dividir en dos pavimentos porosos y pavimentos permeables, es muy importante resaltar la diferencia de estos.





### **2.3.1. Pavimentos permeables**

Son estructuras construidas con materiales impermeables, generalmente prefabricados, en las que su diseño geométrico permite infiltrar el agua superficial hacia las capas inferiores, ya sea a través de orificios en los bloques o de espacios entre las juntas. (Castro *et al.*, 2009)

### **2.3.2. Pavimentos porosos**

Son estructuras de hormigón o asfalto, fabricados con granulometrías sin finos, y que son en sí mismas permeables, escurriendo el agua a través de vacíos interconectados que generalmente alcanzan un valor entre 15 y 25% (Meininger, 1988; Debo & Reese, 1995; Ghafoori & Dutta, 1995). Al ser estructuras construidas con materiales distintos a los utilizados comúnmente en pavimentos, el diseño de las mezclas de estos pavimentos requiere de un estudio más acabado.

Son utilizados principalmente en estacionamientos y calles debajo tránsito, con el objetivo de disminuir el escurrimiento superficial proveniente del agua de lluvia y la incidencia de esta, aguas abajo. La principal ventaja que presentan los pavimentos porosos es que reducen el flujo superficial proveniente de lluvias torrenciales mediante la infiltración, al evitar que la zona pavimentada sea totalmente impermeable. Además, pueden remover elementos contaminantes del agua, tales como: metales, aceites, grasas y sólidos suspendidos; al filtrarlos a través de las capas de arena y grava, ubicadas bajo la capa de rodadura. (Vidaud Quintana, 2014)



Uno de los sistemas de drenaje alternativos son los pavimentos porosos, los cuales son básicamente una mezcla de agregados gruesos uniformemente gradados, con muy bajo contenido de arena y un cementante, que puede ser una mezcla bituminosa o cemento portland, logrando un porcentaje de vacíos entre 15% y 20% (Reyes & Torres, 2002). Los pavimentos permeables se dividen principalmente en dos tipos: (1) pavimentos con revestimiento drenante; (2) pavimentos con revestimiento impermeable. Estos dos tipos de pavimentos porosos pueden ser de evacuación distribuida (pavimentos drenantes de infiltración) y/o de evacuación localizada (pavimentos drenantes de retención) (Azzout *et al.*, 1994).

El pavimento de hormigón desarrollado tiene una capacidad de infiltración superior a la de cualquier suelo. Esta capacidad es más que suficiente para absorber toda la lluvia que cae sobre él. Una superficie de pavimento poroso podría captar el agua de una zona aledaña, aunque no es recomendable que ésta sea superior a 3 veces su tamaño. De este modo se minimiza la colmatación del pavimento, debido a los sedimentos arrastrados por el escurrimiento, que disminuyen la porosidad y por ende la infiltración. (Bonifacio *et al.*, 2003).

Para poder construir o realizar un pavimento poroso primero se deben observar las características de los materiales que van a comprender al concreto como tal.

### **2.3.3. Agregados gruesos**

Los pavimentos porosos están compuestos solo por agregado grueso en algunos casos con muy poca cantidad de agregados finos o en su defecto nulo (Tennis *et al.*, 2004). Debido a esto el agregado fino no se tendrá en cuenta en esta investigación.

Los aglomerados gruesos son la porción de aglomerante que no puede pasar a través de una criba número 4(4.75 mm). El aglomerado grueso normal consta de grava de mina o grava



triturada. Son de consistencia fuerte y durable propios para la elaboración del concreto. (Quiñones & Causil, 2012)

### **2.3.3.1. Propiedades de los agregados gruesos**

#### **Granulometría**

El principio de gradación de Fuller y Thompson expone que las curvas de gradación ideal de toda la masa (incluyendo el aglomerante) presentan un comportamiento elíptico en su fracción fina, el cual converge con una línea recta tangente a la elipse. La Ecuación 2.1 representa la curva elíptica. (Fuller & Thompson, 1907)

$$\frac{(y - b)^2}{b_2} + \frac{(x - a)^2}{a_2} \quad (2.1)$$

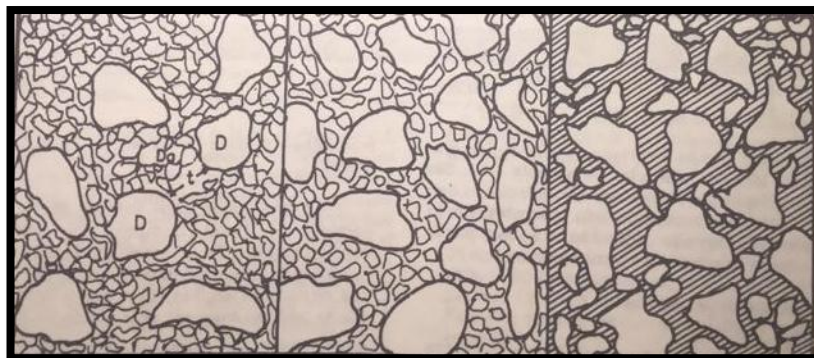
Donde

Y es el porcentaje de material que pasa el tamiz de abertura x.

En cambio Weymouth (1933) expone una teoría acerca de las mezclas de concreto así como el efecto de las partículas de la interferencia en los requerimientos de agua y trabajabilidad. Como se muestra en la Figura 1.



**Figura 1.** Modelo de Weymouth para partículas de interferencia



**Fuente:** (Sanchez, 2001)

La Figura 1 representa, en dos dimensiones una mezcla de dos tamaños de partículas, las partículas más grandes son pocas y están muy separadas por las partículas más pequeñas, en el diagrama del centro de la Figura 1 se observa que el número relativo de las partículas más grandes es más amplio la distancia promedio entre ellas e justo igual al diámetro de las partículas más pequeñas. Y la parte derecha de la figura se muestra que la concentración de partículas más grandes es tal que el espacio promedio es más reducido que el diámetro de las partículas más pequeñas.

A si mismo Weymouth expone que hay una ley de gradación de los agregados de tal forma que los granos de un solo tamaño deben tener espacio suficiente para moverse dentro del espacio dejado por los granos del tamaño subsiguiente mayor, evitando de esta manera la interferencia de las partículas. Esta ley de gradación fue expresada por la Ecuación 2.2.

$$P = 100 \left[ \frac{d}{D} \right]^n \quad (2.2)$$



En donde:

P= porcentaje que pasa por el tamiz (d)

D=tamaño máximo del agregado

N=Exponente que gobierna la distribución de las partículas y es función del agregado grueso.

### **Resistencia al desgaste abrasivo**

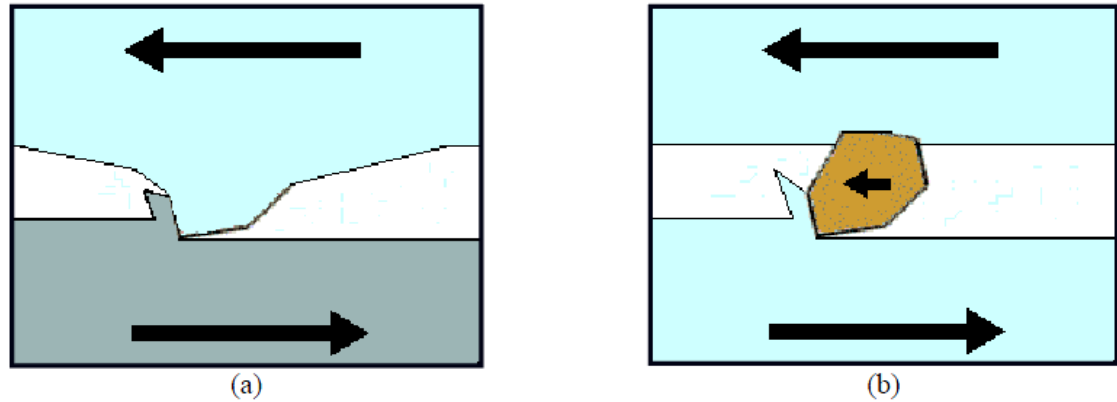
Según la norma ASTM G40-92 el desgaste abrasivo se define como la pérdida de masa resultante de la interacción entre partículas o asperezas duras que son reforzadas con una superficie y se mueven a lo largo de ella.

Existen dos tipos de desgaste abrasivo, estos son: desgaste abrasivo a de los cuerpos o a tres cuerpos. En abrasión a de los cuerpos, el desgaste es causado por rugosidades duras pertenecientes a una de las superficies en contacto, mientras que la abrasión a tres cuerpos, el desgaste es provocado por partículas duras sueltas entre las superficies que se encuentran en movimiento relativo.

Abrasión de dos cuerpos ocurre cuando una superficie irregular de un material es presionada contra otra con menor dureza y Abrasión de tres cuerpos. Se presenta cuando existen partículas con una dureza superior atrapadas en medio de dos superficies. La fuerza aplicada se transmite a través de las partículas abrasivas (Gutierrez Quintero, 2014).



**Figura 2.** Desgaste abrasivo a dos cuerpos y desgaste abrasivo a tres cuerpos



**Fuente:** (Gutierrez Quintero, 2014)

### **Densidad y absorción**

Dentro de las propiedades físicas de los agregados que dependen directamente de las propiedades de la roca original de donde provienen se encuentra la densidad, la cual está definida como la relación entre el peso y el volumen de una masa determinada, sin embargo lo agregados para concreto hay que tener en cuenta que entre sus partículas hay cavidades o poros que pueden estar parcialmente saturados o llenos de agua, dependiendo de su permeabilidad interna. (Sanchez, 2001)

Por otra parte la porosidad, la permeabilidad y la capacidad de absorción de los agregados influyen en la adherencia con la pasta de cemento, en la resistencia del concreto de congelamiento y deshielo, en la estabilidad, en la resistencia a la abrasión y en la densidad relativa. Los tamaños de los poros en el agregado varían en un amplio rango hasta que los más pequeños son mayores a los poros del gel en la pasta de cemento. Algunos poros del agregado están totalmente dentro de las partículas, pero otros se abren en la superficie, de



modo que el agua puede penetrar en ellos; la cantidad y la proporción de la penetración dependerán del tamaño, de la continuidad y el volumen total de los poros. (Neville & Brooks, 1998)

#### **2.3.4. Concreto poroso**

El concreto poroso es un concreto de desempeño fabricado en base a cantidades controladas de cemento, agregado grueso, agua y aditivos para crear una masa de partículas de agregado cubierta con una capa delgada de pasta. Una mezcla de concreto permeable contiene poco o ninguna arena, lo que crea un contenido de vacíos substancial. Usando la suficiente pasta para cubrir y aglomerar las partículas del agregado se crea un sistema de vacíos interconectados altamente permeables que drena con rapidez. Para resistencia, y para evitar que la pasta fluya y llene los vacíos, se requiere una proporción interconectados altamente permeable que drena con rapidez. Para resistencia y para evitar que el paste fluya y llene los vacíos, se requiere una proporción baja de agua/material cementoso (w/c). (Gámez Gamboa, 2010)

##### **2.3.4.1. Propiedades en estado fresco**

#### **Revenimiento**

El revenimiento generalmente, es cero; sin embargo se han usado valores en el rango de 20 a 50 mm. La prueba del revenimiento que se puede realizar de acuerdo con la ASTM C143 no es una prueba que se considera para fines de control de calidad, como en el caso del



concreto convencional, sólo se considera como un valor de referencia, debido principalmente a que la mezcla es demasiado rígida y la medición del revenimiento en la mayoría de casos no es aplicable. (Aire, 2011)

### **Peso unitario**

El peso unitario del concreto permeable es del orden del 70% del concreto convencional. Su determinación se hace de acuerdo con lo especificado en la ASTM C1688.

### **Tiempo de fraguado**

El tiempo de fraguado se reduce en el concreto permeable, por lo que en algunos casos se deben usar aditivos químicos para permitir la adecuada colocación. (Aire, 2011)

### **Relación agua- cemento**

En términos generales, la resistencia del concreto se determina por la cantidad neta de agua utilizada por cantidad unitaria de cemento, para un conjunto dado de materiales y de condiciones. Esto es lo que se conoce como relación “agua-cemento”, la cual está dada en peso, a partir de lo anterior fue que Duff Abrams, en el año 1918, formulo su conocida ley, según la cual, para los mismos materiales y condiciones de ensayo, la resistencia de un concreto completamente compactado, a una edad, es inversamente proporcional al relación agua-cemento (la cual originalmente se expresaba en volumen).





Para cuantificar esto, Abrams propuso la Ecuación 2.3 de tipo exponencial.

$$R = \frac{A}{B^\alpha} \quad (2.3)$$

Donde R es la resistencia media a la compresión en  $\text{kg/cm}^2$ . A y B son constantes empíricas que dependen de la calidad y tipo de cemento, las propiedades de los agregados, los aditivos y las condiciones de ensayo,  $\alpha$  es la relación agua-cemento en peso. (Sanchez, 2001)

#### **2.3.4.2. Propiedades en estado endurecido**

##### **Porosidad**

La porosidad es una medida de los espacios vacíos entre los agregados. La condición para que un concreto sea permeable es que el contenido de vacíos sea mayor al 15%. (Aire, 2011)

##### **Permeabilidad**

La capacidad que presenta un material es cuando un fluido lo atraviesa, se conoce como capacidad de filtración o porosidad, sin embargo es necesario resaltar que al realizar el



proceso de filtración la estructura interna del material no se altera y permanece sin ningún cambio en su estructura original (López Palacios, 2012).

Según la INVE 130-07 la expresión aplicable para el experimento de permeabilidad con cabeza variable, se presenta como la Ecuación 2.4.

$$K = \frac{aL}{At} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (2.4)$$

Donde

A= área de la sección transversal de la bureta o tubería de entrada, en cm<sup>2</sup>.

h<sub>1</sub>= cabeza hidráulica a través de la muestra al comienzo de experimento (t=0).

h<sub>2</sub>= cabeza hidráulica a través de la muestra al final del ensayo (t=e<sub>nsayo</sub>).

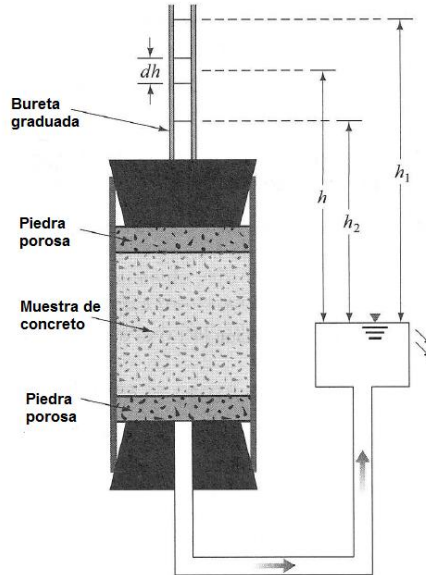
L=longitud de la muestra en Cm.

T= tiempo transcurrido durante el experimento, en segundos.

En la Figura 3 se expone el esquema el esquema de permeabilidad.



Figura 3. Prueba de permeabilidad bajo carga variable



Fuente: (Braja, 2001)

### 2.3.4.3. Propiedades mecánicas

La resistencia a compresión típica es del orden de 17 MPa; sin embargo, se pueden desarrollar resistencias hasta de 28 MPa. La resistencia a compresión está influenciada por los materiales componentes, el esfuerzo de compactación y por el contenido de vacíos. La resistencia a flexión varía entre 1 y 3.8 MPa. Su determinación puede estar sujeta a importante variabilidad, por lo que es común medir la resistencia a compresión y usar relaciones empíricas para estimar su valor. Por su parte, la contracción por secado en el concreto permeable se presenta más pronto, sin embargo, es menor, del orden de la mitad de lo esperado en el concreto convencional. La menor contracción permite eliminar el número de juntas, o en todo caso, respecto a los pavimentos construidos con concretos convencionales, colocarlas más espaciadas. (Aire, 2011)



### **Resistencia a la compresión**

Según la Norma ASTM C39 esta es la característica Principal del concreto, la forma de expresarla es en término de esfuerzo, generalmente en Kg/cm<sup>2</sup>. La forma de evaluar esta resistencia es mediante una prueba mecánica de compresión que consiste en aplicar una carga de compresión axial a cilindros moldeados o corazones de concreto, a una taza predeterminada, hasta que falla ocurre; esta prueba está contemplada en la norma ASTM C 39, la fuerza compresiva del espécimen calcula al dividir la carga máxima lograda durante la prueba entre el área calculada del espécimen, como se muestra en la Ecuación 2.5.

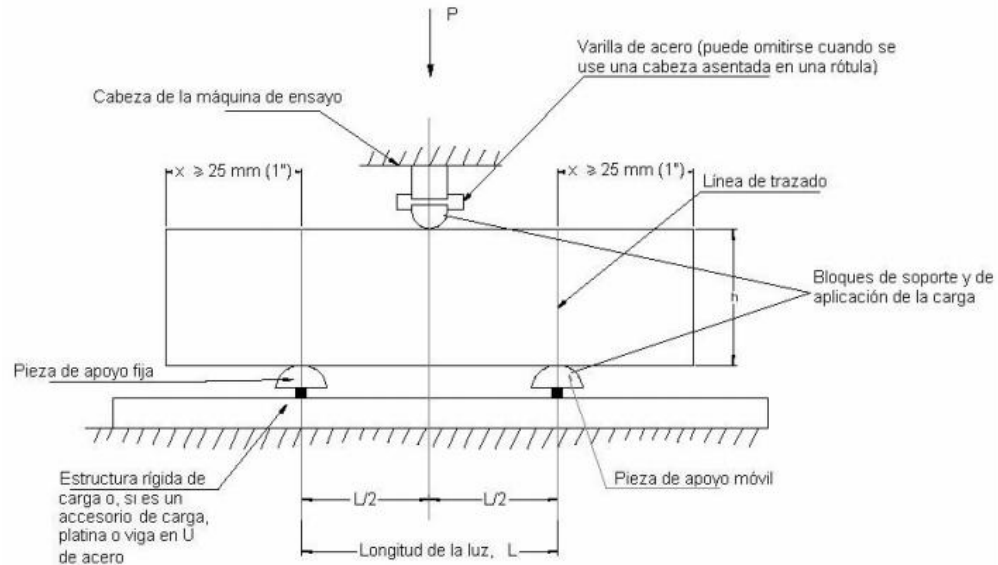
$$R = \frac{P}{A} \quad (2.5)$$

### **Módulo de rotura o resistencia a la flexión**

La INVE 415-07 contempla que la resistencia a flexión es una medida de la falla a la resistencia por momento de una viga o losa de concreto no reforzado (ver Figura 5), debido a que los pavimentos de concreto trabajan principalmente a flexión es recomendable que su especificación de resistencia sea acorde con ello, por eso el diseño considera la resistencia del concreto trabajando a flexión, que se le conoce como resistencia a la flexión por tensión (Sc) o Módulo de Rotura (MR) normalmente especificada a los 28 días. Para el cálculo se hace uso de las siguientes expresiones.



Figura 4. Esquema de ensayo de resistencia a la flexión



Fuente: INVE 415

Si la fractura en la superficie sometida a tensión dentro del tercio medio de la distancia entre apoyos se calcula el módulo de rotura, este se calcula con la Ecuación 2.6.

$$R = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (2.6)$$

En donde

R=Modulo de rotura, Mpa (Psi).

P=Carga máxima aplicada indicada por la máquina de ensayo, N, (Lbf).

L=Distancia entre apoyos, mm, (pulgadas).



*Estudio comparativo de mezclas de concreto poroso usando materiales disponibles en Cartagena de Indias para uso de pavimentos en parqueaderos*

---

b=Ancho promedio de la probeta en la fractura, mm, (pulgadas).

D=altura promedio del espécimen en lugar de la fractura, mm (pulgadas).

Se debe tener en cuenta que el peso de la viga no está incluido en el cálculo anterior.

Si la fractura ocurre en la superficie sometida a tensión por fuera del tercio medio de la distancia entre apoyos, en más de un 5% de esta, no se debe tener en cuenta el resultado del ensayo.



### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. Objetivo general**

Evaluar técnica y económicamente a nivel de laboratorio diferentes mezclas de concreto hidráulico poroso, utilizando materiales disponibles en la ciudad, que puedan ser empleados como capa de rodadura de pavimentos rígidos porosos en zonas de estacionamiento de Cartagena de Indias.

#### **3.2. Objetivos específicos**

- Identificar los materiales disponibles en las diferentes canteras cercanas a la ciudad de Cartagena, que puedan ser usados para el diseño de mezclas de concreto hidráulico poroso
- Analizar las diferentes propiedades físico - mecánicas e hidráulicas de cada una de las mezclas de concreto poroso que se diseñen, teniendo en cuenta su uso final.
- Hacer una evaluación económica de los diferentes diseños de mezclas de concreto poroso, comparando su comportamiento vs costos.
- Proponer recomendaciones de las mezclas más apropiadas para superficies de parqueaderos.



#### **4. ALCANCE**

El proyecto experimental se desarrollará a escala de laboratorio, en las instalaciones de la Universidad de Cartagena, El diseño de la mezcla de concreto poroso será realizado en el laboratorio teniendo en cuenta que este se limitará a solo el uso de materiales disponibles en la ciudad, es decir de las canteras aledañas a esta, que permitan desarrollar mezclas adecuadas para la implementación de pavimentos permeables. Se utilizaran las herramientas necesarias para la obtención de datos e información en pro del diseño y el cumplimiento de los objetivos. El desarrollo a nivel de laboratorio permitirá que a futuro los estudiantes de ingeniería civil tengan la oportunidad por medio de probetas ver el funcionamiento del concreto poroso en el ensayo de permeabilidad y así mismo para que puedan tener un acercamiento a esta técnica innovadora, para eso las probetas que se usen en esta investigación serán donada a la institución. Se utilizaran las herramientas necesarias para la obtención de datos e información en pro del diseño y el cumplimiento de los objetivos.

La investigación se delimitará en el diseño de las diferentes mezclas de concreto poroso que se pueden realizar con los distintos tipos de materiales para realizar un análisis comparativo de los diferentes parámetros para la escogencia de un solo modelo que sea el más óptimo y adecuado para el entorno.

Por otra parte, la investigación no tendrá en cuenta la colmatación de los poros ya que según (Kumer *et al.*, 2015) La colmatación de las partículas en los poros se presenta a los cuatro años de construido el pavimento permeable producido por la fuerza cortante ejercida por el tránsito y por todos los sedimentos que comenzaban a taponar los espacios vacíos o poros, disminuyendo el rendimiento drenante del pavimento.

El tiempo estimado para la realización del proyecto de investigación es de cuatro meses (segundo semestre de 2016), en el cual serán presentadas todas las bases teóricas, serán





*Estudio comparativo de mezclas de concreto poroso usando materiales disponibles en Cartagena de Indias para uso de pavimentos en parqueaderos*

---

realizados los ensayos de laboratorio, se presentaran los resultados, el análisis y las conclusiones.

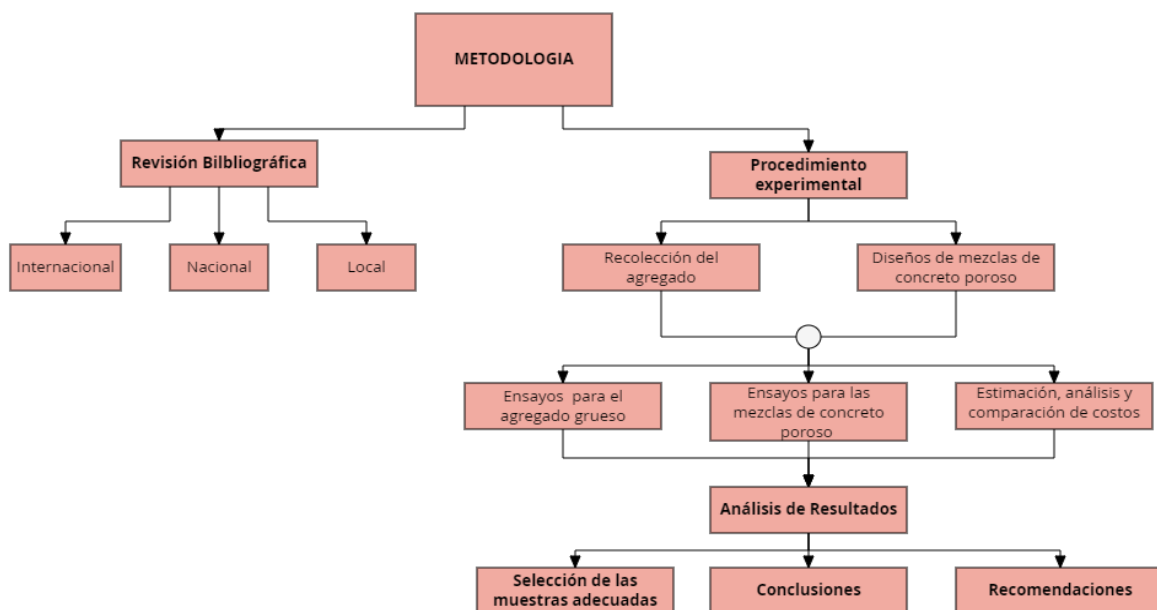
Se espera que el diseño realizado a escala de laboratorio proporcione nuevas formas de mitigar el impacto de las aguas fluviales en los parqueaderos residenciales de la ciudad de Cartagena, y que sirva como una alternativa complementaria para las estructuras de drenaje ya presentes en la zona, y en un futuro sirva como apoyo para la mejora de los sistema integrales de drenaje pluvial.



## 5. METODOLOGIA

La investigación tiene un enfoque cuantitativo y un diseño experimental a escala de laboratorio. Esto, debido a que se analizará el efecto de las variables, en este caso del porcentaje de vacíos, la relación agua-cemento y del tipo de material utilizado para el diseño de mezcla, sobre las propiedades mecánicas de ésta como la resistencia, el módulo de rotura y la permeabilidad. Lo anterior permitirá encontrar el mejor diseño de mezcla de un pavimento poroso que ofrezca un óptimo rendimiento, en la Figura 5 se puede observar el esquema metodológica utilizado en la investigación.

Figura 5. Esquema de metodología aplicado en el desarrollo del estudio.



Las fuentes de extracción de los agregados gruesos, serán de canteras aledañas a la ciudad de Cartagena, en este caso se escogieron dos canteras ubicadas en sitios cercanos a la



ciudad, los cuales son, Turbaco y las canteras cercanas a los municipios que limitan al nororiente con la ciudad.

Este capítulo consiste en la recopilación de la información secundaria y primaria necesaria para ejecutar la investigación. En la recopilación de la información secundaria se usarán las bases de datos disponibles en la Universidad de Cartagena y otros medios que permitan recopilar investigaciones e información relacionada con el tema. Para la recopilación primaria se harán 18 diseños de mezclas a las cuales se les realizarán ensayos de resistencia a la compresión, módulo de rotura y permeabilidad, además en esta parte es necesario comprobar la calidad de los agregados gruesos que se usarán. Todo lo anterior se detalla en los siguientes numerales

### **5.1. Recopilación de la información secundaria**

Esta etapa consistirá en la recolección de información secundaria de bases de datos de revistas, manuales y artículos a nivel internacional y nacional. Para de esta manera adaptarlos a nivel local, pues los estudios sobre el diseño de pavimentos porosos en Cartagena son pocos.

Se usarán las bases de datos Science Direct, EBSCO y Dialnet, para recolectar información de artículos científicos que sirvan para el análisis de la información que se obtenga por medio de las fuentes de recolección primaria. También se usará el manual “Pervious Concrete Pavements” desarrollado por la Portland Cement Association, en el cual se encuentran rangos típicos en los pavimentos porosos sobre las variables que se analizarán (Tennis *et al.*, 2004), así mismo se utilizará la información recolectada por la National Ready Mixed Concrete Association sobre estas variables, en el artículo “Pervious concrete – An overview” (Obla, 2010). De igual manera, se tomará como base de la investigación, la experiencia de otras universidades latinoamericanas y nacionales, plasmadas por medio de



tesis de pregrado, maestrías y artículos científicos, tal es el caso de la Pontificia Universidad Católica de Chile (Castro *et al.*, 2009), la Universidad Autónoma de México (Perez, 2009) y la Pontificia Universidad Javeriana (Castañeda & Moujir, 2014)

## **5.2. Procedimiento experimental**

### **5.2.1. Recolección de agregado**

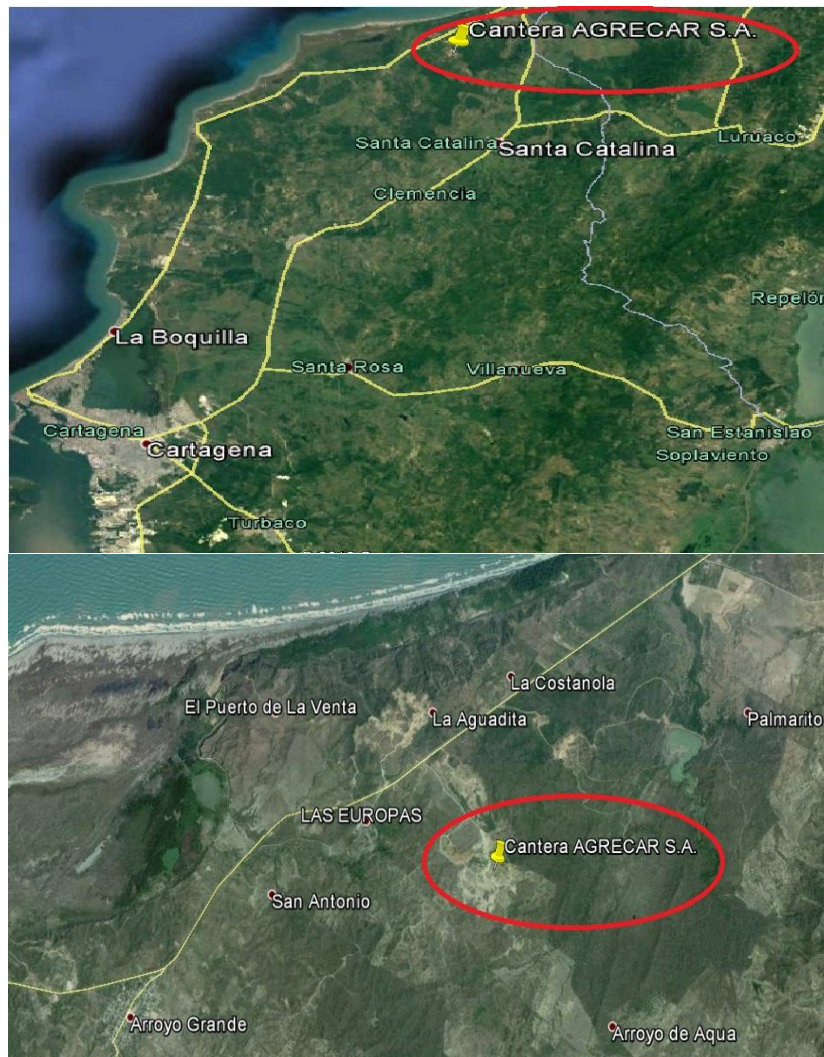
Para la obtención de los agregados que se utilizaron durante la investigación, se hizo una identificación de las zonas de cantera que suministran canto rodado y triturado de caliza a Cartagena de Indias, de dicho proceso se logró identificar que las mayores canteras de canto rodado se encuentran en la zona norte de la ciudad, a cercanías de municipios como lo son Bayunca, Arroyo de Piedra y Arroyo Grande; y de la misma manera se encontró que las canteras de triturado de caliza, se ubican en la zona comprendida por los municipios de Turbaco y Arjona.

Una vez identificadas las zonas de canteras, se inició una consulta sobre las diferentes canteras que se ubican en cada zona, para así seleccionar una cantera por cada zona, las cuales son, para el canto rodado, la cantera AGRECAR S.A., y para el triturado de caliza, la cantera Coloncito, de las cuales se puede distinguir su ubicación en las Figura 6 y Figura 7 respectivamente



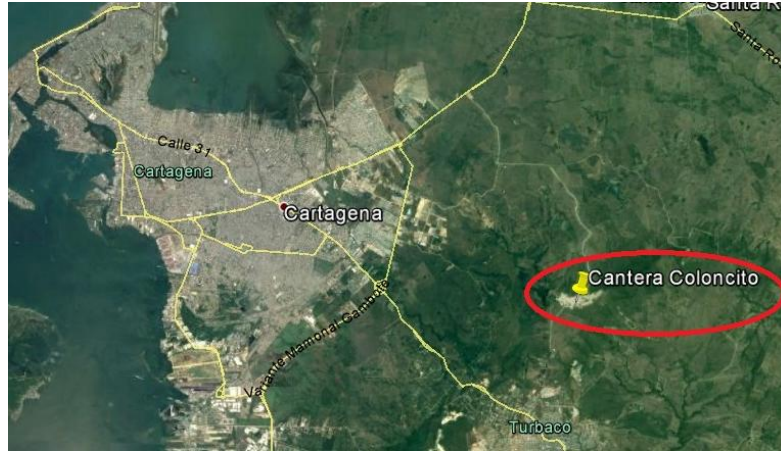
*Estudio comparativo de mezclas de concreto poroso usando materiales disponibles en Cartagena de Indias para uso de pavimentos en parqueaderos*

**Figura 6.** Ubicación geográfica de la cantera AGRECAR S.A.





**Figura 7.** Ubicación de la cantera Coloncito



Una vez identificadas y seleccionadas las canteras, se hizo una visita a las canteras escogidas para la recolección del material, según sea el tipo de agregado. En las Figuras 8 y 9 se evidencia la visita hecha a la cantera AGRECAR S.A., y en las Figuras 10 y 11 se muestra la visita a la cantera Coloncito

**Figura 8.** Cantera de AGRECAR S.A.







*Estudio comparativo de mezclas de concreto poroso usando materiales disponibles en Cartagena de Indias para uso de pavimentos en parqueaderos*

---

**Figura 9.** Recolección del material de parte de los investigadores en la cantera AGRECAR S.A.



**Figura 10.**Cantera Coloncito.



**Figura 11.** Recolección del material de parte de los investigadores en la cantera coloncito.





## 5.2.2. Ensayos para el agregado grueso

Para el análisis de la calidad de los agregados gruesos adquiridos durante esta investigación, se realizaron distintos ensayos como lo son el ensayo de resistencia al desgaste, gravedad específica y absorción, granulometría.

### 5.2.2.1. Ensayo para determinar la resistencia al desgaste de agregados grueso

Con el objetivo de determinar la resistencia al desgaste de los agregados grueso, se empleó la máquina de Los Ángeles con una carga abrasiva. El procedimiento y cálculo de los resultados del ensayo se realizaron de acuerdo a lo establecido en la NTC 98, la muestra se lavó y se colocó a secar en un horno a 110° C durante un día. Cabe destacar que el ensayo se realizó para dos tipos de muestras canto rodado y triturado de caliza el cual se realiza el mismo procedimiento para los tipos de agregados.

La muestra se fracción en los distintos tamices y se seleccionó el tipo de gradación De acuerdo a la Tabla 1. Y se escoge la distribución que más se acoplen con los datos mostrados en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Granulometría de la muestra de agregado en cada ensayo

Pasa tamiz		Retenido en tamiz		Masa de la muestra para ensayo (g) Granulometrias			
mm	(alt.)	mm	(alt.)	A	B	C	D
37.5	(1½")	25.0	(1")	1250 ± 25	...	...	...
25.0	(1")	19.0	(¾")	1250 ± 25	...	...	...
19.0	(¾")	12.5	(½")	1250 ± 10	2500 ± 10	...	...
12.5	(½")	9.5	(3/8")	1250 ± 10	2500 ± 10	...	...
9.5	(3/8")	6.3	(¼")	...	...	2500 ± 10	...
6.3	(¼")	4.75	(No.4)	...	...	2500 ± 10	...
4.75	(No.4)	2.36	(No.8)	...	...	...	5000 ± 10
TOTALES				5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10

Fuente: INV E-218-07





Posteriormente se selecciona la carga de acuerdo a la Tabla 2, dependiendo de la masa de la muestra para ensayo.

**Tabla 2.** Carga abrasiva

Granulometría de ensayo	Número de esferas	Masa Total g
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15

**Fuente:** INV E-218-07

Una vez seleccionada la carga, se introduce la muestra en la máquina de Los Ángeles, junto a la carga abrasiva correspondiente (ver Figura 12) y se activó la maquina durante 15 minutos, sometiendo la muestra a 500 revoluciones.

**Figura 12.** Máquina de los ángeles





Una vez detenida la máquina de Los Ángeles, se retiró la muestra y se lavó sobre el tamiz N° 12. El material retenido se llevó a secar en el horno durante un día, y luego se pesó obteniendo la masa de la muestra seca después del ensayo.

Con la información obtenida se realizó el cálculo de % de desgaste con la Ecuación 5.1

$$\%Desgaste = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100 \quad (5.1)$$

Donde  $P_1$  es la masa de la muestra antes del ensayo y  $P_2$  es la masa de la muestra después del ensayo.

#### **5.2.2.2. Ensayo de gravedad específica y absorción de agua del agregado grueso**

Este método de ensayo tiene por objeto determinar la densidad y la absorción del agregado grueso y se encuentra descrito en la NTC 176. La densidad se puede expresar como densidad aparente, densidad aparente (SSS) (saturada superficialmente seca). O densidad nominal (SSS) y la absorción se basa en el humedecimiento en agua del agregado después de 24 h

En primer lugar se lava adecuadamente los componentes de la muestra de agregado para eliminar el polvo o material adherido a sus superficies y se sumergen en agua durante 24 horas.

Este material se seca cuidadosamente superficialmente con un trapo, de esta manera se puede obtener el peso de una muestra saturada pero superficialmente seca. Luego de



pesar la muestra, esta se coloca en estado de saturación interna y se sumerge en una canasta de alambre como lo vemos en la Figura 13 y se determina su peso sumergida en agua, a una temperatura de aproximadamente 25°C.

**Figura 13.** Montaje para determinar el peso sumergido en el ensayo de gravedad específica



Hecho esto, se procede a secar la muestra utilizando una estufa eléctrica a una temperatura entre 100°C y 110°C hasta que se logre obtener una masa constante. Luego se deja reposar hasta que alcance la temperatura ambiente y se pesa nuevamente.

Posteriormente se realizan los cálculos para determinar la absorción y la densidad específica del agregado grueso.

Se obtiene la masa en gramos de la muestra seca (P), la masa en gramos de la muestra saturada internamente y seca superficialmente (P<sub>ss</sub>) y la masa en gramos de la muestra sumergida en agua (P<sub>i</sub>), con ello determinamos la densidad aparente (D<sub>e</sub>) Ecuación 5.2, la



densidad específica saturada pero superficialmente seca ( $De(sss)$ ) Ecuación 5.3, densidad aparente ( $Da$ ) Ecuación (5.4) y la Absorción de los agregados Con la Ecuación 5.5.

$$De = \frac{P}{P_{SS} - P_i} \quad (5.2)$$

$$De(sss) = \frac{P_{SSS}}{p_{SSS} - P_i} \quad (5.3)$$

$$Da = \frac{P}{P - P_i} \quad (5.4)$$

$$\% \text{ Absorción} = \frac{P_{SSS} - P}{P} \times 100 \quad (5.5)$$

### **5.2.2.3. Ensayo de granulometría para agregado grueso.**

Es un método mediante el cual se separa una masa de agregados en fracciones de igual tamaño, consiste en hacerla pasar a través de una serie de tamices que tienen aberturas cuadradas. Este ensayo tiene como objetivo determinar si el agregado a analizar presenta una buena o mal gradación lo cual está regido por la Norma INV E-123-07, para llevar a cabo este ensayo se tiene una muestra de 2000 g de agregado grueso o gravilla tipo canto rodado y triturado de caliza. En la Figura 14 se puede ver la serie de tamices usada que en este caso al ser un agregado grueso de tamaño pequeño, se utilizó de manera adicional los tamices N° 10 y N° 20, que hacen parte de la serie de finos.



**Figura 14.** Serie de tamices a la cual es pasada la muestra.



Después de ser tamizada la muestra se pesa cada uno del material retenido en los distintos tamices y se llena la Tabla 3.

**Tabla 3.** Tabla para distribución por tamices de la muestra

<b>Tamiz</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Peso retenido (g)</b>	<b>Porcentaje de Material retenido (%)</b>	<b>Porcentaje que pasa el respectivo tamiz (%)</b>	<b>Porcentaje retenido acumulado (%)</b>
3/4"	19.1	-	-	-	-
1/2"	12.7	-	-	-	-
3/8"	9.52	-	-	-	-
N° 4	4.76	-	-	-	-
N° 10	2	-	-	-	-
N° 20	0.85	-	-	-	-



De acuerdo a los resultados de los datos obtenidos para la Tabla 3. Se realiza una curva granulométrica, la cual definirá si está bien gradada o no, por otra parte se debe calcular el % de arcilla que tiene la muestra con la Ecuación (5.6).

$$\% \text{ Arcilla} = \frac{P1 - P2}{P1} \times 100 \quad (5.6)$$

Donde

P1= Peso de la muestra sin lavar

P2= peso de la muestra lavada sobre el tamiz N° 200 y posteriormente secada

### **5.2.3. Diseño de mezclas de concreto poroso**

El diseño de mezclas de concreto poroso, se desarrolló determinando la proporción de los materiales de la mezcla de concreto, usando el proceso descrito en el apéndice 6 de la norma ACI 211.3R-02, en el cual se determina la proporción de la pasta de cemento por medio del porcentaje de vacío, seguidamente se encuentra la proporción de agregado grueso y luego por medio de la relación agua/cemento, se encuentra las proporciones cemento y agua.

En la Tabla 4 se encuentran las 18 mezclas que se diseñaron, teniendo en cuenta el número de variables independientes (tipo de agregado, la relación agua/cemento y el porcentaje de vacíos) y la cantidad de valores a analizar por cada variable, la cual se estimó de acuerdo a la confiabilidad que se quiere al estudiar las variables independientes.



*Estudio comparativo de mezclas de concreto poroso usando materiales disponibles en Cartagena de Indias para uso de pavimentos en parqueaderos*

**Tabla 4.** Mezclas de concreto poroso estudiados

Referencia	Tipo de agregado grueso	Relación agua/cemento	Porcentaje de vacíos
CR1	Canto Rodado	0.26	15%
CR2	Canto Rodado	0.26	20%
CR3	Canto Rodado	0.26	25%
CR4	Canto Rodado	0.35	15%
CR5	Canto Rodado	0.35	20%
CR6	Canto Rodado	0.35	25%
CR7	Canto Rodado	0.45	15%
CR8	Canto Rodado	0.45	20%
CR9	Canto Rodado	0.45	25%
TC1	Triturado de caliza	0.26	15%
TC2	Triturado de caliza	0.26	20%
TC3	Triturado de caliza	0.26	25%
TC4	Triturado de caliza	0.35	15%
TC5	Triturado de caliza	0.35	20%
TC6	Triturado de caliza	0.35	25%
TC7	Triturado de caliza	0.45	15%
TC8	Triturado de caliza	0.45	20%
TC9	Triturado de caliza	0.45	25%

Para determinar el proporcionamiento calculamos solo una combinación a modo de ejemplo como se muestra en el siguiente procedimiento.

Relación a/c=0.26, volumen de vacíos=0.15, peso específico del cemento=3.15

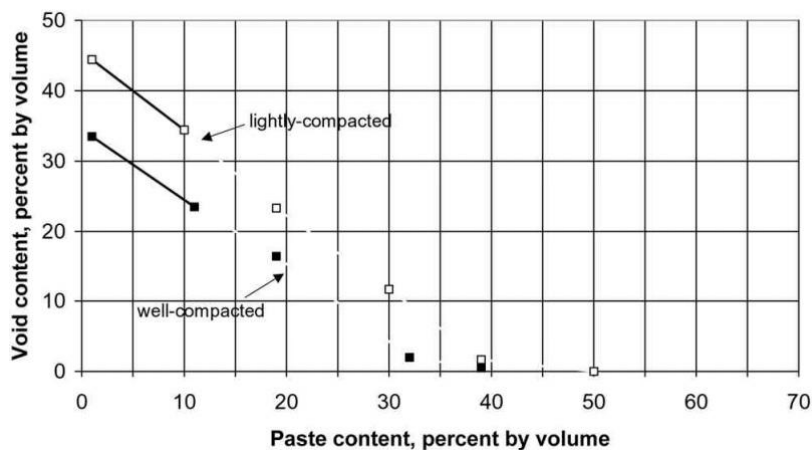
Para determinar el volumen de la pasta se hizo necesario el uso de la Figura 15 el cual permite obtener el valor por medio del volumen de vacíos.

Según la Figura 14 el volumen de pasta para esta combinación es de 0.2, luego se determinó el volumen de agregado necesario para que la mezcla de concreto poroso se



encuentre bien proporcionada, para determinar el volumen de agregado se usó la Ecuación 5.7

**Figura 15.** Relación del contenido de vacíos y el contenido de pasta para agregado No. 8



Fuente: ACI 211.3R, 1998

$$\text{Volumen de agregados} = 1 - (V \text{ de vacíos} + V \text{ de pasta}) \quad (5.7)$$

$$\text{Volumen de agregados} = 1 - (0.15 + 0.2)$$

$$\text{Volumen de agregados} = 0.65$$

En cuanto al volumen de cemento primero se calculó el contenido de cemento y el volumen en metros cúbicos con la siguiente Ecuación 5.8.

$$\text{Contenido de cemento} = \frac{V_p}{\frac{1}{3.15 * 1000} + \frac{a}{1000c}} \quad (5.8)$$





$$\text{Contenido de cemento} = \frac{0.2}{\frac{1}{3.15 * 1000} + \frac{0.26}{1000}}$$

$$\text{Contenido de cemento} = 346.344$$

Ahora hallamos el volumen de cemento utilizando el peso específico en la siguiente Ecuación 5.9.

$$\text{Volumen de Cemento} = \frac{\text{Contenido de cemento}}{\text{Pe de cemento} * 1000} \quad (5.9)$$

$$\text{Volumen del cemento} = \frac{346.344}{3.15 * 1000}$$

$$\text{Volumen del cemento} = 0.1099 \text{ m}^3$$

Ya teniendo el contenido de cemento y la relación agua cemento podemos calcular la cantidad de agua necesaria para la proporción de la mezcla.

$$\frac{a}{c} = 0.26 \quad (5.10)$$

Despejamos,

$$a = 0.26 * 346.344/1000$$

$$a = 0.09004 \text{ m}^3$$



De igual forma se realizó el mismo procedimiento de cálculo para las diferentes combinación de mezclas de concreto poroso. Los resultados se muestran en el Anexo 1 y 2, para canto rodado y caliza respectivamente

#### **5.2.4. Ensayos para las mezclas de concreto poroso**

Con el fin de poder desarrollar el análisis de las propiedades mecánicas e hidráulicas, por medio de los ensayos de resistencia a la compresión, módulo de rotura y permeabilidad, se hace necesario la preparación de la mezclas de concreto y muestras para los ensayos al concreto endurecido, a su vez también es fundamental realizar el ensayo de asentamiento para determinar la fluidez de la mezcla de concreto fresco.

##### **5.2.4.1. Ensayo de asentamiento**

El asentamiento es una de las propiedades fundamentales a analizar del concreto en estado fresco, es por eso que posteriormente a la preparación de la mezcla, se hizo el ensayo por medio del cono de Abrams, por medio de la norma NTC 396. En el Figura 16, se puede ver el ensayo de asentamiento, tomando como ejemplo las mezclas CR1 y TC2.

##### **5.2.4.2. Ensayo de resistencia a la compresión**

La determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndrico fabricados con diferentes mezclas de concreto poroso, se hizo por medio de la norma NTC 673. Para cada una de las mezclas se ensayaron tres muestras midiendo la resistencias a los 21 y 28 días después de



*Estudio comparativo de mezclas de concreto poroso usando materiales disponibles en Cartagena de Indias para uso de pavimentos en parqueaderos*

---

fabricar la mezcla. Los especímenes se diseñaron con medidas iguales a 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, como se pueden ver en la Figura 17. En la Figura 17 se puede observar uno de los especímenes antes de ensayar, durante el ensayo y después de ser ensayado.

**Figura 16.** Ensayo de asentamiento para las mezclas CR1 (izquierda) y TC2 (derecha)



**Figura 17.** Especímenes cilíndricos usados para determinar la resistencia a la compresión





**Figura 18.** Espécimen antes de ser ensayado (izquierda), durante el ensayo (centro) y después de ser ensayado (derecha)



#### **5.2.4.3. Ensayo de módulo de rotura**

La evaluación del módulo de rotura de las diferentes viguetas elaboradas con las diferentes mezclas de concreto poroso, se ejecutó de acuerdo a la norma INV E – 415 – 07. La medición de la resistencia de las diferentes muestras elaboradas se hizo 14 días después de fundir la mezcla en los moldes. Las viguetas se fabricaron con 15 cm de alto, 15 cm de ancho y 50 cm de largo (ver Figura 19). En la Figura 20 se encuentra una de las viguetas momentos antes de ser ensayada y luego de ser ensayada.



**Figura 19.** Especímenes prismáticos usados para determinar la resistencia a la flexión



**Figura 20.** Vigueta ante de ser ensayada (izquierda) y después de ser ensayada (derecha)



#### **5.2.4.4. Ensayo de permeabilidad**

El estudio de la permeabilidad de las diferentes mezclas de concreto poroso se realizó de acuerdo a las recomendaciones dadas en la norma ACI522R-06, en el cual se estipula el uso del método de carga variable para determinar el coeficiente de permeabilidad del concreto poroso, por lo cual se siguieron las especificaciones y procedimiento para la realización del





*Estudio comparativo de mezclas de concreto poroso usando materiales disponibles en Cartagena de Indias para uso de pavimentos en parqueaderos*

---

ensayo por medio de la norma INVE 130-07. En este ensayo se usó un permeámetro de carga variable, el cual se puede observar en el Figura 21. En este permeámetro, se usó un tubo de 3 pulgadas de diámetro para el tubo de la carga y se utilizaron muestras de 10 cm de alto y 3 pulgadas de diámetro, estas se pueden visualizar en la Figura 22.

**Figura 21.** Permeámetro de carga variable usado durante la investigación



**Figura 22.** Muestras usadas durante el ensayo de permeabilidad





### **5.3. Estimación, análisis y comparación de costos del concreto poroso**

En el proceso de la evaluación de los costos de las diferentes mezclas de concreto poroso usadas durante esta investigación, se ejecutó una estimación de los diferentes costos de cada material usados durante la fabricación de la mezclas, esto se realizó en base a la información suministrada por los distintos distribuidores de materiales, como lo fueron, para el agregado grueso, los encargados en las distintas canteras, en el caso del cemento, el lugar o centro de venta de materiales de construcción y por ultimo para el agua, la empresa encargada del servicio de acueducto en la ciudad.

Una vez hecha la estimación de costos, se desarrolló el análisis de precios unitarios de cada una de las mezclas de concreto poroso que elaboradas durante la investigación, esto se llevó a cabo teniendo en cuenta las dosificaciones obtenidas por cada mezcla. Este análisis se hizo con el fin de conocer, el valor de cada  $m^3$  de concreto poroso. De manera posterior, se llevó a cabo una comparación de los distintos costos obtenidos por cada mezcla, durante el análisis.

### **5.4. Selección de la mezcla más optima**

Después que se haya estudiado el comportamiento técnico y económico, se ejecutará un análisis en el cual se pueda examinar cómo afecta el comportamiento de las propiedades del concreto poroso en el costo de mezcla, esto se desarrollara por medio de una matriz que ayude a evidenciar que mezclas cumplen con los rangos establecidos en todas su propiedades



## **6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Teniendo en cuenta cada uno de los procedimientos descritos en el capítulo anterior, en esta sección se presentan los resultados obtenidos y los análisis de los mismos

### **6.1. Ensayos para el agregado grueso**

Las propiedades y las características de los agregados son unos de los aspectos con mayor importancia en un diseño de mezcla o concreto, debido a que de ellos puede depender las propiedades mecánicas y físicas de un concreto o una mezcla, ya que intervienen directamente en este y su comportamiento se debe analizar en base a diferentes ensayos establecidos en normas o guías para el mejor manejo de estos.

#### **6.1.1. Ensayo para determinar la resistencia al desgaste del agregado grueso**

Con el fin de encontrar la resistencia al desgaste de los agregados grueso, se empleó la máquina de Los Ángeles con una carga abrasiva. El procedimiento y cálculo de los resultados del ensayo se realizaron de acuerdo a lo establecido en la NTC 98. Teniendo en cuenta la granulometría de ambos tipos de agregado que se usaron en esta investigación y lo establecido en la norma NTC 98, se seleccionó en la Tabla 1 la gradación Tipo C, por lo cual el tamaño de la muestra que se empleó en el ensayo fue de 5000 g, compuesto por 2500 g de material que pasa por el tamiz 3/8" y es retenido en el tamiz 1/4" y por 2500 de material que pasa por el tamiz 1/4" y se retiene en el tamiz No. 4. En cuanto a la carga





abrasiva, se utilizó la Tabla 2 obtenida de la NTC 98, donde para una gradación tipo C se emplean 8 balines como carga abrasiva.

Una vez ejecutado el procedimiento se obtuvieron los resultados que podemos ver en la Tabla 5 y el porcentaje de desgaste se obtuvo por medio de la Ecuación 5.1.

**Tabla 5.** Resultados obtenidos durante el ensayo en la máquina de Los Ángeles

<b>Tipo de agregado</b>	<b>Peso de la muestra antes del ensayo (g)</b>	<b>Peso de la muestra después del ensayo (g)</b>	<b>Porcentaje de desgaste (%)</b>
Canto Rodado	5000	4183.90	16.32
Triturado Calizo	5000	3409.70	31.81

Teniendo en cuenta el Artículo 500-07 de INVIAS, donde se dan especificaciones para pavimento de concreto hidráulico, se tiene como requisito para este tipo de pavimentos, un porcentaje de desgaste de Los Ángeles máximo de 40 % (Instituto Nacional de Vías, 2007), por lo que al compararlo con los valores obtenidos para cada tipo de agregado (ver Tabla 5) se tiene que los agregados cumplen con este requisito.

### **6.1.2. Ensayo de granulometría para agregados gruesos**

El análisis granulométrico para el agregado grueso tipo canto rodado se comparó con los requisitos presentados en la NTC 174 la cual contiene estipulado algunos límites para determinar si el agregado es apto o no para el uso en concreto, de acuerdo a esto se presenta la Tabla 6, la cual es base para determinar si se el agregado tiene una buena o mala gradación.



*Estudio comparativo de mezclas de concreto poroso usando materiales disponibles en Cartagena de Indias para uso de pavimentos en parqueaderos*

**Tabla 6.** Requisitos de gradación para agregado grueso

Número del tamaño del agregado	Tamaño nominal (tamices de abertura cuadrada)	Material que pasa uno de los siguientes tamices (porcentaje en masa)												
		100 mm	90 mm	75 mm	63 mm	50 mm	37,5 mm	25,0 mm	19,0 mm	12,5 mm	9,5 mm	4,75 mm (No.4)	2,36 mm (No.8)	1,18 mm (No.16)
1	90 mm a 37,5 mm	100	90-100	-	25-60	-	0-15	-	0-5	-	-	-	-	-
2	63 mm a 37,5 mm	-	-	100	90-100	35-70	0-15	-	0-5	-	-	-	-	-
3	50 mm a 25,0 mm	-	-	-	100	90-100	35-70	0-15	-	0-5	-	-	-	-
357	50 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	100	95-100	-	35-70	-	10-30	-	0-5	-	-
4	37,5 mm a 19,0 mm	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-15	-	0-5	-	-	-
467	37,5 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	-	100	95-100	-	35-70	-	10-30	0-5	-	-
5	25,0 mm a 12,5 mm	-	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-10	0-5	-	-	-
56	25,0 mm a 9,5 mm	-	-	-	-	-	100	90-100	40-85	10-40	0-15	0-5	-	-
57	25,0 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	-	-	100	95-100	-	25-60	-	0-10	0-5	-
6	19,0 mm a 9,5 mm	-	-	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-15	0-5	-	-
67	19,0 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	-	-	-	100	90-100	-	20-55	0-10	0-5	-
7	12,5 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	-	-	-	-	100	90-100	40-70	0-15	0-5	-
8	9,5 mm a 2,36 mm (No.8)	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85-100	10-30	0-10	0-5

Fuente: NTC 174

Los datos obtenidos en laboratorio después de realizar el ensayo de granulometría son los de la Tabla 7.

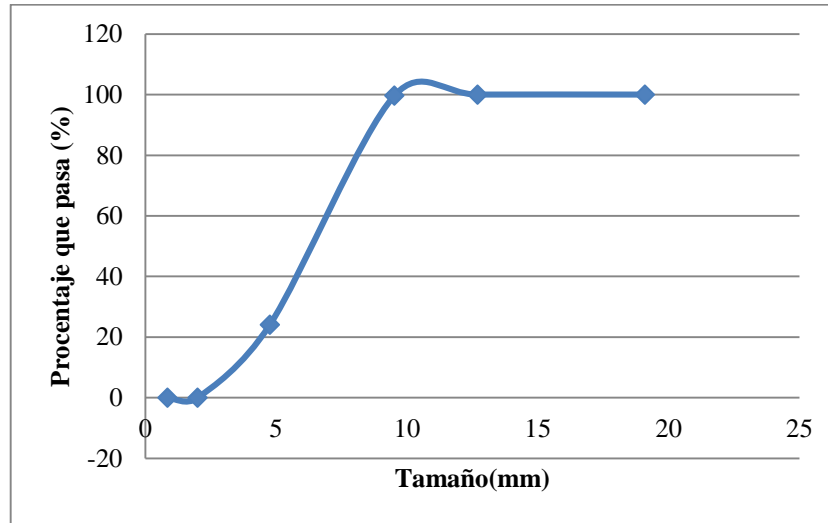
**Tabla 7.** Resultado de material retenido en la serie de tamices para canto rodado.

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	Porcentaje de Material retenido (%)	Porcentaje que pasa el respectivo tamiz (%)	Porcentaje retenido acumulado (%)
3/4"	19.1	0	0	100	0
1/2"	12.7	0	0	100	0
3/8"	9.52	6.3	0.324809239	99.67519076	0.324809239
N° 4	4.76	1465.1	75.53619303	24.13899773	75.86100227
N° 10	2	467.1	24.08228501	0.056712724	99.94328728
N° 20	0.85	0.7	0.036089915	0.020622809	99.97937719

De acuerdo a la Tabla 7 se realizó la gráfica del porcentaje que pasa de material en cada uno de los tamices, esto para determinar el tipo de gradación del agregado en estudio.



Figura 23. Curva granulométrica agregado grueso tipo canto rodado.



Al observar la Figura 23 se puede afirmar que el agregado representa una muestra bien gradada, pues poseen diferentes tamaños de partículas, lo que le brinda a los mismos buena densidad y por tanto buenas propiedades mecánicas a la mezcla en la que se utilicen.

Comparando los valores de la Tabla 6 y la Tabla 7 se puede apreciar que el agregado analizado posee una gradación buena, es decir bien gradada debido a que cumple con todos los límites o requisitos estipulados en la norma NTC174 el cual asegura de que el agregado pueda ser utilizado para concreto.

Por otra parte el porcentaje de arcilla se determinó con la Ecuación 5.6.

$$\% \text{ Arcilla} = \frac{2000 - 1939.6}{2000} \times 100 = 3.15 \%$$



*Estudio comparativo de mezclas de concreto poroso usando materiales disponibles en Cartagena de Indias para uso de pavimentos en parqueaderos*

Lo cual nos resulta con un % de arcilla de 3.15, debido a esto la muestra es recomendable usar ya que presenta un porcentaje de arcilla bajo.

Este ensayo también fue realizado para el agregado tipo triturado de caliza el cual se obtuvo como resultado la Tabla 8.

**Tabla 8.** Resultado de material retenido en la serie de tamices para triturado de caliza.

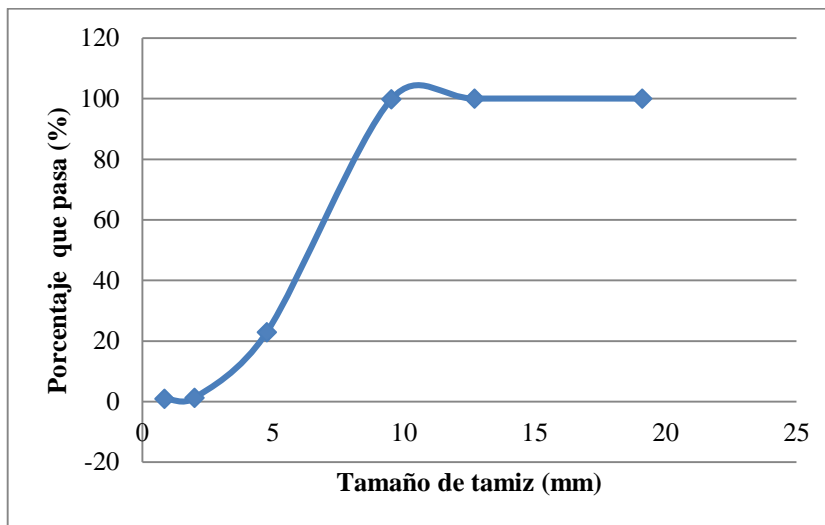
<b>Tamiz</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Peso retenido (g)</b>	<b>Porcentaje de Material retenido (%)</b>	<b>Porcentaje que pasa el respectivo tamiz (%)</b>	<b>Porcentaje retenido acumulado (%)</b>
3/4"	19.1	0	0	100	0
1/2"	12.7	0	0	100	0
3/8"	9.52	3.4	0.183813591	99.81618641	0.183813591
N° 4	4.76	1422.2	76.88814402	22.92804239	77.07195761
N° 10	2	401.4	21.70081635	1.227226037	98.77277396
N° 20	0.85	4.7	0.254095259	0.973130778	99.02686922

De acuerdo a la Tabla 8 se realizó la gráfica del porcentaje que pasa de material en cada uno de los tamices, esto para determinar el tipo de gradación del agregado en estudio.

En el caso de agregado tipo triturado de caliza se realizó la comparación con los límites para el uso de agregado en concreto, se obtuvo una buena gradación debido a que todos los porcentajes de agregado que pasan en cada uno de los tamices cumplen con los intervalos estipulados en la NTC 174.



Figura 24. Curva granulométrica agregado grueso tipo triturado de caliza.



Por otra parte el porcentaje de arcilla se determinó con la siguiente Ecuación 5.6.

$$\% \text{ Arcilla} = \frac{2000 - 1849.7}{2000} \times 100 = 7.515 \%$$

Lo cual nos resulta con un % de arcilla de 7.515, debido a esto la muestra no es recomendable usar ya que presenta un porcentaje de arcilla alto.

### 6.1.3. Ensayo de gravedad específica y absorción de agua del agregado grueso

Con el fin de determinar la densidad y la absorción de los agregados gruesos, se realizó el ensayo de gravedad específica y absorción en estos, debido a que esta información nos



proporciona cómo se comporta el agua en los agregados, el cual nos permite mejorar las dosificaciones teniendo en cuenta que absorción posee el agregado.

Se obtuvo la masa en gramos de la muestra seca (P), la masa en gramos de la muestra saturada interiormente y seca superficialmente (P<sub>ss</sub>) y la masa en gramos de la muestra sumergida en agua (P<sub>i</sub>), para el cálculo de los datos obtenidos en la Tabla 9, se utilizaron las Ecuaciones (5.2), (5.3), (5.4) y (5.5), para calcular la densidad específica, densidad específica (s<sub>ss</sub>), densidad aparente y absorción.

**Tabla 9.** Resultados de gravedad específica y absorción. (canto rodado)

<b>Datos de gravedad específica</b>	
<b>Peso en el aire muestra seca</b>	1455.5 g
<b>Peso en el aire muestra s.s.s</b>	1476.6 g
<b>Peso en el agua, muestra saturada</b>	902.7 g
<b>Gravedad Especifica Bulk =</b>	2.54 g/cm <sup>3</sup>
<b>Gravedad Especifica Bulk S.S.S. =</b>	2.57 g/cm <sup>3</sup>
<b>Gravedad Especifica Aparente =</b>	2.63 g/cm <sup>3</sup>
<b>Absorción (%) =</b>	1.44 %

La densidad aparente del agregado resulta mayor que la densidad específica, dado que en esta el volumen es menor ya que en esta no se incluye el volumen ocupado por los poros saturables, y la densidad es inversamente proporcional al volumen. El agregado grueso en estudio (canto rodado) presentó una absorción del 1.44%.

De igual forma se realizó el mismo proceso para el agregado tipo triturado de caliza el cual se obtuvo como resultado la Tabla 10.



**Tabla 10.** Resultados de gravedad específica y absorción. (triturado de caliza)

<b>Datos de gravedad específica</b>	
<b>Peso en el aire muestra seca</b>	1295.6 g
<b>Peso en el aire muestra s.s.s</b>	1362.2 g
<b>Peso en el agua, muestra saturada</b>	812.6 g
<b>Gravedad Especifica Bulk =</b>	2.36 g/cm <sup>3</sup>
<b>Gravedad Especifica Bulk S.S.S. =</b>	2.48 g/cm <sup>3</sup>
<b>Gravedad Especifica Aparente =</b>	2.68 g/cm <sup>3</sup>
<b>Absorción (%) =</b>	5.14 %

Lo que representa que la absorción de este agregado es grande por tanto se debe adicionar el volumen en agua que representa la absorción del agregado para añadirlo a la muestra y no desproporcionar la mezcla de diseño.

Por otra parte la gravedad específica nos sirve para determinar el peso de la mezcla dependiendo de la densidad la cual nos facilita para motivos de diseño o requerimiento si se desea un tipo de mezcla ligera o pesada.

## **6.2. Ensayos para las mezclas de concreto poroso**

El estudio de las propiedades físico mecánicas de las mezclas de concreto es sin duda alguna todo el proceso para definir si un concreto puede ser utilizado o no, dependiendo de sus características mecánicas como, manejabilidad, resistencia a la compresión, módulo de rotura, permeabilidad, porosidad entre otros, el cual nos permite analizar su comportamiento para las diferentes escenarios a los que puede encontrarse sometido este, permitiendo garantizar un adecuado uso con respecto a los requerimientos que se contemplen en el área de trabajo.



### **6.2.1. Ensayo de asentamiento**

Partiendo del procedimiento descrito en la norma NTC 936, se obtuvieron los diversos resultados de asentamientos para cada mezcla, los cuales se encuentran descritos en la Tabla 11, además en los Anexos 3 al 12 se observan las fotografías de cada uno de los ensayos de asentamientos ejecutados a las distintas mezclas.

**Tabla 11.** Resultados obtenidos durante el ensayo de asentamiento

<b>Mezcla</b>	<b>Asentamiento (mm)</b>
<b>CR1</b>	0
<b>CR2</b>	35
<b>CR3</b>	193
<b>CR4</b>	0
<b>CR5</b>	40
<b>CR6</b>	82
<b>CR7</b>	0
<b>CR8</b>	0
<b>CR9</b>	106
<b>TC1</b>	0
<b>TC2</b>	0
<b>TC3</b>	190
<b>TC4</b>	0
<b>TC5</b>	0
<b>TC6</b>	80
<b>TC7</b>	0
<b>TC8</b>	0
<b>TC9</b>	103





Teniendo en cuenta la ACI – 522R, es común que el asentamiento en los concreto porosos sea cero, debido a que son mezclas secas que tienden a tener una buena adherencia, por lo cual son válidos los asentamientos de las mezclas CR1, CR4, CR7, CR8, TC1, TC2, TC4, TC5, TC7 y TC8. En cuanto a las mezclas CR2 y CR5, se tienen valores que puede ser aceptables, porque se han encontrado mezclas que llegan hasta 50 mm (Tennis *et al.*, 2004).

Por otro lado, las mezclas CR3, CR6, CR9, TC3, TC6 y TC9 tuvieron asentamientos mayores a 50 mm por lo cual no se encuentran en los valores comunes para este tipo de concreto; de acuerdo a lo observado en el laboratorio, una de las causas que esto se diera es que estas mezclas tenían muy poca agua, lo que provocó baja estabilidad en estas mezclas y por consiguiente poca adherencia (ver Figura 25), además cabe resaltar que el porcentaje de vacíos de estas mezclas es 25%, el cual es el máximo en esta investigación, es decir, que a medida que aumenta el porcentaje de vacíos y/o disminuye el agua, la mezcla pierde estabilidad, esto se puede evidenciar en las mezclas CR3 y TC3, que son las que menos agua poseen y son las que tuvieron un mayor desplome.

**Figura 25.** Asentamiento de mezclas con poca agua





### **6.2.2. Ensayo de resistencia a la compresión**

Las pruebas para determinar la resistencia a la compresión del concreto se realizaron en la máquina de compresión simple, que está compuesta por un equipo principal, una fuente hidráulica, un controlador y un sistema de control computarizado. Su placa móvil es accionada por energía eléctrica, hasta lograr ajustar la zona con la compresión deseada, la prueba se realizó a cilindros de 15 cm de diámetro y 30 cm de alto, estos fueron ensayados con diferentes dosificaciones, variando su porcentaje de vacíos, tipo de agregado grueso y la relación agua cemento.

En la siguiente tabla se observa los resultados obtenidos para el tipo de agregado Triturado de caliza (TC), las pruebas se hicieron 1 a los 21 días y dos a los 28 días, en total 3 cilindros por mezcla. Los esfuerzos fueron calculados con la Ecuación 2.6.

**Tabla 12.** Resultados de esfuerzo y carga para cilindros de triturado de caliza

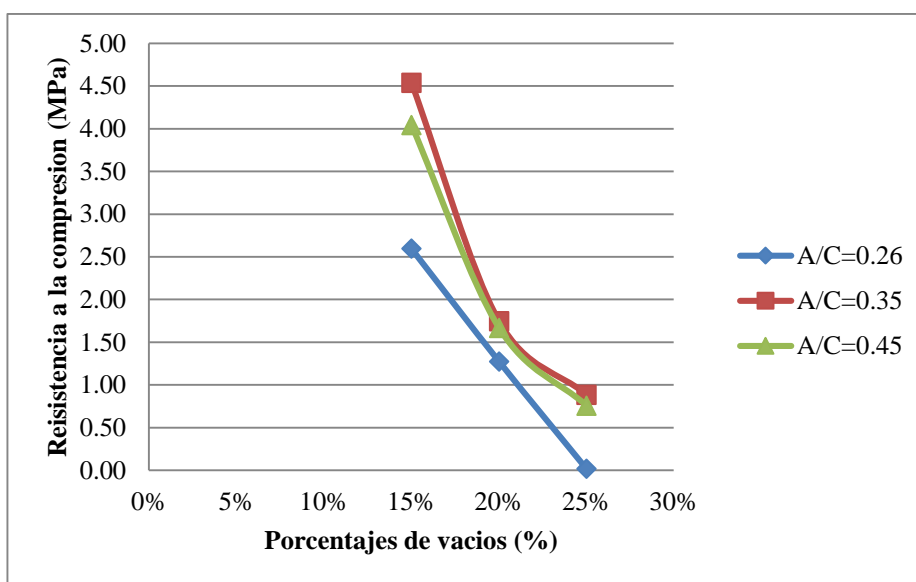
<b>Muestra</b>	<b>21 días carga (KN)</b>	<b>28 días carga (KN)</b>	<b>28 días carga (KN)</b>	<b>Resistencia promedio a los 28 días (Mpa)</b>
<b>TC1</b>	33.80	41.40	50.30	2.60
<b>TC2</b>	19.70	22.80	22.30	1.28
<b>TC3</b>	0.00	0.30	0.00	0.02
<b>TC4</b>	68.90	86.20	74.20	4.54
<b>TC5</b>	27.40	32.10	29.60	1.75
<b>TC6</b>	10.10	18.30	13.00	0.89
<b>TC7</b>	62.30	68.90	74.00	4.04
<b>TC8</b>	25.20	27.30	31.70	1.67
<b>TC9</b>	8.90	14.80	12.00	0.76

Se calculó el esfuerzo para cada una de las cargas en los días 21 y 28 y el esfuerzo se promedió solo las resistencias obtenidas a los 28 días.



De la tabla anterior se realizó una gráfica en donde se agrupan los materiales con la misma relación agua-cemento por lo cual se realizó una figura para observar el comportamiento que tiene el esfuerzo que resiste el cilindro respecto a la variación del porcentaje de vacíos. (Ver figura 26)

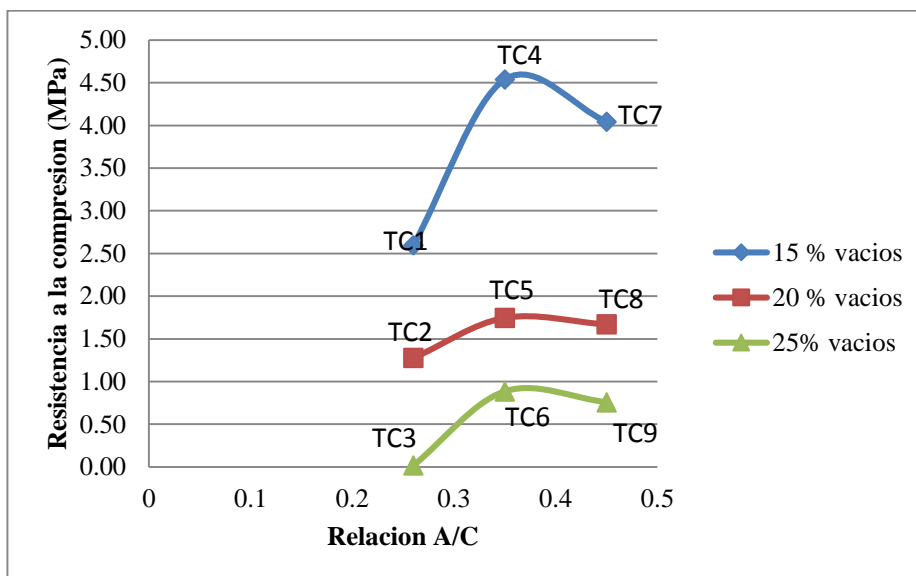
Figura 26. Resistencia a la compresión contra porcentaje de vacíos



El comportamiento de las muestras se ve representado en la (Figura 26), la cual se observa que la resistencia a la compresión es Inversamente proporcional al porcentaje de vacíos debido a que, la muestra es menos densa y se vuelve más fácil de fracturar, por otra parte cabe destacar que la muestra TC3 presento una resistencia de esfuerzo a la compresión muy baja(ver Tabla 12) debido a que esta mezcla se dosifico con muy poca agua, es decir era una muestra muy seca, lo que llevo a que se desmoronaran dos de los tres cilindros realizados (ver Anexo 8), aparte de eso fue el diseño que resulto menos resistente a compresión.



Figura 27. Resistencia a la compresión contra relación A/C



Por otra parte los resultados numéricos de la resistencia a la compresión según la ACI522 R para un pavimento poroso o permeable debe estar entre el rango de 2.8 a 28 Mpa, lo que quiere decir que para resistencia a la compresión solo cumplen las muestras TC4 y TC7 con unos valores de 4.54 y 4.04 Mpa.

Por otro lado los ensayos también fueron realizados para el tipo de agregado canto rodado o China, al cual se le analizo el comportamiento de la mezcla con las mismas dosificaciones planteadas para el triturado calizo, los resultados del ensayo de resistencia a la compresión de cilindros se pueden observar en la Tabla 13.

Los resultados de ensayo de compresión fueron calculados con la Ecuación 2.6, cabe destacar que se realizó el cálculo para cada una de las muestras en sus diferentes días de aplicada la prueba, pero solo se promedió el resultado obtenido a los 28 días de haber sido fundido el cilindro.



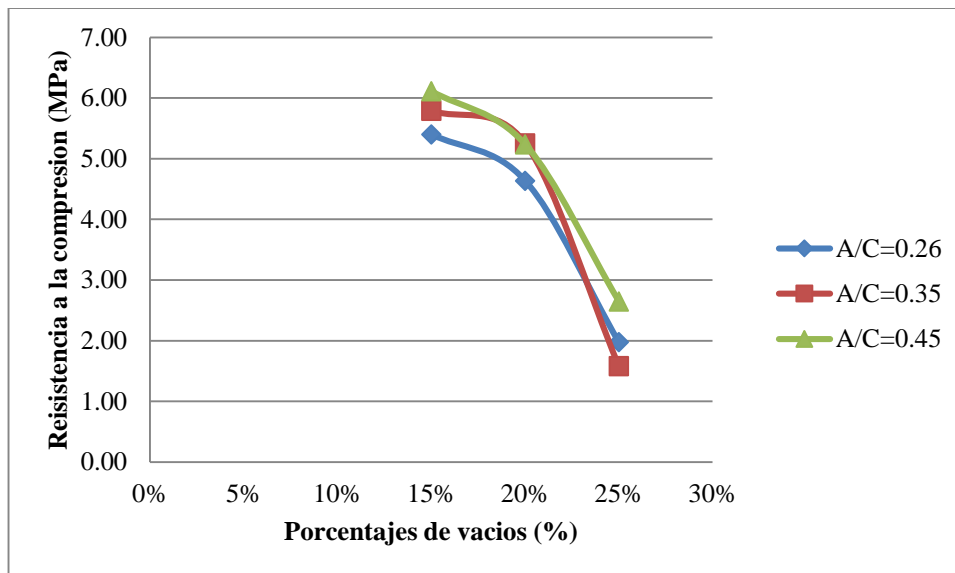
**Tabla 13.** Resultados de resistencia a la compresión canto rodado

<b>Muestra</b>	<b>21 días carga (KN)</b>	<b>28 días carga (KN)</b>	<b>28días carga (KN)</b>	<b>Esfuerzo promedio(Mpa)</b>
<b>CR1</b>	85.60	94.80	96.10	5.40
<b>CR2</b>	80.10	83.20	80.70	4.64
<b>CR3</b>	29.40	35.60	34.20	1.97
<b>CR4</b>	94.50	101.40	103.30	5.79
<b>CR5</b>	78.40	90.50	95.20	5.25
<b>CR6</b>	22.70	29.60	26.20	1.58
<b>CR7</b>	95.40	107.50	108.60	6.11
<b>CR8</b>	90.70	93.30	91.80	5.24
<b>CR9</b>	29.80	43.40	50.2	2.65

Se establecieron relaciones entre las propiedades mecánicas del concreto con las propiedades físicas, es decir tipo de material, porcentaje de vacíos y relación agua cemento, en la figura 28, se puede observar cómo se comporta la resistencia del concreto poroso dependiendo de la variación del porcentaje de vacíos según el diseño de mezcla. Teniendo en cuenta que la relación de agua-cemento es constante para las tres muestras expuestas en cada una de las figura.



Figura 28. Resistencia a la compresión contra porcentaje de vacíos.

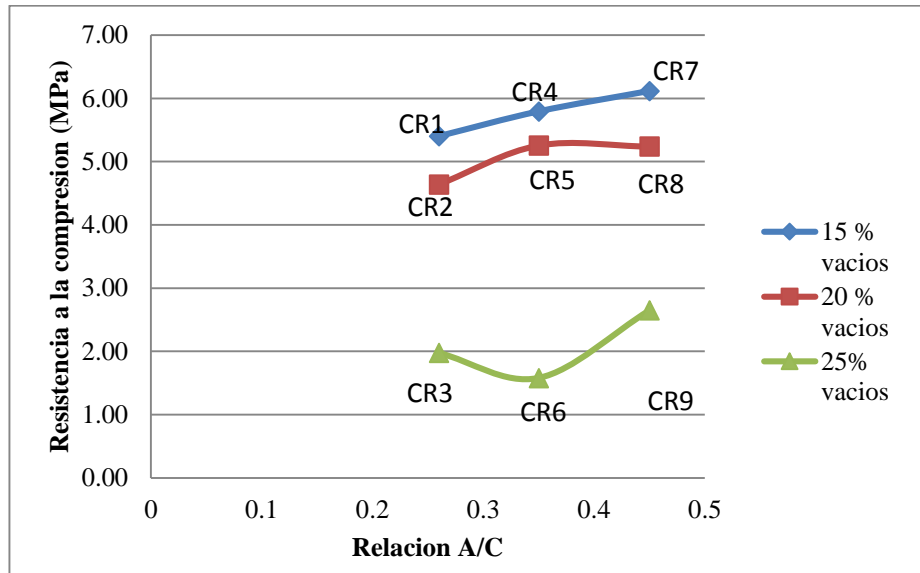


De la figura anterior se puede observar y analizar que la resistencia a compresión es inversamente proporcional al porcentaje de vacíos, debido a que los vacíos le disminuyen la densidad al concreto y pierden resistencia, cabe anotar que las resistencias obtenidas a comparación de las resultados de triturado de caliza son mayores, también se puede resaltar que todas las gráficas tienen el mismo comportamiento a pesar de que la relación agua-cemento sean diferente en cada una de las figuras.

Para analizar el comportamiento de las resistencias variando la relación agua-cemento se realizó la Figura 29.



Figura 29. Resistencia a la compresión contra relación A/C



De la figura anterior se puede afirmar que la resistencia en gran parte es creciente o directamente proporcional respecto al porcentaje de vacíos de 15% con variación en la relación agua-cemento mientras mayor la relación A/C esta resistencia aumento, con respecto a la resistencia en muestras con porcentaje de vacíos de 20 % se comporta como una parábola abierta hacia abajo, lo contrario que cuando se analiza para el porcentaje de vacíos de 25%.

La resistencia a la compresión para concretos porosos contemplan un rango según la ACI 522 R la cual es de 2.8 a 28 Mpa, la cual si el resultado de la muestra no se encuentra en este rango, no se podría utilizar para ejecutarlo en la obra asignada, en el caso de la resistencia para las muestras realizadas con canto rodado las aprobadas y que se encuentran en tres los límites permisibles son CR1, CR2, CR4, CR5, CR7 y CR8.

Haciendo una comparación breve entre las muestras realizadas con canto rodado y las realizadas con triturado de caliza, la muestras de canto rodado supera tanto en número de muestras aceptadas por la norma para poder ser utilizadas como en mayor valor numérico



de la resistencia a la compresión, este comportamiento se presenta debido a que el canto rodado posee una mayor resistencia al desgaste lo que está directamente relacionado con la resistencia a la compresión, y de acuerdo a Tennis *et al.* que realizaron un estudio llamado “*Pervious Concrete Pavements*” plantea que las partículas redondeadas generan una mayor resistencia al concreto, debido a esto los resultados se presentan coherentes.

### 6.2.3. Ensayo de módulo de rotura

Este ensayo fue realizado en la maquina universal, con el método de 2 apoyos en la parte inferior de la vigueta a una distancia  $L$  y un apoyo en el medio de esta, de esta forma se le aplicó una carga y se calculó el esfuerzo con la Ecuación 2.6. Los datos obtenidos para el triturado de caliza se pueden observar en la Tabla 14.

**Tabla 14.** Resultados de módulo de rotura triturado de caliza.

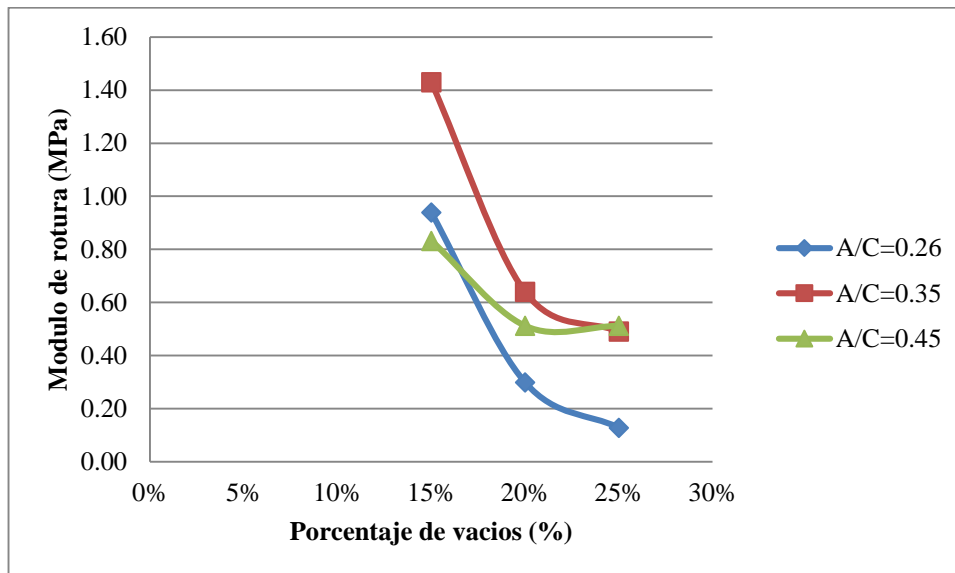
Muestra	Carga (KN)	Resultado (MPa)
TC1	4.40	0.94
TC2	1.40	0.30
TC3	0.60	0.13
TC4	6.70	1.43
TC5	3.00	0.64
TC6	2.30	0.49
TC7	3.90	0.83
TC8	2.40	0.51
TC9	2.40	0.51

De la tabla 13 realizamos las gráficas comparativas en donde relacionamos, el módulo de rotura con el porcentaje de vacíos y la relación agua- cemento.





Figura 30. Módulo de rotura contra porcentaje de vacíos.

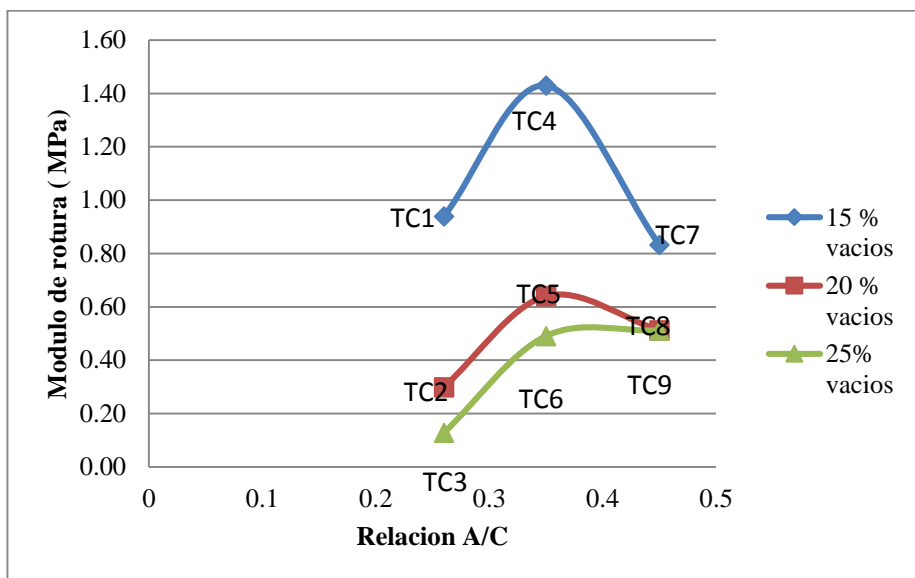


En la figuras 30 se puede observar que el comportamiento del módulo de rotura con respecto a la variación del porcentaje de vacíos y teniendo en cuenta que se estableció una relación agua- cemento fija para cada una de las figuras, donde se observa que de igual manera que en la resistencia a la compresión, El módulo de rotura también es inversamente proporcional al porcentaje de vacíos. Debido a que estos dos ensayos están directamente relacionados.

Posteriormente se realizó la gráfica para observar el comportamiento que tienen el módulo de rotura variando la relación agua-cemento (ver Figura 31)



Figura 31. Módulo de rotura contra relación A/C



De la Figura 31 se puede analizar que el módulo de rotura presenta un comportamiento parabólico respecto a la variación de la relación agua- cemento, esta se da por las mismas razones resultado en el ensayo de resistencia a la compresión.

Se puede realizar una comparación entre el módulo de rotura y la resistencia a la compresión y se puede decir que estas poseen una relación directamente proporcional, por otra parte los valores obtenidos de esfuerzos en el módulo de rotura se compararon con los establecidos en la ACI 522 R la cual contempla que el rango de permisibilidad para módulo de rotura en concretos permeables o porosos es de 1 a 3.8 MPa, lo que quiere decir que la una mezcla entre los rangos especificados para módulo de rotura es TC4 con un resultado de 1.43 Mpa y también cumple con lo estipulado para resistencia a la compresión, en estados unidos se realizó un estudio llamado “*Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties*”, en donde se realizan diferentes mezclas de concreto poroso, variando su porosidad y relación agua- cemento, teniendo en cuenta este estudio mezclas con relación agua-cemento de 0.36 obtuvieron módulo de rotura de



0.72 MPa , comparándolo con los resultados de este proyecto de investigación la mezcla TC4 que presenta una relación de agua cemento de 0.35 resulto con un módulo de rotura de 1.43 Mpa, lo cual quiere decir que se presentó sobre el rango dándole una validez científica y experimental a la mezcla.

Los resultados de módulo de rotura para el agregado tipo canto rodado son los expuestos en la tabla 15.

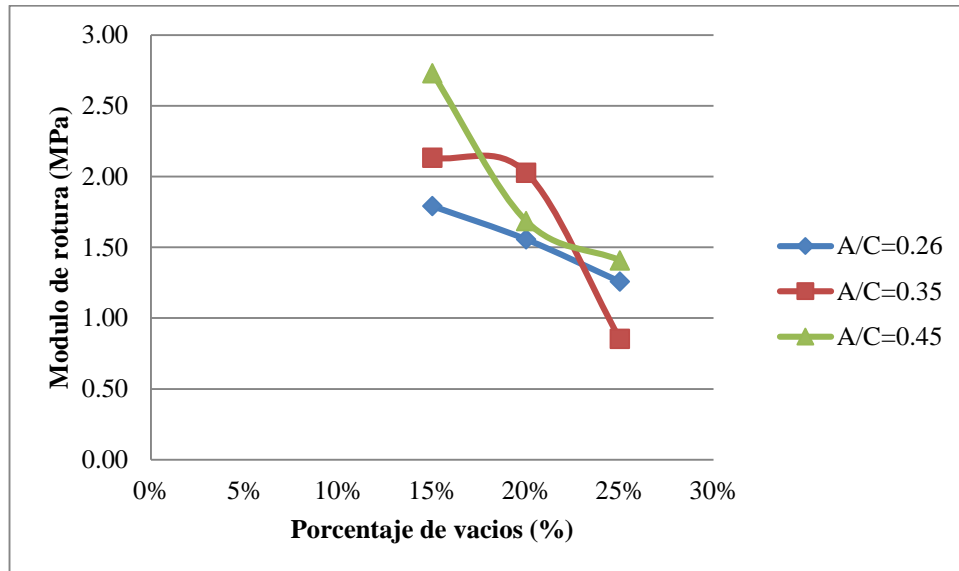
**Tabla 15.** Resultados de módulo de rotura canto rodado

<b>Muestra</b>	<b>Carga (KN)</b>	<b>Resultado (MPa)</b>
<b>CR1</b>	8.40	1.79
<b>CR2</b>	7.30	1.56
<b>CR3</b>	5.90	1.26
<b>CR4</b>	10.00	2.13
<b>CR5</b>	9.50	2.03
<b>CR6</b>	4.00	0.85
<b>CR7</b>	12.80	2.73
<b>CR8</b>	7.90	1.69
<b>CR9</b>	6.60	1.41

En las Figuras 32 se relacionan el módulo de rotura con el porcentaje de vacíos y relación A/C



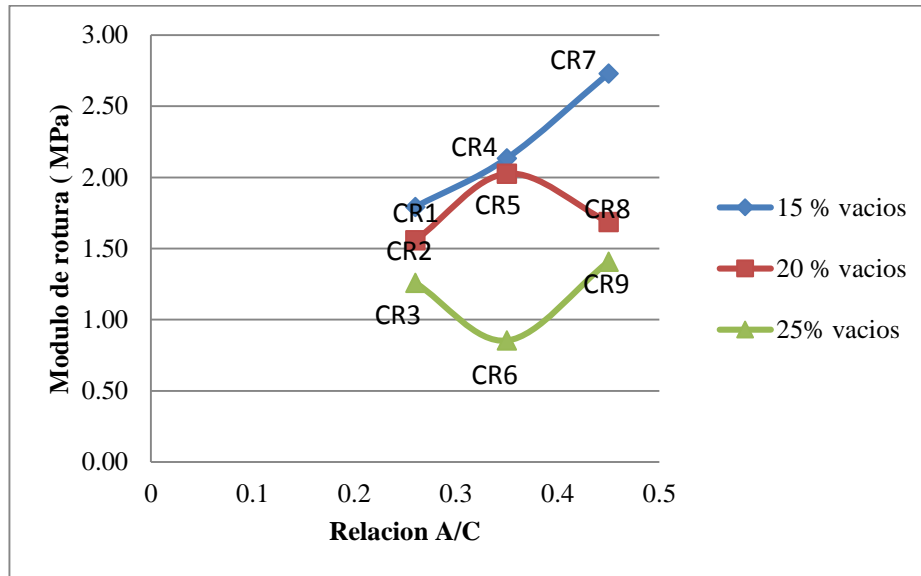
Figura 32. Módulo de rotura contra porcentaje de vacíos.



De las tres graficas anteriores podemos decir que esta siguen teniendo el mismo comportamiento entre menos porcentajes de vacíos mayor es la resistencia y el módulo de rotura, un estudio realizado por la universidad nacional autónoma de México llamado *Estudio experimental de concretos permeables con agregados Andesiticos*, corrobora también que la resistencia a la compresión y el módulo de rotura es inversamente proporcional a el porcentaje de vacíos en una mezcla de concreto poroso.



Figura 33. Módulo de rotura contra relación A/C



De la figura anterior se puede notar que el módulo de rotura se comportan creciente cuando la muestras poseen un porcentaje de vacíos del 15% respecto a la variación de la relación agua-cemento, en cuanto al comportamiento cuando la relación de vacíos es 20 % el módulo de rotura se comporta como una parábola en donde su punto más alto es una relación media de agua-cemento, y con porcentaje de vacíos de 25% el módulo de rotura descende hasta un punto y comienza a incrementar es decir una parábola abierta hacia arriba.

Con el fin de relacionar la resistencia a compresión y el módulo de rotura se realizó las siguientes figuras.



Figura 34. Resistencia a la compresión contra módulo de rotura (triturado de caliza)

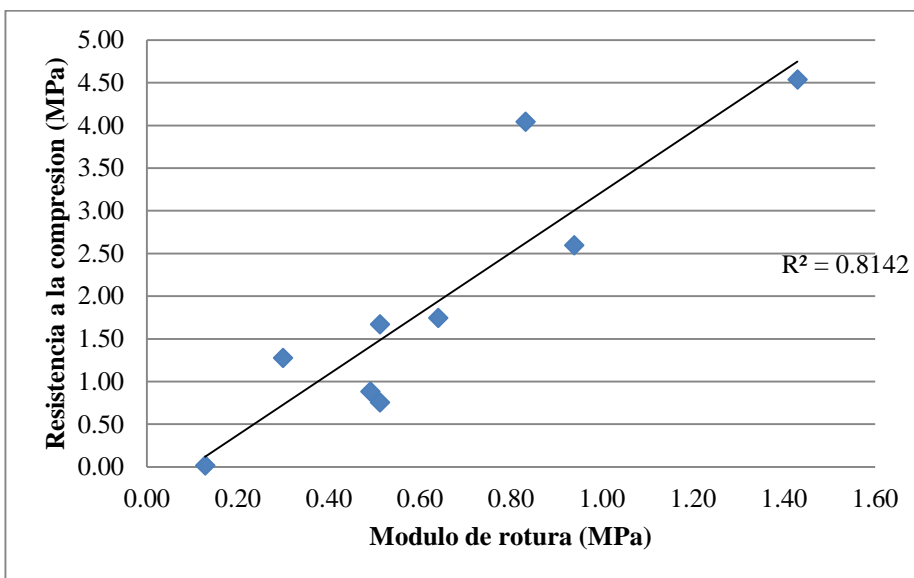
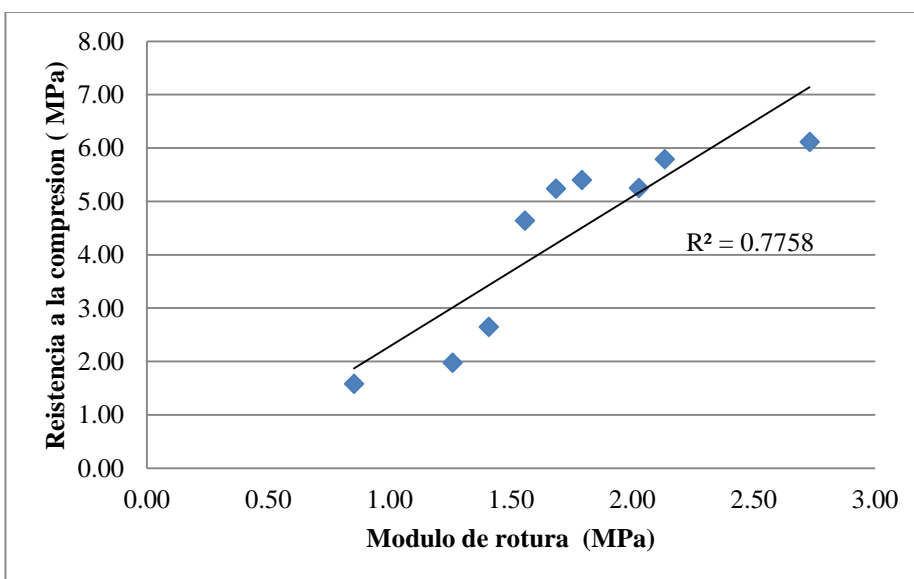


Figura 35. Resistencia a la compresión contra módulo de rotura (canto rodado)





De las figura 34 y 35 se puede notar que la resistencia y módulo de rotura son directamente proporcionales entre ellas para los dos tipos de agregado, por otra parte el coeficiente de correlación para ambas graficas es aceptable lo que quiere decir que los datos no se encuentran tan dispersos reduciendo márgenes de error.

#### **6.2.4. Ensayo de permeabilidad**

Empleando la metodología para determinar la permeabilidad de las mezclas de concreto poroso descrita en el anterior capítulo, se desarrolló el ensayo por medio de un permeámetro de carga variable. El permeámetro utilizado durante esta investigación se diseñó con un diámetro para el tubo de la carga, igual a 3 pulgadas, en cuanto a las muestras de concreto poroso que se ensayaron, estas se fabricaron con 3 pulgadas de diámetro y 10 cm de altura, de igual manera durante todas las pruebas, se tomaron los tiempos en el que el agua pasaba de una carga inicial igual a 27.5 cm hasta una carga final igual a 12.5 cm, estos tiempos se encuentran tabulados en el Anexo 9, donde se puede apreciar que se mesuraron tres tiempos para cada una de las mezclas de concreto poroso diseñadas durante la investigación.

Teniendo en cuenta las variables anteriormente descritas se aplicó la Ecuación 2.3 para determinar el coeficiente de permeabilidad de cada una de las mezclas de concreto poroso estudiadas, estos resultados se pueden encontrar en la Tabla 16.



Tabla 16. Resultados obtenidos durante los ensayos de permeabilidad

Muestra	Coefficiente de permeabilidad 1 (cm/s)	Coefficiente de permeabilidad 2 (cm/s)	Coefficiente de permeabilidad 3 (cm/s)	Coefficiente de permeabilidad promedio (cm/s)
CR1	0.963	0.913	0.942	0.939
CR2	0.958	0.975	0.981	0.971
CR3	1.851	1.780	1.718	1.783
CR4	0.469	0.485	0.480	0.478
CR5	1.282	1.238	1.213	1.244
CR6	1.909	2.037	1.752	1.900
CR7	0.592	0.605	0.577	0.592
CR8	1.266	1.284	1.236	1.262
CR9	1.744	1.760	1.825	1.776
TC1	1.295	1.236	1.330	1.287
TC2	1.543	1.688	1.609	1.613
TC3	1.942	1.825	1.725	1.831
TC4	0.827	0.830	0.832	0.830
TC5	1.123	1.159	1.131	1.138
TC6	1.851	1.891	1.996	1.913
TC7	1.070	1.044	1.109	1.074
TC8	1.252	1.276	1.272	1.266
TC9	1.760	1.882	1.764	1.802

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede decir que todas las mezclas cumplen con el rango establecido por la Portland Cement Association, que es de 0.2 a 0.54 cm/s, y puede llegar a ser igual a 1.2 cm/s o más alto en escala de laboratorio (Tennis *et al.*, 2004), donde el coeficiente de permeabilidad mínimo obtenido fue de 0.478 cm/s y el máximo fue de 1.881 cm/s. De igual manera, se encontró que los valores satisfacen a los coeficientes de permeabilidad dados en la ACI 522R-10, que son de 0.14 a 1.22 cm/s, e incluso algunos dieron por encima de este rango.



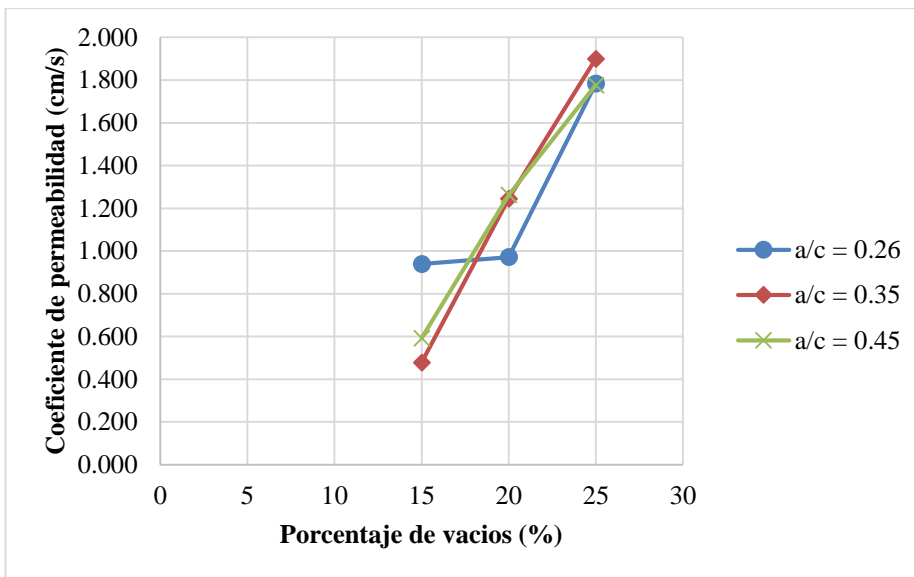


Por otro lado se puede apreciar que las mezclas con porcentaje de vacíos de 15 %, tuvieron un coeficiente de permeabilidad aceptable, al hacer una comparación con la tesis de maestría desarrollada en la UNAM, llamada *Estudio experimental de concretos permeables con agregados andesíticos*, donde se realizó el estudio para una muestra de 15% de vacíos y agregados 3/8” y se obtuvo 0.413 cm/s (Perez, 2009), que es menor al valor mínimo obtenido en la presente investigación, el cual fue de 0.478 cm/s para la mezcla CR4 que posee 15% de vacíos. Cabe también resaltar que los valores máximos obtenidos son altos, para la porosidad y la relación agua/cemento de dichas mezclas, esta información se corrobora con el artículo científico *Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties*, en donde para una mezcla de concreto poroso hecha con agregado 3/8”, relación agua/cemento de 0.35 y porosidad igual al 38% se obtuvo una permeabilidad 1.86 cm/s (Ibrahim *et al*, 2014), es válido hacer esta comparación ya que las mezclas que obtuvieron los valores máximos fueron fabricadas con la misma relación agua/cemento e incluso una porosidad menor (25%) y obtuvieron mejores coeficiente de permeabilidad, los cuales fueron 1.9 cm/s para la mezcla CR6 y 1.913 cm/s en la TC6.

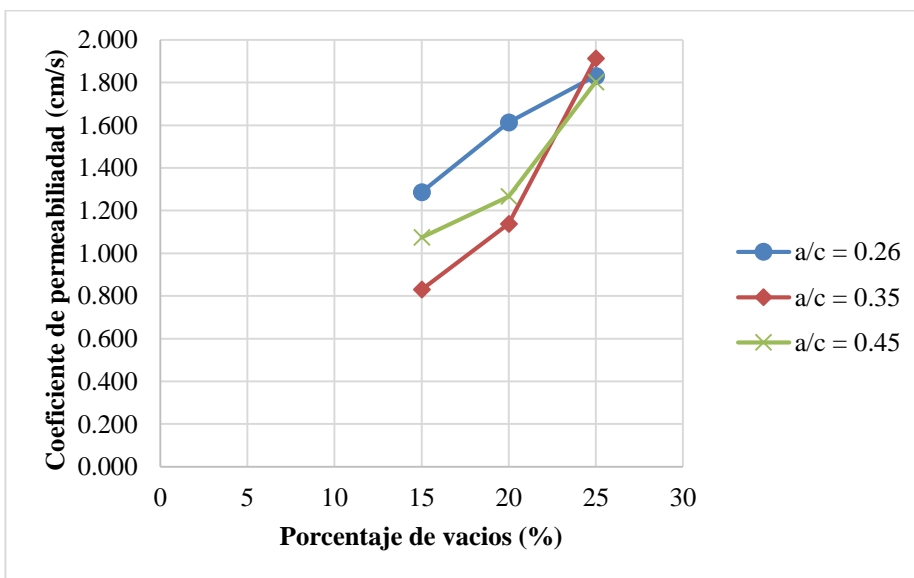
Las Figuras 36 y 37 muestran la relación del coeficiente de permeabilidad con el porcentaje de vacíos para las diferentes relaciones agua/cemento en cuanto a canto rodado y triturado de caliza respectivamente.



**Figura 36.** Relación del coeficiente de permeabilidad con el porcentaje de vacíos para mezclas hechas con canto rodado



**Figura 37.** Relación del coeficiente de permeabilidad con el porcentaje de vacíos para mezclas hechas con triturado de caliza

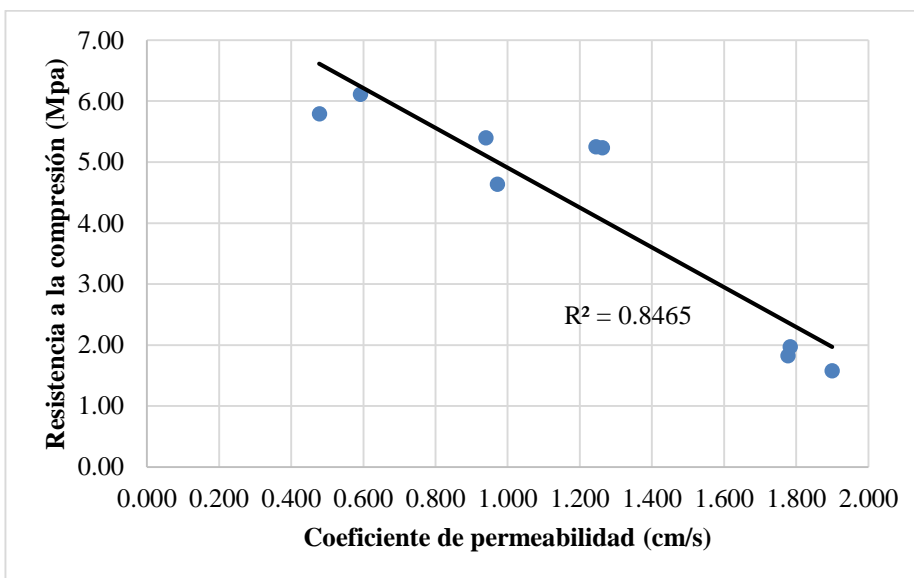




En las Figuras 36 y 37 se aprecia de una manera clara que el coeficiente de permeabilidad es directamente proporcional al porcentaje de vacíos, para cualquier relación agua/cemento y tipo de material. Lo anterior se debe a que entre más vacíos existan en una mezcla, mayor será la velocidad con la que se pase el agua, pues la mezcla tendría mayores espacios sin llenar para que el agua los recorra con mayor facilidad y rapidez, sin importar cantidad de cemento o el tipo de material.

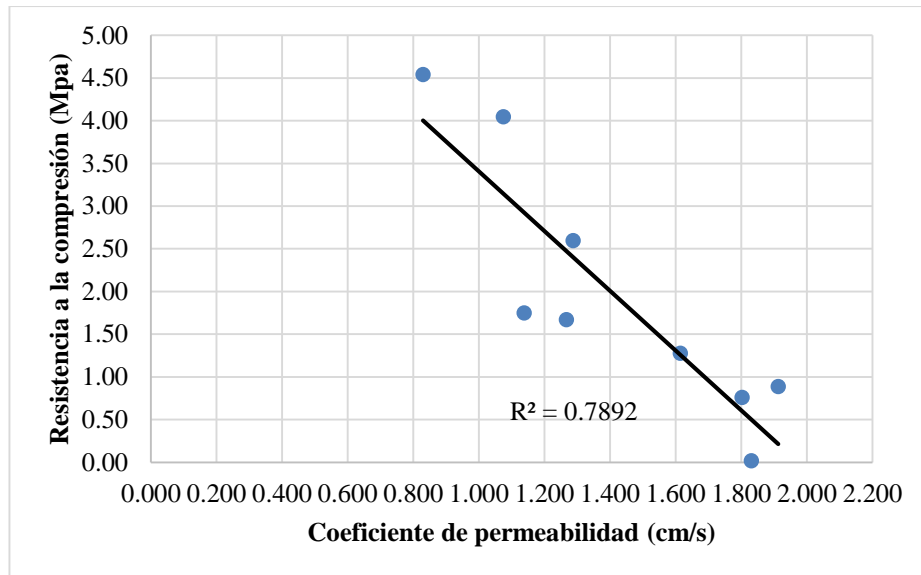
Las Figuras 38 y 39 presentan la relación de la resistencia a la compresión a 28 días con el coeficiente de permeabilidad para canto rodado y triturado de caliza respectivamente.

**Figura 38.** Relación de la resistencia a la compresión a 28 días con el coeficiente de permeabilidad para mezclas hechas con canto rodado





**Figura 39.** Relación de la resistencia a la compresión a 28 días con el coeficiente de permeabilidad para mezclas hechas con triturado de caliza



En las Figuras 38 y 39 se evidencia que generalmente cuando incrementa la permeabilidad, la resistencia a la compresión disminuye, lo cual está relacionado a que una mayor permeabilidad es generada por un mayor porcentaje de vacíos, lo que genera menor densidad y por lo tanto menor resistencia.

### 6.3. Análisis y comparación de costos

Los costos son uno de los factores más importantes al momento de escoger por una solución hacia una problemática y también cuando se opta por la mejor alternativa de construcción, es por esto que se decidió analizar los costos directos generados para el desarrollo de cada una de la mezclas de concreto poroso.



*Estudio comparativo de mezclas de concreto poroso usando materiales disponibles en Cartagena de Indias para uso de pavimentos en parqueaderos*

De la Tabla 17 a la 34 se presentan los análisis unitarios realizados para las mezclas de concreto poroso estudiadas durante la presenta investigación, esto se llevó a cabo por medio de las diferentes dosificaciones anteriormente calculadas para un m<sup>3</sup> de concreto poroso.

**Tabla 17.** Costo directo de 1 m<sup>3</sup> de la mezcla CR1, de concreto poroso

Concreto poroso CR1 (a/c = 0.26, 15% de vacíos)			Unidad de medida	m <sup>3</sup>
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo
Agregado canto rodado	Tn	1.651	\$ 37,068.00	\$ 61,199.27
Agua	m <sup>3</sup>	0.089	\$ 1,506.29	\$ 133.92
Cemento	kg	305.950	\$ 410.00	\$ 125,439.65
<b>Total</b>				<b>\$ 186,772.84</b>

**Tabla 18.** Costo directo de 1 m<sup>3</sup> de la mezcla CR2, de concreto poroso

Concreto poroso CR2 (a/c = 0.26, 20% de vacíos)			Unidad de medida	m <sup>3</sup>
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo
Agregado canto rodado	Tn	1.651	\$ 37,068.00	\$ 61,199.27
Agua	m <sup>3</sup>	0.069	\$ 1,506.29	\$ 103.96
Cemento	kg	229.463	\$ 410.00	\$ 94,079.74
<b>Total</b>				<b>\$ 155,382.97</b>



*Estudio comparativo de mezclas de concreto poroso usando materiales disponibles en Cartagena de Indias para uso de pavimentos en parqueaderos*

**Tabla 19.** Costo directo de 1 m<sup>3</sup> de la mezcla CR3, de concreto poroso

Concreto poroso CR3 (a/c = 0.26, 25% de vacíos)			Unidad de medida	m <sup>3</sup>
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo
Agregado canto rodado	Tn	1.702	\$ 37,068.00	\$ 63,082.32
Agua	m3	0.041	\$ 1,506.29	\$ 62.46
Cemento	kg	122.380	\$ 410.00	\$ 50,175.86
			<b>Total</b>	\$ 113,320.64

**Tabla 20.** Costo directo de 1 m<sup>3</sup> de la mezcla CR4, de concreto poroso

Concreto poroso CR4 (a/c = 0.35, 15% de vacíos)			Unidad de medida	m <sup>3</sup>
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo
Agregado canto rodado	Tn	1.651	\$ 37,068.00	\$ 61,199.27
Agua	m3	0.103	\$ 1,506.29	\$ 155.88
Cemento	kg	268.925	\$ 410.00	\$ 110,259.40
			<b>Total</b>	\$ 171,614.54

**Tabla 21.** Costo directo de 1 m<sup>3</sup> de la mezcla CR5, de concreto poroso

Concreto poroso CR5 (a/c = 0.35, 20% de vacíos)			Unidad de medida	m <sup>3</sup>
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo
Agregado canto rodado	Tn	1.651	\$ 37,068.00	\$ 61,199.27
Agua	m3	0.080	\$ 1,506.29	\$ 120.43
Cemento	kg	201.694	\$ 410.00	\$ 82,694.55
			<b>Total</b>	\$ 144,014.25



*Estudio comparativo de mezclas de concreto poroso usando materiales disponibles en Cartagena de Indias para uso de pavimentos en parqueaderos*

**Tabla 22.** Costo directo de 1 m<sup>3</sup> de la mezcla CR6, de concreto poroso

Concreto poroso CR6 (a/c = 0.35, 25% de vacíos)			Unidad de medida	m <sup>3</sup>
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo
<b>Agregado canto rodado</b>	Tn	1.702	\$ 37,068.00	\$ 63,082.32
<b>Agua</b>	m3	0.047	\$ 1,506.29	\$ 71.24
<b>Cemento</b>	kg	107.570	\$ 410.00	\$ 44,103.76
			<b>Total</b>	<b>\$ 107,257.32</b>

**Tabla 23.** Costo directo de 1 m<sup>3</sup> de la mezcla CR7, de concreto poroso

Concreto poroso CR7 (a/c = 0.45, 15% de vacíos)			Unidad de medida	m <sup>3</sup>
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo
<b>Agregado canto rodado</b>	Tn	1.651	\$ 37,068.00	\$ 61,199.27
<b>Agua</b>	m3	0.116	\$ 1,506.29	\$ 174.78
<b>Cemento</b>	kg	237.051	\$ 410.00	\$ 97,190.85
			<b>Total</b>	<b>\$ 158,564.90</b>

**Tabla 24.** Costo directo de 1 m<sup>3</sup> de la mezcla CR8, de concreto poroso

Concreto poroso CR8 (a/c = 0.45, 20% de vacíos)			Unidad de medida	m <sup>3</sup>
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo
<b>Agregado canto rodado</b>	Tn	1.651	\$ 37,068.00	\$ 61,199.27
<b>Agua</b>	m3	0.089	\$ 1,506.29	\$ 134.61
<b>Cemento</b>	kg	177.788	\$ 410.00	\$ 72,893.14
			<b>Total</b>	<b>\$ 134,227.02</b>



*Estudio comparativo de mezclas de concreto poroso usando materiales disponibles en Cartagena de Indias para uso de pavimentos en parqueaderos*

**Tabla 25.** Costo directo de 1 m<sup>3</sup> de la mezcla CR9, de concreto poroso

Concreto poroso CR9 (a/c = 0.45, 25% de vacíos)			Unidad de medida	m <sup>3</sup>
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo
<b>Agregado canto rodado</b>	Tn	1.702	\$ 37,068.00	\$ 63,082.32
<b>Agua</b>	m3	0.052	\$ 1,506.29	\$ 78.80
<b>Cemento</b>	kg	94.820	\$ 410.00	\$ 38,876.34
			<b>Total</b>	<b>\$ 102,037.47</b>

**Tabla 26.** Costo directo de 1 m<sup>3</sup> de la mezcla TC1, de concreto poroso

Concreto poroso TC1 (a/c = 0.26, 15% de vacíos)			Unidad de medida	m <sup>3</sup>
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo
<b>Agregado canto rodado</b>	Tn	1.651	\$ 37,068.00	\$ 61,199.27
<b>Agua</b>	m3	0.080	\$ 1,506.29	\$ 120.43
<b>Cemento</b>	kg	201.694	\$ 410.00	\$ 82,694.55
			<b>Total</b>	<b>\$ 144,014.25</b>

**Tabla 27.** Costo directo de 1 m<sup>3</sup> de la mezcla TC2, de concreto poroso

Concreto poroso TC2 (a/c = 0.26, 20% de vacíos)			Unidad de medida	m <sup>3</sup>
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo
<b>Agregado canto rodado</b>	Tn	0.650	\$ 33,565.00	\$ 21,817.25
<b>Agua</b>	m3	0.066	\$ 1,506.29	\$ 100.02
<b>Cemento</b>	kg	219.385	\$ 410.00	\$ 89,947.94
			<b>Total</b>	<b>\$ 111,865.21</b>





*Estudio comparativo de mezclas de concreto poroso usando materiales disponibles en Cartagena de Indias para uso de pavimentos en parqueaderos*

**Tabla 28.** Costo directo de 1 m<sup>3</sup> de la mezcla TC3, de concreto poroso

Concreto poroso TC3 (a/c = 0.26, 25% de vacíos)				Unidad de medida	m <sup>3</sup>
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo	
Agregado canto rodado	Tn	0.670	\$ 33,565.00	\$ 22,488.55	
Agua	m3	0.040	\$ 1,506.29	\$ 60.36	
Cemento	kg	117.005	\$ 410.00	\$ 47,972.24	
				<b>Total</b>	\$ 70,521.14

**Tabla 29.** Costo directo de 1 m<sup>3</sup> de la mezcla TC4, de concreto poroso

Concreto poroso TC4 (a/c = 0.35, 15% de vacíos)				Unidad de medida	m <sup>3</sup>
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo	
Agregado canto rodado	Tn	0.650	\$ 33,565.00	\$ 21,817.25	
Agua	m3	0.100	\$ 1,506.29	\$ 150.37	
Cemento	kg	258.488	\$ 410.00	\$ 105,980.28	
				<b>Total</b>	\$ 127,947.91

**Tabla 30.** Costo directo de 1 m<sup>3</sup> de la mezcla TC5, de concreto poroso

Concreto poroso TC5 (a/c = 0.35, 20% de vacíos)				Unidad de medida	m <sup>3</sup>
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo	
Agregado canto rodado	Tn	0.650	\$ 33,565.00	\$ 21,817.25	
Agua	m3	0.077	\$ 1,506.29	\$ 116.31	
Cemento	kg	193.866	\$ 410.00	\$ 79,485.21	
				<b>Total</b>	\$ 101,418.77



**Tabla 31.** Costo directo de 1 m<sup>3</sup> de la mezcla TC6, de concreto poroso

Concreto poroso TC6 (a/c = 0.35, 25% de vacíos)				Unidad de medida	m <sup>3</sup>
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo	
<b>Agregado canto rodado</b>	Tn	0.670	\$ 33,565.00	\$ 22,488.55	
<b>Agua</b>	m3	0.046	\$ 1,506.29	\$ 69.04	
<b>Cemento</b>	kg	103.395	\$ 410.00	\$ 42,392.11	
<b>Total</b>				<b>\$ 64,949.71</b>	

**Tabla 32.** Costo directo de 1 m<sup>3</sup> de la mezcla TC7, de concreto poroso

Concreto poroso TC7 (a/c = 0.45, 15% de vacíos)				Unidad de medida	m <sup>3</sup>
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo	
<b>Agregado canto rodado</b>	Tn	0.650	\$ 33,565.00	\$ 21,817.25	
<b>Agua</b>	m3	0.112	\$ 1,506.29	\$ 169.26	
<b>Cemento</b>	kg	228.904	\$ 410.00	\$ 93,850.63	
<b>Total</b>				<b>\$ 115,837.14</b>	

**Tabla 33.** Costo directo de 1 m<sup>3</sup> de la mezcla TC8, de concreto poroso

Concreto poroso TC8 (a/c = 0.45, 20% de vacíos)				Unidad de medida	m <sup>3</sup>
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo	
<b>Agregado canto rodado</b>	Tn	0.650	\$ 33,565.00	\$ 21,817.25	
<b>Agua</b>	m3	0.087	\$ 1,506.29	\$ 130.47	
<b>Cemento</b>	kg	171.678	\$ 410.00	\$ 70,387.97	
<b>Total</b>				<b>\$ 92,335.69</b>	

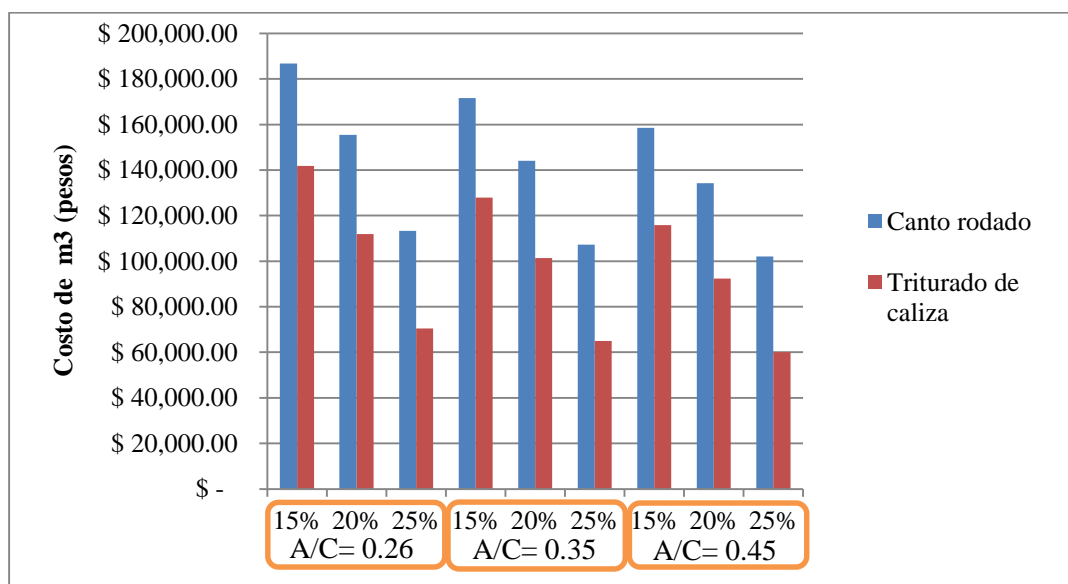


**Tabla 34.** Costo directo de 1 m<sup>3</sup> de la mezcla TC9, de concreto poroso

Concreto poroso TC9 (a/c = 0.45, 25% de vacíos)				Unidad de medida	m <sup>3</sup>
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo	
Agregado canto rodado	Tn	0.670	\$ 33,565.00	\$ 22,488.55	
Agua	m3	0.051	\$ 1,506.29	\$ 76.60	
Cemento	kg	91.562	\$ 410.00	\$ 37,540.25	
<b>Total</b>				<b>\$ 60,105.40</b>	

La Figura 40, presenta una comparación de los diferentes costos de la mezclas de concreto, y confrontando el comportamiento de los costos con el comportamiento de las variables independientes.

**Figura 40.** Comparación de los diferentes costos teniendo en cuenta las diferentes variables independientes





De la figura anterior se puede observar como varía el precio de un metro cubico de concreto dependiendo de su dosificación, es decir porcentaje de vacíos, relación agua cemento y tipo de material, debido a que las cantidades de material cambian según el tipo de dosificación que se requiera, y el costo disminuye cuando la relación agua-cemento aumenta y el porcentaje de vacíos también, por otra parte se puede observar en la figura que las mezclas diseñadas con agregado tipo canto rodado son más costosas que las diseñadas con triturado de caliza, debido a que estas requieren mayor masa de agregados

#### **6.4. Selección de las mezclas adecuadas para aplicar en parqueaderos**

Con el objetivo de evaluar de una manera global las mezclas de concreto poroso desarrolladas, se llevó a cabo una comparación de las propiedades estudiadas durante la investigación, para así seleccionar las mezclas más adecuadas para la implementación en parqueaderos en zonas residenciales y posean un excelente rendimiento mecánico, hidráulico y económico.

Para ejecutar lo anterior se realizó una matriz en donde se evalúa si las propiedades de cada mezcla cumplen con los rangos de aceptación encontrados en la literatura. En esta matriz se puede evidenciar con facilidad cuales de las mezclas poseen valores aceptables en todas las propiedades (ver Tabla 35), los valores aceptables están representados con color naranja, además se evidencia los valores máximos obtenidos de cada propiedad.



*Estudio comparativo de mezclas de concreto poroso usando materiales disponibles en Cartagena de Indias para uso de pavimentos en parqueaderos*

**Tabla 35.** Matriz de evaluación técnico económica

Propiedad Mezcla	Resistencia a la compresión (MPa)	Módulo de Rotura (MPa)	Coefficiente de permeabilidad (cm/s)	Costo por m <sup>3</sup> de concreto
CR1	5.40	1.79	0.939	\$186,772.84
CR2	4.64	1.56	0.971	\$155,382.97
CR3	1.97	1.26	1.783	\$113,320.64
CR4	5.79	2.13	0.478	\$171,614.54
CR5	5.25	2.03	1.244	\$144,014.25
CR6	1.58	0.85	1.900	\$107,257.32
CR7	6.11	2.73	0.592	\$158,564.90
CR8	5.24	1.69	1.262	\$134,227.02
CR9	2.65	1.41	1.776	\$102,037.47
TC1	2.60	0.94	1.287	\$141,876.50
TC2	1.28	0.30	1.613	\$111,865.21
TC3	0.02	0.13	1.831	\$70,521.14
TC4	4.54	1.43	0.830	\$127,947.91
TC5	1.75	0.64	1.138	\$101,418.77
TC6	0.89	0.49	1.913	\$64,949.71
TC7	4.04	0.83	1.074	\$115,837.14
TC8	1.67	0.51	1.266	\$92,335.69
TC9	0.76	0.51	1.802	\$60,105.40

 NO CUMPLE     CUMPLE     MEJOR VALOR OBTENIDO

En la Tabla 35 se encontró que las mezclas CR1, CR2, CR4, CR5, CR7, CR8 y TC4 cumplen con los rangos establecidos en la literatura para las tres propiedades, por lo cual pueden ser consideradas como mezclas adecuadas para la aplicación en parqueaderos residenciales.



En el caso que la resistencia a la compresión sea el requisito de mayor prioridad, la mezcla más adecuada, según la Tabla 35, sería la mezcla CR7, debido a que es la mezcla con mayor resistencia a la compresión de las que cumplen con todos los rangos. De la misma manera pasaría si el criterio de selección de la muestra fuera el modulo rotura, la mezcla más adecuada sería la CR7. Ahora bien, si se tiene en cuenta la permeabilidad como el requisito de mayor importancia, la mezcla más adecuada es la CR8, ya que posee el coeficiente de permeabilidad más alto de las siete mezclas adecuadas. En cuanto a economía, la mezcla TC4 tendría una mayor relevancia al tener menores costo por m<sup>3</sup> de concreto y tener rendimiento mecánico e hidráulico aceptable



## **7. CONCLUSIONES**

El desarrollo del presente proyecto de investigación condujo a evaluar técnica y económicamente a nivel de laboratorio diferentes mezclas de concreto poroso, comprobando que algunas de estas mezclas puedan ser empleadas como capa de rodadura en zonas de estacionamiento de Cartagena de Indias, teniendo en cuenta que estas mezclas cumplen con los requisitos arrojados por la revisión literaria en cuanto a sus propiedades mecánicas e hidráulicas.

De acuerdo a la investigación realizada se encontró que en la ciudad de Cartagena existen dos tipos de agregado grueso que pueden ser utilizados para la fabricación de concreto poroso, los cuales son canto rodado y triturado de caliza. Estos cumplen con la norma colombiana para que la calidad del agregado, presentando una buena gradación y un porcentaje de desgaste aceptable por la norma en ambos casos.

Las mezclas de concreto poroso en estado fresco presentaron distintos valores en los asentamientos, debido a que en algunas el revenimiento fue cero lo cual es el valor más común en este tipo de concreto según la ACI-522R, por otro lado algunas presentaron valores menores a 50 mm, los cuales son aceptables de acuerdo a la literatura (Tennis *et al.*, 2004), y también se presentaron asentamientos mayores a 50 mm, los cuales se dieron en las mezclas que tenían 25% de vacíos y se podía evidenciar la baja estabilidad de estas mezclas debido a que se desmoronaban una vez hecha la prueba.

Durante la investigación se obtuvieron valores de resistencia a la compresión a los 28 días en un rango de 0.02 a 4.54 MPa para las mezclas hechas con triturado de caliza y un rango 1.58 a 6.11 MPa con canto rodado, obteniendo valores de resistencia más altos en las mezclas con canto rodado, además de manera puntual, la mezcla más resistente a la compresión fue la CR7 para la cual se utilizó relación agua-cemento 0.35 y 15 % de vacíos. En cuanto al módulo de rotura se presentó un rango de 0.13 a 1.43 MPa para mezclas con



triturado de caliza y de 0.85 a 2.73 MPa para canto rodado, siendo las mezclas de canto rodado las de mayor módulo de rotura, en donde la mezcla con el máximo módulo de rotura obtenido en la investigación, fue la mezcla CR7. Cabe desatacar que la resistencia a la compresión y módulo de rotura resultaron siendo directamente proporcionales. En base a los resultados obtenidos en estos dos ensayos se corrobora que, tal como lo indica la literatura, la resistencia a la compresión y el módulo de rotura son inversamente proporcional al porcentaje de vacíos. (Castañeda & Moujir, Diseño y aplicación de concreto poroso para pavimentos, 2014) (Ibrahim *et al.*, 2014) (Perez, 2009).

En cuanto la permeabilidad, los resultados que se obtuvieron fueron completamente satisfactorios para ambos tipo de material, ya que los valores logrado se encuentra desde 0.478 a 1.913 cm/s, donde la mayoría superaron los rangos contemplados por la PCA y por ACI. La mezcla con mayor coeficiente de permeabilidad fue la TC6, para la cual se utilizó relación agua-cemento 0.35 y 25 % de vacíos. Con estos resultados se logró probar que la permeabilidad es directamente proporcional al porcentaje de vacíos, debido a que, mientras mayor porcentaje de vacíos, existen mayores espacios de partículas lo que permite que el agua recorra con mayor velocidad y facilidad. Con base a la relación anteriormente nombrada, se puede afirmar que la permeabilidad al ser directamente proporcional al porcentaje vacíos, vendría siendo inversamente proporcional a la resistencia.

Mientras se efectuaban los análisis hechos a las distintas propiedades mecánicas e hidráulicas, se alcanzó evidenciar que cuando se relacionaba a la proporción agua/cemento con la resistencia a la compresión, el módulo de rotura y la permeabilidad, no presentaba tendencia alguna, que definiera con facilidad de estas variables.

En la evaluación económica se notó que en la variación de la relación agua/cemento y el porcentaje de vacíos, a medida que presentaban un aumento los costos del concreto poroso disminuían, gracias a que cuando estas variables son mayores, las proporciones de los materiales disminuyen. Por otra parte, se presentaron costos superiores en la mezclas de diseñado con canto rodado, dado que el canto rodado tiene mayor densidad y costo por





unidad comparado con el triturado de caliza. La mezcla más económica fue la TC9, la cual tuvo un costo de \$ 60 105.40 por m<sup>3</sup> de concreto.

Analizando todas las propiedades se encontraron 7 mezclas adecuadas para el uso de concreto poroso en parqueaderos en zonas residenciales, ya que cumplían con todo los requerimientos en cada una de las propiedades, estas son las mezclas CR1, CR2, CR4, CR5, CR7, CR8 y TC4, de las cuales la más económicamente factible sería la TC4 al presentar menor costo por unidad, por motivos de resistencia a la compresión y a la flexión, la más conveniente es la mezcla CR7, en tanto a la permeabilidad, la mezcla CR8 presenta mejores condiciones. De la misma manera, haciendo un recorrido general de todos los resultados, el canto rodado es el material que presenta un mejor comportamiento para los diseños de mezclas desarrollados en la investigación, lo cual se evidencia en el mayor número de mezclas adecuadas.

Con base a la información obtenida en esta investigación, se logró evidenciar que los agregados disponibles en la ciudad de Cartagena, son aptos para la fabricación de concretos porosos, siendo en una mayor parte el canto rodado, el material con el que se pueden desarrollar mejores desempeños. De igual manera, esta información permite que se puedan construir distintos concretos porosos, que sean adecuados a las necesidades requeridas sin afectar algunas de las propiedades de menor prioridad. Además permite que se desarrollen proyectos de pavimentos rígidos permeables y que se hagan estudios sobre el mejoramiento de estos y se logre la implementación de investigaciones como *diseño de un campo de prueba piloto de pavimentos permeables de la ciudad de Cartagena* realizado en la universidad de Cartagena.



## **8. LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES**

En el presente capítulo se elabora la descripción de cada una de las limitaciones encontradas durante el desarrollo de la investigación y las recomendaciones respectivas para posibles investigaciones a futuro relacionadas con pavimentos permeables y concretos porosos.

### **8.1. Limitaciones**

El proyecto de investigación presentó las siguientes limitaciones:

- **Traslado de las muestras desde el lugar de curado al lugar de ensayo.** Esta limitación afectó en el tiempo y en los mismos resultados, ya que al transportar las muestras para medir la resistencia hacia el respectivo laboratorio se presentaban pérdidas de agua del concreto, lo que disminuía la resistencia.
- **Incertidumbre en la medición de la permeabilidad.** A causa de que el ensayo se realizó por primera vez en la universidad, se hizo necesario la fabricación de un permeámetro de carga variable, lo cual generó incertidumbre en el valor de la permeabilidad, la cual no pudo ser ajustada por efectos de tiempo.
- **Obtención de los agregados.** Debido a las limitaciones económicas para la compra y transporte de material necesario para las muestras se generaron atrasos para llevar a cabo el proyecto.
- **Problemas en la compactación del concreto.** Durante la fabricación de las muestras se encontró que a pesar de que se hacía la mezcla para un volumen exacto en



ocasiones sobraba o faltaba concreto de la misma dosificación para llenar las muestras.

- **Producción de concreto manual.** Se generaban desperdicio de material, se podía perder agua o cemento durante el mezclado.

## **8.2. Recomendaciones**

- Tener mayor cuidado con el curado de las muestras al momento de transportarlos desde el sitio de almacenamiento hasta el sitio de ensayos.
- Certificación de todos los equipos que serán utilizados en las próximas investigaciones para tener menor margen de error, equipos como el permeámetro que fueron fabricados por los investigadores se debe corroborar su incertidumbre antes de ser usados.
- Realizar estudios en donde se usen dosificaciones que tengan en cuenta el nivel de compactación del concreto poroso, ya que la compactación puede afectar a la porosidad y la resistencia. Recopilar información sobre la compactación al momento de fabricar muestras de laboratorio de concreto poroso.
- Realizar la fabricación de las muestras en equipos de mezclado para mejorar su calidad.
- Desarrollar estudios investigaciones con los mismos tipos de materiales pero adicionando distintos aditivos que mejoren la manejabilidad, estabilidad y la resistencia del concreto poroso.
- Investigar e implementar ensayos para medir el asentamiento de mezclas secas, diferentes al ensayo del cono de Abrams, como el Consistómetro Vebe, que es utilizado para concretos muy secos.



## **9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

Alcaldía de Cartagena de Indias, MADS, INVEMAR, CDKN, Cámara de Comercio de Cartagena. (2014). *Plan 4C: Cartagena de Indias Competitiva y Compatible con el Clima* (63 ed.). (A. P. Zamora Bornachera, A. López Rodríguez, V. Trujillo Gedeón, C. Martínez Zuleta, G. Llinás, & M. Lacoste, Edits.) Cartagena: Serie de Publicaciones Generales del INVEMAR.

Alcaldía Mayor de Cartagena de Indias. (2008). *Plan Maestro de Drenajes Pluviales*.  
Cartagena de Indias

Alcaldía Mayor de Cartagena de Indias. (2013). *Plan Distrital de Gestión del Riesgo Cartagena de Indias*. Cartagena de Indias.

American Concrete Institute (2010). ACI 522R- 10 "Report on Pervious Concrete". USA, 38 pp

American Society of the International Association for Testing and Materials (ASTM) G40-92. Resistencia al desgaste abrasivo.

American Society of the International Association for Testing and Materials (ASTM) C143. Asentamiento para el concreto fresco.

American Society of the International Association for Testing and Materials (ASTM) C1688. Peso unitario.

American Society of the International Association for Testing and Materials (ASTM) C39. Ensayo de Resistencia a la compresión.

Arango, S. (2014). *Concreto permeable: desarrollo urbano de bajo impacto*. Obtenido de Blog 360° en concreto: <http://blog.360gradosenconcreto.com/concreto-permeable-desarrollo-urbano-de-bajo-impacto-2/>



*Estudio comparativo de mezclas de concreto poroso usando materiales disponibles en Cartagena de Indias para uso de pavimentos en parqueaderos*

---

- Argos. (2014). *Concreto Permeable. Ficha Tecnica*. Obtenido de <http://www.argos.co/Media/Colombia/images/Ficha%20t%C3%A9cnica%20Concreto%20Permeable.pdf>
- Blogs Uninorte. (2014). *Arroyos: Desarrollo, riesgo y sostenibilidad*. Obtenido de Universidad del Norte: <http://www.uninorte.edu.co/web/dip/arroyos-en-barranquilla>
- Castañeda, L. F., & Moujir, Y. F. (2014). *Diseño y aplicación de concreto poroso para pavimentos*. Tesis de pregrado. Pontificia Universidad Javeriana, Cali.
- Castro, J., de Solminihac, H., Videla, C., & Fernández, B. (2009). Estudio de dosificaciones en laboratorio para pavimentos porosos. *Revista Ingeniería de Construcción*, 24(3), 271-284. Obtenido de: [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-50732009000300005&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732009000300005&lng=es&tlng=es). 10.4067/S0718-50732009000300005
- Cementos Argos. (2014). *Demostraciones concreto permeable Expocamacol 2014*. Medellín, Antioquia, Colombia. Obtenido de [https://www.youtube.com/watch?v=SBe4vHCW9\\_U](https://www.youtube.com/watch?v=SBe4vHCW9_U)
- Concreto Ecológico de Mexico S.A. de C.V. (2012). *Ficha Tecnica de Hidrocreto, Sistema para infiltrar o recuperar el agua pluvial por medios de pisos y pavimentos porosos*. Mexico D.F. Obtenido de <http://www.concretopermeable.com/fichatecnicahidrocreto.pdf>
- Contraloría Distrital de Cartagena de Indias. (2013). *Informe macro de control fiscal ambiental 2013*. Cartagena de Indias.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (2012). *Censo de edificaciones IV trimestre de 2011*. Boletín de prensa. Bogotá D. C.



Departamento Administrativo Nacional de Estadística (2016). *Censo de edificaciones IV trimestre de 2015*. Boletín técnico. Bogotá D. C.

Eco@Dmin (2014). *Pavimento permeable – gimnasio al aire libre*. Obtenido de Ecoltehado: <http://ecotelhado.com.co/pavimento-permeable-parque-bogota/>

Ferguson, B. (2010). *Porous Pavements in North America: Experience and Importance*. Novatech.

Fuller, W., & Thompson, S. (1907). The laws of proportioning concrete. *Asian journal of civil engineering transport*, 67-143

Hernandez Diaz, B., & Martinez Llorente, O. (2014). *Diseño de un campo de prueba piloto de pavimentos permeables en la ciudad de Cartagena*. Tesis de pregrado, Universidad de Cartagena, Programa de Ingeniería Civil, Cartagena de Indias.

Hernandez, S., & Macea, F. (2014). *Investigación para el desarrollo de sistemas urbanos de drenaje sostenible (suds) en la ciudad de Bogotá*. Tesis de pregrado. Universidad Católica de Colombia, Bogotá.

Ibrahim, A., Mahmoud, E., Yamin, M., & Patibandla, V. (2014). Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties. *Construction and Building Materials*, 50, 524–529. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.09.022

Instituto Nacional de Vías (INV) Artículo 500-07. Pavimento de concreto hidráulico.

Instituto Nacional de Vías (INV) E-218-07. Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1½") por medio de la máquina de los ángeles.

Instituto Nacional de Vías (INV) E-128-07. Gravedad específica y absorción del agregado grueso.

Instituto Nacional de Vías (INV) E-130-07. Ensayo de Permeabilidad.



- Kumar, K., Kozak, J., Hundal, L., Cox, A., & Zhang, H. (2015). In-situ infiltration performance of different permeable pavements in a employee used parking lot e A four-year study. *Journal of Environmental Management*, 167, 8-14. doi: 10.1016/j.jenvman.2015.11.019
- Marrugo Ramirez, D. A. (2005). *Implementación del concreto poroso en estructuras de pavimento rígido*. Tesis de grado, Universidad de Cartagena, Ingeniería Civil, Cartagena.
- Massiel Santana, C., Florimón, M., & Pérez, A. (2010). Estudio de pavimentos sostenibles: hormigón permeable en estacionamientos de vehículos. En Odebrecht, *Recopilación de los mejores proyectos. Libro Conmemorativo 2010* (págs. 132 - 153). Santo Domingo: Odebrecht.
- Meininnger, R. (1988). No-Fines Pervious Concrete for Paving. *Concrete International*, 10, 20-27. Obtenido de: <http://www.rmc-foundation.org/images/PCRC%20Files/Applications%20&%20Case%20Studies/No-Fines%20Pervious%20Concrete%20for%20Paving-Meiningger.pdf>
- Metro (2010). Porous Pavement. *EcoVative Conference and Trade Show*. Estados Unidos de America.
- National Ready Mixed Concrete Association. (2004). Concrete in Practice. What, why and how? *Previous concrete*, 38. Estados Unidos de America.
- Neville, A., & Brooks, J. (1998). *Tecnología del Concreto*. México: Trillas.
- Norma Técnica Colombina (NTC) 77. Método de ensayo para analizar por tamizado de los agregados finos y gruesos.
- Norma Técnica Colombina (NTC) 396. Ensayo de Asentamiento del concreto.



- Norma Técnica Colombina (NTC) 2871. Método de Ensayo para determinar la resistencia del concreto a la flexión (utilizando una viga con carga en los tercios medios).
- Obla, K. H. (2010). Pervious concrete – An overview. *The Indian Concrete Journal*, 9-18. Obtenido de: [http://www.nrmca.org/research\\_engineering/Documents/Pervious\\_Concrete\\_Overview\\_paper\\_KObla\\_Aug2010.pdf](http://www.nrmca.org/research_engineering/Documents/Pervious_Concrete_Overview_paper_KObla_Aug2010.pdf)
- Perez, D. (2009). *Estudio experimental de concretos permeables con agregados andesíticos*. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico D.F.
- Polanco Andrade, A. M., & Sanchez Vega, A. M. (2012). *Diseño hidráulico de losas en pavimento poroso rígido como estructuras complementarias al drenaje pluvial de Bogotá*. Tesis de grado, Pontificia Universidad Javeriana, Ingeniería Civil, Bogota.
- Reyes, F., & Torres, A. (2002). Efectos de las fibras en la flexión de estructuras de pavimentos drenantes. *Ingeniería de construcción*, XVII(2), 93-102. Obtenido de: <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/10126>
- Rodríguez Hernández, J. (2008). *Estudio, análisis y diseño de secciones permeables de firmes para vías urbanas con un comportamiento adecuado frente a la colmatación y con la capacidad portante necesaria para soportar tráfico ligero*. Tesis doctoral, Universidad de Cantabria, Santander, España.
- Sánchez, I. (2009). *Jornadas sobre tecnologías y medio ambiente*. Obtenido de Fundacion Crana Fundazioa: [www.crana.org](http://www.crana.org)
- Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá. (2011). *Sistemas urbanos de drenaje sostenible SUDS para el plan de ordenamiento zonal norte pozn*. Bogotá, Colombia.





- Tennis , P. D., Leming, M. L., & Akers, D. J. (2004). *Pervious Concrete Pavements*. Skokie, Illinois; Silver Spring, Maryland: Portland Cement Association and National Ready Mixed Concrete Association.
- Teorema Ambiental. (1 de Febrero de 2004). *100% concreto ecológico mexicano*. Recuperado el 11 de 04 de 2016, de: <http://www.teorema.com.mx/agua/100-concreto-ecologico-mexicano/>
- Trujillo Lopez, A., & Quiroz Lasprilla, D. P. (2013). *Pavimentos Porosos Utilizados Como Sistemas Alternativos de Drenaje Urbano*. Tesis de grado, Pontificia Universidad Javeriana, Bogota.
- Uma Maguesvari , M., & Narasimha , V. (2013). Studies on Characterization of Pervious Concrete for Pavement Applications. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 104, 198–207. doi: 10.1016/j.sbspro.2013.11.112
- Universidad de Washington & CH2M HILL Inc. (2011). *Permeable pavement*. Greenroads Manual v15. (pp. 429 – 440) Seattle, Estados Unidos de America: Universidad de Washington
- Wang, Y., & Wang, G. (2011). Improvement of Porous Pavement. U.S. Green Building Council. Obtenido de: <http://www.usgbc.org/Docs/Archive/General/Docs9915.pdf>
- Weymouth, C. (1933). *Effects of particle interference in mortars and concretes*. The chilstone companies.
- Woods, R. (2013). *Chicago's 'greenest street' uses smog-eating cement*. Recuperado el 02 de Junio de 2016, de EarthTechling: <http://earthtechling.com/2013/05/chicagos-greenest-street-uses-smog-eating-cement/>



*Estudio comparativo de mezclas de concreto poroso usando materiales disponibles en Cartagena de Indias para uso de pavimentos en parqueaderos*

## 10. ANEXOS

**Anexo 1.** Dosificaciones para un metro cubico de concreto poroso hecho con canto rodado (Gravedad especifica = 2.54 y absorción = 1.441 %)

Referencia	Relación A/C	Porcentaje de vacíos (%)	Volumen de la pasta (m3)	Volumen de vacíos (m3)	Volumen de grava (m3)	Contenido de grava (Tn)	Contenido de cemento (kg)	Volumen de agua (m3)	Volumen de agua + absorción (m3)
CR1	0.26	15	0.2	0.15	0.65	1.651	346.344	0.090	0.099
CR2	0.26	20	0.15	0.2	0.65	1.651	259.758	0.068	0.077
CR3	0.26	25	0.08	0.25	0.67	1.702	138.538	0.036	0.046
CR4	0.35	15	0.2	0.15	0.65	1.651	299.643	0.105	0.114
CR5	0.35	20	0.15	0.2	0.65	1.651	224.732	0.079	0.088
CR6	0.35	25	0.08	0.25	0.67	1.702	119.857	0.042	0.052
CR7	0.45	15	0.2	0.15	0.65	1.651	260.600	0.117	0.127
CR8	0.45	20	0.15	0.2	0.65	1.651	195.450	0.088	0.097
CR9	0.45	25	0.08	0.25	0.67	1.702	104.240	0.047	0.057

**Anexo 2.** Dosificaciones para un metro cubico de concreto poroso hecho con triturado de caliza (Gravedad especifica = 2.36 y absorción = 5.14 %)

Referencia	Relación A/C	Porcentaje de vacíos (%)	Volumen de la pasta (m3)	Volumen de vacíos (m3)	Volumen de grava (m3)	Contenido de grava (Tn)	Contenido de cemento (kg)	Volumen de agua (m3)	Volumen de agua + absorción (m3)
TC1	0.26	15	0.2	0.15	0.65	1.651	346.344	0.090	0.123
TC2	0.26	20	0.15	0.2	0.65	1.651	259.758	0.068	0.101
TC3	0.26	25	0.08	0.25	0.67	1.702	138.538	0.036	0.070
TC4	0.35	15	0.2	0.15	0.65	1.651	299.643	0.105	0.138
TC5	0.35	20	0.15	0.2	0.65	1.651	224.732	0.079	0.112
TC6	0.35	25	0.08	0.25	0.67	1.702	119.857	0.042	0.076
TC7	0.45	15	0.2	0.15	0.65	1.651	260.600	0.117	0.151
TC8	0.45	20	0.15	0.2	0.65	1.651	195.450	0.088	0.121
TC9	0.45	25	0.08	0.25	0.67	1.702	104.240	0.047	0.081



*Estudio comparativo de mezclas de concreto poroso usando materiales disponibles en Cartagena de Indias para uso de pavimentos en parqueaderos*

**Anexo 3.** Pruebas de asentamiento para CR1, CR2 y CR3 (de izquierda a derecha)



**Anexo 4.** Pruebas de asentamiento para CR4, CR5, CR6, y CR7 (izquierda a derecha)







*Estudio comparativo de mezclas de concreto poroso usando materiales disponibles en Cartagena de Indias para uso de pavimentos en parqueaderos*

---

**Anexo 5.** Pruebas de asentamiento para CR8, TC1, TC2 y TC3 (de izquierda a derecha)



**Anexo 6.** Pruebas de asentamiento para TC4, TC5 y TC6 (de izquierda a derecha)







*Estudio comparativo de mezclas de concreto poroso usando materiales disponibles en Cartagena de Indias para uso de pavimentos en parqueaderos*

**Anexo 7.** Pruebas de asentamiento para TC7, TC8 y TC9 (de izquierda a derecha)



**Anexo 8.** Cilindros de la mezcla TC3 desmoronados





*Estudio comparativo de mezclas de concreto poroso usando materiales disponibles en Cartagena de Indias para uso de pavimentos en parqueaderos*

---

**Anexo 9.** Tiempos obtenidos durante la prueba de permeabilidad

Muestra	Tiempo 1 (s)	Tiempo 2 (s)	Tiempo 3 (s)	Permeabilidad 1 (cm/s)	Permeabilidad 2 (cm/s)	Permeabilidad 3 (cm/s)	Permeabilidad promedio (cm/s)
CR1	8.19	8.64	8.37	0.963	0.913	0.942	0.939
CR2	8.23	8.09	8.04	0.958	0.975	0.981	0.971
CR3	4.26	4.43	4.59	1.851	1.780	1.718	1.783
CR4	16.81	16.27	16.43	0.469	0.485	0.480	0.478
CR5	6.15	6.367	6.5	1.282	1.238	1.213	1.244
CR6	4.13	3.87	4.5	1.909	2.037	1.752	1.900
CR7	13.31	13.03	13.66	0.592	0.605	0.577	0.592
CR8	6.23	6.14	6.38	1.266	1.284	1.236	1.262
CR9	4.52	4.48	4.32	1.744	1.760	1.825	1.776
TC1	6.09	6.38	5.93	1.295	1.236	1.330	1.287
TC2	5.11	4.67	4.9	1.543	1.688	1.609	1.613
TC3	4.06	4.32	4.57	1.942	1.825	1.725	1.831
TC4	9.53	9.5	9.48	0.827	0.830	0.832	0.830
TC5	7.02	6.8	6.97	1.123	1.159	1.131	1.138
TC6	4.26	4.17	3.95	1.851	1.891	1.996	1.913
TC7	7.37	7.55	7.11	1.070	1.044	1.109	1.074
TC8	6.3	6.18	6.2	1.252	1.276	1.272	1.266
TC9	4.48	4.19	4.47	1.760	1.882	1.764	1.802