



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería

Diseño de un pavimento de concreto permeable de alta resistencia

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Maestro en:

Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta

Ing. Pedro de Jesús Pérez Huerta

Dirigido por:

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Querétaro, Qro. A 07 de Junio del 2019



Universidad Autónoma de Querétaro Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Diseño de un Pavimento de Concreto Permeable de Alta Resistencia

Opción de titulación:

Tesis

Que como parte para obtener el Grado de  
Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad.

Presenta

Ing. Pedro de Jesús Pérez Huerta

Dirigido por:

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza  
Presidente

Dra. Teresa López Lara  
Secretario

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel  
Vocal

Dr. Francisco Javier García Rodríguez  
Suplente

M. I. Gerardo Medellín Aguilar  
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.  
Junio 2019  
México

## RESUMEN

Los pavimentos de concreto permeable son técnicas que son empleadas para el manejo y control de escorrentías dentro de una vialidad, sin embargo, a pesar de que estos son una solución para el desalojo de agua, debido a la estructura abierta de poros que presentan es común que en este tipo de concreto existan problemas con la resistencia a la desintegración al igual que pueden presentarse resistencias más bajas tanto a compresión como a tensión que las de un concreto convencional. Debido a esto se ha visto la necesidad analizar el efecto de las propiedades de las mezclas porosas que constituyen al concreto permeable, así como su funcionalidad y durabilidad en el campo. En esta investigación se evalúan las propiedades mecánicas de resistencia y permeabilidad del concreto permeable al incorporarle un polímero a base de estireno reciclado, con el objetivo de aumentar la resistencia a la desintegración del mismo sin disminuir su permeabilidad, para esto se realizó el diseño de diversas mezclas de concreto combinando diferentes tamaños de agregado (1/2", 3/4" y 3/8") y diferentes porcentajes de polímero (5%, 10% y 15%), las cuales fueron ensayadas bajo estándares de las normas ASTM. Los resultados fueron comparados con una mezcla base de concreto permeable convencional y estos muestran que la mezcla modificada con polímero tuvo un incremento en la resistencia a flexión y compresión (17.3% y 30% respectivamente), lo que demuestra que una mezcla modificada con polímero a base de desechos mejora el desempeño del concreto permeable además de disminuir la huella ecológica.

**(Palabras clave:** Concreto, pavimento, polímero, resistencia, permeabilidad)

## SUMMARY

Pervious concrete pavements are techniques that are used for the management and control of runoff within a road, however, although these are a solution for the eviction of water, due to the open pore structure they present is common that in this type of concrete there are problems with the resistance to disintegration as well as lower resistances, both compression and tension, than those of a conventional concrete. Due to this, it has been necessary to analyze the effect of the properties of the porous mixtures that constitute the permeable concrete, as well as its functionality and durability in the field. In this research the mechanical properties of permeability and resistance of pervious concrete are evaluated by incorporating a recycled styrene-based polymer, with the aim of increasing the resistance to its disintegration without diminishing its permeability, for this purpose the design of various concrete mixtures combining different sizes of aggregate (1/2 ", 3/4" and 3/8 ") and different percentages of polymer (5%, 10% and 15%), which were tested under ASTM standards . The results were compared with a conventional permeable concrete base mix and these show that the polymer modified mix had a slight increase in flexural and compressive strength (30% and 17.3% respectively), which shows that a modified mixture with polymer based on waste improves the performance of pervious concrete in addition to reducing the ecological footprint.

**(Keywords:** Concrete, pavement, polymer, strength, permeability)

## **DEDICATORIA**

**A Dios mi sostén y guía en la vida.**

**A mis padres, hermana y abuela por ser mis principales motores e inculcarme los valores y la fortaleza que me llevaron a concluir esta etapa.**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por ser mi fortaleza y mi guía en el camino.

A mi padre, por inculcarme los valores que me definen ahora, darme su confianza y apoyo, sin ti jamás lo hubiera logrado. Te amo.

A mi madre y hermana por el apoyo, paciencia y amor que me brindaron para finalizar este proceso.

Agradezco al Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza por la confianza, tiempo e información brindada para el desarrollo de esta investigación.

A mis compañeros de generación de la Maestría en Vías Terrestres y Movilidad, por el simple hecho de haberlos conocido y haber forjado amistades con cada uno de ellos, especialmente a quienes considero mis hermanos Jacob, Edgar y Jehovanny.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Universidad Autónoma de Querétaro por su apoyo para el desarrollo y fortalecimiento de este trabajo de investigación.

# INDICE

	Pág.
RESUMEN .....	3
INDICE DE FIGURAS .....	11
INDICE DE TABLAS .....	13
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>15</b>
1.1 Justificación .....	17
1.2 Descripción del problema .....	18
1.3 Hipótesis .....	19
1.4 Objetivo .....	19
<b>2. REVISIÓN DE LA LITERATURA. ....</b>	<b>20</b>
<b>2.1 Pavimentos. ....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.1 Tipos de pavimento. ....</b>	<b>21</b>
2.1.1.1 Pavimento flexible. ....	21
2.1.1.2 Pavimento rígido. ....	22
<b>2.1.2 Pavimentos permeables. ....</b>	<b>22</b>
2.1.2.1 Superficie permeable. ....	25
2.1.2.2 Capas inferiores. ....	25
2.1.3 Pavimentos de concreto permeable. ....	26
<b>2.2 Concreto permeable. ....</b>	<b>29</b>
2.2.1 Antecedentes. ....	29
2.2.2 Ventajas del concreto permeable. ....	29
2.2.3 Diseño y composición del concreto permeable. ....	30
2.2.3.1 Materiales. ....	31
2.2.3.2 Diseño de mezclas. ....	32

2.2.3.3 Procedimiento de proporcionamiento.....	33
<b>2.2.2 Propiedades del concreto permeable. ....</b>	<b>36</b>
2.2.2.1 Peso volumétrico. ....	36
2.2.2.2 Revenimiento. ....	36
2.2.2.3 Porosidad. ....	37
2.2.2.4 Permeabilidad. ....	39
2.2.2.5 Resistencia. ....	40
2.2.2.6 Durabilidad.....	41
<b>2.3 Polímeros .....</b>	<b>42</b>
2.3.1 Estructura. ....	42
2.3.2 Poliestireno. ....	43
<b>3. METODOLOGÍA .....</b>	<b>46</b>
<b>3.1 Material y caracterización del agregado.....</b>	<b>47</b>
<b>3.1.1 Agregados. ....</b>	<b>47</b>
3.1.2 Cementantes y Agua.....	49
3.1.3 Aditivos. ....	49
<b>3.2 Variables independientes. ....</b>	<b>50</b>
<b>3.3 Dosificación.....</b>	<b>50</b>
3.3.1 Fase 1. ....	50
3.3.2 Fase 2. ....	50
3.3.3 Fase 3. ....	51
<b>3.4 Diseño de Mezclas.....</b>	<b>51</b>
3.4.1 Concreto permeable con agregado 3/8".....	52
3.4.2 Concreto permeable con agregado 3/4".....	54
3.4.3 Concreto permeable con agregado 3/8" y 1/2".....	56

<b>3.5 Elaboración de probetas.</b>	<b>58</b>
3.5.1 Cilindros.	58
3.5.2 Vigas.	61
<b>3.6 Pruebas y ensayos de laboratorio.</b>	<b>63</b>
3.6.1 Granulometría.	63
3.6.2 Absorción y peso específico.	64
3.6.3. Peso volumétrico.	64
3.6.4 Compresión.	65
3.6.5 Flexión.	66
3.6.6 Permeabilidad.	68
3.6.7 Infiltración.	70
<b>4. RESULTADOS.</b>	<b>72</b>
<b>4.1 Caracterización del agregado.</b>	<b>72</b>
4.2.1. Granulometría.	72
4.2.2 Absorción y peso específico.	75
4.2.3 Peso volumétrico.	75
<b>4.3 Propiedades mecánicas del concreto base.</b>	<b>76</b>
4.3.1 Resistencia a compresión concreto base.	77
4.3.2 Ensayo de permeabilidad concreto base.	81
4.3.3 Ensayo a flexión concreto base.	82
<b>4.4 Propiedades mecánicas concreto con poliestireno.</b>	<b>83</b>
4.4.1 Resistencia a compresión concreto con poliestireno.	83
4.4.2 Ensayo de permeabilidad concreto con poliestireno.	87
4.3.3 Ensayo a flexión concreto con poliestireno.	88
<b>5. CONCLUSIONES.</b>	<b>90</b>



## INDICE DE FIGURAS

Figura.	Pág.
Figura 2.1 Estructuración típica de pavimentos.....	21
Figura 2.2 Sección típica de un pavimento flexible. ....	22
Figura 2.3 Sección típica de un pavimento rígido. ....	22
Figura 2.4 Estructura típica del pavimento permeable. ....	24
Figura 2.5 Esquema de uso del concreto permeable sobre un pavimento de concreto convencional.....	27
Figura 2.6: Relación entre el contenido de vacíos y el contenido de pasta para agregado No. 8 (3/8"). ....	36
Figura 2.7: Ley de Darcy. Esquema de un concreto poroso. ....	38
Figura 2.8. Clasificación de los polímeros. ....	42
Figura 2.9. Poliestireno expandido nivel macroscópico y microscópico.....	44
Figura 2.10. Clasificación de partículas de poliestireno expandido. ....	44
Figura 3.1: Mapa conceptual de la metodología empleada. ....	46
Figura 3.2. Localización del banco de materiales la cañada. ....	47
Figura 3.3. Material producto de basalto banco la cañada. ....	48
Figura 3.4 Muestreo banco de materiales. ....	48
Figura 3.5. Aditivo Sika ViscoBond y poliestireno. Fuente: Elaboración propia ....	49
Figura 3.6: Elaboración de probetas.....	59
Figura 3.7. Cilindros y Vigas antes de ser desmoldados. ....	60
Figura 3.8. Muestra de cilindros desmoldados y listos para curar. ....	61
Figura 3.9. Dimensiones de la viga.....	62
Figura 3.10. Vigas desmoldadas listas para curar. Fuente: Elaboración propia ....	62
Figura 3.11. Obtención del peso volumétrico agregado grueso. ....	65
Figura 3.12. Ensayo a compresión simple.....	66
Figura 3.13. Elementos del ensayo a flexión. ....	67
Figura 3.14 Ensayo a flexión.....	67
Figura 3.15. Permeámetro utilizado para el ensayo de permeabilidad.....	69
Figura 3.16 Esquema aro utilizado para el ensayo de filtración. ....	70
Figura 4.1. Curva granulométrica banco de materiales la cañada. ....	74

Figura 4.2. Agregado 3/8", 1/2" y 3/4". .....	74
Figura 4.3. Comportamiento de la resistencia del concreto permeable 3/4". .....	77
Figura 4.4. Comportamiento de la resistencia del concreto permeable 3/4". .....	78
Figura 4.5. Comportamiento de la resistencia del concreto permeable 3/8" y 1/2". .....	79
Figura 4.6. Comparación mezcla base concreto permeable. ....	80
Figura 4.7. Comparación de coeficientes de permeabilidad.....	81
Figura 4.8. Comportamiento mezcla con 5% de poliestireno .....	84
Figura 4.9. Comportamiento mezcla con 10% de poliestireno .....	85
Figura 4.10. Comportamiento mezcla con 15% de poliestireno.....	86
Figura 4.11. Comparación de la resistencia a compresión del concreto modificado y el concreto base .....	87
Figura 4.12. Comparación coeficientes de permeabilidad concreto base y modificado.....	88
Figura 4.13. Ensayo a flexión concreto con poliestireno. ....	89

## INDICE DE TABLAS.

Tabla.	Pág.
Tabla 2.1 Relación capas inferiores y materiales de elaboración. ....	26
Tabla 2.2. Rangos típicos para el proporcionamiento en el concreto permeable. ..	31
Tabla 2.3. Tipos de aditivos y su utilización en concretos permeables. ....	32
Tabla 2.4. Valores efectivos b/bo .....	34
Tabla 3.1. Datos empleados para el diseño de mezcla concreto 3/8" .....	52
Tabla 3.2. Cantidades de materiales para el diseño de la mezcla de 3/8" .....	53
Tabla 3.3. Volúmenes por m <sup>3</sup> concreto 3/8" .....	54
Tabla 3.4 Datos empleados para el diseño de mezcla concreto 3/4" .....	55
Tabla 3.5. Cantidades de materiales para el diseño de la mezcla de 3/4" .....	55
Tabla 3.6. Volúmenes por m <sup>3</sup> concreto 3/4" .....	55
Tabla 3.7. Datos empleados para el diseño de mezcla concreto 3/8" y 1/2" .....	56
Tabla 3.8. Cantidades de materiales para el diseño de la mezcla de 3/8" y 1/2" ..	56
Tabla 3.9. Volúmenes por m <sup>3</sup> concreto 3/4" .....	57
Tabla 3.10. Pruebas de laboratorio aplicadas al concreto permeable. ....	63
Tabla 4.1. Granulometría de gravas, banco la cañada. ....	72
Tabla 4.2. Granulometría de arenas banco la cañada. ....	73
Tabla 4.3. Granulometría banco la cañada. ....	73
Tabla 4.4. Absorción y peso específico. ....	75
Tabla 4.5. Peso volumétrico agregados .....	76
Tabla 4.6. Resistencias del concreto permeable con agregado 3/4". ....	77
Tabla 4.7. Resistencias del concreto permeable con agregado 3/8". ....	78
Tabla 4.8. Resistencias del concreto permeable con agregado 3/8" y 1/2". ....	79
Tabla 4.9. Resultados prueba de permeabilidad. ....	81
Tabla 4.10. Resistencia a flexión concreto base 3/8" y 1/2" .....	82
Tabla 4.11. Resistencia a compresión concreto modificado con 5% de poliestireno. .....	83
Tabla 4.12. Resistencia a compresión concreto modificado con 10% de poliestireno. .....	84

Tabla 4.13. Resistencia a compresión concreto modificado con 15% de poliestireno. .....	85
Tabla 4.14. Coeficientes de permeabilidad concreto modificado con polímero. ....	87
Tabla 4.15. Resultados ensayo a flexión concreto modificado. ....	88

## 1. INTRODUCCIÓN

Muchas de las ciudades del mundo dependen de los sistemas de redes de tuberías que con frecuencia han sido implementadas desde el siglo XIX de acuerdo a Scholz y Grabowiecki (2007), los sistemas tradicionales capturan la escorrentía de las tormentas y posteriormente la distribuyen a los cursos de agua o sistemas de alcantarillado cercanos, pero algunos de estos sistemas se han vuelto ineficientes. Por su parte Mahboub *et al.* (2005) menciona que estas estrategias también se han adoptado para reducir la acumulación de agua en la estructura de los pavimentos combinándolos con materiales de baja permeabilidad en su superficie para evitar la infiltración de agua; sin embargo, se ha notado que la construcción de pavimentos impermeables convencionales es causa de cambios importantes en el entorno local como son los aspectos hidrológicos y algunas variaciones en el ambiente, dado como resultado una mayor cantidad de escorrentía de las aguas pluviales originando un gran volumen de agua sobre los pavimentos que además de contener una cantidad inaceptable de contaminantes generan inundaciones repentinas (Haselbach *et al.* 2005; Chandrappa & Biligiri, 2016).

El no desalojar adecuadamente el agua estancada sobre la superficie del pavimento trae consigo una serie de problemas, de acuerdo a Liang (2010) se expone que el exceso de humedad provoca fallas estructurales y funcionales de manera prematura en el pavimento así mismo esta acumulación de agua puede traer consigo un fenómeno de hidroplaneo poniendo en riesgo a los usuarios de la vía, por lo que es necesario un adecuado sistema de drenaje en un pavimento impermeable o por su parte la implementación de nuevos sistemas de eliminación de escorrentías como lo es el pavimento permeable (Liscano y Torres, 2002; Li, 2013).

Ranieri *et al.* (2012) en su investigación muestra que estos en lugar de sellar el pavimento abren su estructura de poros a la infiltración y evaporación lo que da como resultado el drenado del agua además de proporcionar una purificación que beneficia al medio ambiente. Es por esto que investigaciones muestran que debido a su capacidad de almacenamiento, el uso del pavimento permeable resulta ser

favorable para la eliminación de las escorrentías (Collin *et al.*, 2007; Scholz y Grabowiecki, 2007; Alyasery y Zhou, 2016).

Si nos enfocamos particularmente en un sistema de pavimento de concreto permeable las prestaciones de drenaje de agua que ofrece ha llevado a que sea utilizado en aceras, parques, exteriores de edificios y pavimentos de carreteras de tráfico ligero, (Tennis *et al.* 2004; Amer *et al.* 2012). Sin embargo, al ser un material poroso puede presentar problemas debido a que este tiene ausencia de finos y por ende la resistencia a la flexión y compresión tienden a ser menores así que se debe tener en cuenta que un incremento de la porosidad siempre representará una pérdida de resistencia a la desintegración en el concreto.

El principal componente de un concreto de altas especificaciones son los aglutinantes modificados con polímeros (Yildirim 2007). Los polímeros se han incluido en las mezclas para la elaboración de concreto con el fin de modificar el comportamiento de este durante su estado fresco o endurecido, algunos de estos ayudan a mejorar las propiedades mecánicas del concreto tales como la resistencia. Los resultados de este comportamiento varían de acuerdo al tipo de agregado, tipo de polímero, relación agua/cemento, relación polímero/cemento y a los aditivos que se le agreguen a la mezcla (Giustozzi, 2016).

Huang (2010) realizó estudios sobre las propiedades mecánicas y físicas de los pavimentos de concreto permeable al ser modificados con polímeros (SBS látex) en dicha investigación se logró un equilibrio de permeabilidad y resistencia del concreto permeable. Por su parte Jian Z *et al.* (2005) observó que la adición de fibra de polipropileno al 0.56% en volumen del concreto presentó un aumento del 90% en la resistencia a la tracción indirecta y un aumento del 20% en la resistencia a la flexión, Lutfur *et al.* (2017) también comenta los beneficios de esta fibra a la resistencia del concreto. Como respuesta a estos acontecimientos se desarrolla la idea de elaborar una mezcla de concreto con la adición de un polímero a base de materiales reciclados en este caso el poliestireno el cual ofrecerá un concreto permeable con respuesta mecánica superior a los tradicionales.

## 1.1 Justificación

Debido a su capacidad de almacenamiento autores como Alyasery y Zhou (2016) coinciden que el uso del pavimento permeable resulta ser favorable para la eliminación de la escorrentía. Sin embargo, el ser un material poroso esta es precisamente la causa de uno de los problemas que puede presentarse al trabajar con este tipo de pavimento. Como mencionan Lizcano y Torres (2002) debido a que el concreto poroso tiene ausencia de finos, la resistencia a la flexión y compresión tienden a ser menores así que se debe tener en cuenta que un incremento de la porosidad siempre representará una pérdida de resistencia a la desintegración en el concreto. Chen *et al.* (2016) menciona al respecto que la resistencia a la tracción y el módulo resiliente de una mezcla abierta son usualmente más bajos en comparación con los del asfalto denso convencional, así como sus propiedades estructurales, tales como durabilidad y resistencia, son relativamente pobres en comparación con los pavimentos asfálticos densos convencionales.

La necesidad de aumentar las propiedades mecánicas del concreto permeable ha llevado a varios autores a experimentar con diferentes tipos de materiales y polímeros para conseguir un mejor desempeño en este tipo de concreto (Huang, 2010; Jian Z *et al.* 2005; Lutfur *et al.* 2017) . Estas investigaciones fundamentan el hecho de que con la inclusión de polímeros es posible mejorar las propiedades físicas y mecánicas del concreto permeable, por lo que en esta investigación se estudia el efecto de un polímero a base de estireno en el concreto permeable.

## **1.2 Descripción del problema.**

Con la implementación de un pavimento de concreto permeable podemos afrontar el problema de inundaciones que afecta a muchas ciudades de México, sin embargo a pesar de ser una solución para disminuir la cantidad de escorrentía de un sitio, el exceso de flujo de agua y el tránsito no adecuado puede ocasionar la erosión de estos pavimentos, Keck (2001) menciona que se presentan situaciones en las que la acción del medio o la calidad de la mezcla de concreto contribuyen a los fenómenos de deterioro lo que deriva a realizar una rápida intervención, ya sea de rehabilitación o de reemplazo de la estructura. Este problema se presenta debido a la textura superficial más áspera, la poca o no inclusión de finos y a la estructura abierta que se presenta por la presencia de poros en el concreto permeable, provocando que se obtengan bajas resistencias y una desintegración del mismo por este motivo aplicaciones como autopistas o calles diseñadas para la inclusión de tránsito pesado resultan no adecuadas para este tipo de concretos. Es por esto que se comenta la necesidad de analizar el efecto de las propiedades de las mezclas porosas, así como su funcionalidad y durabilidad en el campo, por lo que actualmente se busca incrementar su resistencia y permeabilidad con la inclusión de nuevos aditivos y combinaciones de materiales.

### **1.3 Hipótesis.**

El uso de aditivos poliméricos experimentales a base de estireno incrementa la resistencia a flexión y compresión del concreto permeable sin disminuir la permeabilidad para lo que fue diseñado.

### **1.4 Objetivo.**

Incrementar la resistencia a flexión y compresión del concreto permeable mediante el uso de un aditivo polimérico experimental a base de estireno producto de reciclaje.

## **2. REVISIÓN DE LA LITERATURA.**

### **2.1 Pavimentos.**

De acuerdo al manual para el diseño de estructuras de pavimento AASHTO (2001) el pavimento es una combinación de subbase, base y la capa de rodadura colocado en una subrasante para soportar la carga de tráfico y distribuirlo a las terracerías. El catálogo de secciones estructurales de pavimentos de las Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) señala que es la capa o conjunto de capas comprendidas entre la subrasante y la superficie de rodamiento, cuya función principal es soportar las cargas rodantes y transmitir las a las terracerías, distribuyéndolas en tal forma que no se produzcan deformaciones perjudiciales en ellas.

Los requisitos básicos con los que debe cumplir un pavimento son la durabilidad, la suavidad y la seguridad es decir, resistencia al deslizamiento, Sun (2016).

Este tiene como principales funciones:

- Proporcionar una superficie de rodamiento segura, cómoda y de características permanentes ante las cargas del tránsito a lo largo del tiempo, vida de diseño, o ciclo de vida. Durante este periodo debe haber tan sólo algunas acciones esporádicas de conservación o mantenimiento locales, de poca magnitud en importancia y costo.
- Resistir las sollicitaciones del tránsito previsto durante la vida de diseño, y distribuir las presiones verticales ejercidas por las cargas, de tal forma que sólo llegue a la capa subrasante una pequeña fracción compatible con su capacidad de resistencia. Las deformaciones recuperables que se produzcan tanto en la subrasante como en las diferentes capas del pavimento, deberán ser admisibles sin dejar de tomar en cuenta la repetición de cargas y la resistencia a la fatiga de los materiales.

- Construir una estructura que resista los factores climatológicos, como son temperatura y agua, por ser los más adversos en el comportamiento del pavimento y de los suelos de cimentación.

### 2.1.1 Tipos de pavimento.

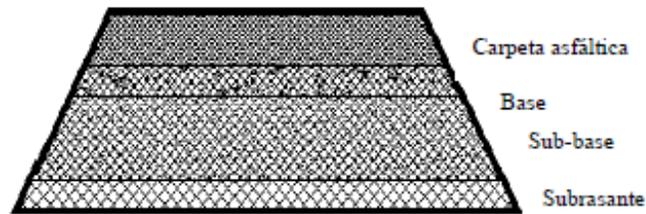
Conforme al tipo de carpeta estructural que integra a un pavimento, éstos se clasifican generalmente en flexibles (tienen superficialmente una carpeta asfáltica) y rígidos (tienen superficialmente concreto hidráulico).



**Figura 2.1 Estructuración típica de pavimentos.**  
Fuente: (SCT)

#### 2.1.1.1 Pavimento flexible.

En un pavimento flexible la carpeta asfáltica es la que proporciona la superficie de rodamiento y es aquella que está formada por suelos con características especiales y cemento asfáltico, sobre la cual las cargas del tránsito vehicular actúan directamente por lo que está encargada de absorber y transmitir los esfuerzos horizontales y verticales a las capas que yacen bajo ella Olivera (2004). Las capas que forman un pavimento flexible se muestran en la Figura 2.2 y estas son: carpeta asfáltica, base y sub-base, que se construyen sobre la capa subrasante.

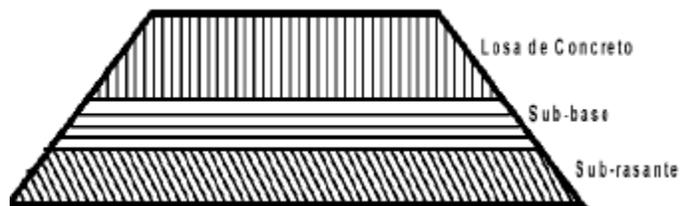


**Figura 2.2 Sección típica de un pavimento flexible.**

*Fuente: Olivera (2004).*

### 2.1.1.2 Pavimento rígido.

Por su parte un pavimento rígido tiene como superficie de rodadura losas de concreto hidráulico las cuales distribuyen las cargas del tráfico hacia las capas inferiores por medio de toda la superficie de la losa, aunque pueden colocarse en forma directa sobre la subrasante resulta conveniente el construir una capa de sub-base para evitar que los finos sean bombeados hacia la superficie, Olivera (2004). En la figura 2.3 se muestra la estructura de un pavimento rígido.



**Figura 2.3 Sección típica de un pavimento rígido.**

*Fuente: Olivera (2004).*

### 2.1.2 Pavimentos permeables.

Los estudios de los pavimentos permeables se remontan fundamentalmente a la década de 1970, en los Estados Unidos se llevó a cabo probablemente la primera investigación, de acuerdo con el Franklin Institute (1972) el 13 de agosto de 1969 fue presentada una propuesta a la oficina de investigación y agencia ambiental para desarrollar pavimentos porosos con el fin de determinar su viabilidad en una

serie de aplicaciones y para construir áreas de muestra y prueba para propósitos de demostración. Pasando a la década de 1980, los estudios comenzaron a abordar los aspectos de la calidad del agua de pavimentos permeables Day *et al.* (1981).

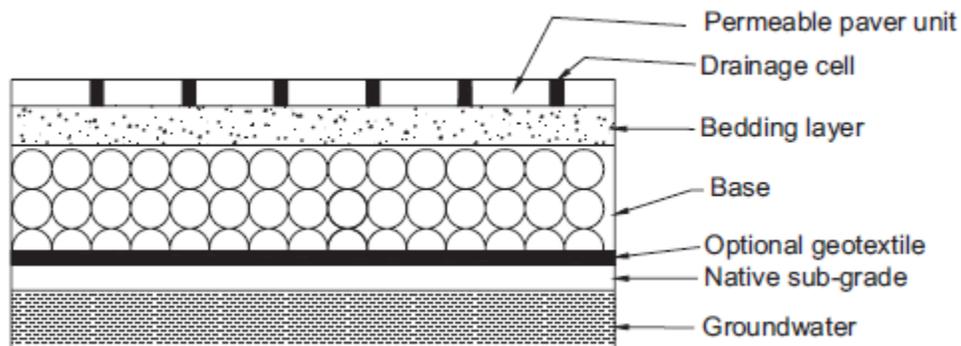
De acuerdo con Pratt (2004) citando a Hogland *et al.* (1987) y Larson (1990), en Suecia, en los años ochenta, comenzaba el uso de asfalto de concreto poroso, colocado sobre una base de agregado de piedras trituradas y de drenaje libre, y las primeras observaciones sugieren que esta forma de pavimento ofrecía importantes beneficios de cantidad y calidad de descarga de aguas pluviales. Desde entonces han sido múltiples los trabajos de investigación desarrollados en varios países que han dado lugar a monografías y manuales específicos tal es el caso del elaborado por Pratt *et al.* (2002) para la asociación de la construcción CIRIA en el cual se recoge más de 20 años de experiencia en el diseño y construcción de firmes permeables.

En recientes años autores como Scholz y Grabowiecki (2007); Lee *et al.* (2015); Rahman *et al.* (2015); Alyasery y Zhou (2016); Chandrappa y Biligiri (2016); Mohammadinia *et al.* (2018), definen a los pavimentos permeables como técnicas que permiten a las aguas o escorrentías generadas por las lluvias infiltrarse a la capa superficial del pavimento, lo que permite drenarla y conducirla al suelo para su infiltración, en caso de así desearlo, también Collin *et al.* (2007) nos indica que, el agua en el pavimento permeable pasa a través de varias capas de materiales permeables lo cual permite reducir la cantidad de escorrentía.

La tecnología de los pavimentos permeables se sintetiza en Ranieri *et al.* (2012), donde se expone que son la combinación de arena, grava, aglutinante de asfalto (o alternativamente cemento Portland y agua), junto con aditivos de superficie activa, los cuales proporcionarían un material que puede beneficiar el entorno de donde se construye sin cambiar la función primaria de pavimento como una superficie portadora de carga. La estructura puede estar constituida de capas de diferentes materiales porosos, tal como mencionan Masy *et al.* (2016) que la definen como una capa superior constituida por pavimentos de concreto espaciados y rellenos de juntas arenosas basada en una capa de lecho de granulometría fina,

la cual esta soportada por una base y una subbase de piedras trituradas, la capa inferior es un geotextil permeable o impermeable dependiendo del objetivo, y un tubo de drenaje ubicado a una altura apropiada evitará la saturación del pavimento.

La estructura típica de un pavimento permeable se muestra en la Figura 2.4.



**Figura 2.4 Estructura típica del pavimento permeable.**

*Fuente: Scholz y Grabowiecki (2007).*

Desde el punto de vista cuantitativo, García (2011) menciona que los procesos que generalmente se dan en las capas de un pavimento permeable son los siguientes:

- Infiltración/Percolación. (Entendiendo por percolación, como la infiltración a través de la superficie permeable).
- Retención.
- Transporte.
- Almacenamiento.

Desde el punto de vista cualitativo Woods-Ballard *et al.* 2007, menciona que los tratamientos físicos, químicos y biológicos que ocurren en las capas son :

- Filtración.
- Adsorción.
- Biodegradación.
- Sedimentación.

La configuración y la naturaleza de los materiales de las capas pueden presentar variantes, pero siempre bajo la condición de permeabilidad creciente desde las capas superiores hacia las inferiores. De acuerdo a Rodríguez (2008) y como se muestra en la sección de la Figura 2.4, las capas que conforman el sistema pueden agruparse en:

- Superficie permeable.
- Capas inferiores.

#### *2.1.2.1 Superficie permeable.*

Se define como superficie permeable a aquel pavimento artificial que permite el paso del agua (Castro *et al.* 2005). Dichas superficies se presentan de diversas maneras, tienen como principal función servir como filtro permitiendo la infiltración de las aguas pluviales y actúan como soporte estructural. Los tipos de superficie permeable que comúnmente se encuentran son:

- Adoquines con ranuras.
- Bloques porosos.
- Mezcla bituminosa porosa.
- Césped o grava con refuerzos.
- Concreto poroso.

#### *2.1.2.2 Capas inferiores.*

La estructura del pavimento permeable es completada por las capas inferiores para las cuales deben contemplarse la base, sub-base y un geotextil. Rodríguez (2008) menciona que en función de la naturaleza de los materiales estas capas se pueden catalogar en:

- Capas granulares.
- Estructuras de plástico.
- Geo sintéticos.

La Tabla 2.1 proporciona un resumen de la tipología de las capas inferiores en función de los materiales.

**Tabla 2.1 Relación capas inferiores y materiales de elaboración.**

<b>Capa</b>	<b>Material</b>
Base	Granular
Sub-base	Granular / Estructuras de plástico / Geo sintéticos
Geotextil	Geo sintéticos.

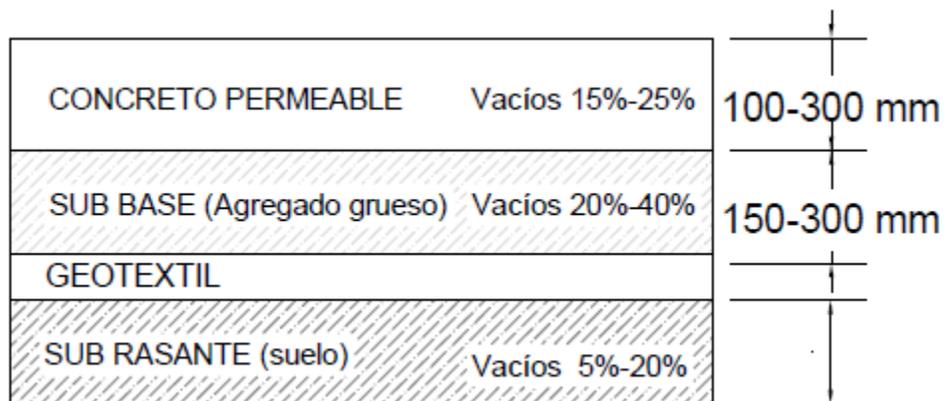
*Fuente: Rodríguez (2008)*

### 2.1.3 Pavimentos de concreto permeable.

Si bien los impactos ambientales positivos que ofrece el concreto permeable son muchos, su aplicación es limitada. Esto es atribuible a los inconvenientes heredados de su estructura porosa aleatoria, como la resistencia limitada, la susceptibilidad a la obstrucción y la preocupación por la durabilidad, sin embargo debido a la creciente preocupación por el desarrollo sostenible junto con los avances recientes en concreto permeable de alto rendimiento , se ha visto un aumento en la aplicación de este para la construcción de pavimentos.

Para aplicaciones en carreteras, el hormigón permeable generalmente cubre un hormigón impermeable convencional como un proceso de desgaste como se ilustra en la Fig. 2.5, proporcionando la funcionalidad de reducción de ruido durante la interacción del pavimento con el neumático y el drenaje de agua.

Se tiene que cumplir los criterios de resistencia y durabilidad suficientes para la carga del sitio y la exposición ambiental lo que resultara en un diseño exitoso de concreto permeable y así su uso en la superficie será el adecuado.



**Figura 2.5 Esquema de uso del concreto permeable sobre un pavimento de concreto convencional.**

*Fuente: Adaptación de Zhong (2018).*

A pesar de que el uso del concreto permeable como material de construcción del pavimento ha ido incrementando, su aplicación sigue siendo escasa en comparación con el concreto impermeable convencional por lo que se necesitan más investigaciones para facilitar una aplicación más amplia del concreto permeable como material de construcción de pavimento sostenible. Zhong *et al.* (2018) mencionan seis puntos en los que hay que trabajar a futuro los cuales se enuncian a continuación:

- Método de diseño y de ensayo de mezclas:

Existe un gran número de parámetros que afectan el rendimiento del concreto permeable. Sin embargo, la prueba y el error sigue siendo la práctica común para su diseño y ensayo en laboratorios, no existe alguna medida estándar por lo que la comparación de resultados entre laboratorios no puede ser significativa.

- Procedimiento de diseño estructural.

Hacen falta especificaciones como la resistencia mínima, la conductividad hidráulica del umbral, la reducción de ruido deseada o el espesor óptimo por lo que existe la necesidad de desarrollar un código y procedimiento de diseño estructural universal para concretos permeables similares a los de otros materiales de pavimento.

- Construcción de campo, control de calidad, mantenimiento.

Existe una diferencia entre los resultados obtenidos en el laboratorio y el desempeño en el campo, aunque se sabe que el concreto permeable tiene una naturaleza aleatoria también hay que tomar en cuenta la práctica de construcción en el campo esta variación de resultados se puede minimizar si el procedimiento de construcción esta estandarizado.

- Aplicabilidad en carretera de gran volumen.

A pesar de los avances en pavimentos de concreto permeable de alto rendimiento aún se necesita más investigación para la aplicación de este a carreteras de alto volumen.

- Caracterización microestructural y modelización estructural del rendimiento.

El rendimiento del concreto permeable depende en gran medida de su estructura abierta (porosidad). Sin embargo, solo se ha realizado una investigación limitada y hay muy pocos modelos disponibles.

- Análisis del costo del ciclo de vida.

El estudio limitado del costo del ciclo de vida de este tipo de pavimento ocasiona que los contratistas duden en usar este material, al ser el pavimento de concreto permeable un material relativamente débil el costo inicial es más alto en comparación con los pavimentos de concreto convencionales.

## **2.2 Concreto permeable.**

En esta sección se revisaran los antecedentes, características y propiedades del concreto permeable, así como los pasos para su adecuado diseño.

### **2.2.1 Antecedentes.**

Enfocándonos en el término de concreto permeable este es usado históricamente para describir a aquel concreto sin finos o un concreto de granulometría discontinua, de acuerdo con la ACI (2006) en los años 1800 este concepto solo consistía en unir grava y cemento y era empleado en la construcción de casas. Fue hasta a la década de 1970 cuando el concreto permeable fue utilizado en los Estados Unidos para la construcción de pavimentos, como se menciona en ACI (2006) este fue referido como un material de pavimentación de estacionamiento en el área central de Florida, el concepto se desarrolló como un medio para manejar las enormes cantidades de agua que salía del estacionamiento durante una tormenta permitiendo al agua penetrar en el suelo bajo el pavimento.

Lo anterior se demuestra en Tennis *et al.* (2004) quien reporta que el concreto permeable ha sido empleado en estacionamientos, pavimentos de tráfico ligero y andadores por muchos años en Florida, y que, de acuerdo para estas aplicaciones, generalmente se usan tamaños de agregados más pequeños por razones de estética.

Recientemente autores como Chen *et al.* (2016) mencionan que el concreto poroso ha sido ampliamente utilizado en todo el mundo por sus ventajas de drenaje de agua y reducción de ruido que resulta en beneficios de seguridad, economía y medio ambiente para los usuarios de la carretera al igual de lo mucho que se ha investigado sobre las propiedades materiales, incluyendo aglutinantes, el agregado y la permeabilidad de las mezclas.

### **2.2.2 Ventajas del concreto permeable.**

Como se ha mencionado con anterioridad y según lo indican Aamer *et al.* (2011) debido a las prestaciones de drenaje de agua del concreto permeable este se ha utilizado en aceras, parques, exteriores de edificios y pavimentos de

carreteras de tráfico ligero. Los concretos permeables proporcionan una serie de beneficios hidrológicos que incluye la reducción de escorrentía, el aumento de recarga del agua subterránea y la mejora de la calidad de la escorrentía, William *et al.* (2014) menciona que, para llevarse a cabo estos beneficios, el pavimento debe estar funcionando hidráulicamente según lo diseñado. Es decir, debe alcanzar su conductividad hidráulica de diseño o permeabilidad y el indicador típico de que esto ocurra es su porosidad.

### **2.2.3 Diseño y composición del concreto permeable.**

En Alyasery y Zhou (2016) se encuentra que los materiales componentes de un concreto permeable son cemento, agregado grueso y agua con poco o sin agregado fino (agregados finos de 0:1 a 1:1 a cemento) con una relación de agua a cemento de 0.35 a 0.40 y un contenido de huecos de 15 % a 25 % estos rangos también se hacen mención en Tennis *et al.* (2004) y Solminihac y Castro (2002) para evitar problemas de estabilidad en la mezcla.

Para los espesores típicos del concreto permeable se presentan rangos que varían entre 10 y 30.5 cm (4 a 12 pulgadas), dependiendo de la carga de tráfico y otros requisitos según Rodriguez (2008) las opciones de conglomerante son habitualmente dos: cemento hidráulico o un ligante sintético los cuales pueden ser modificados con distintos tipos de aditivos para mejorar sus prestaciones.

De acuerdo con Tennis *et al.* (2004) las variables más importantes que afectan las propiedades mecánicas de un concreto permeable son las relaciones de agregado y agua/cemento, además dependiendo de la aplicación que tendrán se ha encontrado como aceptable un amplio rango de valores de cemento, así como que los aditivos químicos además de afectar la relación agua/cemento son utilizados para mejorar la trabajabilidad, los tiempos de fraguado y mejorar las características del concreto permeable. . En la tabla 2.2 se muestran los rangos más comunes para el proporcionamiento de materiales en un concreto permeable.

**Tabla 2.2. Rangos típicos para el proporcionamiento en el concreto permeable.**

<b>Criterio</b>	<b>Rango</b>
Agregado	1190 a 1480 (Kg/m <sup>3</sup> )
Cementantes	270 a 415 (Kg/m <sup>3</sup> )
Agua/cemento, peso	0.26 a 0.45
Agregado/cemento	4 a 4.5:1
Agregado fino/ Agregado grueso	0 a 1:1

*Fuente: Tennis et al. (2004).*

### 2.2.3.1 Materiales.

A continuación se presentan las características y normas que deben cumplir los materiales que se usaran para el diseño de concreto permeable.

#### 2.2.3.1.1 Agregados.

De acuerdo a la ACI (2006) los tamaños de agregados para la realización del concreto permeable pueden ser agregado grueso de un solo tamaño o de una clasificación entre 3/4 y 3/8 de pulgada (19 y 9.5 mm) y deben cumplir con los requisitos de las normas ASTM D 448 y ASTM C 33 las cuales hacen referencia a la clasificación estándar del tamaño de agregados para la construcción de caminos y elaboración de concreto respectivamente, también se menciona que para mejorar la resistencia del concreto permeable, se deben mejorar tres aspectos: la resistencia de la pasta, la pasta alrededor del agregado y la cohesión entre el agregado y la pasta, para conseguirlo se pueden emplear tamaños de agregados más pequeños y usar aditivos.

#### 2.2.3.1.2 Cementantes y agua.

Para este tipo de concreto el cemento Portland que satisface las normas ASTM C150, C595 ó C1157 se usa como el aglomerante principal, así como también pueden usarse materiales suplementarios como la ceniza volante, el cemento de escoria, y el humo de sílice, los cuales deben de satisfacer los requisitos de las normas ASTM C618, C989, y C1240, respectivamente.

Con respecto al cemento Solminihac y Castro (2002) mencionan que una mayor dosis de cemento generará un concreto más resistente, pero demasiado cemento disminuirá el porcentaje de vacíos interconectados en el concreto, perdiendo este su capacidad de infiltración por lo que Tennis *et al.* (2004) mencionan que es recomendable

utilizar una cantidad que fluctúe entre los 270 a 415 kg/m<sup>3</sup>, según requisitos de resistencia y permeabilidad.

#### 2.2.3.1.3 Aditivos.

Los aditivos deben satisfacer los requisitos de la norma ASTM C494 estas nos dan a conocer la especificación normalizada de aditivos químicos para concreto. En la Tabla 2.3 se muestran los tipos de aditivos que comúnmente se usan en la elaboración de concreto y su uso de acuerdo con la ACI 522 (2006).

**Tabla 2.3. Tipos de aditivos y su utilización en concretos permeables.**

<b>Aditivos</b>	<b>Uso</b>
Reductores de agua (mediano a alto rango).	Se usan dependiendo de la relación agua-cemento.
Retardadores.	Se usan para estabilizar y controlar la hidratación del cemento.
Aceleradores.	Pueden utilizarse cuando se está colocando concreto permeable en climas muy fríos.
Inclusores de aire.	Pueden utilizarse en ambientes susceptibles a la congelación y deshielo.

*Fuente: ACI (2006)*

#### 2.2.3.2 Diseño de mezclas.

Existen una gran cantidad de métodos empíricos de diseño de mezclas para obtener concretos con características específicas, sin embargo, no existe una norma como tal que mencione el procedimiento para la realización de mezclas para concreto permeable, para nuestro caso se usara el propuesto por el ACI 211 de acuerdo con Tennis *et al.* (2004), este método provee un procedimiento apto para producir el proporcionamiento de la mezcla de concreto permeable.

El procedimiento descrito en ACI 211 detalla dos métodos de proporcionar mezclas de concreto de peso normal y denso que son:

1. Basado en un peso estimado del concreto por volumen unitario.
2. Basado en el cálculo del volumen absoluto ocupado por los componentes del concreto.

Los métodos descritos proporcionan una aproximación preliminar de las cantidades de materiales necesarios para elaborar la mezcla de concreto, que luego deben ser verificadas mediante mezclas de prueba en el laboratorio o en el campo y efectuar los ajustes que sean necesarios con el objetivo de lograr las características deseadas en el concreto fresco y endurecido. El método de la ACI se resume en los siguientes pasos:

- 1) Elección del revenimiento,
- 2) Elección del tamaño máximo de agregado,
- 3) Cálculo del agua de mezclado y el contenido de aire,
- 4) Selección de la relación agua- cemento,
- 5) Cálculo del contenido de cemento,
- 6) Estimación del contenido de agregado grueso,
- 7) Estimación del contenido de agregado fino,
- 8) Ajuste por humedad del agregado,
- 9) Ajustes en las mezclas de prueba.

#### *2.2.3.3 Procedimiento de proporcionamiento.*

El procedimiento para el diseño de mezclas de concreto permeable es diferente al empleado para el concreto convencional. Para el concreto convencional se siguen las recomendaciones del ACI 211.1; mientras que para el concreto permeable se debe seguir las recomendaciones del ACI 211.3R. En el concreto convencional, el diseño de mezcla se basa en la relación agua/cemento; sin embargo, en el diseño de mezcla de concreto permeable lo más importante es el contenido de vacíos y el volumen de pasta. El contenido de vacíos determina la

velocidad de infiltración del agua a través de la estructura porosa del concreto, además de proveer la capacidad de almacenamiento; y el volumen de pasta garantiza la adherencia entre las partículas de árido grueso.

El adecuado diseño de mezclas dependerá de las propiedades de los materiales usados y de los resultados de las pruebas con dichos materiales. El procedimiento está basado en el volumen de pasta necesario para mantener unidas las partículas de agregado, mientras se mantiene la estructura de vacíos necesaria.

La cantidad de agregado depende del peso unitario seco-compactado y de los valores de  $b/b_0$  seleccionados de la Tabla 2.4 (ACI 211 3R-02).

Donde:

$b/b_0$  = volumen seco compactado de agregado grueso por unidad de volumen de concreto.

$b$  = volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto.

$b_0$  = volumen de agregado grueso por unidad de volumen de agregado grueso.

**Tabla 2.4. Valores efectivos  $b/b_0$**

Porcentaje de agregado fino (%)	$b/b_0$	
	3/8"	3/4"
0	0.99	0.99
10	0.93	0.93
20	0.85	0.86

*Fuente: ACI 211 3R 02*

Una vez que se determina el volumen de pasta se selecciona la relación  $a/c$ , se determinan los pesos del agua y el cemento por metro cúbico de acuerdo con las siguientes relaciones:

$$\text{Volumén de la pasta } (V_p) = \text{Volumén de cemento} + \text{Volumén de agua.}$$

O bien:

$$Vp = \frac{c}{\gamma_{\text{cemento}}} + \frac{a}{\gamma_{\text{agua}}} \quad (1)$$

Si se considera como ejemplo que el peso específico del cemento y agua es 3.15 y 1 respectivamente se tiene:

$$Vp = \frac{c}{3.15 \cdot 1000} + \frac{a}{1000} \quad (2)$$

Donde:

c= peso del cemento

a= peso del agua.

Si la relación agua-cemento es (a/c) entonces:

$$a = \frac{a}{c} * c \quad (3)$$

Y

$$Vp = \frac{c}{3.15 \cdot 1000} + \frac{a}{c} * \frac{c}{1000} \quad (4)$$

Una vez que se determina el volumen de pasta de la Figura 2.6, se pueden determinar el peso del cemento y el peso del agua.

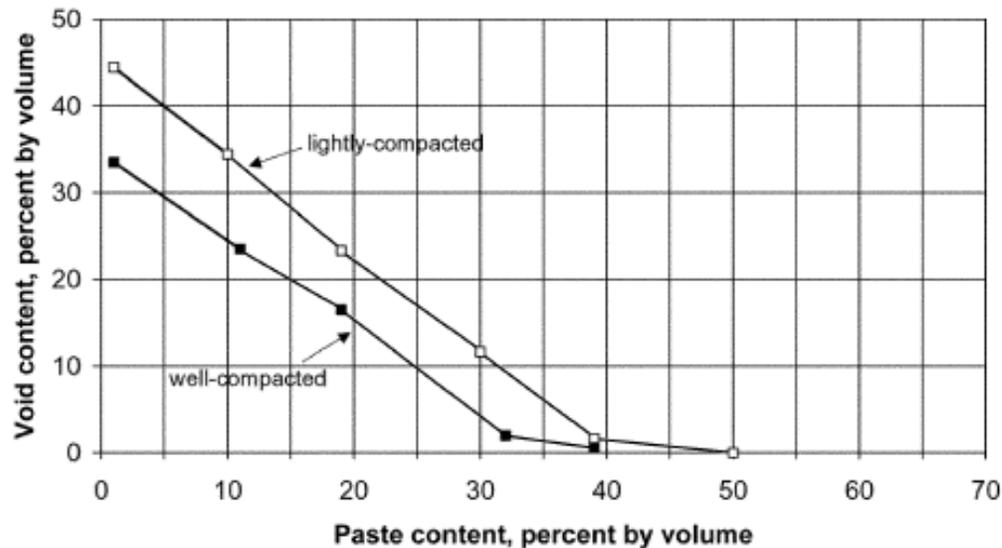


Figura 2.6: Relación entre el contenido de vacíos y el contenido de pasta para agregado No. 8 (3/8").

Fuente. (ACI 211 3R 02)

## 2.2.2 Propiedades del concreto permeable.

### 2.2.2.1 Peso volumétrico.

El peso volumétrico de las mezclas de concreto permeable es aproximadamente 70% del peso volumétrico de las mezclas de concreto convencional. Se determina de acuerdo a la norma ASTM C29. El peso volumétrico del concreto permeable oscila entre 1,600 a 2,000 kg/m<sup>3</sup>, dependiendo del porcentaje de vacíos.

### 2.2.2.2 Revenimiento.

El revenimiento (asentamiento) se usó con el fin de medir la consistencia del concreto, esto para una proporción dada de cemento y agregado, sin aditivos, cuanto mayor sea el revenimiento, más húmeda es la mezcla. Se determina de acuerdo a la norma ASTM C143. De acuerdo a Pérez (2009), la mezcla de concreto permeable en estado plástico es rígida comparada con el concreto convencional por lo que el revenimiento, cuando es medido, generalmente varía de 0 a 1 cm.

### 2.2.2.3 Porosidad.

Ghafoori y Dutta (1995) citados por Lian *et al.* (2011) afirmaron que la mayoría de los poros existentes en el concreto permeable están formados por los espacios que dejan los agregados gruesos y que se distingue entre la porosidad y el contenido de aire vacío. En su investigación denominan porosidad a la fracción de huecos medibles migrados por fluidos, y definen como contenido de aire a la suma de vacíos medibles entre agregados más el aire arrastrado o atrapado en la pasta de cemento.

Para medir el contenido de huecos se utiliza una expresión del porcentaje de aire obtenido mediante el método gravimétrico conforme a la norma ASTM C138, el cual se relaciona directamente con el peso volumétrico de una mezcla dada de concreto permeable. Vélez (2010) argumenta que el contenido de vacíos dependerá en gran medida de varios factores: granulometría del agregado, contenido de material cementante, relación agua/cemento y la energía de compactación.

La ley de Darcy expresa el movimiento del agua a través de un medio poroso mediante su expresión matemática:

$$Q = k * \frac{h_3 - h_4}{L} * A = KiA \quad (5)$$

Donde:

Q = gasto, descarga o caudal (m<sup>3</sup>/s)

L = longitud de la muestra (m)

k = coeficiente de permeabilidad de Darcy, variable en función del material de la muestra (m/s)

A = área de la sección transversal de la muestra (m<sup>2</sup>)

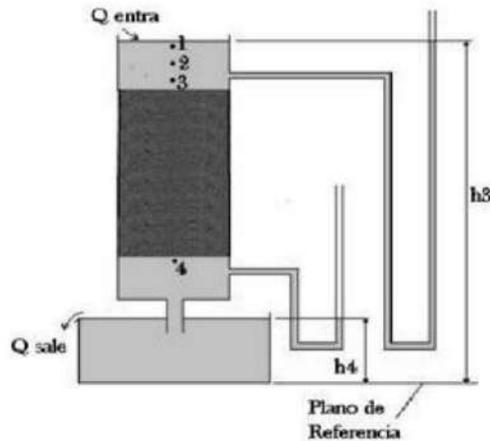
h<sub>3</sub> = altura sobre el plano de referencia que alcanza el agua en un tubo colocado a la entrada de la capa filtrante.

$h_4$  = altura, sobre el plano de referencia que alcanza el agua en un tubo colocado a la salida de la capa filtrante.

$i$  = gradiente hidráulico dado por:

$$i = \frac{h_3 - h_4}{L} \quad (6)$$

Las fórmulas se expresan en la Fig.2.7 en la que un caudal de agua entra al concreto poroso, se almacena por algún tiempo en la estructura del concreto y migra a través de los poros.



**Figura 2.7: Ley de Darcy. Esquema de un concreto poroso.**

*Fuente: Vélez (2010).*

No obstante, la porosidad no solo influye en la absorción del material, sino que también repercute en su resistencia como afirman Hincapié y Montoya (2005) por lo cual se han realizado investigaciones Kumar y Bhattachrjee (2003) para relacionar porosidad y resistencia en el concreto.

#### 2.2.2.4 Permeabilidad.

Una de las características más importantes del concreto permeable es su capacidad para filtrar el agua a través de la matriz. Un concreto, cuanto más poroso sea, será más permeable y tendrá una posibilidad de absorción capilar más importante Pérez (2009).

En Vélez (2010) se refiere a la permeabilidad del concreto como la cantidad de migración de agua u otras sustancias líquidas por los poros de este material en un determinado tiempo, como resultado de la composición de la porosidad en la pasta de concreto, la hidratación o la asociación con la liberación de calor y evaporación del agua de mezcla, la temperatura del concreto, y la formación de cavidades y grietas por contracción plástica en el concreto durante el tiempo de fraguado. La capacidad de filtración del concreto permeable normalmente se encuentra en el rango de 120 a 320 L /m<sup>2</sup>/min (0.2 a 0.54 cm/s). Para que se pueda asegurar el flujo del agua se recomienda al menos 15% de contenido de vacíos (Meininger, 1988),

La prueba de permeabilidad permitirá conocer el coeficiente de permeabilidad, el cual caracteriza al concreto poroso. Para su desarrollo se usa un permeámetro de carga variable recomendado en ACI 522 (2010).

En numerosas investigaciones (Sumanasooriya *et al.* 2011; Montes *et al.* 2006 y Neithalath *et al.* 2004) se ha comprobado que existe una relación entre la permeabilidad y la porosidad en este tipo de concreto y los estudios individuales han representado estos datos con una relación exponencial. Neithalath *et al.* (2010) reconoció que había más factores implicados en la predicción de la permeabilidad que solo la porosidad, por lo que en su estudio incorporaron el diámetro y la conectividad característica de los poros para tratar de mejorar el comportamiento de la permeabilidad de una mezcla de concreto permeable.

#### 2.2.2.5 Resistencia.

Pasando a la resistencia Aguado (1995) nos indica que el concreto poroso hidráulico ofrece resistencias medias a compresión entre 10 y 20 MPa y permeabilidades entre 0.5 y 5 cm/s. A un nivel experimental Yang y Jiang (2003) por ejemplo lograron resistencias de hasta 50 Mpa. incorporando el humo de sílice, superplastificante y polímeros orgánicos, con esto lograron obtener un concreto poroso apto para todo tipo de caminos urbanos de tráfico ligero, ya sea en capas superficiales o de base. A niveles más prácticos existen aditivos como por ejemplo el Ecoconcreto (2007) que se ha utilizado en México y nos permite alcanzar resistencias de 25 MPa. Para cualquier caso Beneira y Romeu (1996) indican que es necesaria la adición de polímeros o una mayor dotación de cemento para poder mantener un alto índice de huecos y se obtenga una adecuada resistencia a los esfuerzos tangenciales del tráfico.

Respecto a la pérdida de resistencia en los concretos porosos se han hecho estudios sobre cómo evitarla. En Sudamérica se han empleado técnicas para aumentar la resistencia de este tipo de pavimento en Lizcano y Torrez (2002) mencionan que se utilizan adiciones de tiras de plástico de desechos de bolsa de leche para buscar aumentar la resistencia de este tipo de pavimento drenante. El material con el cual se produce las bolsas de plástico es el polietileno (desechos de tiras de plástico), de baja densidad, o LDPE. Este tipo de polímero tiene buena resistencia a la tensión, aunque normalmente tienen mala resistencia a la compresión. Debido a esta combinación de resistencias y debilidades, es una buena idea usarlo con otro material, ya que sirven para reforzar y de esta manera compensar las debilidades de otros materiales, como las del concreto permeable. Huang *et al.* (2010) llevaron a cabo un experimento de laboratorio en donde el objetivo fue mejorar las propiedades de resistencia del concreto permeable a través de la incorporación de polímeros de látex.

#### 2.2.2.5.1 Resistencia a la compresión.

La resistencia a compresión se puede definir como la medida máxima de la resistencia a carga axial de especímenes de concreto de acuerdo con la norma ASTM C39 y ASTM C109.

En ACI 522 (2006) se menciona que la resistencia a compresión del concreto permeable depende de las propiedades de la pasta y de la relación entre la pasta y el agregado y que para mejorar la resistencia del concreto permeable, se deben mejorar tres aspectos: la resistencia de la pasta, la pasta alrededor del agregado y la cohesión entre el agregado y la pasta. Esto se puede lograr usando tamaños de agregados más pequeños y/o usando aditivos.

Las mezclas de concreto permeable pueden alcanzar resistencias a la compresión en el rango de 35 a 280 kg/cm<sup>2</sup> valor ya apropiado para ser utilizado en diversas aplicaciones.

#### 2.2.2.5.2 Resistencia a la flexión.

La resistencia a la flexión se considera una de las características técnicas más importantes del concreto permeable, debido a que esta es mejor que la del concreto hidráulico ordinario, comúnmente es 30% de la resistencia a la compresión, es decir, relativamente más alta que en el concreto ordinario (FCPA, 1990).

La resistencia a flexión o el módulo de ruptura se usa en el diseño de pavimentos u otras losas (pisos, placas) sobre el terreno, se determina de acuerdo con la norma ASTM C78. Existen varios factores que influyen en la resistencia a la flexión, principalmente el grado de compactación, porosidad, y la proporción agregado-cemento ACI 522 (2006). La resistencia a la flexión en concretos permeables generalmente se encuentra en el rango de 10.5 kg/cm<sup>2</sup> y 40.0 kg/cm<sup>2</sup>.

#### 2.2.2.6 Durabilidad.

La durabilidad del concreto se define como la capacidad de este para resistir a la acción del medio ambiente, al ataque químico y a la abrasión, manteniendo sus propiedades mecánicas. Los efectos físicos que influyen adversamente en la

durabilidad del concreto permeable incluyen exposición a temperaturas extremas y a químicos tales como sulfatos y ácidos. (ACI 522, 2006).

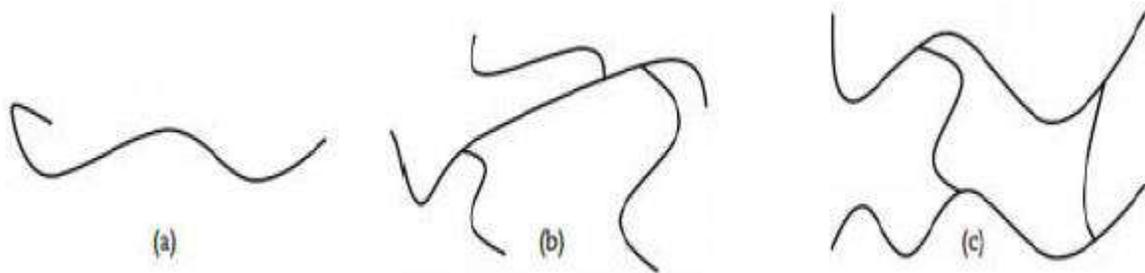
De acuerdo a Kosmatka *et al.* (2004), los diferentes tipos de concreto necesitan de diferentes durabilidades, dependiendo de la exposición del ambiente y de las propiedades deseables. Los componentes del concreto, la proporción de éstos, la interacción entre los mismos y los métodos de colocación y curado determinan la durabilidad final y la vida útil del concreto.

## 2.3 Polímeros

Los polímeros sintéticos son utilizados en una variedad de aplicaciones que actualmente cubren casi todas las áreas que el humano desempeña, de acuerdo con Podzimek (2017) estos pueden reemplazar los materiales convencionales pero con las propiedades superiores a los materiales clásicos en la mayoría de los casos. La baja densidad, la posibilidad de ajustar las propiedades a las aplicaciones requeridas, la resistencia a la humedad y los productos químicos, y la fácil trabajabilidad son las principales ventajas de los polímeros sintéticos.

### 2.3.1 Estructura.

Los polímeros son macromoléculas formadas por la unión de muchas unidades pequeñas, denominadas monómeros. Una sola molécula de polímero puede constar de cientos a un millón de monómeros, por lo que, Coreño y Méndez (2010) caracterizan la estructura de acuerdo al ordenamiento molecular: lineal, ramificado o entrecruzado como se muestra en Figura 2.8.



**Figura 2.8. Clasificación de los polímeros.**  
*Fuente: Coreño y Méndez (2010)*

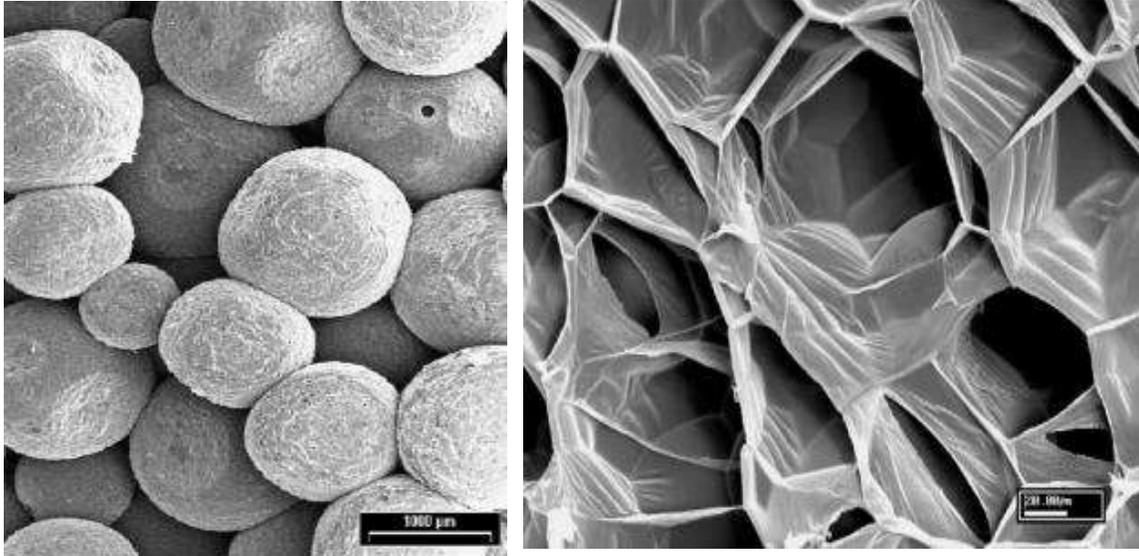
Existen enlaces covalentes para mantener unidos los átomos en las moléculas de polímero y los enlaces secundarios mantienen juntos grupos de cadenas de polímeros para formar el material polimérico, Pethrick (2013).

### 2.3.2 Poliestireno.

El poliestireno expandido es definido por Mohajerani *et al.* (2017) como un material polimérico de estructura celular cerrada, su fabricación implica el calentamiento de perlas expandibles de poliestireno con vapor y la colocación de estas perlas de poliestireno expandido calentadas en moldes para crear bloques prismáticos de poliestireno.

La composición del poliestireno expandido Cenavaro (2004) la especifica como un material plástico compuesto por 98% de aire y 2% de materia prima (poliestireno). Este material ha sido ampliamente aplicado de muchas maneras, como para la industria del embalaje, bienes de consumo, materiales de construcción, más allá de los procesos de fundición a presión de los bloques de motores de la industria del automóvil. Por otro lado, Schmidt *et al.* (2011) estiman que la producción mundial de poliestireno es de aproximadamente tres millones de toneladas anuales, de las cuales, la industria de envasado y bienes de consumo son responsables del 54% de la producción total, seguidas del negocio de la construcción con el 46%.

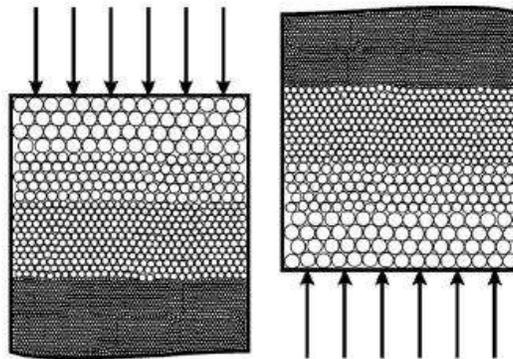
La estructura de las espumas de poliestireno de acuerdo con Rossacci y Shivkumar (2003), puede ser visualizado en dos niveles. El nivel macroscópico, donde la estructura estándar generalmente con un diámetro del orden de 2-4 mm y el nivel microscópico para la estructura celular presentada en cada esfera (Figura 2.9).



**Figura 2.9. Poliestireno expandido nivel macroscópico y microscópico.**

*Fuente: Rossacci y Shivkumar (2003)*

Secerov et al. (2009) consideran que las partículas de poliestireno expandido están disponibles en un amplio rango de densidad, desde 15 hasta 900 kg/m<sup>3</sup>, y diámetro de partícula de 0.30 a 7.00mm. Dándole la posibilidad de formar camas con características muy diferentes, ya sea con disminución o aumento de tamaño de las partículas.



**Figura 2.10. Clasificación de partículas de poliestireno expandido.**

*Fuente: Secerov et al. (2009)*

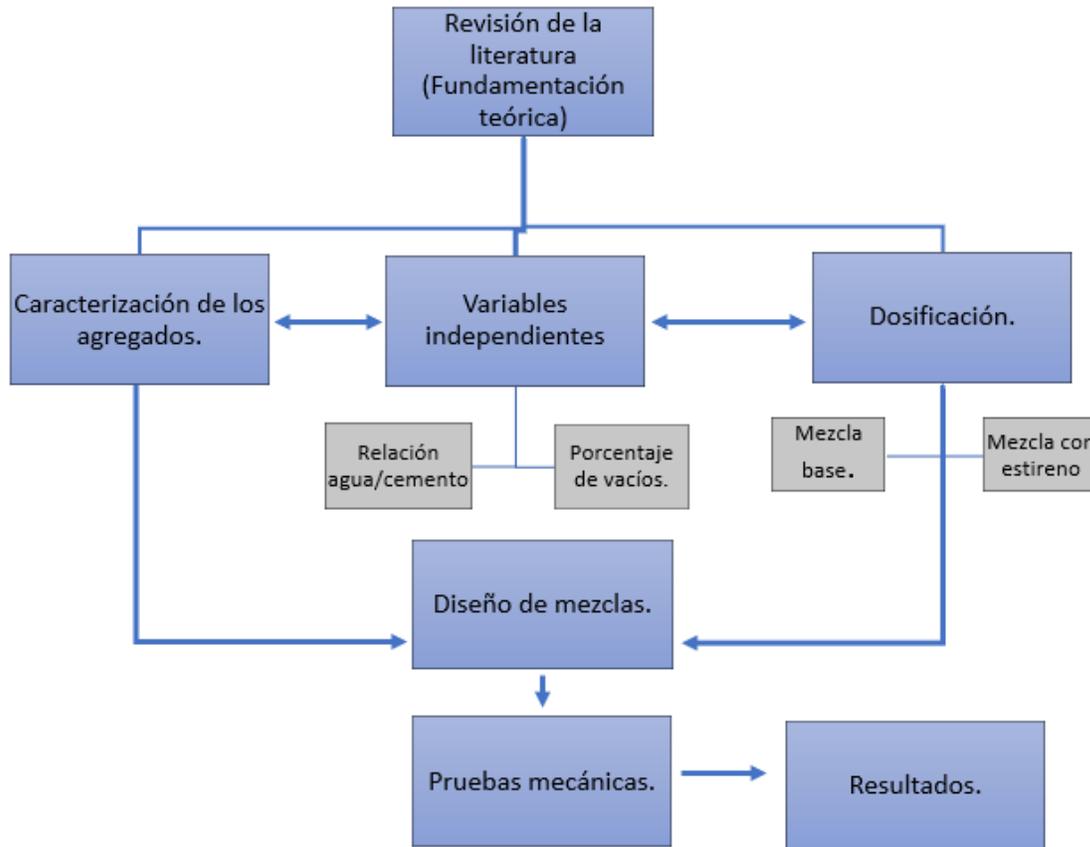
La ciencia de alterar el comportamiento mecánico de los materiales de concreto a través de polímeros obtuvo consenso en la ingeniería civil (principalmente estructuras) desde hace décadas (Kardon 1997).

De acuerdo con Giustozzi (2016), en el concreto permeable los polímeros cubren una amplia variedad de aplicaciones debido a sus múltiples peculiaridades y tienen la posibilidad de proporcionar resistencia y durabilidad sin descuidar la capacidad de infiltración.

Cadere *et al.* (2018) mencionan que los estudios relacionados con el concreto abordan diferentes tipos de materiales de construcción con gránulos de poliestireno, como el mortero, el concreto, el pavimento, etc. Los efectos del granulado de poliestireno en el concreto dependen de su tipo (concreto a base de cemento o concreto a base de polímero), dosis y tipo de poliestireno, etc.

### 3. METODOLOGÍA

Las propiedades mecánicas e hidráulicas del concreto permeable serán determinadas de acuerdo a las características de la pasta. En la Figura 3.1 se muestra un esquema en el que se indican los pasos que se seguirán para el desarrollo de la investigación (elaboración de la mezcla y ensayos que se la harán al concreto permeable).



**Figura 3.1: Mapa conceptual de la metodología empleada.**

*Fuente: Elaboración propia*

Una vez definidas las normativas y conociendo las teorías y metodologías aplicables al proyecto se definirán los materiales que se emplearán en la elaboración de la mezcla para el concreto permeable.

### 3.1 Material y caracterización del agregado.

El material para la realización de este proyecto fue obtenido del banco de materiales la cañada, ubicado en el estado de Querétaro, en la carretera Querétaro-Tequisquiapan en el km 08+400, el cual es un producto triturado de basalto y es usado como material de base, sello, concreto hidráulico y concreto asfáltico de acuerdo al Inventario de banco de materiales SCT (2016).



**Figura 3.2. Localización del banco de materiales la cañada.**

*Fuente: Elaboración propia.*

#### 3.1.1 Agregados.

Se usará un basalto como agregado grueso el cual cumple con la norma ASTM C33.

Los tamaños de agregado que se usarán serán:

- 3/4"
- 1/2"
- 3/8"

En caso de ser necesario se usaran agregados finos. En la Figura 3.3 observamos el material proveniente del banco, mientras que en la Figura 3.4 se observa el muestreo realizado dentro de dicho banco de materiales.



**Figura 3.3. Material producto de basalto banco la cañada.**

*Fuente: Elaboración propia*



**Figura 3.4 Muestreo banco de materiales.**

*Fuente: Elaboración propia*

### 3.1.2 Cementantes y Agua.

La calidad del agua para el concreto permeable está gobernada por los mismos requisitos que para el concreto convencional, en el ACI 301. El agua que es potable es adecuada para usarla en el concreto.

Para este tipo de concreto el cemento Portland que satisface las normas ASTM C150, C595 ó C1157 se usa como el aglomerante principal.

Se usará cemento Portland compuesto (CPC,NMX,NOM o ASTM ) de alta resistencia inicial con densidad  $3.5 \text{ gr/cm}^3$ .

### 3.1.3 Aditivos.

Los aditivos deben satisfacer los requisitos de la norma ASTM C494 estas nos dan a conocer la especificación normalizada de aditivos químicos para concreto. En la Tabla 2.3 se muestran los tipos de aditivos y su uso de acuerdo con la ACI 522 (2006).

Para nuestro concreto se utilizará aditivos marca Sika y un polímero los cuales se muestran en la Figura 3.5.

- Sika ViscoBond.
- Polímero experimental a base de poliestireno reciclado (estireno).



**Figura 3.5. Aditivo Sika ViscoBond y poliestireno.**

*Fuente: Elaboración propia*

### **3.2 Variables independientes.**

En la experimentación serán consideradas dos variables independientes que son el porcentaje de vacíos y la relación agua/cemento de la mezcla. De acuerdo a la literatura las mezclas permeables deben tener de 15% a 25% de vacíos, mientras que la variable a/c va de 0.35 a 0.40, una cantidad excesiva de agua conduciría al atascamiento del sistema de poros.

Relación agua/cemento: 0.38

Porcentaje de vacíos: 20%

### **3.3 Dosificación.**

A continuación se presenta el proceso de dosificación que se realizara para la investigación esta cuenta con 3 fases (concreto base, concreto modificado con polímero a base de estireno y concreto modificado con aditivo comercial).

#### **3.3.1 Fase 1.**

Se diseñaran tres mezclas de referencia para la elección del concreto base.

- Concreto permeable 3/4" con 20% de vacíos.
- Concreto permeable 3/8" con 20% de vacíos.
- Concreto permeable 3/8" y 1/2" con 20% de vacíos.

Las tres mezclas de referencia servirán para determinar el tamaño de agregado optimo que se usara para las mezclas con poliestireno, será seleccionada aquella que tenga un balance entre permeabilidad y resistencia.

#### **3.3.2 Fase 2.**

En esta etapa a la mezcla elegida se incorporara el polímero a base de estireno, realizando tres mezclas que son descritas a continuación:

- Concreto permeable base y 5% de estireno.
- Concreto permeable base y 10% de estireno.
- Concreto permeable base y 15% de estireno.

### 3.3.3 Fase 3.

Finalmente se realizara una mezcla con un aditivo comercial el cual es un aditivo y mejorador de adherencia de nueva generación para concreto y mortero, esta mezcla se realiza con la finalidad de comparación con la mezcla con poliestireno.

- Concreto permeable base y Sika ViscoBond.
- 

### 3.4 Diseño de Mezclas.

Existen una gran cantidad de métodos empíricos de diseño de mezclas para obtener concretos con características específicas, sin embargo, no existe una norma como tal que mencione el procedimiento para la realización de mezclas para concreto permeable, para nuestro caso se usara el propuesto por el ACI 211 de acuerdo con *Tenis et al. (2004)*, este método provee un procedimiento apto para producir el proporcionamiento de la mezcla de concreto permeable, este procedimiento se describió en el capítulo 2.2.

Partiendo del diseño base en el cual se usaran los rangos típicos de proporcionamiento mencionados en la Tabla 2.2, se realizarán 3 mezclas las cuales se elaborarán con parámetros de diseño que irán variando en la cuestión del porcentaje de polímero, relación agua-cemento y agregados hasta obtener una mezcla que proporcione una resistencia y permeabilidad equilibrada. Los cálculos del diseño de mezclas para el concreto base se muestran a continuación.

### 3.4.1 Concreto permeable con agregado 3/8"

En la Tabla 3.1 de a continuación se muestran los datos necesarios para realizar el diseño de la mezcla para el concreto permeable con agregado de 3/8", el volumen de la pasta se obtuvo de la Figura 2.6 en donde se tomó un valor de 0.21.

**Tabla 3.1. Datos empleados para el diseño de mezcla concreto 3/8"**

<b>Características de la mezcla</b>	
Relación a/c	0.38
Porcentaje de vacíos	20%
Porcentaje de la pasta	21%
<b>Características del agregado</b>	
Peso específico	2.668
Absorción (%)	0.752
PVSS (Kg/m <sup>3</sup> )	1470.52
PVSC (Kg/m <sup>3</sup> )	1512.38
Peso específico cemento	3.15

*Fuente: Elaboración propia*

Se procede a calcular la masa del agregado usando un valor de b/b0 de 0.99 el cual se obtiene de la Tabla 2.4.

$$Wg = 1512.38 \times 0.99 = 1497.25 \text{ kg}$$

Después se multiplica por el porcentaje de absorción para sacar el peso del material superficialmente saturado.

$$Wssd = 1497.25 \times 1.00752 = 1508.51 \text{ kg}$$

Para calcular el volumen del agregado se procede de la manera siguiente:

$$Vg = \frac{1508.21}{2.668 \times 1000} = 0.565 \text{ m}^3$$

Para el volumen de la pasta utilizamos la ecuación 4 que se vio en el capítulo 2 quedando de la siguiente manera:

$$V_p = \frac{21}{100} = 0.210 \text{ m}^3$$

$$0.210 = \frac{c}{3150} + 0.38 \times \frac{c}{1000}$$

$$C = 302.15 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Agua} = 302.15 \times (0.38) = 114.82 \text{ kg/m}^3$$

Por último se procede a calcular el volumen de agua y cemento:

$$V_c = \frac{302.15}{3150} = 0.095 \text{ m}^3$$

$$V_a = \frac{114.82}{1000} = 0.114 \text{ m}^3$$

En la Tabla 3.2 y la Tabla 3.3 se muestra un resumen de las cantidades y volúmenes de material que será utilizado para realizar el concreto.

**Tabla 3.2. Cantidades de materiales para el diseño de la mezcla de 3/8"**

Concepto	Unidad	Cantidad
<b>Grava</b>	Wa (kg)	1497.25
	Wssd (Kg)	1508.51
<b>Cemento</b>	(Kg/m <sup>3</sup> )	302.15
<b>Agua</b>	(kg/m <sup>3</sup> )	114.82

*Fuente: Elaboración propia.*

**Tabla 3.3. Volúmenes por m<sup>3</sup> concreto 3/8"**

<b>Concepto</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>
<b>Volumen del agregado</b>	0.565
<b>Volumen del cemento</b>	0.095
<b>Volumen del agua</b>	0.114
<b>Total</b>	0.776

*Fuente: Elaboración propia*

Para corroborar que el porcentaje de vacíos sea el correcto se realiza una última verificación:

$$\text{Volumen de vacíos} = 1.00 - 0.78 = 0.22 \text{ m}^3$$

Tenemos una cantidad de vacíos de 0,22 tomando en cuenta que el parámetro de diseño fue del 0.20, se considera el diseño correcto.

#### 3.4.2 Concreto permeable con agregado 3/4"

Para el concreto con agregado de 3/4" el procedimiento es el mismo por lo que no se muestra el desarrollo de este, en la Tabla 3.4 se observan los datos para el diseño de la mezcla, por su parte la Tabla 3.5 y Tabla 3.6 se muestran las cantidades y volúmenes que se obtuvieron de los cálculos y que son requeridos para la elaboración de este concreto.

**Tabla 3.4 Datos empleados para el diseño de mezcla concreto 3/4"**

<b>Características de la mezcla</b>	
Relación a/c	0.38
Porcentaje de vacíos	20%
Porcentaje de la pasta	21%
<b>Características del agregado</b>	
Peso específico	2.668
Absorción (%)	0.752
PVSS (Kg/m <sup>3</sup> )	1502.58
PVSC (Kg/m <sup>3</sup> )	1545.15
Peso específico cemento	3.15

*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 3.5. Cantidades de materiales para el diseño de la mezcla de 3/4"**

<b>Concepto</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
<b>Grava</b>	Wa (Kg)	1529.70
	Wssd (Kg)	1541.20
<b>Cemento</b>	(Kg/m <sup>3</sup> )	302.15
<b>Agua</b>	(Kg/m <sup>3</sup> )	114.82

*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 3.6. Volúmenes por m<sup>3</sup> concreto 3/4"**

<b>Concepto</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>
<b>Volumen del agregado</b>	0.577
<b>Volumen del cemento</b>	0.095
<b>Volumen del agua</b>	0.114
<b>Total</b>	0.788

*Fuente: Elaboración propia*

Realizando la comprobación del volumen de vacíos podemos corroborar que el diseño de concreto se considera correcto.

$$1.00 - 0.79 = 0.21 \text{ m}^3$$

### 3.4.3 Concreto permeable con agregado 3/8" y 1/2"

Para el concreto con la combinación de agregados 3/4" y 3/8" en la Tabla 3.7 se observan los datos para el diseño de la mezcla, por su parte la Tabla 3.8 y Tabla 3.9 se muestran las cantidades y volúmenes que se obtuvieron de los cálculos y que son requeridos para la elaboración de este concreto.

**Tabla 3.7. Datos empleados para el diseño de mezcla concreto 3/8" y 1/2"**

<b>Características de la mezcla</b>	
Relación a/c	0.38
Porcentaje de vacíos	20%
Porcentaje de la pasta	
<b>Características del agregado</b>	
Peso específico	2.668
Absorción (%)	0.752
PVSS (Kg/m <sup>3</sup> )	1489.14
PVSC (Kg/m <sup>3</sup> )	1531.54
Peso específico cemento	3.15

*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 3.8. Cantidades de materiales para el diseño de la mezcla de 3/8" y 1/2"**

<b>Concepto</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
<b>Grava</b>	Wa	1516.22
	Wssd	1527.62
<b>Cemento</b>	Wc	302.15
<b>Agua</b>	Wa	114.82

*Fuente: Elaboración propia.*

**Tabla 3.9. Volúmenes por m3 concreto 3/4"**

<b>Concepto</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>
<b>Volumen del agregado</b>	0.572
<b>Volumen del cemento</b>	0.095
<b>Volumen de agua</b>	0.114
<b>Total</b>	0.783

*Fuente: Elaboración propia*

Realizando la comprobación del volumen de vacíos podemos corroborar que el diseño de concreto se considera correcto.

$$1.00 - 0.78 = 0.22 \text{ m}^3$$

### **3.5 Elaboración de probetas.**

A continuación se describe el procedimiento de elaboración de las probetas que se usaran para los ensayos de compresión y flexión del concreto.

#### **3.5.1 Cilindros.**

Se elaborarán probetas cilíndricas de concreto compactado, mediante varillado de acuerdo con la norma ASTM C31. Para esto los moldes deben ser de acero, hierro forjado u otro material no absorbente y que no reaccione con el cemento.

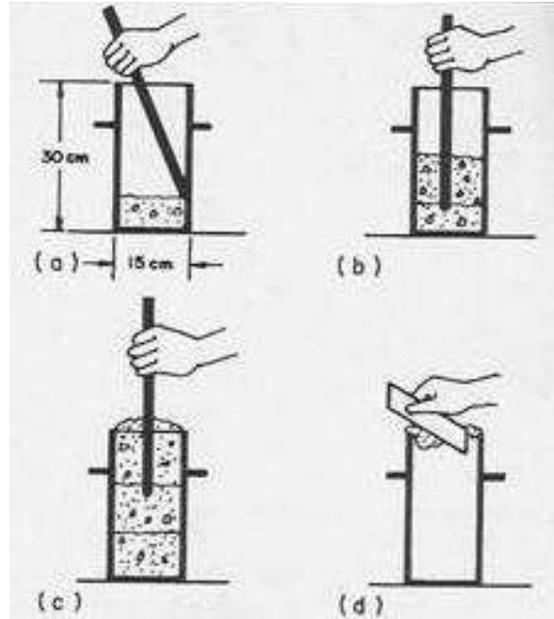
Antes de usarse los moldes deben ser cubiertos ligeramente con aceite mineral o un agente separador de encofrado no reactivo. Varilla la cual debe ser de hierro liso diámetro 5/8", de 60 cm de largo y con uno de sus extremos boleados, así mismo debe usarse un mazo de goma que pese entre 0.60 y 0.80 Kg.

Los especímenes deben ser cilindros de concreto vaciado y fraguado en posición vertical, de altura igual a dos veces el diámetro, siendo el espécimen estándar de 6x12 pulgadas, o de 4x8 pulgadas para agregado de tamaño máximo que no excede las 2". Para nuestro caso se usaran cilindro de 10x20 cm.

Se diseñarán 7 mezclas de las cuales se obtendrán 12 cilindros de cada una, estos cilindros se evaluarán a los 7,14,21 y 28 días. Para la elaboración de las probetas se sigue la siguiente serie de pasos:

- Colocar los moldes sobre una superficie nivelada y libre de cualquier tipo de vibración.
- Se procede a llenar el molde con el concreto, este se deposita cuidadosamente alrededor del borde esto asegura una correcta distribución.
- Los moldes se llenan en 3 capas de igual volumen. Cada capa debe ser compactada con 25 penetraciones de la varilla, esto en forma de espiral distribuyéndose alrededor del cilindro y terminando en el centro. La primera capa se compacta en todo su espesor; la segunda y tercera debe ser penetrando no más de 1" en la capa anterior. Terminando de compactar cada

capa se debe golpear a los lados del molde con un mazo de goma, esto con la finalidad de liberar las burbujas de aire que el concreto pueda contener.



**Figura 3.6: Elaboración de probetas**  
*Fuente: ASTM.*

- Se enrasa el exceso de concreto con la misma varilla.
- Se identifican los especímenes etiquetándolos con la información correcta y se protege adecuadamente la cara descubierta de los moldes con tela húmeda o plásticos.
- Una vez hecho esto se llevan al lugar de almacenamiento donde deberán permanecer sin ser perturbados durante el periodo de curado inicial.

En la Figura 3.6 se observa una muestra de los cilindros realizados bajo este procedimiento antes de ser desmoldados mientras que en la Figura 3.7 se observa una muestra de los cilindros ya desmoldados y listos para curar.



**Figura 3.7. Cilindros y Vigas antes de ser desmoldados.**

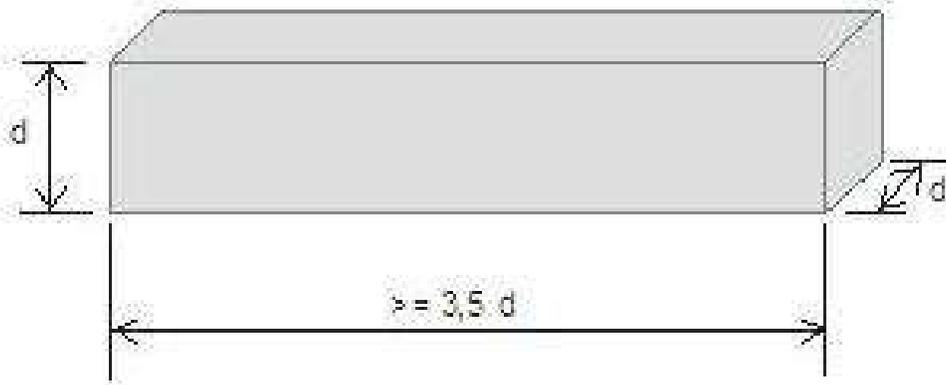
*Fuente: Elaboración propia*



**Figura 3.8. Muestra de cilindros desmoldados y listos para curar.**  
*Fuente: Elaboración propia*

### **3.5.2 Vigas.**

La resistencia de diseño a la tensión por flexión ( $S'c$ ) o conocido como Módulo de rotura (MR) a los 28 días, se verifica en especímenes moldeados durante el colado del concreto, correspondientes a vigas estándar 6"X6" y mínimo 21" (15 cm x 15 cm x 53 cm), compactando el concreto por vibro compresión y una vez curados adecuadamente, se ensayan a los 7 y 28 días aplicando las cargas en los tercios del claro, fabricados conforme a ASTM C 42-03 y probados conforme a ASTM C 78-02 (Flores Prieto, 2010), para esta investigación se ensayaron 3 vigas por mezcla a los 28 días. La Figura 3.9 muestra un esquema de las dimensiones de la viga de acuerdo a la ASTM, por su parte en la Figura 3.10 se observa una muestra de las vigas desmoldadas y listas para el proceso de curación.



**Figura 3.9. Dimensiones de la viga.**  
*Fuente: ASTM C42*



**Figura 3.10. Vigas desmoldadas listas para curar.**  
*Fuente: Elaboración propia*

### 3.6 Pruebas y ensayos de laboratorio.

En la Tabla 3.10 presentada a continuación se muestra un resumen de las pruebas que serán aplicadas a nuestro concreto.

Tabla 3.10. Pruebas de laboratorio aplicadas al concreto permeable .

Prueba	Norma
Granulometría	ASTM C136
Peso volumétrico	ASTM C29
Absorción y peso específico.	ASTM C127
Compresión	ASTM C39
Flexión	ASTM C78
Permeabilidad.	ACI 522
Coeficiente de permeabilidad (infiltración).	ASTM C1701

*Fuente: Elaboración propia.*

#### 3.6.1 Granulometría.

La distribución granulométrica de un suelo se define como la división del mismo en diversas porciones, de acuerdo al tamaño de los agregados o partículas que lo conforman. Este ensayo se ejecutó conforme lo indicado en la Norma ASTM C136 – 06 “Análisis granulométrico de agregados finos y gruesos”, la cual establece que la cantidad mínima de material seco para esta prueba es de 15 kg. El equipo para la realización del ensayo consiste de báscula (precisión 0.5g) y tamices cuyas designaciones son 1 ½”, 1”, ¾”, ½”, ⅜”, ¼”, No. 4 (para gravas); No. 10, No. 20, No. 40, No. 60, No. 100 y No. 200 (para arenas) (ASTM International, 2006c).

### 3.6.2 Absorción y peso específico.

La realización de las pruebas de densidad y absorción permiten obtener las relaciones masa-volumen de los materiales con respecto a la relación masa-volumen del agua. La densidad relativa (gravedad específica) se emplea para calcular el volumen que ocupa el agregado en las mezclas de material donde se empleará. Los valores de absorción son utilizados para calcular el aumento en masa del agregado debido a la cantidad de agua que éste absorbe dentro de sus poros. Las pruebas de densidad y absorción son diferentes para cada tipo de material. Para agregado grueso se realizó el ensaye conforme a lo escrito en la Norma ASTM C127 “Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica) y Absorción del Agregado Grueso” con una cantidad mínima de 5 kg de material, cuyo equipo consiste de una balanza, contenedor de muestra (canastilla), un depósito con agua y horno (ASTM International, 2012).

### 3.6.3. Peso volumétrico.

El peso volumétrico (también llamado peso unitario o densidad en masa) de un agregado, es el peso del agregado que se requiere para llenar un recipiente con un volumen unitario especificado. El volumen al que se hace referencia, es ocupado por los agregados y los vacíos entre las partículas de agregado. El peso volumétrico aproximado de un agregado usado en un concreto de peso normal, varía desde aproximadamente 1,200 kg/m<sup>3</sup> a 1,760 kg/m<sup>3</sup>.

Se calcula el peso volumétrico del material seco y compactado, con la siguiente fórmula:

$$P.V.S.S. = \frac{Wm}{Vr} \quad (7)$$

Donde:

$W_m$  = Peso del material = kgs.

$W_m$  = (Peso del recip. + mat.) – (Peso del recip.)

$V_r$  = Volumen del recipiente = m<sup>3</sup>

La Figura 3.11 muestra parte del procedimiento de obtención del peso volumétrico del agregado grueso.



**Figura 3.11. Obtención del peso volumétrico agregado grueso.**  
*Fuente: Elaboración propia.*

#### 3.6.4 Compresión.

Este ensayo permite la determinación de la resistencia a la compresión ( $f_c$ ) de los especímenes cilíndricos de concreto moldeados en laboratorio o en campo u obtenidos por medio de la extracción de núcleos. Se limita a concretos con peso unitario mayor que 800 kg/m<sup>3</sup>.

Consiste en la aplicación de una carga de compresión uniaxial a los cilindros moldeados o núcleos a una velocidad de carga especificada ( $0.25 \pm 0.05$  MPa/s). La resistencia a la compresión del espécimen se calcula dividiendo la carga

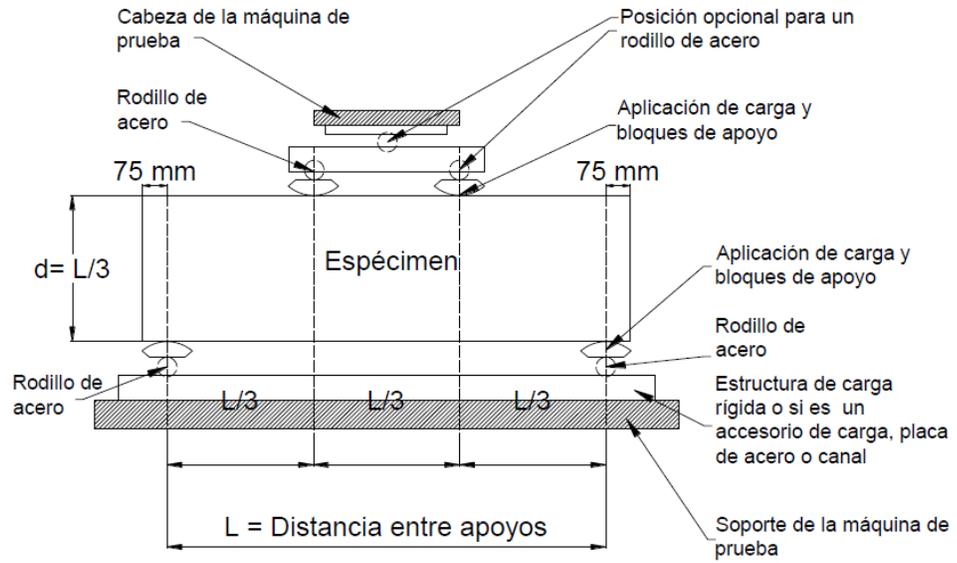
máxima obtenida durante el ensayo entre el área de la sección transversal del espécimen.



**Figura 3.12. Ensayo a compresión simple.**  
*Fuente: Elaboración propia.*

### 3.6.5 Flexión.

Para efecto de las vigas, se llevaron a cabo las pruebas de flexión a dos especímenes por mezcla a los 28 días según como se indica en la norma ASTM C78 (ver Figura 3.13). Dichas vigas se marcan como se indica en la Figura 3.14, dividiéndolas en tres partes según las medidas proporcionadas por la norma; ya que con las líneas de guía que dividen estos tercios se analiza la falla y se calcula el módulo de ruptura diferente para cada caso.



**Figura 3.13. Elementos del ensayo a flexión.**  
Fuente: ASTM



**Figura 3.14 Ensayo a flexión.**  
Fuente: Elaboración propia.

Según la norma, si la falla se encuentra dentro del tercio medio, el módulo se calcula según la Ecuación ; por otro lado, si la falla se sale del tercio medio, pero no más de un 5 % del largo de este, el módulo se calcula según la Ecuación X.

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (8)$$

Donde:

R = Módulo de ruptura, Mpa (psi)

P = Carga máxima aplicada indicada por la máquina de prueba, N (lbf)

L = Longitud entre los puntos de apoyo inferiores, mm (in)

b = ancho promedio del espécimen, mm (in)

d = altura promedio del espécimen, mm (in)

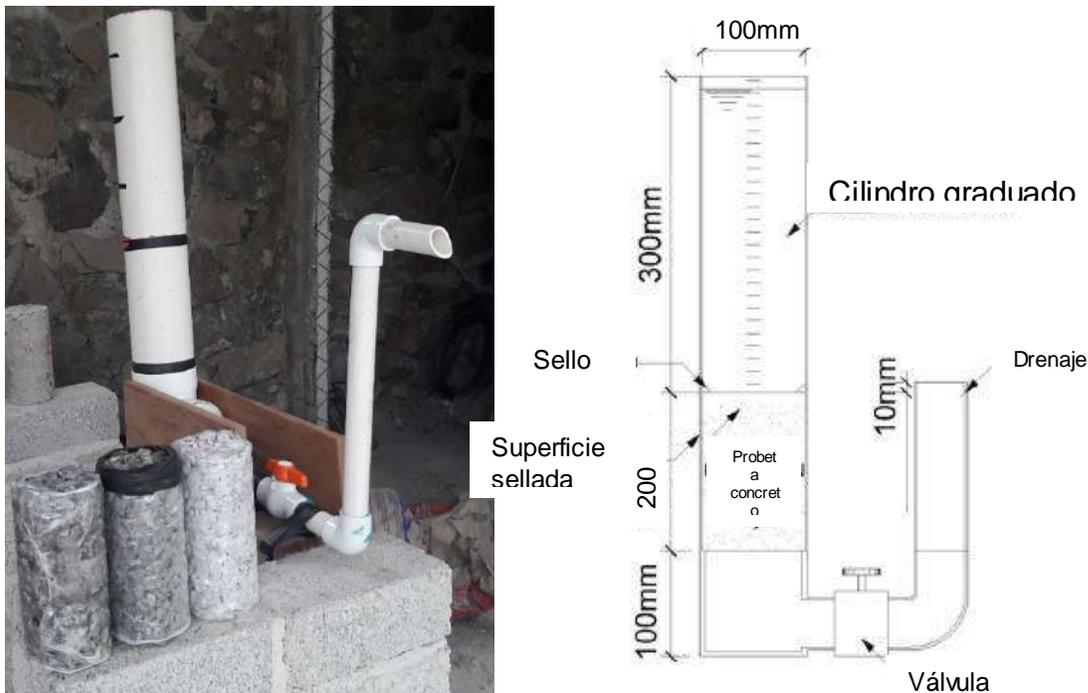
$$R = \frac{3pa}{bd^2} \quad (9)$$

a = distancia promedio entre la línea de fractura y el apoyo más cercano en la superficie de la viga, en mm.

### 3.6.6 Permeabilidad.

Para llevar a cabo las pruebas de permeabilidad antes de iniciar los cilindros fueron envueltos en plástico para que encajaran de mejor manera en el permeámetro, además de evitar que durante la prueba el agua se moviera entre el tubo y el espécimen.

El permeámetro se construyó tomando como base la recomendación dada en el ACI 522R-10, donde se habla de un permeámetro de carga variable utilizado en una investigación realizada por Neithalath *et al.* (2006). El permeámetro construido para esta investigación consta de un tubo de 300 mm de largo con diámetro de 101,6 mm donde se ubica el espécimen que será sometido a prueba; una válvula conectada bajo el espacio del espécimen lleva a una tubería vertical a través de la cual el agua puede drenarse fuera. La parte superior de este tubo está colocado 10 mm por encima de la parte superior de la muestra de modo que no se produce flujo no saturado durante la prueba.



**Figura 3.15. Permeámetro utilizado para el ensayo de permeabilidad.**  
*Fuente: Elaboración propia.*

Para el cálculo de la permeabilidad de los especímenes se utilizó la siguiente ecuación:

$$K = \frac{L}{(t_1 - t_2)} * \frac{a}{A} * \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (10)$$

Donde:

k = coeficiente de permeabilidad, cm/s

L = altura del espécimen, cm

a = área del tubo cilíndrico graduado, cm<sup>2</sup>

A = área de la muestra, cm<sup>2</sup>

t<sub>1</sub> = tiempo inicial, s

t<sub>2</sub> = tiempo final, s

h<sub>1</sub> = altura de la columna de agua en el tubo graduado al inicio de la prueba, cm

h<sub>2</sub> = altura de la columna de agua en el tubo graduado al final de la prueba, cm

### 3.6.7 Infiltración.

La prueba de infiltración se realiza en la loseta como homóloga de la de permeabilidad en el laboratorio. Para llevar a cabo esta prueba se utilizara la norma ASTM C1701; donde se indica que para áreas de hasta 2 500 m<sup>2</sup> se debe realizar la prueba en tres lugares distintos. Se debe utilizar un aro como el que se ve en la Figura X con marcas a los 10 mm y 15 mm donde se mantendrá el nivel de agua durante la prueba. Finalmente, obtenidos los datos, se procede a realizar el cálculo de la infiltración con la Ecuación 6

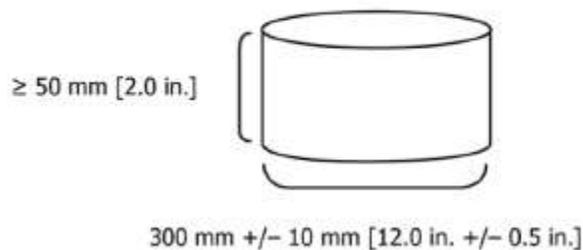


Figura 3.16 Esquema aro utilizado para el ensayo de filtración.

Fuente: ASTM

$$I = \frac{K * M}{D^2 * t} \quad (11)$$

Dónde:

I: tasa de infiltración (mm/hr).

K: Constante de cálculo (4,583,666,00 SI o 126,879 in).

D: Diámetro interno de anillo (mm).

T: el tiempo de (seg).

## 4. RESULTADOS.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del proyecto de investigación, esto siguiendo los pasos de la metodología descrita en el capítulo 3.

### 4.1 Caracterización del agregado.

A continuación se describen los resultados obtenidos de los ensayos que fueron realizados al agregado.

#### 4.2.1. Granulometría.

La granulometría es la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado y se determina por medio de tamices de malla de alambre. Esta se determinó de acuerdo con la norma ASTM C136.

Si bien para la elaboración del concreto permeable no se necesitan mas de 3 tamaños de agregado se optó por realizar el análisis granulométrico de todo el material

En las Tablas 4.1 y 4.2 siguientes se presenta la granulometría que se obtuvo del material producto de base obtenido del banco de materiales La cañada, así como la respectiva curva granulométrica.

Tabla 4.1. Granulometría de gravas, banco la cañada.

Malla	Abertura(mm)	Abertura norma (mm)	Retenido seco(g)	Ret. (%)	Ret. acum (%)	Pasa(%)
2"	50.7	50	0	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	39.94	37.5	225.42	2.52	2.52	97.48
1"	25.32	25	1946.97	21.81	24.33	75.67
3/4"	19.32	19	1246.88	13.97	38.30	61.70
1/2"	12.54	12.5	1773.89	19.87	58.16	41.84
3/8"	10	9.5	729.41	8.17	66.33	33.67
1/4"	6.42	6.3	1157.55	12.96	79.30	20.70
#4	4.68	4.75	539.91	6.05	85.34	14.66
<b>Pasa Malla No.4</b>			1308.55	14.66	100.00	
<b>Total</b>			<b>8928.58</b>			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.2. Granulometría de arenas banco la cañada.

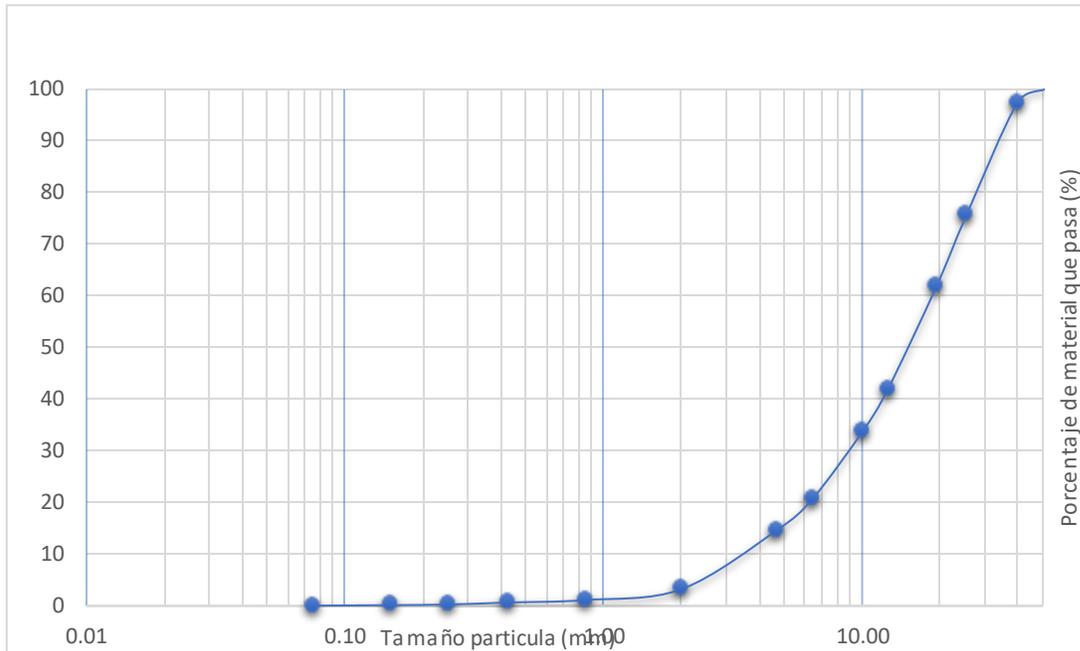
Malla	Abertura norma (mm)	Retenido seco(g)	Ret (%)	Ret acum (%)	Pasa(%)
#10	2	213.56	11.42	11.42	3.23
#20	0.8	39.3	2.10	13.53	1.13
#40	0.42	8.87	0.47	14.00	0.66
#60	0.25	7.22	0.39	14.39	0.27
#100	0.149	2.27	0.12	14.51	0.15
#200	0.074	1.86	0.10	14.61	0.05
pasa #200		0.91	0.05	14.66	0.00
		273.99			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.3. Granulometría banco la cañada.

Malla	Abertura(mm)	Abertura norma (mm)	Pasa(%)
2"	50.7	50	100.00
1 1/2"	39.94	37.5	97.48
1"	25.32	25	75.67
3/4"	19.32	19	61.70
1/2"	12.54	12.5	41.84
3/8"	10	9.5	33.67
1/4"	6.42	6.3	20.70
#4	4.68	4.75	14.66
#10	2	2	3.23
#20	0.85	0.85	1.13
#40	0.425	0.425	0.66
#60	0.25	0.25	0.27
#100	0.15	0.15	0.15
#200	0.075	0.075	0.05
pasa #200			

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 4.1. Curva granulométrica banco de materiales la cañada.**  
*Fuente: Elaboración propia.*

Para la realización de la mezcla los agregados gruesos fueron procesados eliminando los finos, debido a que los concretos permeables no llevan o tal vez muy pocos, y un exceso de “polvo” en el agregado puede afectar la adherencia entre la pasta de cemento y las partículas de agregado. Los tamaños de agregados que se utilizaron para la realización de las mezclas fueron de 3/8”, 1/2” y 3/4” (Figura 4.2).



**Figura 4.2. Agregado 3/8”, 1/2” y 3/4”.**  
*Fuente: Elaboración propia*

#### 4.2.2 Absorción y peso específico.

La absorción es la cantidad de agua que es capaz de absorber un material inicialmente seco, después de estar sumergida en ella durante 24 horas. Se determina de acuerdo con las normas ASTM C127 para agregado grueso.

Determinar la absorción en los agregados es de suma importancia, pues fija la cantidad de agua en la dosificación de los concretos y morteros, ya que además del agua necesaria para la hidratación de los aglomerantes hay que agregar la que absorberán los agregados, de lo contrario, faltará agua para la reacción de hidratación y fraguado.

El peso específico o densidad de un cuerpo es la relación que existe entre su peso y el peso de un volumen igual de agua. Se determina de acuerdo a las normas ASTM C127 para agregado grueso. Los resultados de las pruebas de absorción y peso específico son presentados en la Tabla 4.4.

**Tabla 4.4. Absorción y peso específico.**

<b>Concepto</b>	<b>Cantidad</b>
Absorción	0.752 %
Densidad relativa mat. Seco (Sd)	2.668
Densidad relativa mat. Saturado (Ssat)	2.688
Densidad relativa solidos del mat. (Ss)	2.722

*Fuente: Elaboración propia.*

#### 4.2.3 Peso volumétrico.

El peso volumétrico se determina comúnmente a los materiales heterogéneos o discontinuos como el concreto, arena, grava, mercancías, etc., con el propósito de conocer el peso del material necesario para llenar un volumen de 1.00 m<sup>3</sup>. Se determina de acuerdo con la norma ASTM C29.

La masa volumétrica aproximada del agregado comúnmente usado en el concreto de peso normal varía de 1200 a 1750 kg/m<sup>3</sup> (Kosmatka et al., 2004). Los resultados del peso volumétrico del material se muestran en la Tabla 4.5.

**Tabla 4.5. Peso volumétrico agregados**

<b>Concepto</b>	<b>Cantidad</b>
PVSS 3/8"	1470.52 Kg/m <sup>3</sup>
PVSC 3/8"	1512.38 Kg/m <sup>3</sup>
PVSS 3/4"	1502.58 Kg/m <sup>3</sup>
PVSC 3/4"	1545.16 Kg/m <sup>3</sup>
PVSS 3/8" – 1/2"	1489.14 Kg/m <sup>3</sup>
PVSC 3/8" – 1/2"	1531.54 kg/m <sup>3</sup>

*Fuente: Elaboración propia.*

### **4.3 Propiedades mecánicas del concreto base.**

En este apartado se presentan los resultados de las pruebas mecánicas que se aplicaron al concreto base, donde se analizó la resistencia a compresión y flexión y la permeabilidad para cada una de las mezclas.

#### 4.3.1 Resistencia a compresión concreto base.

En la Tabla 4.6 se muestra los resultados del ensayo a compresión del concreto elaborado con agregado 3/4", el cual obtuvo una resistencia máxima a los 28 días de 62.58 kg/cm<sup>2</sup>.

Tabla 4.6. Resistencias del concreto permeable con agregado 3/4".

Días de curado	Resistencia (kN)	Resistencia (Ton)	Resistencia (Kg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )
7	20.68	2.11	2108.78	26.84
7	17.23	1.76	1756.98	22.37
7	21.25	2.17	2166.91	27.57
14	22.14	2.26	2257.66	28.76
14	24.84	2.53	2532.98	32.24
14	27.89	2.84	2844.00	36.15
21	33.67	3.43	3433.40	43.68
21	36.12	3.68	3683.23	46.91
21	39.23	4.00	4000.36	50.93
28	44.56	4.54	4543.87	57.84
28	45.89	4.68	4679.50	59.59
28	48.24	4.92	4919.13	62.58

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.3 se muestra el comportamiento del concreto.

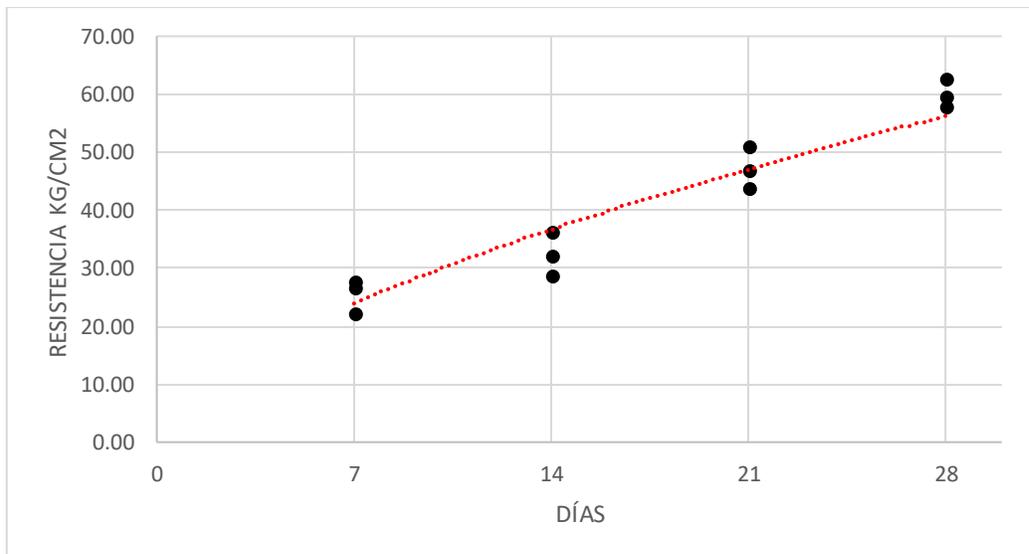


Figura 4.3. Comportamiento de la resistencia del concreto permeable 3/4".

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 4.7 da a conocer los resultados del concreto realizado con un agregado de 3/8" mientras que la Figura 4.4 nos muestra su comportamiento, para este caso observamos un aumento significativo en la resistencia obteniendo 72.6 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días.

Tabla 4.7. Resistencias del concreto permeable con agregado 3/8".

Días de curado	Resistencia (kN)	Resistencia (Ton)	Resistencia (Kg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )
7	23.36	2.38	2382.07	30.32
7	25.84	2.63	2634.96	33.51
7	29.78	3.04	3036.73	38.67
14	38.36	3.91	3911.65	49.75
14	36.62	3.73	3734.21	47.50
14	37.12	3.79	3785.20	48.10
21	47.22	4.82	4815.12	61.36
21	45.56	4.65	4645.84	59.15
21	41.47	4.23	4228.78	53.84
28	55.87	5.70	5697.18	72.60
28	54.45	5.55	5552.38	70.74
28	53.79	5.49	5485.07	69.82

Fuente: Elaboración propia

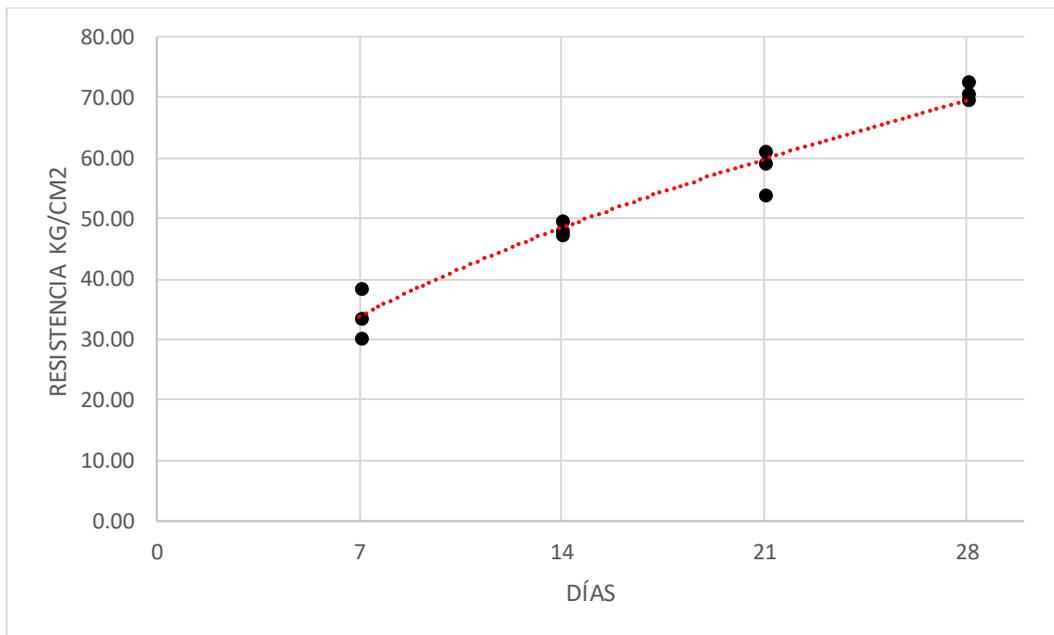


Figura 4.4. Comportamiento de la resistencia del concreto permeable 3/4".

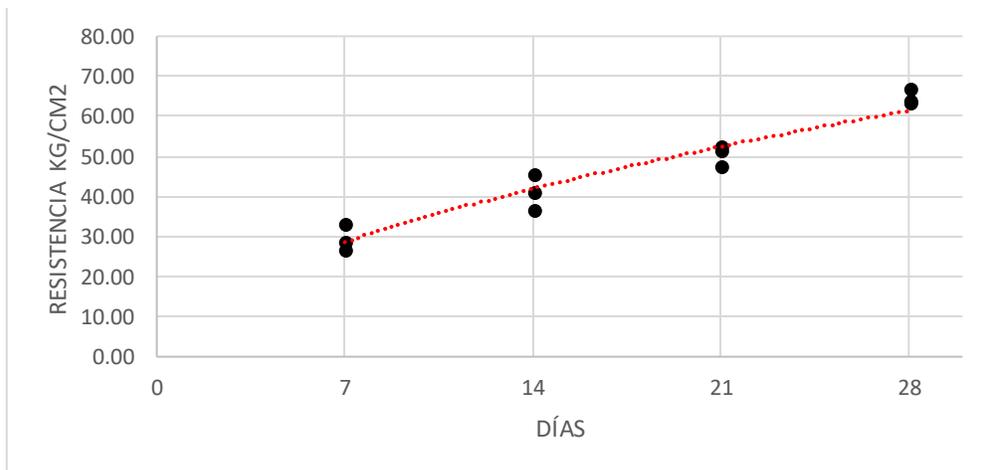
Fuente: Elaboración propia

Para concluir con los ensayos del concreto base en la Tabla 4.8 que se presenta a continuación se observa que para un concreto en donde se emplea una granulometría con una combinación de agregados de 3/8" y 1/2" la resistencia máxima a los 28 días es de 66.79 kg/cm<sup>2</sup>, el comportamiento de esta mezcla se presenta en la Figura 4.5.

**Tabla 4.8. Resistencias del concreto permeable con agregado 3/8" y 1/2".**

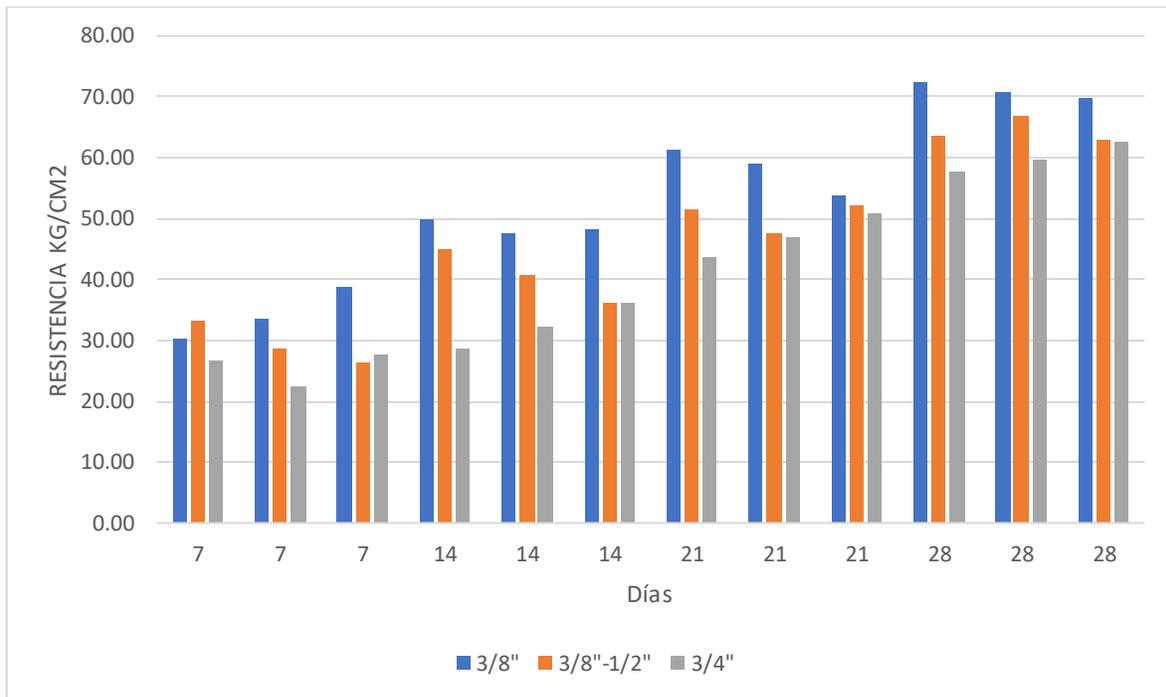
Días de curado	Resistencia (kN)	Resistencia (Ton)	Resistencia (Kg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )
7	25.46	2.60	2596.21	33.10
7	22.02	2.25	2245.42	28.66
7	19.68	2.01	2006.81	26.52
14	34.92	3.56	3560.86	45.16
14	31.43	3.20	3204.98	40.74
14	27.94	2.85	2849.10	36.32
21	39.68	4.05	4046.25	51.42
21	36.72	3.74	3744.41	47.57
21	40.34	4.11	4113.55	52.30
28	49.08	5.00	5004.79	63.66
28	51.45	5.25	5246.46	66.79
28	48.56	4.95	4951.76	63.08

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 4.5. Comportamiento de la resistencia del concreto permeable 3/8" y 1/2".**

En la Figura 4.6 se observa la comparación de resistencias de las diferentes mezclas de concreto permeable en donde podemos percibir que el concreto diseñado con agregado de 3/4" es el que arroja menor resistencia, lo cual era esperado si revisamos la literatura, ya que a ser el de mayor tamaño el espacio entre partículas, la adherencia es menor comparandolo con las que ofrece un agregado mas pequeño como el de 3/8". Por otra parte el concreto diseñado con la combinación de agregados de 3/8" y 1/2" obtuvo valores que se establecen entre los obtenidos de los agregados anteriores siendo mas resistente que la mezcla de 3/4" pero ligeramente menor a la de 3/8".



**Figura 4.6. Comparación mezcla base concreto permeable.**  
*Fuente: Elaboración propia*

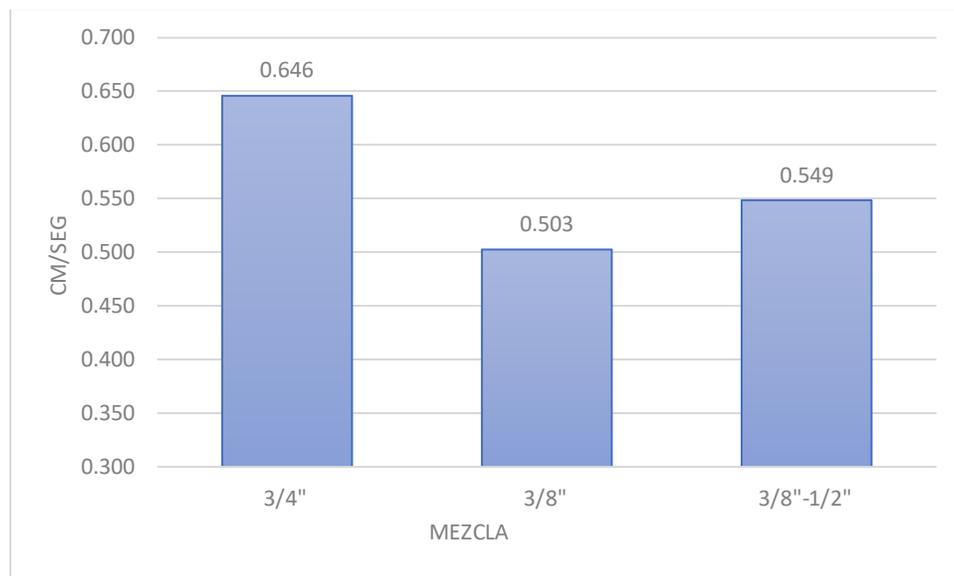
#### 4.3.2 Ensayo de permeabilidad concreto base.

En la Tabla 4.9 se muestra los resultados obtenidos mediante el permeámetro para cada una de las muestras realizadas y en la Figura 4.7 se muestra una comparativa de los coeficientes de permeabilidad obtenidos.

**Tabla 4.9. Resultados prueba de permeabilidad.**

Muestra	Días	t1	t2	h1	h2	K
3/4"	28	0	16.08	25	15	0.656
3/4"	28	0	15.34	25	15	0.670
3/4"	28	0	17.23	25	15	0.612
3/8"	28	0	21.05	25	15	0.501
3/8"	28	0	20.45	25	15	0.516
3/8"	28	0	21.67	25	15	0.491
3/8"-1/2"	28	0	20.07	25	15	0.525
3/8"-1/2"	28	0	19.84	25	15	0.549
3/8"-1/2"	28	0	19.45	25	15	0.572

*Fuente: Elaboración propia.*



**Figura 4.7. Comparación de coeficientes de permeabilidad.**

*Fuente: Elaboración propia*

De acuerdo al Imcyc (2011) la permeabilidad de un concreto permeable va de los 0.20 a 0.54 cm/seg. En la figura 4.7 se observa que las 3 mezclas de concreto cumplen con ese rango, al tener mayor cantidad de espacios la mezcla de 3/4" fue la que mostro un mayor grado de permeabilidad mientras que la mezcla con la combinación de agregados de 3/8" y 1/2" tiene una permeabilidad ligeramente superior a la mezcla con agregado de solo 3/8".

Con los resultados de las pruebas anteriores se hizo la elección como concreto base el diseñado con agregados combinados (3/8" y 1/2") ya que fue el que presento un comportamiento equilibrado entre permeabilidad y resistencia, que son las 2 características que se requieren para el proyecto.

#### 4.3.3 Ensayo a flexión concreto base.

Para el ensayo a flexión debido al material limitado solo se ensayaron las vigas para la mezcla base seleccionada (3/8" y 1/2") de la cual los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 4.10. Resistencia a flexión concreto base 3/8" y 1/2"**

Muestra	Días	Carga			
		KN	Ton	Kg/cm <sup>2</sup>	Mpa
<b>Base</b>	28	12.50	1.27	17.00	1.67
<b>Base</b>	28	11.94	1.22	16.23	1.59
<b>Base</b>	28	11.40	1.16	15.50	1.52

*Fuente: Elaboración propia*

De la Tabla 4.10 se observa que la resistencia máxima obtenida es de 1.67 Mpa lo cual es un valor bajo comparado con un concreto convencional y no apto para la construcción de concreto para pavimento de altas especificaciones.

#### 4.4 Propiedades mecánicas concreto con poliestireno.

A continuación se presenta los resultados de los ensayos obtenidos al evaluar la mezcla base modificada con el 5%, 10% y 15% del polímero a base de poliestireno reciclado.

##### 4.4.1 Resistencia a compresión concreto con poliestireno.

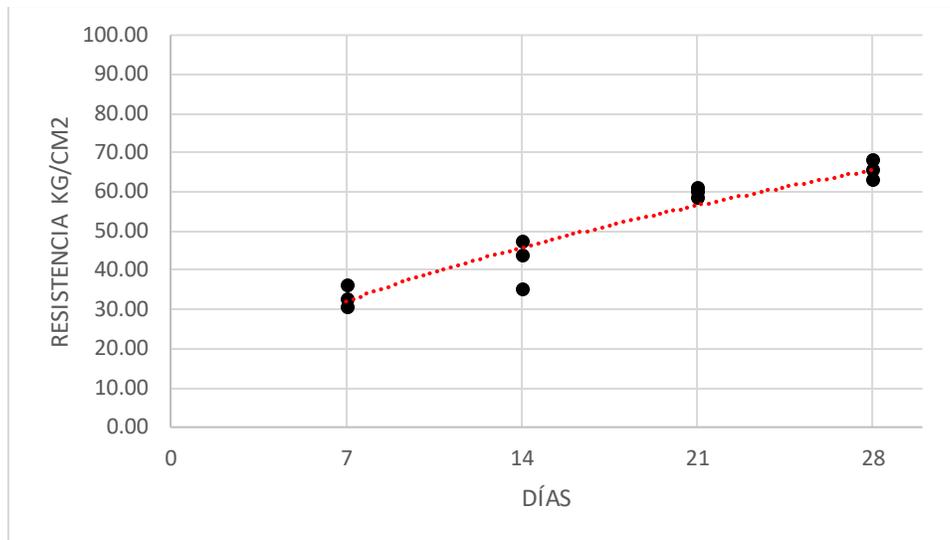
En la Tabla 4.11 se muestran las resistencias para el concreto modificado con el 5% de polímero siendo 68.15 kg/cm<sup>2</sup> el máximo valor alcanzado.

Tabla 4.11. Resistencia a compresión concreto modificado con 5% de poliestireno.

Días de curado	Resistencia (kN)	Resistencia (Ton)	Resistencia (Kg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )
7	27.68	2.82	2822.58	36.39
7	23.84	2.43	2431.01	30.84
7	25.00	2.55	2549.30	32.39
14	36.36	3.71	3707.70	47.21
14	33.84	3.45	3450.73	44.02
14	27.17	2.77	2770.58	35.38
21	46.87	4.78	4779.43	60.85
21	45.02	4.59	4590.78	58.50
21	46.24	4.72	4715.19	60.02
28	48.45	4.94	4940.54	62.92
28	50.68	5.17	5167.94	65.83
28	52.46	5.35	5349.45	68.15

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.8 que se muestra a continuación observamos el comportamiento de la mezcla a diferencia del concreto base el aumento en la resistencia de los 21 a 28 días fue menor.



**Figura 4.8. Comportamiento mezcla con 5% de poliestireno.**

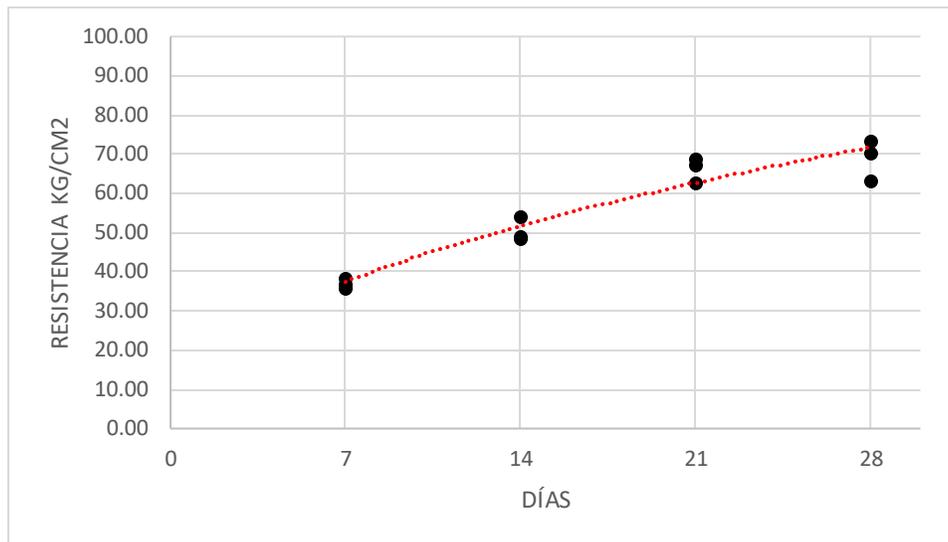
*Fuente: Elaboración propia*

La Tabla 4.12 nos muestra que la resistencia máxima obtenida para la mezcla modificada con el 10% de polímero es de 73.61 kg/cm<sup>2</sup>. La figura 4.9 nos muestra el comportamiento para esta mezcla, al igual que la anterior el aumento de los 21 a 28 días fue ligeramente menor.

**Tabla 4.12. Resistencia a compresión concreto modificado con 10% de poliestireno.**

Días de curado	Resistencia (kN)	Resistencia (Ton)	Resistencia (Kg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )
7	29.86	3.04	3044.88	38.78
7	27.74	2.83	2828.70	36.08
7	28.61	2.92	2917.42	37.08
14	38.11	3.89	3886.15	49.49
14	41.76	4.26	4258.35	54.23
14	37.43	3.82	3816.81	48.64
21	51.94	5.30	5296.43	67.48
21	53.08	5.41	5412.67	69.04
21	48.76	4.97	4972.15	63.23
28	56.68	5.78	5779.77	73.61
28	48.86	4.98	4982.35	63.44
28	54.46	5.55	5553.40	70.69

*Fuente: Elaboración propia.*



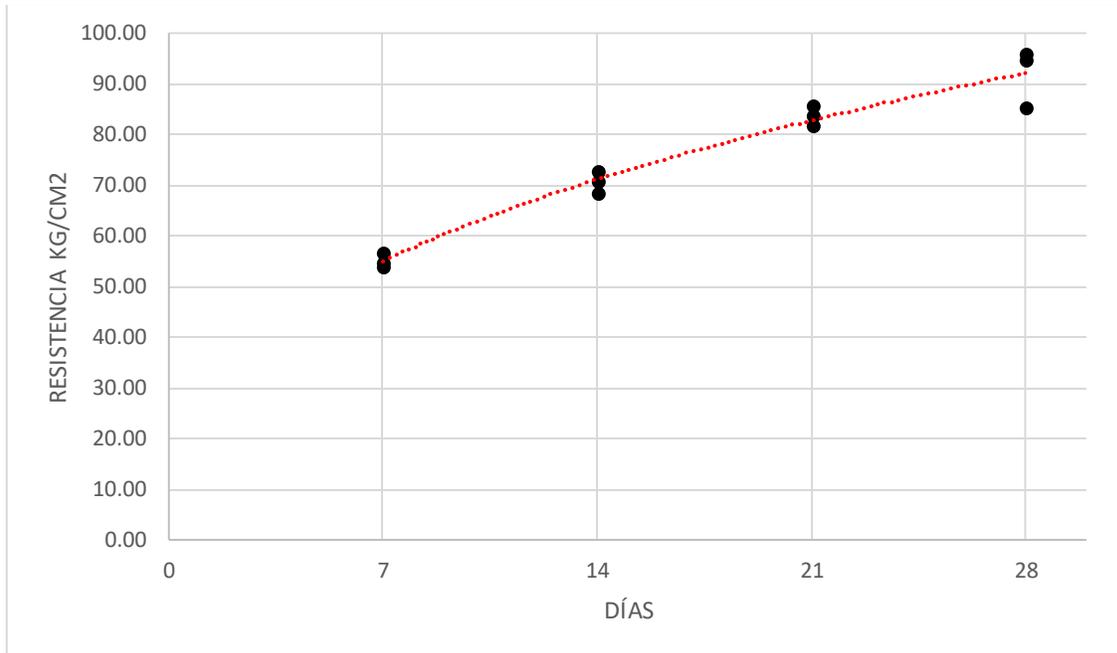
**Figura 4.9. Comportamiento mezcla con 10% de poliestireno.**  
*Fuente: Elaboración propia*

De la Tabla 4.13 obtenemos que la resistencia máxima para el concreto modificado con el 15% de polímero es de 95.85 kg/cm<sup>2</sup>. La Figura 4.10 muestra el comportamiento para dicha mezcla.

**Tabla 4.13. Resistencia a compresión concreto modificado con 15% de poliestireno.**

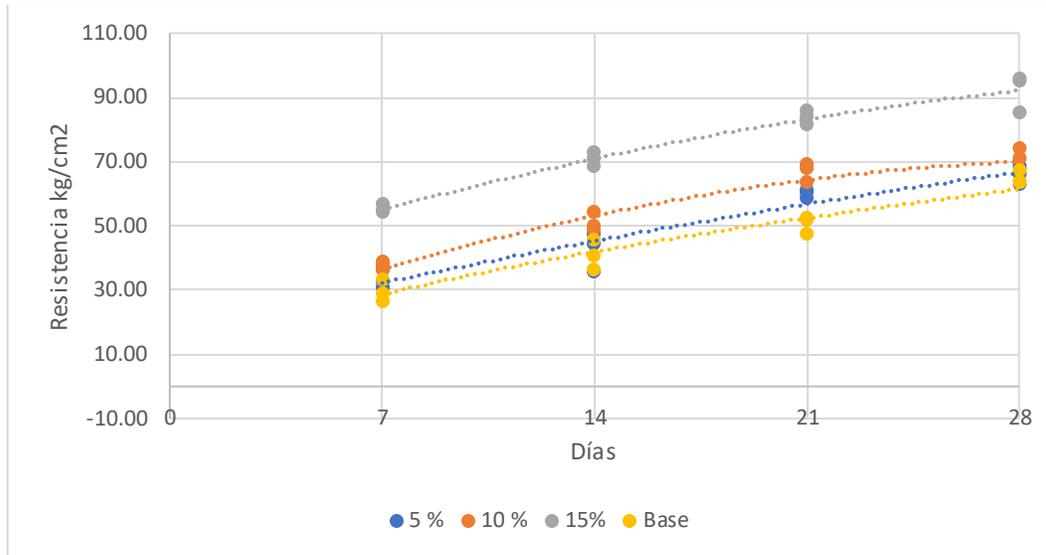
Días de curado	Resistencia (kN)	Resistencia (Ton)	Resistencia (Kg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )
7	41.56	4.24	4237.96	53.92
7	42.07	4.29	4289.96	54.73
7	43.46	4.43	4431.70	56.53
14	54.49	5.56	5556.45	70.56
14	55.95	5.71	5705.33	72.58
14	52.61	5.36	5364.75	68.37
21	62.79	6.40	6402.82	81.58
21	65.87	6.72	6716.90	85.51
21	64.43	6.57	6570.06	83.73
28	72.89	7.43	7432.74	94.65
28	65.73	6.70	6702.62	85.25
28	73.76	7.52	7521.45	95.85

*Fuente: Elaboración propia.*



**Figura 4.10. Comportamiento mezcla con 15% de poliestireno.**  
*Fuente: Elaboración propia*

La figura 4.11 compara las resistencias obtenidas del concreto base y el concreto modificado con polímero, en primera instancia se observa que con la adición del 5% de polímero el incremento respecto al concreto base es mínimo, para la inclusión del 10% se obtiene un incremento inicial notable para los 14 días respecto al concreto base, sin embargo a los 28 días este incremento no mantiene la misma tendencia y resulta ser poco mayor comparado con la inclusión del 5, a partir de los 15% se observa un comportamiento donde el incremento es superior respecto al crecimiento de las demás mezclas.



**Figura 4.11. Comparación de la resistencia a compresión del concreto modificado y el concreto base**

#### 4.4.2 Ensayo de permeabilidad concreto con poliestireno.

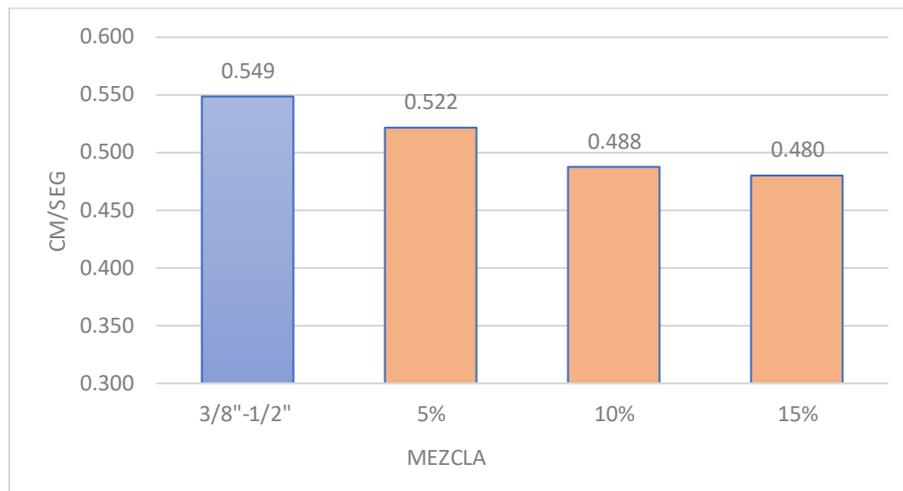
El ensayo de permeabilidad para las mezclas modificadas con polímero arrojó coeficientes menores con respecto a los de la mezcla base como se observa en la Tabla 4.14, sin embargo se encuentran dentro del rango permisible para un concreto permeable que va de los 0.20 a 0.54 cm/s.

**Tabla 4.14. Coeficientes de permeabilidad concreto modificado con polímero.**

Muestra	Días	t1	t2	h1	h2	K
5%	28	0	20.15	25	15	0.523
5%	28	0	20.67	25	15	0.510
5%	28	0	19.85	25	15	0.531
10%	28	0	21.55	25	15	0.489
10%	28	0	21.87	25	15	0.482
10%	28	0	21.47	25	15	0.491
15%	28	0	22.03	25	15	0.479
15%	28	0	21.92	25	15	0.481
15%	28	0	21.95	25	15	0.480

*Fuente: Elaboración propia.*

La Figura 4.12 es una comparación de los coeficientes de permeabilidad obtenidos en donde se observa que el concreto base tiene un coeficiente ligeramente mayor que el concreto modificado con el 5% de polímero, mientras que para los concretos modificado con 10% y 15% la variación entre ellos es mínima.



**Figura 4.12. Comparación coeficientes de permeabilidad concreto base y modificado.**  
Fuente: Elaboración propia

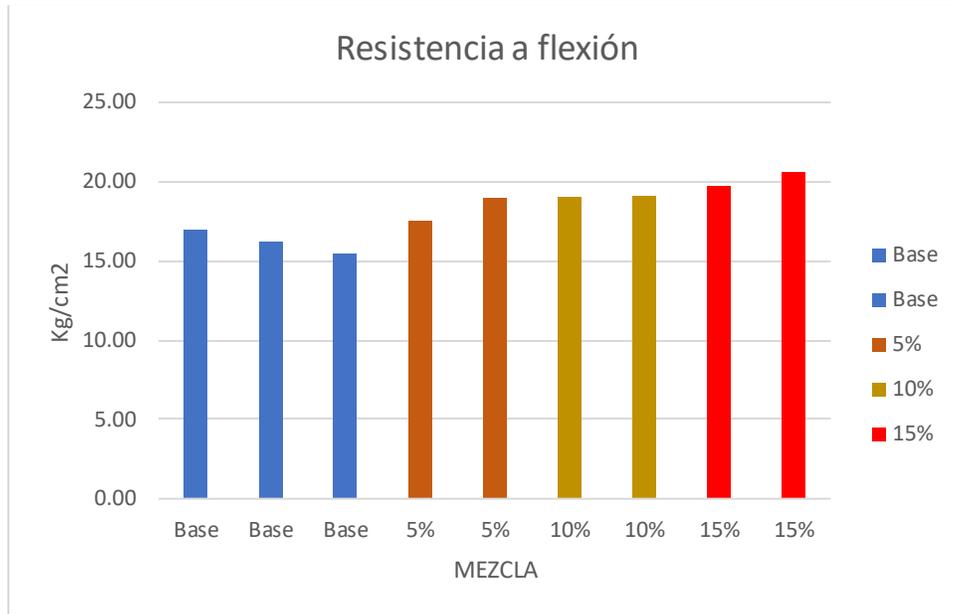
#### 4.3.3 Ensayo a flexión concreto con poliestireno.

En la Tabla 4.15 se muestran los resultados obtenidos del ensayo a flexión para las mezclas modificadas con estireno, donde resalta que para la adición de un 15% de polímero la resistencia máxima alcanzada es de 2 Mpa

**Tabla 4.15. Resultados ensayo a flexión concreto modificado.**

Muestra	Días	Carga			
		KN	Ton	Kg/cm <sup>2</sup>	Mpa
5%	28	12.89	1.31	17.53	1.72
5%	28	13.93	1.42	18.94	1.86
10%	28	13.98	1.43	19.01	1.86
10%	28	14.06	1.43	19.12	1.87
15%	28	14.51	1.48	19.73	1.93
15%	28	15.13	1.54	20.57	2.02

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 4.13. Ensayo a flexión concreto con poliestireno.**  
*Fuente: Elaboración propia*

## 5. CONCLUSIONES.

Basándonos en los resultados obtenidos en la investigación, confirmamos que la hipótesis planteada es correcta, ya que al incluir el polímero a base de estireno a la mezcla de concreto permeable mejora su desempeño y características.

A partir de los ensayos a compresión y flexión se recalca que con la adición de poliestireno al concreto base se consiguió un aumento de resistencia a la compresión en un 30%, siendo el valor máximo del concreto base de 66.79 kg/cm<sup>2</sup> y el valor máximo del concreto modificado de 95.85 kg/cm<sup>2</sup>.

Por su parte la resistencia a flexión tuvo un incremento del 17.3% con respecto al concreto base. De los ensayos realizados podemos concluir que las tasas de infiltración de todas las dosificaciones de concreto permeable fabricadas se encuentran dentro del rango establecido, aunque existe una disminución en la permeabilidad con la adición de poliestireno, esta es mínima.

Si bien dentro de la investigación no se alcanzó un concreto de alta resistencia, el objetivo principal del polímero a base de estireno cumplió con lo estipulado, por lo que realizar una investigación con un diseño de concreto permeable con las condiciones óptimas para alcanzar la alta resistencia con la inclusión de este aditivo arrojará resultados satisfactorios, cabe mencionar que el concreto permeable superó la resistencia del concreto convencional por lo que es un concreto de alta resistencia comparándolo con este último.

Del proceso de diseño de mezclas obtenemos que las resistencias a compresión aumentan con el aumento de la relación a/c y con el aumento del contenido de pasta de cemento; aunque las resistencias a compresión obtenidas no superan el valor de 10 MPa, todos los valores obtenidos se encuentran dentro del rango de 2,8 a 28 MPa mencionada por la ACI (2010).

Los métodos de proporcionamiento convencionales no son aplicables al concreto permeable, tampoco los métodos de prueba; es por esto que la elaboración de la mezcla resulta ser un método a veces empírico y debido a lo anterior a pesar de que grupos de trabajo de la ASTM y ACI vienen trabajando arduamente en estos apartados, se deben realizar más investigaciones al respecto del diseño de mezclas.

Por último con el empleo de este aditivo a base de poliestireno reciclado, además de buscar mejoras sustanciales, también se busca contribuir al desarrollo sustentable dentro del área de pavimentos permeables con la reutilización de materiales buscando la reducción de las emisiones de dióxido de carbono y volúmenes de residuos. Esta idea, representa una alternativa eficiente, económica y ecológica en la industria del pavimento.

## BIBLIOGRAFIA

- Aamer M., Tsuruta, K., & Mirza, J. (2012). "Evaluation of high-performance porous concrete properties". *Construction and Building Materials*. 31, 67-73.
- ACI Committee. (2010). *Pervious Concrete 522R-10*. Farmington Hills, MI.: American Concrete Institute.
- ACI 211. (2002). *Guide for selecting proportions for no-slump concrete, Appendix 7—Pervious concrete mix proportioning*. American concrete institute.
- Aguado, A., Josa, A., & Pindado, M. (1995). Nuevas tendencias en los hormigones porosos. VII Jornada del Hormigón del Gremi de Constructors d'Obres de Barcelona i Comarques.
- Alyaseri, I., & Zhou, J. (2016). "Stormwater Volume Reduction in Combined Sewer: City of St. Louis". *Journal Environ Engineering*. 142, 1-9.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2001). *Design for Pavement Structures*. Washington D.C., U.S.A.: AASHTO.
- Anush K. Chandrappa, Krishna Prapoorna Biligiri. (2016). "Pervious concrete as a sustainable pavement material – Research findings and future prospects: A state of the art review". *Construction and Building Materials*. 111, 262–274
- ASTM C494, (2004). *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*. American Society for Testing Materials. West Conshohocken.
- ASTM C1018, (1997). *Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete*. American Society for Testing Materials. West Conshohocken.
- ASTM C109. (2002). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*. American Society for Testing Materials. West Conshohocken.

- ASTM C138. (2004). Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete. American Society for Testing Materials. West Conshohocken.
- ASTM C143 (2004). Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. American Society for Testing Materials. West Conshohocken.
- ASTM C33. (2004). Standard Specification for Concrete Aggregates. American Society for Testing Materials. West Conshohocken.
- ASTM C39. (2004). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. American Society for Testing Materials. West Conshohocken.
- ASTM C78. (2002). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete. American Society for Testing Materials. West Conshohocken.
- ASTM D448. (2004). Standard Classification for Sizes of Aggregate for Road and Bridge Construction. American Society for Testing Materials. West Conshohocken.
- Beneira , A., y Romeu, X. (1996). "Hormigon poroso en pavimentos urbanos". Universidad Politecnica de Catalunya.
- Cadere, C. A., Barbuta, M., Rosca, B., Serbanoiu, A. A., Burlacu, A., & Oancea, I. (2018). Engineering properties of concrete with polystyrene granules. *11th International Conference Interdisciplinarity in Engineering*, 22, 288-293.
- Castro Fresno, D.; Rodriguez Bayon, J.; Rodriguez Hernandez, J.; Ballester Munoz, F. (2005). *Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)*. Interciencia. pp 255-260.
- Cedergren H. (1994). "America's pavements: world's Longest Bathtubs". *Civil engineering*. 64, 56-58.

- Chen, J. S., Lee, C. T., & Lin, Y. Y. (2016). Influence of Engineering Properties of Porous Asphalt Concrete on Long-Term Performance. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(4), 04016246.
- Collins, K. A., Hunt, W. F., & Hathaway, J. M. (2007). Evaluation of various types of permeable pavements with respect to water quality improvement and flood control. *In World Environmental and Water Resources Congress 2007: Restoring Our Natural Habitat (pp. 1-12)*.
- Coreño A. & Méndez B., (2010), Relación estructura-propiedades de polímeros, *Educación Química*, 21(4): 291-299.
- Day, G., Smith, D., & Bowers, J. (1981). "Runoff and pollution abatement characteristics of concrete grid pavements". *Virginia Water Resources Research Center. Bulletin 135*.
- FCPA (1990), Florida Concrete and Products Association, *Pervious Pavement Manual*, Orlando, Florida.
- Franklin Institute, Wilford C., Arnold J., & Thomas I. (1972). Investigation of porous pavements for urban runoff control. *Office Research and Monitoring Environmental Protection Agency*.
- García Haba, Eduardo (2011). Control de escorrentías urbanas mediante pavimentos permeables: aplicación en climas mediterráneos.
- Giustozzi, F. (2016). Polymer-modified pervious concrete for durable and sustainable transportation infrastructures. *Construction and Building Materials*, 111, 502-512.
- Haselbach, L. M., Valavala, S., & Montes, F. (2005). Permeability predictions for sand-clogged Portland cement pervious concrete pavement systems. *Journal of environmental management*, 81(1), 42-49.
- Hincapié A.M, y Montoya Y.D. (2005). "La microestructura de los prefabricados de concreto". *Revista universidad EAFIT*.41, 95-105.

- Hogland W., Niemczynowicz J., & Wahlman T. (1987). "The unit superstructure during the construction period". *Science of the total environment*, 59, 411-424.
- Huang, B., Wu, H., Shu, X., & Burdette, E. G. (2010). Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 24(5), 818-823.
- Jiang, Z. W., Sun, Z. P., & WANG, P. M. (2005). Effects of some factors on properties of porous pervious concrete. *Journal of Building Materials*, 5.
- Kardon, J. B. (1997). Polymer-modified concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 9(2), 85-92.
- Keck, R. H. (2001). "Improving concrete durability with cementitious materials". *Concrete International*, 23(09), 47-51.
- Kim, Y. J., Gaddafi, A., & Yoshitake, I. (2016). Permeable concrete mixed with various admixtures. *Materials & design*, 100, 110-119.
- Kosmatka, Steven H.; Kerkhoff, Beatrix; Panarese, William C.; y Tanesi, Jussara, (2004)." Diseño y Control de Mezclas de Concreto", *Portland Cement Association*, Skokie, Illinois, EE.UU.
- Kumar, R., & Bhattacharjee B. (2003). "Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete". *Cement and Concrete Research*, 33 (1), 155-164.
- Li, H., Kayhanian, M., & Harvey, J. T. (2013). Comparative field permeability measurement of permeable pavements using ASTM C1701 and NCAT permeameter methods. *Journal of Environmental Management*, 118, 144-152.
- Larson R. (1990). Swedish experience with design and construction of pervious asphalt constructions. *Proc. Standing Conf. of Stormwater Source Control*.

- Lian C., Zhuge Y., & Beecham S. (2011). "The relationship between porosity and strength for porous concrete". *Construction and Building Materials*, 25 (11), 4294-4298.
- Liang, R., & Taamneh, M. (2010). "Design of Effective Subsurface Drainage for Flexible Pavement". *Advances in Analysis, Modeling & Design*, 2631-2640.
- Lee, J. G., Borst, M., Brown, R. A., Rossman, L., & Simon, M. A. (2014). Modeling the hydrologic processes of a permeable pavement system. *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(5), 04014070.
- Lutfur Akand, Mijia Yang, Xinnan Wang.(2017). Effectiveness of chemical treatment on polypropylene fibers as reinforcement in pervious concrete. *Construction and Building Materials*. 163. 32-39.
- Mahboub, K., Liu, Y., & Allen, D. (2005). "Asphalt Overlay and Subsurface Drainage of Broken and Seated Concrete Pavement". *Journal of Transportation Engineering*, 131 (8), 617-622.
- Masy, T., Bertrand, C., Xavier, P.-M., Vreuls, C., Wilmot, A., & Cludts, M. (2016). "Stable biofilms of *Rhodococcus erythropolis* T902.1 in draining pavement structures for runoff water decontamination". *International Biodeterioration & Biodegradation*, 112, 108-118.
- Mohajerani A., Ashdown M., Abdihashi L. & Nazem M. (2017), Expanded polystyrene geofoam in pavement construction, *Construction and Building Materials*, 157: 438-448.
- Mohammadinia, Mahdi M. Disfani, Guillermo A. Narsilio, Lu Aye. (2018). "Mechanical behaviour and load bearing mechanism of high porosity permeable pavements utilizing recycled tire aggregates". *Construction and Building Material*, 168, 794-804.

- Montes, F., & Haselbach, L. (2006). "Measuring Hydraulic Conductivity in Pervious Concrete". *Environmental engineering design*, 23 (6), 960-969.
- Neithalath, N. (2004). Development and characterization of acoustically efficient cementitious materials. Thesis.
- Neithalath, N., Sumanasooriya, M. S., & Deo, O. (2010). Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction. *Materials characterization*, 61(8), 802-813.
- Olivera Bustamante, F. (2004). *Estructuración de vías terrestres*. México: CECSA.
- Pérez Ramos, D. (2009). Estudio experimental de concretos permeables con agregados andesíticos. *Trabajo de graduación de maestría en Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería*.
- Pethrick A., (2013), Polymer structure characterization, *Journal RSC*, 60: 24-33.
- Pratt, C. J. (2004). Sustainable drainage: A review of published material on the performance of various SUDS components. Prepared for the Environment Agency. SUDS Science Group/99705.015.
- Pratt C., Wilson S., & Cooper P. (2002). Source Control Using Constructed Pervious Surfaces. *Hydraulic, Structural and Water Quality Performance Issues*, 152.
- Rahman, M. A., Imteaz, M. A., Arulrajah, A., Disfani, M. M., & Horpibulsuk, S. (2015). Engineering and environmental assessment of recycled construction and demolition materials used with geotextile for permeable pavements. *Journal of Environmental Engineering*, 141(9), 04015019.
- Rahman, S., Northmore, A. B., Henderson, V., & Tighe, S. L. (2015). Developing A Framework for Low-Volume Road Implementation of Pervious Concrete Pavements. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 4(1), 77-91.

- Ranieri, V., Ying, G., & Sansalone, J. (2012). "Drainage Modeling of Roadway Systems with Porous Friction Courses". *Journal of transportation engineer*, 138 (4), 395-405.
- Reyes, F., y Torres, A. (2002). "Efecto de las fibras plasticas en la flexión de estructuras de pavimentos drenantes". *Revista Ingeniería de Construcción.*, 93-102.
- Rodríguez 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.
- Scholz, M., & Grabowiecky, P. (2007). "Review of permeable pavement systems". *Building and Environment*, 42 (11), 3830-3836.
- Schmidt, P., Cioffi, M., Voorwald, H. & Silveria, J., (2011), Flexural Test On Recycled Polystyrene, *Engineering Procedia*, 10: 930-935.
- Secerov S., Sokolovic S. & Govedarica D., (2009), Performance of expanded polystyrene particles in deep bed filtration, *Separation and Purification Technology*, 68: 267-272.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), "Catálogo de secciones estructurales de pavimentos para las carreteras de la república mexicana". *Dirección General de Servicios Técnicos*
- Solminihaç T., & Castro S. (2002). Pavimentos Porosos de Hormigón: Una Opción para Mitigar los Efectos de las Aguas de Lluvia. *Revista BIT*, 35-38.
- Sumanasooriya, M., & Neithalath, N. (2011). "Pore structure features of pervious concretes proportioned for desired porosities and their performance prediction". *Cement and concrete composites*, 33 (8), 778-787.

- Sun, L. (2016). *Structural Behavior of Asphalt Pavements: Intergrated Analysis and Design of Conventional and Heavy Duty Asphalt Pavement*. Butterworth-Heinemann.
- Tennis, P., Leming, M., & Akers, D. (2004). "Pervious Concrete Pavements". PCA.
- Vélez, L. (2010). "Permeabilidad y Porosidad en Concreto". *Rev. Tecno Lógicas*, 25, 169-187.
- William D., Nigel B., & Bradley J. (2014). "Impact of vertical porosity distribution on the permeability of pervious concrete". *Construction and Building Materials*, 59, 78-84.
- Woods-Ballard B., Kellagher R., Martin P., Jefferies C., Bray R. & Shaffer P. (2007). *The SUDS Manual*. CIRIA C697. London.
- Yang, J., & Jiang, G. (2003). "Experimental study on properties of pervious concrete pevement materials". *Cement and Concrete Research*, 33, 381-386.
- Yildirim, Y. (2007). Polymer modified asphalt binder. *Construction and Building Materials*, 21(1), 66-72.
- Zhong, R., Leng, Z., & Poon, C. S. (2018). Research and application of pervious concrete as a sustainable pavement material: A state-of-the-art and state-of-the-practice review. *Construction and Building Materials*, 183, 544-553.