

Comportamiento a la compresión y flexión de un pavimento en concreto poroso con adición de fibras sintéticas

Angie Lizeth Chaparro Fajardo

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Civil

Tunja

2021

**Comportamiento a la compresión y flexión de un pavimento en concreto poroso con
adición de fibras sintéticas** ii

Angie Lizeth Chaparro Fajardo

Director

PhD. Andrés Mauricio Núñez López

Co-Director

Mg. Osmar Albert Gamba Gomez

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil.

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Civil

Tunja

2021

Este trabajo de grado es dedicado a mi familia, amigos, docentes y demás personas que con su aporte, hicieron posible el desarrollo de este proyecto.

Le agradezco a Dios, a mis padres y hermanos por su ayuda incondicional en todo el trayecto para alcanzar esta meta, al Doctor Andrés Mauricio Núñez, quien en su calidad de director con su dedicación y conocimiento contribuyo para la elaboración y ejecución de este trabajo de grado, al Ingeniero Magister Osmar Albert Gamba por su entrega y dedicación en cada una de las etapas de investigación y por su arduo acompañamiento en el laboratorio de materiales, a mi equipo de laboratorio Esneider Burgos Torres, y Carlos Julio Ibáñez por su compromiso y gran labor en la ejecución experimental de este proyecto.

A las empresas Argos y Toxement quienes suministraron el material requerido y empleado en el desarrollo de esta investigación y quienes me acompañaron en todo este proceso, a la Escuela de Ingeniería civil y a todos aquellos sin los cuales no hubiese sido posible la realización de este trabajo de grado.

La presente investigación tiene como fin evaluar el comportamiento de un pavimento permeable, a partir de ensayos de resistencia a flexión y compresión, así como pruebas de infiltración y porosidad. Se busca obtener resultados confiables para el diseño de mezcla de un concreto permeable con y sin agregado fino, y con adición de fibras sintéticas, generando un diseño de mezcla óptimo para dar solución a los problemas de baja resistencia mecánica, y baja durabilidad comúnmente presentes. En la investigación se partirá por detallar el comportamiento del concreto permeable a nivel mundial, así como sus avances y contribuciones en el desarrollo de la ciencia de los materiales, se estudiarán dos métodos comúnmente usados para el diseño de mezcla, se define el tamaño de agregado grueso óptimo, se establece el método de mezclado y de compactación pertinentes para este tipo de concreto, se realiza la caracterización de los materiales empleados para la elaboración de los especímenes, se analiza la cantidad óptima de aditivos a incluir en el diseño de mezcla, y se realizan ocho tipos de mezclas para concreto permeable variando el porcentaje de fibras a adicionar en porcentajes de 3%, 5% y 7%, finalmente, se realizara un símil entre los resultados obtenidos y se presentara el diseño de mezcla óptimo, de tal manera que este pueda ser utilizado de manera confiable y directa garantizando las condiciones de permeabilidad.

Los pavimentos en concreto permeable ofrecen una suma de beneficios tanto ambientales como funcionales, ya que gestionan eficientemente el agua de escorrentía permitiendo recrear el ciclo natural del agua. En la actualidad los pavimentos permeables son considerados como una forma efectiva de restaurar la funcionalidad ecológica de los sistemas de carreteras urbanas, transformando ciudades impermeables y pocos sostenibles, a ciudades cambiadas desde la superficie, hasta hace poco, una gran parte de las aplicaciones de pavimentos permeables se enfocaban en áreas con poca carga de vehículos y/o aceras, estacionamientos, y calles residenciales, sin embargo, con los avances en la tecnología de los materiales y las regulaciones ambientales más estrictas, se anticipa el uso masivo de pavimentos permeables en las carreteras y autopistas urbanas.

Sin embargo una alta tasa de infiltración se traduce en bajas resistencias mecánicas, se sigue buscando mejorar esta condición y aportar al desarrollo de materiales sostenibles y funcionales que contribuyan a la infraestructura verde y su implementación permita que el agua lluvia sea tratada como un recurso y no como un producto de desecho.

Se ofrece este documento como base para posibles investigaciones en el diseño de pavimentos permeables.

Capítulo 1.....	1
Información General.....	1
1. Introducción.....	1
2. Objetivos.....	2
2.1. General.....	2
2.2. Específicos.....	2
3. Estado del Arte.....	2
3.1. Estado del Concreto Permeable a nivel Internacional.....	2
3.2. Estado del Concreto permeable en Colombia.....	5
3.3. Adiciones del concreto permeable.....	7
3.4. Dosificación.....	12
4. Marco Teórico.....	15
4.1. Porosidad.....	15
4.2. Infiltración.....	16
4.3. Resistencia a flexión o módulo de rotura.....	16
4.4. Resistencia a Compresión.....	18
5. Marco conceptual.....	19
5.1. Contenido de cemento y relación agua / cemento (a/c).....	19
5.2. Agregados.....	20
5.3. Aditivos.....	21
5.4. Fibras.....	22
5.5. Curva Granulométrica.....	23
5.6. Densidad Aparente.....	23
5.7. Densidad Nominal.....	23
5.8. Absorción.....	24
5.9. Masa Unitaria Compactada.....	24
5.10. Masa Unitaria Suelta.....	24
Capítulo 2 Diseño Experimental.....	25
6. Pruebas piloto (Fase I).....	25

6.1.	Método PCA	25viii
6.2.	Método ACI	30
6.3.	Tamaño Óptimo de Agregado Grueso	35
6.3.1.	Granulometría	36
7.	Pruebas piloto (Fase II).....	37
7.1.	Caracterización de materiales	38
7.2.	Contenido de Agregado fino	38
7.3.	Dosificación de aditivos.....	39
7.4.	Método de compactación	40
8.	Diseño Final	42
Capítulo 3 Resultados y discusión.		48
9.	Dosificación	48
9.1.	Cemento	48
9.2.	Agregado grueso	48
9.3.	Agregado fino	49
9.4.	Agua.....	49
10.	Propiedades del agregado	50
10.1.	Procedencia del agregado grueso.....	50
10.2.	Tamaño máximo del agregado grueso	52
11.	Propiedades mecánicas	52
11.1.	Resistencia a compresión.....	52
11.2.	Resistencia a Flexión	54
12.	Propiedades hidráulicas	58
12.1.	Infiltración.....	58
12.2.	Porosidad.....	60
Conclusiones		63
Recomendaciones		64
Anexos		66
Lista de referencias		81
Vita.....		¡Error! Marcador no definido.

Tabla 1. Información detallada de los diseños de mezcla estudiados para esta investigación.	14
Tabla 2. Relación agua-material cementante y resistencia a compresión del concreto.	26
Tabla 3. Agua de mezcla y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales del agregado.....	27
Tabla 4. Cantidad de agua, y contenido de cemento diseño PCA.	28
Tabla 5. Volumen de Agregado grueso por volumen unitario de concreto.	29
Tabla 6. Calculo de volúmenes método PCA.	29
Tabla 7. Diseño de mezcla método PCA.	30
Tabla 8. Relación b/bo y porcentaje de agregado fino.....	31
Tabla 9. Diseño de mezcla, método ACI,	34
Tabla 10. Proporciones de cada una de las 12 mezclas desarrolladas.	46
Tabla 11. Relaciones utilizadas en cada una de las mezclas.....	47
Tabla 12. Resultados resistencia a compresión.....	52
Tabla 13. Resultados resistencia a Flexión.	54
Tabla 14. Resultados de infiltración.	58
Tabla 15. Resultados de porosidad.	61
Tabla 16. Resultados Concreto permeable (sin agregado fino, sin fibras)	71
Tabla 17. Resultados concreto permeable sin agregado fino, 3% fibras sintéticas	72
Tabla 18. Resultados concreto permeable (sin agregado fino, 5% fibras sintéticas).....	73
Tabla 19. Resultados concreto permeable (sin agregado fino, 7% fibras sintéticas).....	74
Tabla 20. Resultados concreto permeable con 5% de agregado fino, sin fibras sintéticas.	75
Tabla 21. Resultados concreto permeable con 5% de agregado fino, 3% de fibras sintéticas.	77
Tabla 22. Resultados concreto permeable con 5% de agregado fino, 5% de fibras sintéticas.	78

Lista de figuras

x

Ilustración 1. Montaje ensayo de resistencia a flexión. Fuente: Autor.	17
Ilustración 2. Montaje ensayo de resistencia a compresión. Fuente: Autor.....	19
Ilustración 3. Agregado grueso mono tamaño de fuente aluvial. Fuente: Autor.	21
Ilustración 4. Cilindros con diferente tamaño de agregado grueso (3/8" y 1/2")......	36
Ilustración 5. Clasificación de material por tamaño. Fuente: Autor.	36
Ilustración 6. Maquina tamizadora. Fuente: Autor.	37
Ilustración 7. Cilindros con diferentes porcentajes de agregado fino. Fuente: Autor.....	39
Ilustración 8. Cilindros con diferentes dosificaciones de aditivos. Fuente: Autor.	40
Ilustración 9. Mezcla con y sin aditivo reductor de agua. Fuente: Autor.	40
Ilustración 10. Compactación para cilindros de 100 mm de diámetro. Fuente: Autor.	41
Ilustración 11. Compactación para vigas. Fuente: Autor.....	42
Ilustración 12. Especímenes de vigas y cilindros. Fuente: Autor.	42
Ilustración 13. Cilindros 10 cm x 20 Cm. Fuente: Autor.....	43
Ilustración 14. Viga 15 cm x 15 cm x 50 cm. Fuente: Autor.....	43
Ilustración 15. Refrendado de cilindros. Fuente: Autor.....	44
Ilustración 16. Falla de viga, por ensayo de resistencia a flexión. Fuente: Autor.	44
Ilustración 17. Contenido de Fibras en una viga de concreto permeable. Fuente: Autor.	46
Ilustración 18. Mezcla con exceso de agua y aditivo. Fuente: Autor.	50
Ilustración 19. Espécimen con Agregado de cantera. Fuente: Autor.....	51
Ilustración 20. Espécimen con Agregado de rio. Fuente: Autor.....	51

Lista de gráficos.

Gráfico 1. Porcentaje de pasta, y contenido de vacíos. Fuente: (ACI, 2010) 32

Gráfico 2. Tasa de infiltración y contenido de vacíos. Fuente: (ACI, 2010) 34

Gráfico 3. Curva de desarrollo de resistencia a la compresión para todas mezclas. Fuente: Autor.
..... 53

Gráfico 4. Curva de desarrollo de resistencia a flexión para todas las mezclas. 56

Gráfico 5. Correlación entre la resistencia a flexión y la resistencia a compresión. Fuente: Autor
..... 57

Gráfico 6. correlación entre la tasa de infiltración y la porosidad. Fuente: Autor..... 60

Gráfico 7. Resistencia a la compresión relacionada con la porosidad. Fuente: Autor..... 62

Gráfico 8. Resistencia a la flexión relacionada con la porosidad. Fuente: Autor. 62

Capítulo 1.

Información General.

1. Introducción

El desarrollo de civilizaciones, y el crecimiento acelerado de las ciudades ha conllevado a que transformemos nuestro planeta originalmente permeable a ciudades impermeables las cuales no son sostenibles. Anteriormente la naturaleza podía evotranspirar, tenía un porcentaje de escorrentía superficial menor al 10% y un porcentaje de infiltración mayor al 70%, actualmente con el desarrollo, la escorrentía superficial supera el 80% y la infiltración no supera el 10%, Estos porcentajes de cambio en el ciclo hidrológico llevan a ocasionar desastres medioambientales los cuales son inadecuados, insostenibles e inviables, algunos de ellos son la potenciación de escorrentía, una mínima infiltración, aumento de la velocidad de flujo, aumento de contaminación física, química, térmica, etc, Mayor cambio de nivel de agua en los cauces, inundaciones, y desbalance hidrostático de los suelos. (Argos & Arango, 2016b)

Los pavimentos permeables han sido ampliamente considerados como una forma efectiva de restaurar la funcionalidad ecológica de los sistemas de carreteras urbanas, por esta razón es una de las tecnologías prometedoras del pavimento.

Por esta razón se planteó la presente investigación que estudia el comportamiento del concreto permeable, en cuanto a sus propiedades mecánicas e hidrostáticas, a partir de ensayos que permitan determinar el comportamiento del mismo, una búsqueda preliminar en fuentes bibliográficas ilustra que el uso de este pavimento se reduce a aplicaciones tales como aceras y estacionamientos, por ende uno de los objetivos del presente documento es establecer criterios para la utilización de nuevas tecnologías en el diseño de pavimentos, donde el concreto permeable pueda ser tomado como una opción oportuna, eficaz y eficiente, llevando así a una aplicación más alta del mismo en la infraestructura vial del país.

A partir del presente documento académico, se expondrán resultados que permitirán conocer las principales características de un pavimento permeable, así como las ventajas y desventajas del mismo. La investigación considera la adición de agregados finos en la mezcla, y la inclusión de diferentes porcentajes de fibras sintéticas, se realizan ensayos que permitan la correcta visualización y correlación al adicionar estos materiales alternativos en el diseño de pavimentos permeables, se presenta la caracterización de los materiales a emplear en la mezcla, así como la dosificación de aditivos, todo esto siguiendo lo estipulado en las normas que rigen los ensayos a realizar.

2. Objetivos

2.1. General

Desarrollar un concreto poroso, con adición de fibras sintéticas, que aumente el módulo de rotura para aplicaciones de unas exigencias superiores a las actuales, todo esto sin variar los diseños de sostenibilidad que tienen los concretos permeables.

2.2. Específicos

Recopilar y analizar la información bibliográfica a partir de publicaciones aprobadas y revisadas mediante entes académicos.

Realizar y ejecutar un plan de ensayos que permita cuantificar las propiedades mecánicas (Compresión y flexión) en estado fresco y endurecido de las muestras de concreto poroso. Medir la porosidad y tasa de infiltración de los especímenes.

3. Estado del Arte

3.1. Estado del Concreto Permeable a nivel Internacional

Para entender el concepto de concreto permeable, es necesario indagar y develar su aplicabilidad en el contexto económico actual. De acuerdo con Chandrappa & Biligiri,

(2016) “En los últimos años el uso de concreto permeable como material de pavimento en aplicaciones de carreteras de bajo volumen ha ganado importancia debido a sus impactos ambientales positivos” (p. 262).

Xie et al., (2019) expone los beneficios ambientales claves de los pavimentos de concreto permeable, en términos de:

- Reducción de la escorrentía de Aguas Pluviales
- Mejora en la calidad del agua subterránea
- Mitigación del efecto isla calor
- Reducción del ruido del tráfico
- Mejora de la resistencia al deslizamiento. (p. 1605)

Es por lo anterior que los pavimentos en concreto poroso presentan una serie de propiedades que resultan de gran interés para el desarrollo de estrategias ambientales, transformando ciudades desde la superficie. (Saadeh et al., 2019) concluye:

Los pavimentos totalmente permeables se caracterizan por servir como depósito para almacenar agua y minimizar los impactos negativos del agua de lluvia. Con base en los resultados de la evaluación del desempeño, se determinó que es posible desarrollar e implementar el diseño de un pavimento totalmente permeable como parte de un enfoque sostenible para las autopistas. (p. 1)

Debido al crecimiento acelerado de las ciudades y a la impermeabilización de las mismas es necesario desarrollar mecanismos que contribuyan a la evolución de la superficie urbana. (Zhu et al., 2019) afirma: “El pavimento permeable es parte de la medición del desarrollo de bajo impacto (LID), que puede disminuir el coeficiente de escorrentía de la superficie urbana y el flujo máximo de inundación”. (p.1).

El pavimento permeable es una de las tecnologías prometedoras del pavimento, y está documentado como la solución primordial en la gestión de aguas pluviales por la Agencia

de Protección Ambiental de los Estados Unidos, en donde se desarrolla un marco para identificar cómo se puede integrar el hormigón permeable en la infraestructura de bajo volumen (Rahman et al., 2015,p.77).

Una comprensión de la respuesta mecánica de los hormigones permeables en función del diseño, del material y los parámetros de la estructura de los poros es esencial para la utilización efectiva de este material. (Deo & Neithalath, 2011), para diseñar un Pavimento en Concreto Permeable es necesario conocer una serie de comportamientos característicos de los mismos, algunas de estas características nos las plantea (Sun, 2013) así: “Como para muchos medios porosos, se encuentran características comunes como: baja resistencia, propiedades elásticas y frágiles, que se ven significativamente afectadas por la porosidad de su estructura interna”. (p, 67)

(Lian et al., 2011), Chandrappa & Biligiri, (2017) y Kim et al., (2016), han realizado distintos estudios para la utilización efectiva de este material en función del diseño, del material y de los parámetros de la estructura de los poros, para así proporcionar una mejor predicción del comportamiento en función de la porosidad, y predecir la vida de fatiga mediante modelos de laboratorio que representan la angustia inducida por el tráfico.

Autores como Tang et al., (2019) y Agar-Ozbek et al., (2013), enuncian que el factor más importante en el concreto permeable está estrechamente relacionado con el material cementante, y los parámetros más significativos para mejorar las propiedades del mismo son el diseño de mezcla y la técnica de compactación, complementando lo descrito por los autores, Bhutta et al., (2012), nos expone las principales pruebas de laboratorio realizadas a los concretos permeables las cuales son: el flujo de asentamiento, la relación de huecos, el coeficiente de permeabilidad, la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión, y la tasa de desarrollo de resistencia.

En los últimos años se han desarrollado nuevas tecnologías en todo el mundo para mejorar la durabilidad de los pavimentos de concreto permeable sin aumentar significativamente sus requisitos de mantenimiento o sacrificar sus propiedades de infiltración. (Zhong & Wille, 2015). La aplicación del concreto permeable para autopistas todavía es limitada principalmente debido a los tres desafíos que enfrenta: resistencia limitada, vulnerabilidad a la obstrucción y problemas de durabilidad.

3.2. Estado del Concreto permeable en Colombia

Hacia el año 2000, surge el concepto denominado “Pavimento Permeable” en Colombia, el cual aplica a todos los campos de la construcción, incluyendo el de las tecnologías ambientales. La norma (ACI, 2010) define el pavimento permeable como: “Pavimento compuesto por un material con una red de vacíos continua que permite al agua pasar de la superficie a las capas inferiores” (p. 1-08). Cuando la red de vacíos tiene estas características permite el paso del agua, recreando su ciclo natural y facilitando su almacenamiento y posible reutilización.

Aunque el Pavimento Permeable era un sistema de drenaje muy eficiente, no tuvo gran acogida en el campo de la construcción debido a su uso limitado, el grupo Argos, siendo la empresa en la industria cementera colombiana más importante en el desarrollo de tecnologías sostenibles, y bajo su lema comunidad 360° en Concreto, diseño e implemento el primer tramo de prueba de un pavimento permeable, el cual se desarrolló en los parqueaderos de la Universidad EAFIT (Medellín-Antioquia), el área de drenaje es de 700 m², con un volumen de concreto permeable aplicado de 3.2 m³, y una tasa de infiltración de 160.5 L/s (7.5 L/s/m²), su puesta en funcionamiento fue el 2 de agosto de 2013 (Argos & Arango, 2016b).

Posterior a la implementación del primer Pavimento Permeable en Colombia, en el año 2015 se implementa un nuevo concepto: Pavimento Permeable de Colores, este término es la consolidación del desarrollo de nuevas tecnologías en el uso del concreto, pero que

tiene dos componentes fundamentales: El diseño y la Sostenibilidad, es aquí donde los criterios de la innovación en el Concreto tienen una aplicación más amplia, ya que encuentran soluciones a problemáticas particulares.

A partir del éxito que ha tenido la implementación del Pavimento en concreto permeable, hoy en día se ha extendido su uso, a glorietas y parques Municipales, como en el caso de las ciudades de Cartagena, Cali y Barranquilla.

El concreto permeable se ha utilizado cada vez más para reducir la cantidad de agua de escorrentía y mejorar la calidad del agua cerca de pavimentos y estacionamientos. Sin embargo, debido a la resistencia significativamente reducida asociada con la alta porosidad, las mezclas de concreto permeables actualmente no pueden usarse en estructuras de pavimento de carreteras. A pesar de las innumerables ventajas que presentan los pavimentos permeables, también traen consigo algunas desventajas, (Lopez et al., 2017) indica:

El uso del hormigón poroso fracaso debido a su baja durabilidad, pobre resistencia mecánica (resistencias a compresión máximas alcanzadas de entre 15 y 20 MPa), y escasa resistencia a la abrasión superficial, excluyéndose su empleo como material para la construcción de pavimentos expuestos al tráfico pesado. (p. 73).

Si bien los Pavimentos en Concreto Permeable, presentan desventajas, son mayores las ventajas que presentan en cuanto a sostenibilidad, y gestión de las aguas pluviales, es por esto que se están desarrollando nuevas tecnologías para mejorar la durabilidad y las propiedades mecánicas del mismo. En el futuro, con los avances en la tecnología de pavimentos y las regulaciones ambientales más estrictas, se anticipa que se utilizará pavimento permeable en las carreteras y autopistas urbanas (Kayhanian et al., 2019).

Con respecto a sistemas de drenaje urbano sostenible, Colombia ha presentado avances en cuanto a la regulación y estándares de los Pavimentos en Concreto Permeable, actualmente cuenta con la Consultoría de Apoyo al Desarrollo de la Política de Gestión

del Manejo de Aguas lluvias Urbanas, se cuenta con un borrador del decreto de drenaje urbano (pavimentos permeables), y el POT cuenta con 6 artículos acerca del uso de materiales y pavimentos permeables (artículo 229).

Adicionalmente en Medellín (EPM y Alcaldía) y Barranquilla (AGBAR) trabajan con el plan maestro de drenaje urbano de la ciudad, alineado con los sistemas urbanos de drenaje sostenible. (Argos & Arango, 2016a)

3.3. Adiciones del concreto permeable

Se ha demostrado a lo largo del tiempo que la incorporación de aditivos y adiciones al concreto puede mejorar su durabilidad y resistencia. Sin embargo ¿Cuál es el tipo de adición que al incorporarla al concreto permeable mejorara su comportamiento mecánico? Para resolver esta duda es necesario conocer cómo ha evolucionado el uso de adiciones en el concreto permeable.

Inicialmente se investigan las metodologías desarrolladas para mejorar el rendimiento del concreto permeable mezclado con varios materiales de construcción alternativos, tales como cenizas volantes, fibras y neumáticos. Los resultados experimentales muestran que la inclusión de cenizas volantes y neumáticos disminuye la capacidad de carga del hormigón permeable, mientras que la de las fibras aumenta la capacidad, así mismo aumenta la tasa de infiltración y el grado de mejora depende de sus configuraciones geométricas (Kim et al., 2016).

Teniendo en cuenta lo anterior, el uso de fibras se convierte en la principal adición de los concretos permeables, ya que por un lado sirven como puente de transferencia de carga a través de las fisuras aumentando la tenacidad del material y por el otro permiten absorber la energía durante una deformación antes de la ruptura, finalmente cuando se presenta la fisura, disminuyen el ancho de la misma y permiten que la estructura continúe trabajando. Para autores como Akand, Yang y Wang, (2018):

El refuerzo de fibra retrasa la generación de grietas y mejora la resistencia de la matriz del hormigón convencional. Sin embargo, el mecanismo de unión entre la fibra y la matriz es controvertido en la literatura y necesita una mejor explicación. El uso de fibras en concreto permeable es aún más desafiante debido a la alta porosidad y la interfaz insuficiente de unión entre la matriz y la fibra.

Antes de partir es necesario indagar en el tipo de fibra a emplear, se inicia por determinar los factores predominantes a los cuales van a estar expuestas las fibras y cómo será su posible respuesta ante el sistema de pavimento, Rehder et al., (2014) afirma “la resistencia a la fractura depende principalmente de la porosidad de los hormigones permeables. A tamaños de poro similares, el efecto de las fibras en la respuesta posterior al pico es más prominente en mezclas con una mayor porosidad, estos efectos se explican utilizando el espacio libre medio de poros y la tortuosidad en el sistema”. (p.12)

Aunque la mayor parte de las fibras se involucran con el concreto de manera exitosa, existe otro grupo de fibras que puede representar un comportamiento totalmente opuesto, un ejemplo de esto son las fibras metálicas, aunque si bien presentan un excelente comportamiento en cuanto a resistencia, Ahmed et al., (2019) nos expone: “Las fibras metálicas no son alentadoras como adición al concreto permeable debido al deterioro de las mismas por corrosión con el constante paso del agua a través del sistema”. (p.84) De acuerdo con Ahmed las fibras metálicas se descartan como una opción viable en el diseño del pavimento, ya que puede repercutir en la calidad del mismo.

Otro tipo de fibras poco alentadoras, son las fibras de acero, Caetano et al., (2019) indica: “la adición de fibras de acero mejora la energía de fractura del concreto aumentando su resistencia a la flexión y ductilidad a temperaturas ambiente”, teniendo en cuenta lo expresado por el autor este tipo de fibras no son una alternativa recomendable para lugares donde se presentan climas extremos, y/o cambios estacionales, ya que un aumento o disminución en la temperatura puede generar fallas en el sistema de pavimento.

Por otra parte se encuentran las fibras de PET (Tereftalato de polietileno), en su investigación Rostami et al., (2019) mostro que las propiedades mecánicas de las fibras de PET en un entorno alcalino se deterioran debido al fenómeno de reducción de peso, generando la creación de hoyuelos en la superficie de las fibras, esto proporciona una respuesta negativa al sistema.

Actualmente una de las adiciones más empleadas en este tipo de concreto, son las fibras de carbono, ya que proporcionan una solución ecológica para reciclar el material y es prometedora para mejorar las propiedades físicas y mecánicas del concreto permeable (Rangelov et al., 2016), aunque si bien este tipo de fibras se convierte en un ejemplo de aprovechamiento de materiales suplementarios en la construcción, como lo menciona el autor, es importante resaltar que las fibras de carbono no son de fácil acceso y su costo es elevado, lo cual no proporciona un beneficio económico.

Finalmente se encuentra que por beneficios económicos, de sostenibilidad y de propiedades mecánicas las fibras sintéticas son la mejor alternativa, de acuerdo con Dávila, (2011)

La incorporación de fibras sintéticas modifica la consistencia de la mezcla en estado fresco, reduciendo el agrietamiento por contracción plástica, y en estado endurecido incrementa la tenacidad, incrementa la resistencia al impacto, reduce la contracción por secado y reduce el agrietamiento. (p. 37)

Estudios experimentales como los realizados por Eidan et al., (2019), sobre las propiedades mecánicas de especímenes de concreto reforzado con fibra de polipropileno exhiben como resultado un mejor desempeño del concreto reforzado con fibras en comparación con el concreto simple.

Al explorar el comportamiento del concreto de alto rendimiento reforzado con fibras de polipropileno, Wang et al., (2019) obtuvo que “la resistencia aumenta, con el aumento del volumen de fibra, sin embargo la resistencia a la compresión aumenta ligeramente,

mientras que la resistencia a la flexión y la resistencia a la rotura mejoran significativamente” (p.464).

Aunque si bien el aumento de fibra, aumenta la resistencia del concreto, se debe establecer un equilibrio óptimo de resistencia - drenaje. Para Chen et al., (2013), “La resistencia a la flexión del concreto permeable es más sensible a la porosidad que la resistencia a la compresión”. (p.98) Este equilibrio óptimo se puede lograr mediante un diseño de mezcla que establezca como variable independiente el volumen de fibra a adicionar en la mezcla de concreto.

Al explorar la influencia que tiene el método de compactación en laboratorio, Bonicelli et al., (2016) proporciona información útil sobre la efectividad de la compactación en laboratorio, compara las propiedades de compactación con diferentes porcentajes de arena y varias fibras de refuerzo, y se obtiene que la compactación más efectiva se logra mediante el uso del método Proctor.

Por otro lado Zhong & Wille, (2018), investigan la influencia de la matriz, la cual se clasifica en normal, alta o ultra alta resistencia, con las características del sistema de poros es decir, tamaño de hueco y tortuosidad, para determinar mecanismos de falla, ya que de ellos depende un aumento o reducción en la resistencia del concreto y afecta directamente la durabilidad del mismo. Posteriormente, Xu et al., (2018), demuestra que la porosidad total del hormigón poroso muestra una relación lineal con la porosidad efectiva, y existe una relación de función de potencia entre la permeabilidad y la porosidad efectiva.

Adicional a la incorporación de fibras, también se realiza una revisión de concretos permeables suplementarios modificados con materiales cementosos, y concretos permeables modificados con polímeros.

López-Carrasquillo & Hwang, (2017), exponen “El principal material para la modificación de material cementante es la ceniza volante, ya que puede mejorar significativamente la resistencia a la compresión y la resistencia a la contracción en seco del hormigón poroso”.

Autores como Chang et al., (2016), Mohammed et al., (2018) , Zhang et al., (2011) H. Wang et al., (2019), y Hesami et al., (2014), evaluaron los efectos de la inclusión de ceniza volante sobre las propiedades del hormigón permeable que contiene cenizas volantes, Zhan mostro en sus resultados que se logró un aumento notable de la resistencia interfacial del hormigón permeable mediante la introducción de cenizas volantes y humo de sílice. Hesami encontró el punto de relación agua/cemento, a partir del cual el reemplazo de ceniza aumenta significativamente las propiedades mecánicas del hormigón permeable, finalmente Wang recomienda una relación Agua/cemento de (0.20–0.24) y 20% de contenido de cenizas volantes para producir concreto permeable de alta resistencia.

Por otra parte Zhou et al., (2016) y Huang et al., (2010) evalúan el comportamiento a la fatiga por flexión del concreto permeable modificado con polímeros. Según J. Chen et al., (2018) al realizar pruebas de obstrucción el Pavimento Permeable Modificado con polímeros (PPM) tiene una mejor resistencia a la obstrucción causada por la filtración de suspensiones del suelo en comparación con el concreto convencional. Adicionalmente Giustozzi, (2016) expone que las mezclas modificadas con polímeros, presentan un curado retrasado así como una mayor resistencia mecánica y durabilidad a los ciclos de deshilachado y congelación-descongelación. Por ultimo Tabatabaeian et al., (2019), compara el rendimiento de dos tipos de polímeros obteniendo que la resina de poliéster tiene un mejor rendimiento en comparación con la resina epoxi, siendo estos los dos tipos de polímeros más usados en la industria de los suplementos de construcción.

Además, se ha propuesto una prueba para determinar los efectos de los agentes reductores de agua y espesantes (cohesivos) en la auto compactación del concreto poroso de alto

rendimiento. (Lu et al., 2019) Afirma que el concreto permeable modificado con super plastificante muestra una excelente resistencia a la compresión y la tracción, debido a las excelentes propiedades de adhesión entre el agregado y el aglutinante.

3.4. Dosificación

Para diseñar un pavimento en concreto permeable, es necesario generar una serie de relaciones de materiales, que implican cambios en el comportamiento mecánico, así como en la forma que se evalúan los estándares de calidad.

(Lian & Zhuge, 2010a) indican que el hormigón permeable normalmente está hecho de agregado de un solo tamaño unido entre sí por cemento Portland, lo que conlleva a que se formen vacíos interconectados que permiten que el concreto transmita agua a velocidades relativamente altas.

La cantidad de cemento utilizada afecta el espesor del revestimiento del agregado, lo que tiene un efecto sobre la porosidad y otras propiedades mecánicas del hormigón, para (Torres et al., 2015) “el tamaño del vacío no se rige únicamente por el tamaño del agregado grueso, si no por el grosor de la pasta de cemento, ya que un revestimiento de cemento más grueso conducirá a una tasa de filtración menor al reducir la porosidad.”(p.7) Para distribuir uniformemente la pasta de cemento hacia el tamaño de la grava (Nguyen et al., 2014) propone un método modificado para el diseño del hormigón permeable basándose en dividir el volumen de pasta de cemento por el área superficial del agregado y así determinar el grosor del exceso de pasta.

El tamaño y tipo del agregado es quizá una de los factores predominantes en el diseño de la mezcla, dependiendo del tipo del agregado tendremos una respuesta favorable o desfavorable en cuanto a la resistencia a compresión. El resultado de la investigación realizada por (Korat et al., 2015) ilustra que la eficiencia del hormigón permeable fue sorprendentemente influenciada más por el tipo de agregado que por el tamaño.

(Grubeša et al., 2018), establece que desde el punto de vista hidrológico el tipo de agregado óptimo es aquel que presente bordes afilados, que permiten que el agua pase suavemente a través del sistema de poros, y concluye diciendo que la fracción de agregado más gruesa dará como resultado mejores propiedades hidráulicas y mecánicas del concreto permeable.

Según (Brake et al., 2016) la resistencia a la tracción y la energía de fractura inicial y total no dependen del tamaño, mientras que la resistencia a la flexión si depende de este. Otro enfoque con respecto al efecto del tamaño del agregado, lo proporciona (Ibrahim et al., 2014) expresando que propiedades como la permeabilidad, y la porosidad se ven significativamente afectadas al usar uno o dos tamaños de agregado grueso en la mezclas de concreto, además expone que la densidad es un factor eficaz para predecir la resistencia a la compresión y la porosidad.

El rendimiento puede mejorarse agregando una pequeña cantidad de arena fina, como lo sugieren distintos autores, para (Bonicelli et al., 2015) la arena puede conducir un mejor deshilachado y resistencia al deslizamiento, mejorando también la máxima resistencia a la flexión, por otra parte (Xu et al., 2018) concluye que el agregado fino puede mejorar la resistencia a la compresión y la durabilidad del concreto poroso como material base para carreteras en cuanto a resistencia a la erosión y la contracción.

Otro factor predominante en el diseño del concreto permeable es la relación agua-cemento, muchos autores han encontrado puntos de equilibrio para este tipo de concretos, este factor determina principalmente la porosidad y la resistencia a compresión.

Tabla 1. Información detallada de los diseños de mezcla estudiados para esta investigación.

Núm.	A/C	C (Kg)	Grava	Arena	Humo de Sílice	Súper plastificante	Fibras	Porosidad	Ref.
			mm-kg/m ³			ml o %			
1	0.3	400	4.75 - 9.5				0.5 - 1	19 - 25	(Rehder et al., 2014)
2	0.3	300	20 - 10 375 - 1125			990		26.1%	(Meddah & Hago, 2017)
3	0.34	295	4.75 - 9.5 1640					18%	(AlShareedah, Nassiri, & Dolan, 2019)
4	0.35	-	4.75 - 9.5 80% - 20%	10%		SI	SI	21.9%	(Bonicelli Alessandra, 2016)
5	0.345	285	4.75 - 9.5 1635			710	0.27 - 0.4	19 - 22	(AlShareedah, Nassiri, Chen, et al., 2019)
6	0.28	300	4.75 - 9.5 1716			1260		18%	(Rangelov et al., 2017)
7	0.34	400	4.75 - 9.5 1692	30%				0.597 cm/s	(Maguesvari & Narasimha, 2013)
8	0.32	438.26	19 - 2.36 1086.18	10% - 158.80				14%	(Debnath & Sarkar, 2019)
9	0.28	337.2	4.75 - 9.5 1632		59.5	3800 (Reologyca l Modifyer)	0.5 - 1 - 1.5	20%	(Rangelov et al., 2016)
10	0.22	1	3		0.25 - 0.25	0.036			(Zhong & Wille, 2016)
11	0.26	390	9.5 1440	109		1160		1.3 cm/s	(Shu et al., 2011)
12	0.3	370	10					0.25 cm/s	

			1398			3700 - 960 VMA			(Brake et al., 2016)
13	0.34	633	5- 10 1392						(Liu et al., 2019)
14	0.3	356.5	4.75 - 9.5 1550			11000 Modifyer		21%	(H. Zhou et al., 2019)
15	0.22	1	0.5		0.5	0.036			(Sartipi & Sartipi, 2019)
16	0.31		4.75 - 13 0.22		20% FA		0.3% - 0.5%	21.8%	(H. Wang et al., 2019)

Fuente: Autor.

4. Marco Teórico

Los materiales utilizados en el hormigón permeable son los mismos que en el hormigón normal, pero la dosificación de la mezcla es diferente. El objetivo del diseño de mezclas de hormigón permeable es lograr un equilibrio entre vacíos, resistencia, contenido de pasta y trabajabilidad (Kia et al., 2017).

Se han recomendado varios métodos de dosificación de mezcla, y el requisito más importante es proporcionar suficiente pasta de cemento para unir los agregados y así lograr una alta resistencia y contenido de vacíos. El método de volumen absoluto se utiliza a menudo en el diseño de mezclas, aunque el hormigón permeable puede tener diferentes requisitos de rendimiento no existe ningún método de diseño de mezcla universalmente aceptado.

4.1. Porosidad

La estructura de poros del hormigón permeable consta de grandes huecos interconectados con tamaños que van de 2 a 8 mm según la proporción de la mezcla, el agregado utilizado y el grado de compactación (Kia et al., 2017). El hormigón permeable también contiene muy finos poros capilares y de gel que son características inherentes de la pasta de cemento, con tamaños característicos que varían desde varios micrones hasta nanómetros.

Sin embargo, estos poros hacen una contribución insignificante al agua y por lo tanto son de menor interés. Como se señaló anteriormente, el contenido de huecos del hormigón permeable es típicamente 15-35%, dependiendo de una serie de variables como la fracción de pasta de cemento, el contenido de agregados, gradación y forma de las partículas, relación agua / cemento y esfuerzo de compactación (ACI, 2010).

Los hormigones con porosidad <15% tienden a dar filtración muy lenta del agua debido a la insuficiencia de vacíos interconectados (Meininger, 1988). Porosidades > 35% dan lugar a hormigones muy permeables, pero muy débiles.

4.2. Infiltración

La infiltración informa solo la cantidad de agua que atraviesa la superficie. El flujo es insaturado y se extiende lateralmente a través del pavimento. Posiblemente la mayor diferencia entre permeabilidad e infiltración es que la permeabilidad es flujo saturado y la infiltración es flujo insaturado (Kevern, 2015). La infiltración se realiza usando la norma ISO 17785-1:16. Una tasa de infiltración mínima de 200 pulgadas por hora (1.41 mm/s) es recomendado como mínimo para su aceptación. (National Ready Mixed Concrete Association •, n.d.)

4.3. Resistencia a flexión o módulo de rotura

La resistencia a la flexión en hormigones permeables generalmente varía entre aproximadamente 150 psi (1 MPa) y 550 psi (3,8 MPa). Muchos factores influyen en la resistencia a la flexión, particularmente el grado de compactación, porosidad y la relación agregado/cemento (A/C). Sin embargo, la aplicación típica construida con hormigón permeable no requiere la medición de la resistencia a la flexión para el diseño (Paul et al., 2004).

El ensayo de resistencia a flexión es una medida de la resistencia a la falla por momento de una viga o losa de concreto no reforzada. Se mide mediante la aplicación de carga a vigas de concreto de 150X150 mm de sección transversal y con una luz de tres veces el espesor. La resistencia a la flexión se expresa en MPa – kg.f/cm² y el ensayo se realiza de acuerdo a las exigencias de la norma NTC 2871 (Argos, 2019).



Ilustración 1. Montaje ensayo de resistencia a flexión. Fuente: Autor.

El ensayo de resistencia a la flexión de vigas se utiliza como un ensayo de control en el campo pero es una prueba que presenta diferentes dificultades en el momento de la evaluación, por esta razón cada vez son más los proyectos que han optado por hacer correlación entre compresión y flexión y utilizar el ensayo de compresión para calificar la calidad de un pavimento de concreto (Argos, 2019).

El cumplimiento de todas las exigencias de la norma NTC 2871 para realizar el ensayo a la flexión es extremadamente difícil, frecuentemente como resultado de los valores de módulo de rotura no son confiables y generalmente son bajos. Un periodo corto de secado o una falta de control en la velocidad de carga pueden producir una caída violenta de la resistencia a la flexión (Argos, 2019).

En muchos proyectos viales con pavimentos de concreto se ha recurrido al ensayo de resistencia a la flexión, pero ahora la tendencia es migrar hacia el ensayo de resistencia a

la compresión o resistencia a la tracción para el control de los ensayos y poder calificar la calidad de los pavimentos de concreto (Argos, 2019).

El ensayo de resistencia a la flexión es una herramienta útil en la investigación y en la evaluación de laboratorio de los ingredientes del concreto, pero no es el ensayo que se utiliza como base para la aceptación o rechazo de la calidad del concreto en pavimentos, lo útil es realizar un tramo de prueba y hacer correlación entre compresión y flexión y que el ensayo de compresión sea la prueba que califique la calidad del concreto (Argos, 2019).

4.4. Resistencia a Compresión

Las mezclas de hormigón permeable pueden desarrollar resistencias a la compresión en el rango de 500 psi a 4000 psi (3,5 MPa a 28 MPa), que es adecuado para una amplia gama de aplicaciones. Los valores típicos son aproximadamente 2500 psi (17 MPa). Como ocurre con cualquier hormigón, las propiedades y combinaciones de materiales específicos, así como técnicas de colocación y las condiciones ambientales, dictarán en el lugar la fuerza real (Paul et al., 2004).

Se necesitaría una resistencia de diseño de 13,8 MPa para aceras y senderos no expuestos a vehículos (Crouch et al., 2006). Pavimentos expuestos al tráfico requieren resistencias superiores a 20,7 MPa y, por lo general, se limitan a velocidades bajas y/o uso poco frecuente (Angela Susan Hager, 2008). La resistencia del hormigón permeable está determinada principalmente por la porosidad total.

Las investigaciones de correlación entre las resistencias de compresión y flexión han llevado a concluir que el ensayo de compresión es el método más indicado para calificar la calidad del concreto por ser un método más confiable y con menos incertidumbre (Argos, 2019).



Ilustración 2. Montaje ensayo de resistencia a compresión. Fuente: Autor.

5. Marco conceptual

5.1. Contenido de cemento y relación agua / cemento (a/c)

Se logra una alta resistencia a la compresión aumentando el contenido de cemento, pero el exceso de cemento da como resultado vacíos llenos y porosidad reducida. Por el contrario, la insuficiencia de cemento da como resultado un recubrimiento deficiente del agregado y baja resistencia a la compresión (Kia et al., 2017).

El contenido óptimo de cemento depende del tamaño y distribución del agregado, el Comité (ACI, 2010) recomienda una relación a/c de 0.26-0.40 para producir un buen agregado. Las relaciones a/c más bajas provocan la formación de bolas y el pegado del hormigón durante el mezclado, mientras que las relaciones a/c más altas producen una pasta fina que puede escurrir el agregado durante la colocación, bloqueando poros (Meininger, 1988). De manera similar, un alto contenido de pasta de cemento puede causar obstrucciones localizadas cuando la pasta se escurre por el hormigón permeable, lo que da como resultado una capa inferior densa y rica en pasta, lo cual producirá

hormigones con poca capacidad de infiltración a pesar de la alta porosidad (Kia et al., 2017).

5.2. Agregados

Los agregados en el concreto permeable son de un solo tamaño o de un grado estrecho entre 9,5 y 19 mm (ACI, 2010). La graduación estrecha y el tamaño de partícula más grande producen poros más grandes y mejora la permeabilidad. Mezclar agregados de diferentes tamaños mejora las propiedades mecánicas, pero esto no se recomienda para hormigón permeable porque reduce la porosidad y las tasas de infiltración (Schaefer & Kevern, 2011).

Los agregados redondeados, como la grava, producen un menor contenido de huecos y aumentan la resistencia a la compresión. Los agregados angulares tienden a orientarse en un plano durante la compactación, lo que afecta negativamente al contacto área y vinculación. Se evitan las partículas agregadas escamosas y alargadas. (Lian & Zhuge, 2010b)

El agregado utilizado debe cumplir los requisitos de la norma ASTM D448 y C33 / C33M. Los pesos unitarios de los agregados deben determinarse de acuerdo con la norma ASTM C29 / C29M. El agregado grueso de grado estrecho debe ser duro y limpio, y libre de revestimientos, como polvo o arcilla, u otros productos químicos absorbidos que puedan perjudicar o afectar la unión de la pasta / agregado o la hidratación del cemento. La humedad agregada en el momento de la mezcla es importante, la absorción agregada debe satisfacerse acondicionando el apile según sea necesario para lograr una condición de superficie seca saturada (SSD). De lo contrario, un agregado seco puede resultar en una mezcla que carece de una adecuada trabajabilidad para la colocación y compactación, los agregados demasiado húmedos pueden contribuir al drenaje de la pasta, causando una obstrucción intermitente de la estructura vacía prevista (ACI, 2010).



Ilustración 3. Agregado grueso mono tamaño de fuente aluvial. Fuente: Autor.

El contenido de Agregado fino está limitado en mezclas de hormigón permeable porque tiende a comprometer la conectividad del sistema de poros. La adición de agregado fino puede aumentar la resistencia a compresión y la densidad, pero en consecuencia reducen el flujo de agua a través de la masa de hormigón permeable (ACI, 2010). El agregado fino generalmente se excluye del concreto permeable, pero la adición de una pequeña fracción (hasta un 7% en peso de agregado grueso) aumenta las resistencias a compresión, flexión, densidad y durabilidad de congelación-descongelación, manteniendo una capacidad de infiltración suficiente (Schaefer & Kevern, 2011)

5.3. Aditivos

Los aditivos químicos se utilizan para mejorar las propiedades de los hormigones permeables en estado fresco y endurecido de manera similar al hormigón normal. Los aditivos reductores de agua deben cumplir con los requisitos de ASTM C494 / C494M, se dividen en alto o medio rango y se utilizan dependiendo de la relación a/c. los aditivos retardantes se utilizan para estabilizar y controlar la hidratación del cemento, se prefieren con frecuencia cuando se trata de mezclas rígidas como el hormigón permeable, estos pueden actuar como lubricantes para ayudar a extender el tiempo de trabajo de la mezcla y mejorar la trabajabilidad, Con el uso de múltiples aditivos en cualquier mezcla de hormigón, se recomienda que se realice una colocación de mezcla de prueba para identificar cualquier problema de incompatibilidad de aditivos. Los aditivos

incorporadores de aire deben cumplir los requisitos de ASTM C26, hasta que se disponga de mayor cuerpo de investigación, puede ser prudente incluir un aditivo incorporador de aire. Los aditivos modificadores de la viscosidad pueden producir una mezcla cohesiva e inhibe el drenaje de la pasta (ACI, 2010).

5.4. Fibras

El concreto es un material que puede fisurarse bien sea por su composición, por cambios térmicos o por diversos esfuerzos que sobrepasan su resistencia, es aquí donde las fibras se convierten en un buen aliado: se utilizan como refuerzo secundario para concreto en general y pueden ser metálicas, de vidrio, naturales o sintéticas. En esta investigación nos centraremos en las fibras sintéticas, las cuales ayudan a disminuir las fisuras por retracción plástica generadas durante el secado del concreto, por choques térmicos o por cambios bruscos de temperatura (Argos, 2019).

Las fibras sintéticas para concreto se fabrican a partir de materiales sintéticos que pueden resistir el medio alcalino del concreto a largo plazo. Generalmente tienen secciones pequeñas que se distribuyen aleatoriamente dentro del concreto, y pueden ser de poliéster, polietileno, polipropileno o nylon.

Las fibras sintéticas previenen fisuras que son provocadas a partir de cambios volumétricos que exceden la resistencia del concreto en un determinado momento, mejoran notablemente la capacidad para resistir las cargas que ocasionan la rotura del concreto, y minimizan el efecto ocasionado por las fuerzas de rotura, manteniendo al concreto fuertemente unido. Las fibras sintéticas son compatibles con todos los aditivos y la química de los cementos (Argos, 2019).

Según su tamaño, las fibras pueden clasificarse en microfibras y macrofibras. Las microfibras Se utilizan principalmente para minimizar el agrietamiento por el secado del concreto, es decir, en estado fresco, y no aportan capacidad estructural, y las Macrofibras,

Se utilizan para prevenir la fisuración en estado endurecido, y para mejorar el desempeño después del agrietamiento de elementos de concreto sometidos a esfuerzos de flexión y tensión causados por cargas últimas, contracción o temperatura, alcanzando resistencias equivalentes a las alcanzadas con refuerzo convencional (Argos, 2019).

5.5. Curva Granulométrica

Para mayor facilidad de comprensión, los resultados del análisis granulométrico se representan de manera gráfica mediante la curva de granulometría. La cual registra el porcentaje acumulado que pasa a través de los tamices y las aberturas de los mismos (Guzmán, n.d.). (Véase anexos)

5.6. Densidad Aparente

Está definida como la relación que existe entre el peso de la masa del material y el volumen que ocupan las partículas de ese material, incluidos todos los poros, saturables y no saturables (Guzmán, n.d.).

$$Densidad\ aparente = \frac{Ps}{Vm} \quad (1)$$

Donde Ps: peso seco de la masa (m)

Vm: Volumen ocupado por la masa (m)

5.7. Densidad Nominal

La densidad nominal se define como la relación que existe entre el peso de la masa del material y el volumen que ocupan las partículas de ese material, incluidos los poros no saturables (Guzmán, n.d.).

$$\text{Densidad nominal} = \frac{P_s}{V_m - V_{Ps}} \quad (2)$$

Donde V_{Ps} : Volumen de los poros saturables

5.8. Absorción

La capacidad de absorción de las partículas de agregado se puede determinar fácilmente por diferencia de pesos, entre el peso saturado y superficialmente seco y el peso seco, expresado como un porcentaje del peso seco (Guzmán, n.d.).

$$\% \text{absorción} = \frac{P_{SSS} - P_s}{P_s} * 100 \quad (3)$$

Donde P_{SSS} : Peso de la muestra saturada y superficialmente seca

P_s : Peso seco de la muestra

5.9. Masa Unitaria Compactada

Se entiende por masa unitaria compactada el grado de acomodamiento de las partículas del agregado cuando se ha sometido a vibración, ya que esta mejora el acomodamiento y aumenta la masa unitaria (Guzmán, n.d.).

5.10. Masa Unitaria Suelta

Se denomina masa unitaria suelta la del material que se encuentra en estado normal de reposo porque el volumen que ocupa es mayor y por lo tanto su masa unitaria es menor (Guzmán, n.d.).

Capítulo 2

Diseño Experimental

6. Pruebas piloto (Fase I)

Ante la inexistencia de un método normalizado para el diseño de mezclas de concretos permeables, fue necesario realizar una fase experimental para obtener el diseño de mezcla óptimo, y el tamaño de agregado óptimo para este tipo de concretos, a esta fase experimental se le denominó pruebas piloto.

De esta forma, se tomó como referencia el diseño de mezcla sugerido por American Concrete Institute (ACI) y Portland Cement Association (PCA), estos documentos desarrollan diferentes tipos de metodologías para el diseño de concretos, si bien la ACI 522R-10 se centra en el diseño de concretos permeables, la PCA brinda una metodología de diseño de concreto convencional que es factible para el diseño de concretos porosos.

6.1. Método PCA

El proceso de determinación de las características requeridas del concreto y que se pueden especificar se llama diseño de mezcla. Las características pueden incluir, propiedades del concreto fresco, propiedades mecánicas del concreto endurecido y la inclusión, exclusión o límites de ingredientes específicos.

La primera etapa para el proporcionamiento del concreto es la elección de la relación agua-material cementante apropiada para la resistencia y durabilidad necesarias. La relación agua-material cementante es simplemente la masa del agua dividida por la masa del material cementante. La elección de la relación agua-cemento se debe basar en los requisitos de resistencia a compresión, lo cual se aplica a un concreto convencional, sin embargo, teniendo en cuenta que es un concreto permeable se adopta una relación agua/cemento de 0.32.

Tabla 2. Relación agua-material cementante y resistencia a compresión del concreto.

Dependencia entre la Relación Agua-Material Cementante y la Resistencia a Compresión del Concreto		
Resistencia a los 28 días (kg/cm ²)	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
450	0.38	0.31
400	0.43	0.34
350	0.48	0.4
300	0.55	0.46
250	0.62	0.53
200	0.7	0.61
150	0.8	0.72

Fuente: (Portland Cement Association, 2004).

El contenido de agua se influencia por un gran número de factores: tamaño, forma y textura del agregado, revenimiento, relación agua-material cementante, contenido de aire, tipo y contenido de material cementante, aditivos y condiciones ambientales. A partir de la Tabla 3, se obtiene la cantidad de agua de mezcla dependiendo de la cantidad de aire, la exposición, el revenimiento (asentamiento) y el tamaño máximo nominal del agregado grueso.

Un factor importante para determinar el contenido de agua, es la inclusión de aire, esta se logra con el uso de cemento portland con inclusor de aire o con la adición de aditivo inclusor de aire en el proceso de mezclado. La cantidad de aditivo se debe ajustar para compensar las variaciones de los ingredientes en el concreto y de las condiciones de la obra. La cantidad recomendada por el fabricante del aditivo producirá, en la mayoría de los casos, el contenido deseado.

Otro factor determinante es el asentamiento, el ensayo de revenimiento (asentamiento) se usa para medir la consistencia del concreto, cuanto mayor el revenimiento, más húmeda es la mezcla. Siempre se debe producir el concreto para que tenga trabajabilidad, consistencia y plasticidad adecuadas con las condiciones de la obra.

Tabla 3. Agua de mezcla y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales del agregado.

Requisitos Aproximados de Agua de Mezcla y Contenido de Aire para Diferentes Revenimientos y Tamaños Máximos Nominales del Agregado								
Revenimiento (cm)	Agua en kg/m ³ para concreto con tamaño máximo nominal (mm) indicado							
	9.5	12.5	19	25	38	50	75	150
Sin Aire Incluido								
2.5 a 5.0	207	199	190	179	166	154	130	113
7.5 a 10	228	216	205	193	181	169	145	124
15 a 17.5	243	228	216	202	190	178	160	-
Cantidad de aire aproximada en concreto.	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Con Aire Incluido								
2.5 a 5.0	181	175	168	160	150	142	122	107
7.5 a 10	202	193	184	175	165	157	133	119
15 a 17.5	216	205	197	174	174	166	154	-
Cantidad de aire aproximada en concreto.								
Exposición ligera	4.5	4	3.5	3	2.5	2	1.5	1
Exposición media	6	5.5	5	4.5	4.5	4	3.5	3
Exposición severa	7.5	7	6	6	5.5	5	4.5	4

Fuente: (Portland Cement Association, 2004)

Los aditivos reductores de agua se adicionan al concreto para reducir la relación agua-material cementante, la cantidad de material cementante, el contenido de agua, el contenido de pasta o para mejorar la trabajabilidad del concreto sin cambiar la relación agua-material cementante.

Teniendo en cuenta que se tiene un aditivo reductor de agua de alto rango, el cual reduce en un 15% la cantidad de agua por m³, se realizar la siguiente operación:

$$\text{Cantidad de agua con aditivo} = 175 * (1 - 15\%) = 149 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (4)$$

El contenido de materiales cementantes frecuentemente se determina a través de la relación agua-material cementante elegida y del contenido de agua.

$$\frac{149 \text{ kg/m}^3}{0.32} = 464.84 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (5)$$

Tabla 4. Cantidad de agua, y contenido de cemento diseño PCA.

Cantidad de agua y cemento	
Cantidad de Agua (Kg/m ³)	175.00
Cantidad de Agua con Aditivo (Kg/m ³)	148.75
Cc (kg/m ³)	464.84

Fuente: Autor.

Dos características de los agregados tienen una influencia importante en el proporcionamiento de las mezclas de concreto porque afectan la trabajabilidad del concreto fresco: Granulometría (tamaño y distribución de las partículas) y Naturaleza de las partículas (forma, porosidad, textura de la superficie). Los tamaños mayores minimizan los requisitos de agua y, por lo tanto, permiten la disminución del contenido de cemento. Un agregado redondeado requiere menos agua de mezcla que un agregado triturado, en concretos con el mismo revenimiento, aunque el agregado redondeado presenta problemas de resistencia, por lo cual no es recomendable su uso.

El tamaño máximo del agregado grueso que producirá el concreto con la mayor resistencia, para un dado contenido de cemento, depende de la fuente del agregado, como de su forma y granulometría.

El volumen de agregado grueso se puede determinar a través de la Tabla 5. Estos volúmenes se basan en agregados en la condición varillados en seco para concretos convencionales, teniendo en cuenta que en esta investigación se diseña un concreto permeable sin adición de agregado fino la cantidad de agregado grueso, se determinar a

partir del método de volumen absoluto, ya que es el método más preciso y envuelve el uso de las densidades (gravedad específica) de todos los ingredientes para calcular el volumen absoluto que cada uno de ellos ocupará en una unidad de volumen de concreto.

Tabla 5. Volumen de Agregado grueso por volumen unitario de concreto.

Tabla 9-4. Volumen de Agregado Grueso por Volumen Unitario de Concreto				
Tamaño máximo nominal de AG (mm)	Volumen varillado en seco			
	2.4	2.6	2.8	3
9.5	0.5	0.48	0.46	0.44
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
19	0.66	0.64	0.62	0.6
25	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5	0.75	0.73	0.71	0.69
50	0.78	0.76	0.74	0.72
75	0.82	0.8	0.78	0.76
150	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: (Portland Cement Association, 2004)

El volumen absoluto del material granular (tales como cemento y agregados) es el volumen de la materia sólida en las partículas y no incluye el volumen de los vacíos de aire entre ellas. El volumen (rendimiento) del concreto fresco es igual a la suma de los volúmenes absolutos de sus ingredientes – materiales cementantes, agua, agregados, aditivos cuando se los utiliza y aire. El volumen absoluto se calcula a partir de la masa de los materiales y las densidades relativas (gravedad específica).

$$\text{Volumen absoluto} = \frac{\text{masa de material suelto}}{\text{densidad relativa del material} * \text{densidad del agua}} \quad (6)$$

Tabla 6. Calculo de volúmenes método PCA.

Calculo de Volúmenes	
Volumen de Agua (m3)	0.149
Volumen de cemento (m3)	0.148
Volumen de aire	0.040
Volumen agregado grueso (m3)	0.664
Volumen total	1.000
Volumen agregado fino (m3)	0.000

Fuente: Autor.

Finalmente, se obtiene el diseño de mezcla por metro cubico.

Tabla 7. Diseño de mezcla método PCA.

Diseño final	
Cemento (kg/m3)	464.84
Agua (kg/m3)	148.75
Grava (kg/m3)	1753.00
Masa total (kg/m3)	2366.59

Fuente: Autor.

Se deben realizar correcciones por humedad, teniendo en cuenta que en la práctica, los agregados contienen una cantidad mensurable de humedad, por lo tanto, se deben aumentar para compensar la humedad que se absorbe y que se retiene en la superficie de cada partícula y entre las partículas. El agua de mezcla que se adiciona se debe reducir por la cantidad de humedad libre de los agregados (Portland Cement Association, 2004).

6.2. Método ACI

El procedimiento para producir pruebas iniciales para concreto permeable, se realiza mediante el método b/bo basado en el concepto de volumen absoluto. Para diseñar la mezcla de un hormigón permeable se puede dividir el método en una serie de ocho pasos:

1. Determine el peso agregado;
2. Ajuste al peso del SSD;
3. Determine el volumen de la pasta;
4. Determinar el contenido de cemento;
5. Determine el contenido de agua;
6. Determine el volumen de sólidos;
7. Verifique el contenido vacío;

Se deben realizar pruebas para garantizar las propiedades requeridas; y ajustar las proporciones de la mezcla hasta obtener el rendimiento requerido.

El método propuesto por (ACI, 2010), recomienda una relación agua/material cementante que este entre el rango de 0.26 y 0.45. En este proyecto se adopta una relación a/c de 0.32. Se debe tener un contenido de vacíos igual o mayor del 15%, ya que un contenido de vacíos inferior no permitirá una rápida filtración.

1. Determinar el peso del agregado grueso: Se realiza el cálculo a partir de la densidad del agregado grueso, y a partir de la relación b/bo, obtenida de la tabla 6, para un porcentaje de 0% de agregado fino, y un tamaño de agregado grueso de 9.5 mm.

Tabla 8. Relación b/bo y porcentaje de agregado fino.

Porcentaje de agregado fino	b/bo	
	9.5	19
0	0.99	0.99
10	0.93	0.93
20	0.85	0.86

Fuente: Autor.

$$W_a = 1600 \frac{kg}{m^3} * 0.99 * 1m^3 = 1584 kg \quad (7)$$

2. Ajuste al peso del SSD: Teniendo en cuenta que el porcentaje de absorción es 1.1%, se realiza el ajuste al peso del agregado grueso.

$$W_{ssd} = 1584 * \left(1 + \frac{1.1}{100}\right) = 1601.42 Kg \quad (8)$$

3. Determinar el volumen de pasta

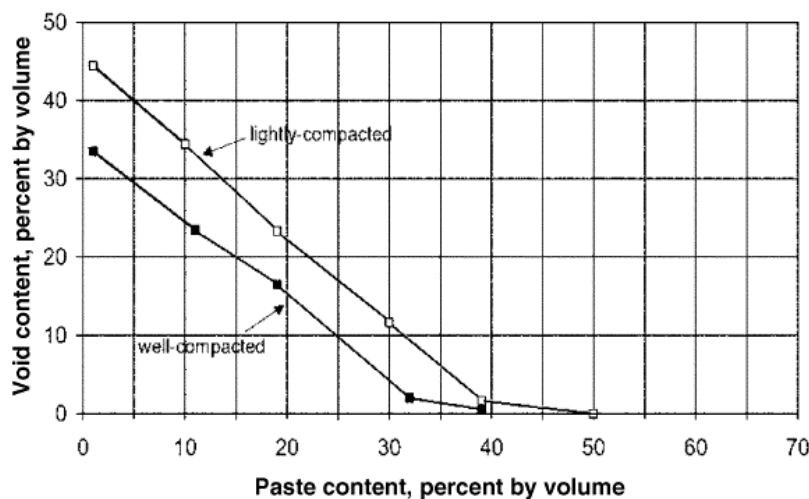


Gráfico 1. Porcentaje de pasta, y contenido de vacíos. Fuente: (ACI, 2010)

Porcentaje de vacíos: 15%

Curva bien compactada.

Porcentaje de pasta: 0.196 de un metro cubico

$$V_p = 15\% * 1 m^3 = 0.15 m^3$$

4. Determinar el contenido cementoso

$$C_c = \frac{V_p}{0.315 * w/c} \quad (9)$$

$$C_c = \frac{0.15}{0.315 * 0.32} * 1000 = 236.22 kg/m^3$$

5. Determinar el contenido de agua

$$w = Cc * \frac{w}{c} \quad (10)$$

$$w = 236.22 \frac{kg}{m^3} * 0.32 = 75.59 \frac{kg}{m^3}$$

6. Determinar el volumen sólido

$$Va = \frac{1601.42 \text{ Kg}}{1000 \frac{kg}{m^3} * 2.64} = 0.60 \text{ m}^3$$

$$Vc = \frac{236.22 \text{ kg/m}^3}{3.15 * 1000 \text{ kg/m}^3} = 0.074 \text{ m}^3$$

$$Vw = \frac{75.59 \text{ kg/m}^3}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0.075 \text{ m}^3$$

7. Volumen total solido

$$Vs = Va + Vc + Vw = 0.7571 \text{ m}^3$$

8. Contenido de vacíos

$$\%vacios = \frac{(V_{tot} - Vs)}{V_{tot}} * 100 \quad (11)$$

$$\%vacios = \frac{(1 \text{ m}^3 - 0.7571 \text{ m}^3)}{1 \text{ m}^3} * 100 = 24.28\%$$

9. Tasa de Infiltración

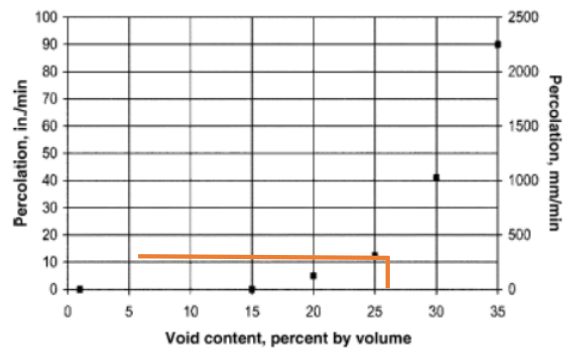


Gráfico 2. Tasa de infiltración y contenido de vacíos. Fuente: (ACI, 2010)

$$T_i = 12 \text{ in./min} = 304.8 \text{ mm/min}$$

10. Peso total

$$W_t = W_{ssd} + W_c + W_s \quad (12)$$

$$W_t = 1913.23 \text{ kg}$$

11. Densidad

$$W_t = \frac{1913.23 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3} = 1913.23 \text{ kg/m}^3$$

Tabla 9. Diseño de mezcla, método ACI,

Volumen de pasta (m3)	0.15
Contenido de cemento (kg/m3)	236.22
Contenido de agua (kg/m3)	75.59
Contenido de agregado fino (kg/m3)	0

Volumen de agregado grueso (m3)	0.607
Volumen de cemento (m3)	0.075
Volumen de arena (w)	0.000
Volumen de agua (m3)	0.076

Vs (m3)	0.76
% Vacíos	24.28
Tasa de inf. (mm/min)	304.80
Masa total (kg/m3)	1913.24
Densidad C	1913.24

Fuente: Autor.

6.3. Tamaño Óptimo de Agregado Grueso

La resistencia a compresión del concreto con una determinada relación agua-cemento no es independiente de la granulometría del agregado. Una de las principales características del concreto permeable es el mono tamaño de su partículas, por esta razón se debe evaluar qué tamaño de agregado representa las mejores condiciones tanto mecánicas como hidráulicas, y de tal forma que permita compactar la mezcla con un uso moderado de energía.

Para la elección tanto del método de diseño como del tamaño del agregado, se realizan 4 mezclas en las cuales se analiza el método PCA con tamaño de agregado de 1/2" (12.5 mm) y 3/8" (9.5 mm) y el método ACI para tamaño de agregado de 1/2" (12.5 mm) y 3/8"(9.5 mm), se evalúa su comportamiento mediante ensayos de resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de 10 cm x 20 cm, siguiendo lo establecido en la norma ASTM C39, y se realizan ensayos de infiltración y porosidad, para un total de 48 cilindros, en esta fase experimental no se utilizó ningún tipo de aditivo, ni agregado fino.



Ilustración 4. Cilindros con diferente tamaño de agregado grueso (3/8" y 1/2").

Fuente: Autor.

6.3.1. Granulometría

La granulometría está definida como la distribución de los tamaños de las partículas que constituyen una masa de agregados. Se determina mediante el análisis granulométrico que consiste en dividir una muestra de agregado en fracciones de igual tamaño. La medida de la cuantía de cada una de estas fracciones es lo que se conoce como granulometría (Guzmán, n.d.).



Ilustración 5. Clasificación de material por tamaño. Fuente: Autor.

La operación de separar una masa de agregado en fracciones de igual tamaño, consiste en hacer pasar este a través de una serie de tamices que tienen aberturas cuadradas y cuyas características deben ajustarse a la norma NTC -32.

Para fines de esta investigación se realizó un proceso de tamizado a todo el agregado grueso y fino que se requirió, se clasifico por su tamaño y se dispuso para ser utilizado como mono tamaño.



Ilustración 6. Máquina tamizadora. Fuente: Autor.

7. Pruebas piloto (Fase II)

Después de realizar los ensayos de caracterización de los agregados en el laboratorio y comprobar que cumplen con los parámetros para ser utilizados en mezclas de concreto, se procede a realizar la segunda fase de las pruebas piloto.

Se busca encontrar la dosificación óptima teniendo en cuenta la condición más crítica, es decir, el diseño de mezcla que contempla un dado porcentaje de agregado fino, y el uso de cuatro aditivos, para obtener esta dosificación optima se realiza una gran variedad de ensayos, en los cuales se varia principalmente el porcentaje de arena a utilizar, inicialmente se plantean ensayos con tres porcentajes de agregado fino (5%, 10% y 15%) con respecto a la masa de agregado grueso, se analiza también la reducción de material

cementante por agregado fino, posterior a obtener el porcentaje de arena indicado, se procede a determinar la cantidad en cm^3/kg de cada uno de los aditivos, buscando que no se vea afectada la consistencia y trabajabilidad de la mezcla, para la dosificación de estos aditivos seguimos la guía ofrecida por la empresa Toxement, proveedores de los aditivos y fibras a emplear en esta investigación.

7.1. Caracterización de materiales

El análisis granulométrico del agregado fino y del agregado grueso se realizó siguiendo las normas ASTM C33 y NTC 174. Posterior al análisis granulométrico se realiza la determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de los agregados siguiendo la norma NTC 82, el método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino se toma de la norma NTC 237, el método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso se toma de la norma NTC 178, finalmente se obtiene el gráfico de Rugosidad (Coarseness Chart). Los materiales utilizados en esta investigación fueron suministrados por la empresa de cementos Argos.

7.2. Contenido de Agregado fino

Para la determinación del contenido de agregado fino, se realizaron diferentes mezclas unitarias, para observar principalmente las propiedades en estado fresco, al obtener la consistencia, manejabilidad y contenido de vacíos deseado, se procede a realizar ensayos de resistencia a una edad de 7 días. Se analizaron distintos porcentajes de agregado fino, las primeras mezclas se realizaron con 10% de agregado con respecto al volumen de agregado grueso, posteriormente se fue reduciendo este porcentaje hasta obtener el porcentaje óptimo de agregado fino.

En la ilustración 7, se puede observar los diferentes comportamientos de los especímenes realizados con diferentes porcentajes de arena, cabe resaltar que el diseño de mezcla presenta gran susceptibilidad al agregado fino.



Ilustración 7. Cilindros con diferentes porcentajes de agregado fino. Fuente: Autor.

7.3. Dosificación de aditivos

Antes de elaborar el diseño de mezcla definitivo, se realizaron algunas mezclas preliminares para observar el comportamiento de las mezclas, su manejabilidad, fluidez y consistencia, allí se observó que era necesario utilizar aditivos para mejorar el desempeño de las mezclas de concreto poroso.

Se decidió utilizar cuatro aditivos, para cada uno de los cuales se realizaron ensayos individuales, posteriormente se verificó la compatibilidad de los mismos en la mezcla. En la ilustración 8, se puede observar el desarrollo y avance con cada uno de los aditivos, especialmente el aditivo Plastol Extender 3600, encargado de reducir la cantidad de agua, se puede observar que un exceso en el mismo conlleva a un cierre total de los poros en la parte inferior de los cilindros o puede generar una base plana en la parte inferior del mismo. La dosificación del aditivo Euco Estabilizador 2000, fue sugerida por la empresa Toxement, al igual que del aditivo Eucon ABS y Airtoc D, se realizaron los

correspondientes ensayos para verificar la dosificación de los mismos y se realizaron los correspondientes ajustes a las cantidades obtenidas.



Ilustración 8. Cilindros con diferentes dosificaciones de aditivos. Fuente: Autor.



Ilustración 9. Mezcla con y sin aditivo reductor de agua. Fuente: Autor.

7.4. Método de compactación

Debido a las características especiales de esta tipología de concreto, se debe realizar un proceso de compactación adecuado para obtener la densidad y resistencias mínimas esperadas; en esta investigación se evaluaron tres tipos de compactación, el primero se realizó en la Fase I de las pruebas piloto en el cual la compactación se realizó por apisonamiento con varilla, como lo expone la norma NTC 1377, para las dimensiones de

los cilindros la norma específica dos capas con 25 golpes para cada capa, distribuyendo uniformemente los golpes sobre la sección transversal del molde. Una vez completada la consolidación, se golpea ligeramente el lateral del molde con un martillo de plástico para eliminar la espuma generada por la varilla de compactación.

El segundo método de compactación se analizó en la Fase II de las pruebas piloto, en este caso se compactaron los cilindros mediante el método proctor, realizando dos capas con 25 golpes cada capa.

El tercer método de compactación, es el definido para las mezclas en estudio, se realiza mediante un martillo proctor, reduciendo el número de golpes por capa, teniendo en cuenta que no se registran antecedentes de compactación para concretos permeables, se adopta este método de compactación siguiendo las investigación de diferentes autores, al reducir el número de golpes por cada, se disminuye la energía de compactación lo cual favorece a la porosidad y a la tasa de infiltración, evitando la obstrucción de los poros y permitiendo que el agua fluya con mayor rapidez, A continuación se presenta el gráfico de distribución de golpes para cilindros de 100 mm de diámetro.

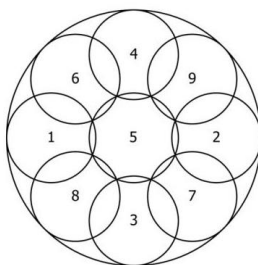


Ilustración 10. Compactación para cilindros de 100 mm de diámetro. Fuente: Autor.

Para las vigas, se realizaron dos capas en las cuales los golpes del martillo proctor se distribuían en tres líneas a lo largo del molde lo más uniformemente que fuera posible.

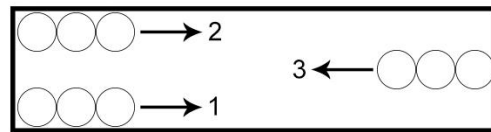


Ilustración 11. Compactación para vigas. Fuente: Autor.

8. Diseño Final

Se diseñaron 8 mezclas bajo condiciones de laboratorio usando normativa ASTM desarrollada para concreto convencional, ya que no existe normativa específica para concreto permeable.

Las mezclas se identificaron como M-XX donde las X corresponden con la numeración, desde la 1 hasta la 12, en orden cronológico. Para las mezclas se fabricaron 12 cilindros de 10 cm x 20 cm para la resistencia a la compresión uniaxial, y 6 vigas de 50 cm x 15 cm x 15 cm para la resistencia flexión. En todos los casos se tuvieron al menos 3 cilindros de 10 cm x 20 cm para las pruebas de porosidad e infiltración. Se obtuvo un total de 96 cilindros y 48 vigas.



Ilustración 12. Especímenes de vigas y cilindros. Fuente: Autor.



Ilustración 13. Cilindros 10 cm x 20 Cm. Fuente: Autor.



Ilustración 14. Viga 15 cm x 15 cm x 50 cm. Fuente: Autor.

Las pruebas de resistencia a compresión uniaxial se hicieron de acuerdo con la norma ASTM C-39/C39M – 14, para esto se decidió ensayar a 3 edades: 7, 14, y 28 días.

La determinación de la resistencia a la compresión uniaxial en cilindros de concreto convencional puede hacerse coronado con yeso cemento o con almohadillas de neopreno. En esta investigación se optó por utilizar el yeso cemento como refrentado de los cilindros usando la norma NTC 504, con este procedimiento se garantiza una correcta distribución de esfuerzos en la aplicación de carga del ensayo.



Ilustración 15. Refrendado de cilindros. Fuente: Autor.

Las pruebas de resistencia a flexión se hicieron de acuerdo con la norma



Ilustración 16. Falla de viga, por ensayo de resistencia a flexión. Fuente: Autor.

Las pruebas de porosidad se realizan siguiendo lo establecido en la norma ASTM C1754 midiendo la masa seca del espécimen (M_d) y midiendo las dimensiones de la probeta para calcular el volumen (V). Luego, la muestra se sumerge en agua durante al menos 30 min; después de lo cual se registra la masa sumergida (M_w). Usando la densidad del agua (ρ_w), la porosidad se calcula como se muestra a continuación:

$$P = \left[1 - \left(\frac{M_d - M_w}{\rho_w * V} \right) \right] * 100 \quad (13)$$

El proceso para la medición de la tasa de infiltración se realizó siguiendo la norma ISO 17785-1:16, los cilindros fundidos se sellan con envoltura retráctil dejando un borde superior de 50 mm para sujetar la cabeza mínima de agua, posteriormente se marcan dos líneas en la parte superior de la muestra a 15 mm y 25 mm. Se realiza el pre humedecimiento de la muestra, el ensayo se inicia a los 5 minutos siguientes a la finalización del pre humedecimiento, se vierte el agua en la muestra, el tiempo se comienza a medir tan pronto el agua toca la superficie de concreto y se detiene el cronometro cuando el agua libre ya no esté presente en la superficie permeable, la cantidad de agua a emplear es de 2000 ml para muestras de 100 mm de diámetro.



El cálculo para la tasa de infiltración se realiza con la fórmula:

$$K = \frac{w}{(A * t)} \quad (14)$$

Donde k : tasa de infiltración (mm/s), W : volumen de agua infiltrada (mm³), A : área de sección transversal de la muestra (mm²), t : tiempo necesario para que el volumen de agua medido se infiltre en el hormigón (s).

El porcentaje de fibras sintéticas varía entre el 0% y el 7%, con respecto al volumen total de la mezcla, las fibras a emplear son TUF STRAND SF TOXEMENT, se realiza un

diseño de mezcla para cada porcentaje de fibras, con el fin de identificar el porcentaje que represente mejores condiciones mecánicas y económicas.



Ilustración 17. Contenido de Fibras en una viga de concreto permeable. Fuente: Autor.

8.1. Dosificaciones

Tabla 10. Proporciones de cada una de las 12 mezclas desarrolladas.

Identificación de la mezcla	Método de diseño	Materiales					Aditivos					Procedencia del AG
		Agua w (kg/m ³)	Cemento c (kg/m ³)	Agregado grueso AG (kg/m ³)	Tamaño máximo (mm)	Agregado fino AF (kg/m ³)	Fibras (kg/m ³)	PLASTOL EXTENDER 3600 (g)	EUCO ESTABILIZADOR 2000 (g)	AIRTOD (g)	EUCON ABS (g)	
M1°	PCA	118.32	464.84	1649.47	1/2"	0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	Cantera
M2°	PCA	150.57	473.82	1649.47	3/8"	0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	Cantera
M3°	ACI	83.96	262.36	1601.42	1/2"	0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	Cantera
M4°	ACI	83.96	262.36	1601.42	3/8"	0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	Cantera
M5	PCA	148.75	464.84	1737.59	1/2"	0	0.0	2.73	3.27	6.70	2.50	Aluvial
M6	PCA	148.75	464.84	1737.59	1/2"	0	0.3	2.73	3.27	6.70	2.50	Aluvial
M7	PCA	148.75	464.84	1737.59	3/8"	0	0.5	2.73	3.27	6.70	2.50	Aluvial
M8	PCA	148.75	464.84	1737.59	3/8"	0	0.7	2.73	3.27	6.70	2.50	Aluvial
M9	PCA	148.75	464.84	1659.05	1/2"	79.92	0.0	2.73	3.27	6.70	2.50	Aluvial
M10	PCA	148.75	464.84	1659.05	1/2"	79.92	0.3	2.73	3.27	6.70	2.50	Aluvial
M11	PCA	148.75	464.84	1659.05	1/2"	79.92	0.5	2.73	3.27	6.70	2.50	Aluvial
M12	PCA	148.75	464.84	1659.05	1/2"	79.92	0.7	2.73	3.27	6.70	2.50	Aluvial

° Los cilindros fueron compactados mediante el método de varillado como lo indica ASTM C-31

Fuente: Autor.

Tabla 11. Relaciones utilizadas en cada una de las mezclas.

Identificación de la mezcla	Relaciones				Aditivo/cemento (%)			
	a/c	AG/c	AF/AG	Fibras	PLASTOL EXTENDER 3600 (g)	EUCO ESTABILIZADOR 2000 (g)	AIRTOC D (g)	EUCON ABS (g)
M1	0.25	3.55	0	0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
M2	0.32	3.48	0	0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
M3	0.32	6.10	0	0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
M4	0.32	6.10	0	0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
M5	0.32	3.74	0	0%	0.6%	0.7%	1.4%	0.5%
M6	0.32	3.74	0	3%	0.6%	0.7%	1.4%	0.5%
M7	0.32	3.74	0	5%	0.6%	0.7%	1.4%	0.5%
M8	0.32	3.74	0	7%	0.6%	0.7%	1.4%	0.5%
M9	0.32	3.57	0.05	0%	0.6%	0.7%	1.4%	0.5%
M10	0.32	3.57	0.05	3%	0.6%	0.7%	1.4%	0.5%
M11	0.32	3.57	0.05	5%	0.6%	0.7%	1.4%	0.5%
M12	0.32	3.57	0.05	7%	0.6%	0.7%	1.4%	0.5%

Fuente: Autor.

Capítulo 3

Resultados y discusión.

9. Dosificación

9.1. Cemento

La cantidad de cemento utilizada se determinó a partir del contenido de agua y de la relación agua/cemento adoptada, la cual depende directamente del diseño de mezcla que se elija, se observó a partir de las pruebas pilotos que el diseño de mezcla obtenido por el método PCA contempla un alto contenido de cemento, y el diseño de mezcla obtenido por el método ACI contiene un baja cantidad de cemento. Los resultados obtenidos a partir de ensayos de resistencia a compresión evidencian que una cantidad reducida de cemento, conlleva a una baja resistencia y por ende un comportamiento mecánico deficiente, se establece que el grosor de pasta de cemento debe ser suficiente para recubrir el agregado, pero no debe interferir en los vacíos interconectados, La cantidad de cemento en los diseños de mezcla M5 a M12 no vario, se estableció una relación agua/cemento de 0.32, siguiendo el diseño de mezcla sugerido por la PCA, y cumpliendo con lo establecido por el comité ACI.

9.2. Agregado grueso

Si bien el diseño adoptado para esta investigación es el suministrado por la PCA, la dosificación de agregado grueso, se modificó a criterio propio, siguiendo el método de volumen absoluto, la cantidad de agregado depende del tamaño del mismo y del volumen de los ingredientes presentes en la mezcla, se analizó el comportamiento de dos tamaños de agregado, y se obtuvieron cuatros dosificaciones distintas para las 12 mezclas realizadas, el diseño de mezcla que no contiene agregado fino, contempla la mayor cantidad de agregado grueso, lo cual representa una mayor masa unitaria de concreto.

9.3. Agregado fino

La dosificación de agregado fino se estableció en esta investigación mediante el ensayo de probetas cilíndricas en los cuales se varió el porcentaje del mismo, se pudo determinar que el concreto permeable es muy susceptible a la presencia de agregado fino y un alto porcentaje en la cantidad de este, puede conllevar a un cierre total de los poros, se observó que el uso de aditivos excluye la arena de la mezcla, presentando disgregación en los materiales.

Un alto contenido de mortero genera una consistencia seca y poco manejable en estado fresco, en estado endurecido se puede observar el cierre de los vacíos y una consistencia áspera en los especímenes elaborados.

Finalmente se establece que el porcentaje óptimo de agregado fino corresponde a un 5% del contenido de agregado grueso, este porcentaje de arena garantiza un aumento en la resistencia a compresión, manteniendo los valores de infiltración y porosidad deseados, sin verse afectada la consistencia y manejabilidad de la mezcla, este porcentaje de agregado se evalúa en las mezclas M9 a M12.

9.4. Agua

El contenido de agua es el parámetro inicial a evaluar, y se influencia por un gran número de factores como el diseño de mezcla adoptado, el uso de aditivos reductores de agua, el tamaño de agregado grueso, la cantidad de aire incluido y el asentamiento esperado, en esta investigación se determinó el contenido de agua a partir del método PCA, si bien se obtiene una determinada cantidad teórica de agua para la mezcla, en el desarrollo de los ensayos se debe agregar paulatinamente la cantidad de la misma, para no generar un exceso de pasta o mortero, lo que influye negativamente en las propiedades hidráulicas de los especímenes. La cantidad de agua es un factor susceptible a cambios en el proceso de

mezclado, se debe tener presente la humedad de los agregados y las condiciones de mezclado.



Ilustración 18. Mezcla con exceso de agua y aditivo. Fuente: Autor.

10. Propiedades del agregado

10.1. Procedencia del agregado grueso

En esta investigación se manejaron dos tipos de agregado, uno de procedencia aluvial y el otro de cantera, en el caso de la resistencia compresión se observó una diferencia significativa, el agregado de río o aluvial presenta valores mayores que el agregado de cantera.

El agregado de cantera se utilizó para el desarrollo de las pruebas piloto, en estas se observó que el agregado era de mala calidad, lo cual se reflejó en los ensayos de compresión realizados, se determinó por el tipo de falla que el agregado no presentaba la suficiente resistencia necesaria para este tipo de concreto, mientras que el agregado de río al presentar menores contenidos de vacíos y mayor cantidad de superficies de contacto de la matriz de agregado, generó una mayor trabazón y mejores resistencias a la compresión.



Ilustración 19. Espécimen con Agregado de cantera. Fuente: Autor.



Ilustración 20. Espécimen con Agregado de rio. Fuente: Autor.

En el caso de la permeabilidad no se observa ninguna diferencia significativa entre el uso de uno y otro agregado para las dosificaciones utilizadas en este estudio.

10.2. Tamaño máximo del agregado grueso

En esta investigación fueron utilizados 2 tamaños máximos: 3/8" (9,5 mm), y 1/2" (12,5 mm). La tendencia observada fue que conforme aumenta el tamaño máximo del agregado, disminuye la resistencia del concreto permeable. Situación opuesta ocurre en términos de la permeabilidad donde a mayor tamaño máximo del agregado grueso, se obtiene también una mayor permeabilidad del concreto.

11. Propiedades mecánicas

11.1. Resistencia a compresión

Se puede determinar a partir de los datos expuestos en la tabla 12, que las mezclas que contienen agregado fino alcanzaron las mayores resistencias, superando en un 31.28 % los resultados obtenidos en las mezclas que no contenían agregado fino, se observa que a medida que aumenta el porcentaje de fibras, aumenta también la resistencia, la mezcla que mejor comportamiento presenta es la mezcla M12, la cual contiene 5% de agregado fino y 7% de fibras sintéticas.

Tabla 12. Resultados resistencia a compresión.

Resistencia a la Compresión							
Mezcla	TMN	7 días		14 días		28 días	
		KN	MPa	KN	MPa	KN	MPa
Pruebas Piloto							
M1	PCA 1/2"	26.96	3.43	29.80	3.80	36.95	4.71
M2	PCA 3/8"	30.39	3.87	31.70	4.04	37.67	4.80
M3	ACI 1/2"	33.82	2.64	33.60	2.45	38.39	2.60
M4	ACI 3/8"	37.25	1.71	35.50	1.59	39.11	1.79
Mezcla sin finos							
M5	1/2"	39.95	4.95	61.00	7.71	41.75	5.16
M6	1/2"	35.50	4.49	46.50	5.99	32.10	3.98
M7	3/8"	50.20	6.27	56.15	6.81	91.35	11.08
M8	3/8"	99.90	11.59	88.70	12.18	109.85	13.87

Mezcla con finos							
M9	1/2"	55.30	6.66	81.40	10.06	93.65	10.14
M10	1/2"	65.80	7.90	75.55	9.34	69.20	9.27
M11	1/2"	66.45	8.21	61.85	9.03	80.95	10.01
M12	3/8"	106.15	13.31	109.85	13.92	142.15	17.19

Fuente: Autor.

Las mezclas (M1, M2, M3, M4) corresponden a las mezclas realizadas en las pruebas piloto en la tabla 12 y el gráfico 3, se observa que aunque no presentaron una buena resistencia a compresión, debido al agregado grueso empleado, fueron importantes para determinar el método de diseño de la PCA y el tamaño de agregado grueso óptimo que es 3/8" (9.5 mm).

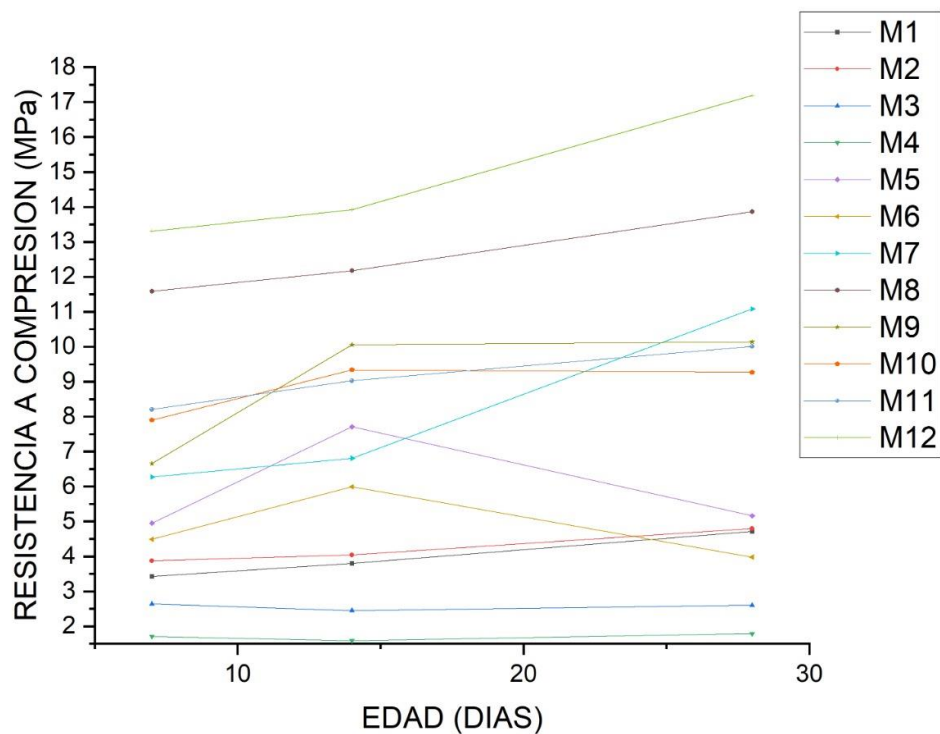


Gráfico 3. Curva de desarrollo de resistencia a la compresión para todas mezclas.

Fuente: Autor.

En el gráfico 3 se observa que las mezclas que tienen un contenido de fibras de 0% y 3%, tanto con agregado fino como sin él, presentan un comportamiento similar en cuanto al desarrollo de la resistencia con el tiempo, estas mezclas (M4, M5, M9, M10) alcanzaron una resistencia del 72.45% a los 7 días, del 100 % a los 14 días, y finalmente una resistencia de 74.55% a los 28 días, este comportamiento no es usual en concretos convencionales, pero en concretos permeables se presenta con frecuencia, las mezclas que tienen un porcentaje de fibras mayor, es decir 5% y 7%, presentaron un mejor comportamiento de resistencia con el tiempo.

Tipos de falla

11.2. Resistencia a Flexión

Aunque si bien, no se obtuvo la resistencia a flexión deseada, se puede observar que a medida que aumenta el porcentaje de fibras y de agregado fino, la resistencia a flexión también aumenta y en general presentan un comportamiento similar en cuanto al desarrollo de la resistencia en el tiempo, La tabla 13 expone los resultados obtenidos en este ensayo, los valores para módulo de rotura en las mezclas sin finos varían desde 0.57 MPa a 0.95 MPa, y en las mezclas con finos varia de 0.76 MPa a 0.98 MPa, al igual que en el caso de la resistencia a compresión la mezcla que presenta el mejor comportamiento es la M12 que contiene el mayor contenido de fibras y 5% de agregado fino.

Tabla 13. Resultados resistencia a Flexión.

Resistencia a la Flexión				
Mezcla	14 días		28 días	
	KN	MPa	KN	MPa
Mezcla sin finos				
M5	14.00	0.63	14.00	0.57
M6	12.50	0.59	14.00	0.65
M7	14.50	0.67	21.50	0.96
M8	19.00	0.83	18.00	0.95
Mezcla con finos				
M9	18.00	0.76	19.50	0.77
M10	13.50	0.84	18.00	0.85
M11	17.00	0.80	21.00	0.95
M12	19.00	0.92	25.00	0.98

Fuente: Autor.

Con los resultados obtenidos se puede afirmar que las fibras sintéticas mejoran el comportamiento mecánico tanto en vigas como en cilindros, se debe evaluar un porcentaje de fibras mayor, para establecer si este tipo de fibras es la solución óptima para la baja resistencia que presentan los concretos permeables, se debe tener presente que la función de las fibras no es aumentar el modulo de rotura a edades tempranas, si no reducir el agrietamiento, cuando el pavimento se encuentre en funcionamiento. Para validar la aceptación de este pavimento se debe hacer un tramo de prueba y evaluar su comportamiento en campo.

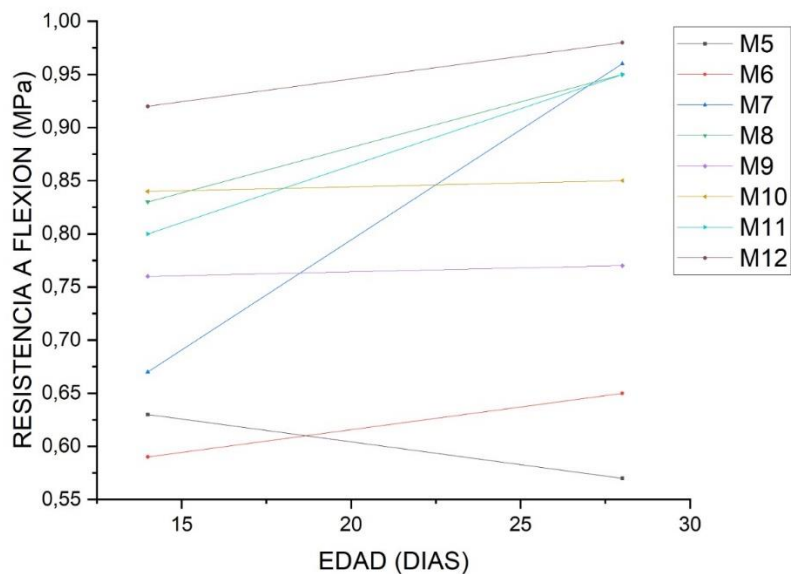


Gráfico 4. Curva de desarrollo de resistencia a flexión para todas las mezclas.

Fuente: Autor

El ensayo de resistencia a flexión es un parámetro de evaluación para los pavimentos, pero este depende de muchos factores, que pueden producir una caída en la resistencia, entre ellos la velocidad de carga, el transporte de las vigas, y un periodo corto de secado, es por esta razón que cada vez son más los proyectos que optan por realizar correlaciones entre la resistencia a compresión y la resistencia a flexión, el gráfico 5 permite establecer la siguiente ecuación, para hallar la correlación entre la resistencia a compresión y la resistencia a flexión.

$$y = 0.03422x + 0.46195 \quad (15)$$

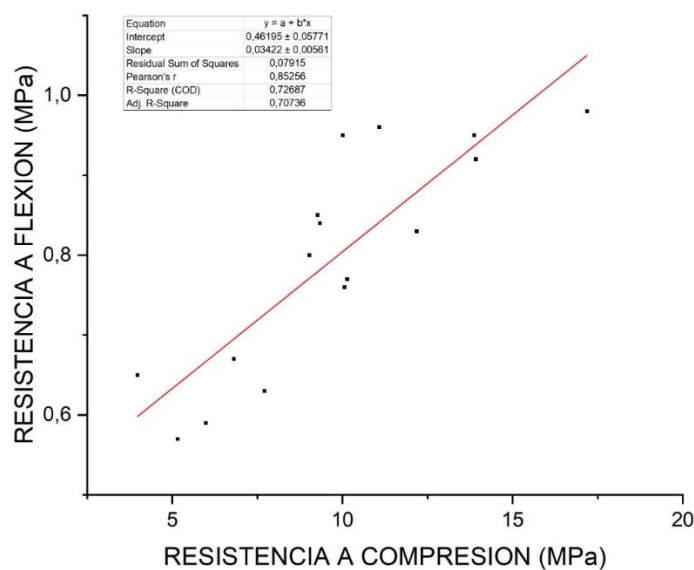


Gráfico 5. Correlación entre la resistencia a flexión y la resistencia a compresión.

Fuente: Autor

Para el concreto convencional existen ecuaciones que correlacionan la resistencia a compresión y la resistencia a flexión, como lo expone la ACI 33, las cuales se adoptan a los valores en campo.

$$Mr = 8\sqrt{f'c} \quad (16)$$

Se puede evidenciar que para el concreto permeable no existe una correlación determinada entre la resistencia a compresión y la resistencia a flexión, debido a que cuenta con más variables para analizar que el concreto convencional. La diferencia principal radica en la estructura porosa del concreto permeable, la cual afecta inversamente la resistencia del concreto.

Aplicando la ecuación (15) obtenida con los resultados obtenidos en esta investigación y comparando los resultados con la normatividad de la ACI 522-R, se tiene que para la resistencia de 17.19 MPa, da como resultado teórico una resistencia a flexión de 1.05

MPa. Se observa que la variación entre el valor obtenido mediante la ecuación obtenida y el valor del ensayo hay un rango de error del 7%, lo cual valida la ecuación obtenida.

12. Propiedades hidráulicas

12.1. Infiltración

Los resultados de infiltración se resumen en la tabla 14. Se puede observar que los valores obtenidos cumplen con los requisitos mínimos para concreto permeable, la norma ACI, estipula como valor mínimo de infiltración 1.41 mm/s, en esta investigación se obtuvieron datos que sobrepasan los 10 mm/s, la velocidad a la que fluye el agua por los especímenes realizados es alto y se promedia en alrededor de 20 seg, lo cual asegura que no se presentara encharcamientos ni estancamientos de agua sobre la superficie del pavimento.

Existen diferentes variables que pueden determinar la tasa infiltración de un concreto permeables, ya que si una mezcla presenta un alto contenido de pasta o de mortero esto generara grumos reduciendo significativamente el paso de agua por el sistema, igualmente si se presenta exceso de agua en la mezcla esto produce una pasta fina que puede escurrir dando como resultado una capa inferior densa con poca capacidad de infiltración a pesar de la alta porosidad. Tanto la infiltración como la porosidad no dependen únicamente de la dosificación de los materiales, sino que también dependen de la compactación de la mezcla, si la mezcla se compacta con una energía superior a la permitida esto eventualmente generara que las partículas entren en mayor contacto y se reduzca abruptamente el contenido de poros vacíos, traduciéndose esto en una baja infiltración.

Tabla 14. Resultados de infiltración.

INFILTRACION			
Mezcla	7 días	14 días	28 días
	(mm/s)	(mm/s)	(mm/s)
Pruebas Piloto			
M1	14.46	18.02	12.82
M2	13.11	10.67	11.85
M3	16.56	17.03	17.21
M4	13.56	14.47	15.24
Mezcla sin finos			
M5	18.16	19.06	16.42
M6	8.92	12.82	8.49
M7	13.78	13.96	12.65
M8	3.75	7.32	4.19
Mezcla con finos			
M9	15.81	14.59	11.20
M10	16.00	17.83	12.73
M11	16.42	10.00	9.79
M12	10.71	10.00	8.89

Fuente: Autor.

La relación que existe entre la tasa de infiltración y el porcentaje de porosidad se puede observar en el gráfico 6, para obtener la ecuación de correlación, fue necesaria la realización de 31 líneas de tendencia y se tomó la que presenta el mayor valor de R^2 , la ecuación obtenida es:

$$y = -8.79893 + 1.23445 * x^1 - 0.01611 * x^2$$

Esta ecuación es teórica y se obtiene de los datos obtenidos en esta investigación, se sugiere realizar correlaciones con datos obtenidos en laboratorio, ya que no se tiene ninguna correlación aceptada y verificada para la tasa de infiltración y el porcentaje de porosidad.

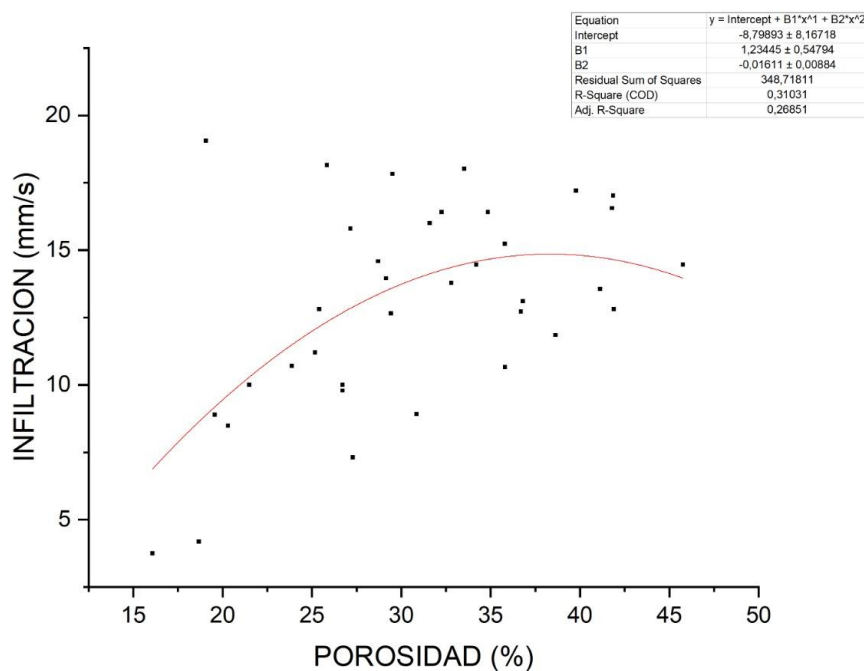


Gráfico 6. Correlación entre la tasa de infiltración y la porosidad. Fuente: Autor.

12.2. Porosidad

Los valores de porosidad mostrados en la tabla 15, permiten el uso de este concreto como parte de un sistema de pavimento para el manejo de la escorrentía superficial en Colombia, teniendo en cuenta las intensidades máximas de lluvia, registradas por el IDEAM, la norma ACI clasifica el concreto permeable con una porosidad que se encuentre en el rango de 15% a 30%, en este estudio los valores de porosidad sobrepasaron el porcentaje mínimo en su totalidad, los valores obtenidos en las pruebas piloto son superiores al 30%, esto se ve reflejado en la baja resistencia que presentaron, las mezclas M5 a M12 registraron un excelente porcentaje de porosidad, sin muchas variaciones en los distintos tipos de mezcla, no se observa variación sustancial en cuanto a las mezclas que contienen y que no contienen finos, esto corrobora que el porcentaje elegido de agregado fino, es el correcto y no interfirió en la conectividad de los poros. El porcentaje de fibras tampoco generó ninguna variación significativa en cuanto a la

porosidad registrada, se sugiere para posibles investigaciones un aumento en el porcentaje de fibras ya que se comprobó que no influyen en la porosidad de las mezclas.

Tabla 15. Resultados de porosidad.

Porosidad			
Mezcla	7 días	14 días	28 días
	%	%	%
Pruebas Piloto			
M1	34.19	33.52	41.89
M2	36.80	35.80	38.63
M3	41.79	41.85	39.77
M4	41.12	45.76	35.79
Mezcla sin finos			
M5	25.84	19.06	34.84
M6	30.85	25.40	20.30
M7	32.79	29.14	29.42
M8	16.07	27.28	18.67
Mezcla con finos			
M9	27.15	28.70	25.17
M10	31.59	29.50	36.69
M11	32.25	21.49	26.71
M12	23.87	26.71	19.56

Fuente: Autor.

A partir del gráfico 7, se puede establecer que la relación entre la resistencia a compresión y la porosidad es inversamente proporcional, esto quiere decir que al poseer mayor contenido de poros, el concreto permeable mejora sus capacidades hidráulicas pero decrece su resistencia, es decir, a mayores valores de porosidad, menores resistencias de compresión, este comportamiento se registró en todas las mezclas realizadas sin excluir los porcentajes de fibras ni el contenido de agregado fino.

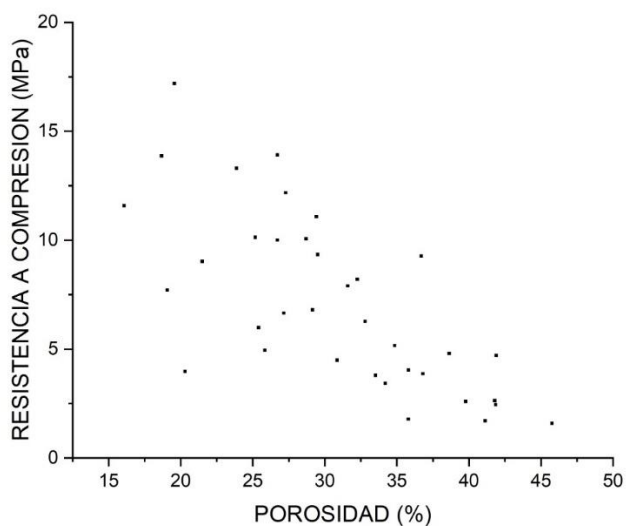


Gráfico 7. Resistencia a la compresión relacionada con la porosidad. Fuente: Autor.

La resistencia a flexión no se ve fuertemente afectada por la porosidad, esto lo podemos interpretar de la gráfica 8, donde a mayores porosidades no se presentan los menores valores de resistencia a flexión, ni tampoco para los mayores valores de resistencia a flexión se presentan las menores porosidades.

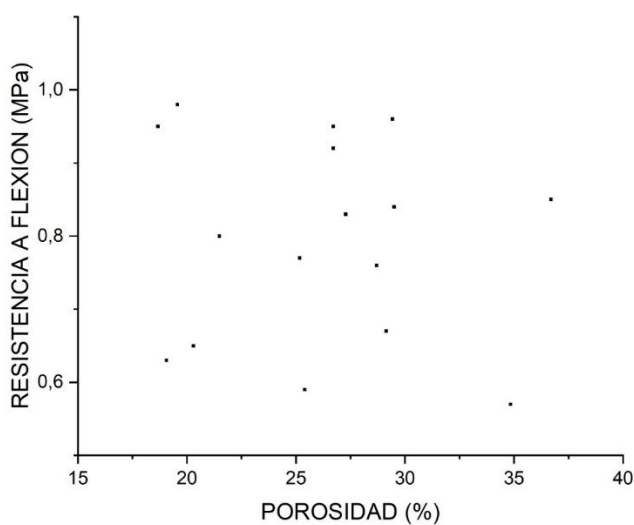


Gráfico 8. Resistencia a la flexión relacionada con la porosidad. Fuente: Autor.

Conclusiones

Se desarrolló un concreto poroso con adición de fibras sintéticas TUF-STRAND , obteniendo resultados de sus propiedades mecánicas e hidráulicas, se evaluaron dos métodos de diseño, y a partir de los resultados obtenidos de resistencia a compresión se determinó que el método a emplear en esta investigación, es el de la PCA, se evaluó el comportamiento con dos tamaños de agregado grueso y dos procedencias del mismo, se obtuvo que el tamaño de agregado grueso que presentó una respuesta más favorable en cuanto a resistencia a compresión es 3/8" (9.5 mm) y se estableció que la eficiencia del concreto permeable se ve afectada más por el tipo de agregado que por el tamaño, por esta razón se sugiere que la procedencia del agregado sea de una fuente aluvial, se realizó la caracterización de los materiales, siguiendo lo establecido en las normas y posteriormente se determinó el porcentaje óptimo de agregado fino que mejora la resistencia a compresión y flexión de los especímenes sin sacrificar el diseño de sostenibilidad que presentan los concretos permeables, este porcentaje corresponde al 5% de contenido de agregado fino, con respecto del contenido de agregado grueso, se analizó el comportamiento de ocho mezclas distintas variando el porcentaje de fibras sintéticas y se obtuvo que un porcentaje de 7% de fibras con respecto a su volumen total de la mezcla, le aporta resistencia al concreto y no interfiere en los valores de infiltración porosidad, de esta forma se obtiene el diseño de mezcla óptimo para un concreto permeable con adición de fibras sintéticas.

El concreto permeable debe responder a ciertas características particulares en su diseño como lo es el mono tamaño de sus partículas de agregado grueso, para lo cual se debe realizar un proceso de tamizaje del material a emplear, la relación agua-cemento debe ser tal que garantice el recubrimiento de los agregados y debe estar en un rango no superior a 0.42, esto conlleva a que se formen vacíos interconectados que permiten que el concreto transmita agua a velocidades relativamente altas.

Se concluye que el concreto reforzado con fibras sintéticas presenta un mejor desempeño en comparación con el concreto simple, y se obtuvo que la resistencia aumenta, con el aumento del volumen de fibras, sin embargo la resistencia a flexión aumenta ligeramente, mientras que la resistencia a compresión mejoran significativamente, se evidencia que el uso de fibras no interfiere en las propiedades de drenaje del concreto permeable.

El rendimiento del concreto permeable mejora agregando un pequeño porcentaje de arena, esto se evidencia en los valores obtenidos de resistencia, el grupo de mezcla que contempla el uso de arena, presento un comportamiento superior, sin comprometer la conectividad del sistema de poros.

Se obtuvo la ecuación de correlación entre la resistencia a compresión y la resistencia a flexión, la cual se verifico mediante el cambio de la variable x , y se obtuvo la ecuación de correlación entre la porosidad y la tasa de infiltración, a partir de curvas de tendencia.

Teniendo en cuenta lo establecido en la norma ACI 522-R el uso de este pavimento se limita a vías de bajo tráfico, estacionamiento, andenes, y aceras.

Recomendaciones

Se recomienda seguir el curso de la investigación tanto a nivel hidráulico, económico, como el uso de otros materiales alternativos de construcción, para conseguir el mejoramiento de este tipo de concreto, el cual brinda distintos beneficios ambientales y sociales a las ciudades.

Se debe realizar una búsqueda de información en fuentes bibliográficas avaladas, teniendo en cuenta que no existe normativa específica para el diseño de concreto permeable, se sugiere tomar como referencia la normativa existente para concreto convencional, tanto para el análisis y caracterización de los materiales, como para el diseño de mezcla.

Se recomienda tener condiciones óptimas en el laboratorio tanto para la realización de las mezclas como para las pruebas a realizar, y contar con un espacio apropiado para el curado de los especímenes.

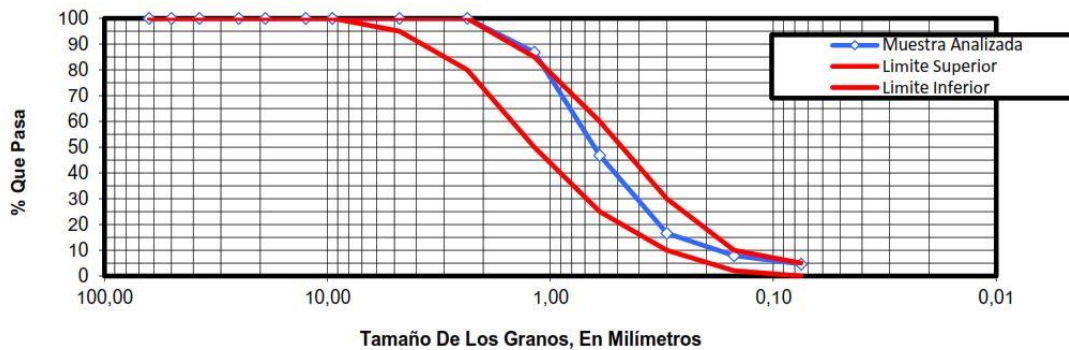
Anexos

Informe ensayo de agregados análisis granulométrico
Especificación: ASTM C 33 -NTC 174

Proyecto	Concreto Permeable	Referencia	1
Descripción	Arena Aluvial	Fecha	25/03/2021
Cantera	Saldaña	Consultor técnico	J. VIVAS
Norma	NTC 77-2007 NTC 78-1995	Informe	4

Masa Inicial Seca (g)	2572.4	Masa Final (g)	2453.2	Masa Seca Después de Lavado (g)	2453.2	Límites	
						Superior	Inferior
Tamiz	mm.	Masa Ret.	%Ret.	%Acum.	%Que pasa		
21/2"	63.00	0.0	0.0	0.0	100.0	100	100
2"	50.00	0.0	0.0	0.0	100.0	100	100
1 1/2"	37.50	0.0	0.0	0.0	100.0	100	100
1"	25.00	0.0	0.0	0.0	100.0	100	100
3/4"	19.00	0.0	0.0	0.0	100.0	100	100
1/2"	12.50	0.0	0.0	0.0	100.0	100	100
3/8"	9.51	0.0	0.0	0.0	100.0	100	100
4	4.75	0.0	0.0	0.0	100.0	100	95
8	2.36	0.2	0.0	0.0	100.0	100	80
16	1.18	338.5	13.2	13.2	86.8	85	50
30	0.60	1028.1	40.0	53.1	46.9	60	25
50	0.30	779.6	30.3	83.4	16.6	30	10
100	0.15	222.3	8.6	92.1	7.9	10	2
200	0.08	84.5	3.3	95.4	4.6	5	0
	FONDO	119.2	4.6	100.0	0.0		
	TOTAL	2572.4	100.0	100.0	0.0		
	TM	4.75	m. finura	2.42	%a. grueso	0.0	
	TMN	1.18	pasa t 200	4.63	%a. fino	95.4	

TAMICES "US STANDARD"

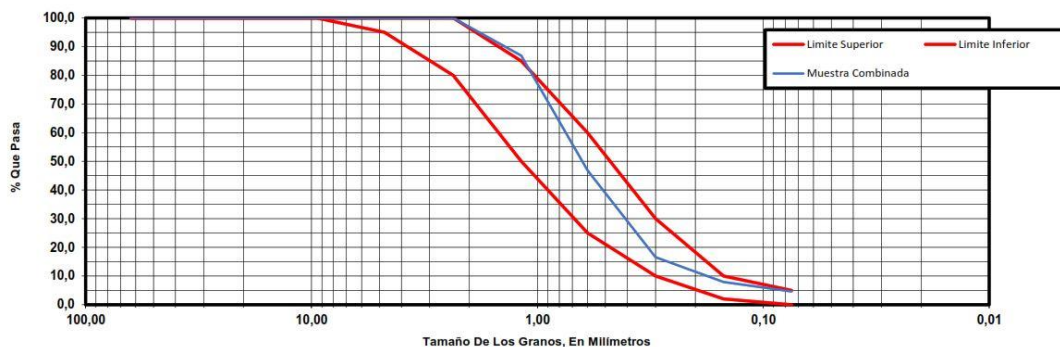


Combinación ideal de agregados finos para diseño de mezcla de concreto

Proyecto	Concreto Permeable	Referencia	2
Descripción	Arena 1 100% - Arena 2 0%	Fecha	25/03/2021
Cantera	Saldaña	Consultor técnico	J. VIVAS
Norma	NTC 77-2007 NTC 78-1995	Informe	4
Arena 1	100		
Arena 2	0		
Arena 3	0		
Arena 4	0		
Arena 5	0		
TOTAL	100		

**LIMITES
GRANULOMETRICOS**

abertura de tamiz (mm)	%pasa	met. gráfico	%pasa					%pasa combinado	%retenido o acumulado
	mínimo	máximo	A1	A2	A3	A4	A5		
63.00	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0
50.00	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0
37.50	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0
25.00	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0
19.00	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0
12.50	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0
9.51	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0
4.75	95.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0
2.36	80.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0
1.18	50.0	85.0	86.8	100.0	100.0	100.0	100.0	86.8	13.2
0.60	25.0	60.0	46.9	100.0	100.0	100.0	100.0	46.9	53.1
0.30	10.0	30.0	16.6	100.0	100.0	100.0	100.0	16.6	83.4
0.15	2.0	10.0	7.9	100.0	100.0	100.0	100.0	7.9	92.1
0.08	0.0	5.0	4.6	100.0	100.0	100.0	100.0	4.6	95.4
		TM	4.75			m. finura	2.42	%a. grueso	0.0
		TMN	1.18			pasa t 200	4.63	%a. fino	95.4



INFORME ENSAYO DE AGREGADOS ANALISIS GRANULOMETRICO

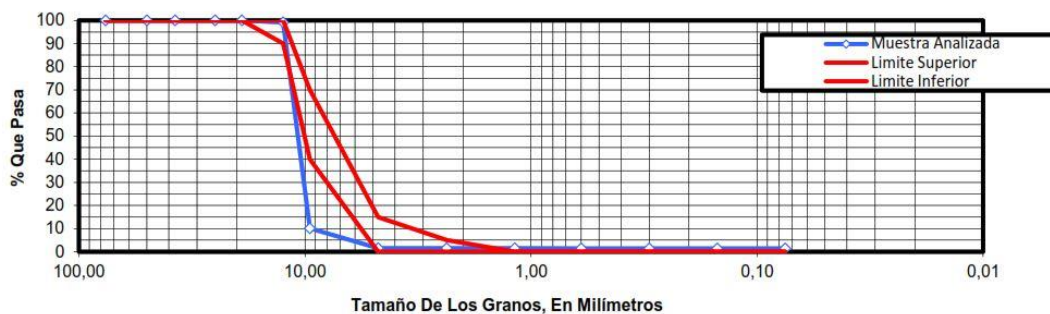
Especificación: ASTM C 33 -NTC 174

Proyecto	Concreto Permeable	Referencia	3
Descripción	Grava TMN 1/2"	Fecha	25/03/2021
Cantera	Saldaña	Consultor técnico	J. VIVAS
Norma	NTC 77-2007 NTC 78-1995	Informe	4

ASTM #7 (12.50 mm a 4.75 mm)

Masa Inicial Seca (g)	2164.3	Masa Final (g)	2133.8	Masa Seca Después de Lavado (g)	2133.8	Límites	
						Superior	Inferior
Tamiz	mm.	Masa Ret.	%Ret.	%Acum.	%Que pasa		
3"	76.20	0.0	0.0	0.0	100.0	100	100
2"	50.00	0.0	0.0	0.0	100.0	100	100
1 1/2"	37.50	0.0	0.0	0.0	100.0	100	100
1"	25.00	0.0		0.0	100.0	100	100
3/4"	19.00	0.0	0.0	0.0	100.0	100	100
1/2"	12.50	19.5	0.9	0.9	99.1	100	90
3/8"	9.51	1926.1	89.0	89.9	10.1	70	40
4	4.75	185.8	8.6	98.5	1.5	15	0
8	2.36	0.4	0.0	98.5	1.5	5	0
16	1.18	0.6	0.0	98.5	1.5	0	0
30	0.60	0.3	0.0	98.5	1.5	0	0
50	0.30	0.4	0.0	98.6	1.4	0	0
100	0.15	0.4	0.0	98.6	1.4	0	0
200	0.08	0.3	0.0	98.6	1.4	0	0
FONDO		30.5	1.4	100.0	0.0		
TOTAL		2164.3	100.0	100.0	0.0		
TM		19.00	M. FINURA	6.81	%A. GRUESO	98.5	
TMN		12.50	PASA T 200	1.41	%A. FINO	0.1	

TAMICES "US STANDARD"



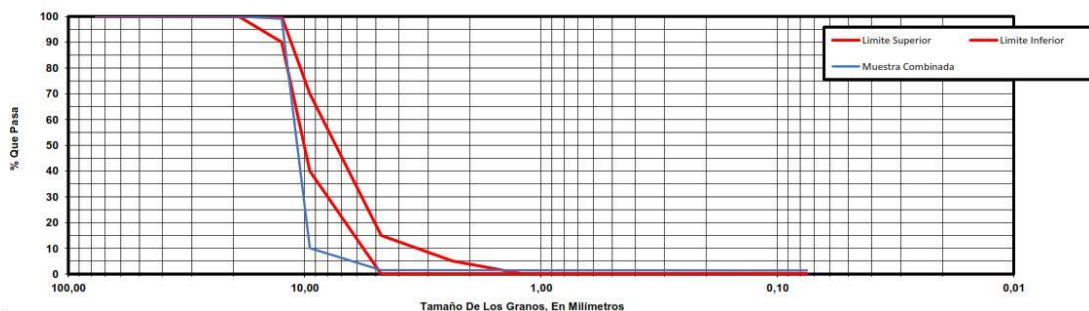
Combinación ideal de agregados finos para diseño de mezcla de concreto

Proyecto	Concreto Permeable	Referencia	4
Descripción	Grava 1 100% - Grava 2 0% - Grava 3 0%	Fecha	25/03/2021
Cantera	Saldaña	Consultor técnico	J. VIVAS
Norma	NTC 77-2007 NTC 78-1995	Informe	4
Arena 1	100		
Arena 2	0		
Arena 3	0		
Arena 4	0		
Arena 5	0		
TOTAL	100		

LIMITES GRANULOMETRICO

Abertura de tamiz (mm)	Limites ASTM #7 (12.50 mm a 4.75 mm)		%pasa					%pasa combinado	%retenido acumulado
	Superior	Inferior	G1	G2	G3	G4	G5		
76.20	100	100	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0
50.00	100	100	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0
37.50	100	100	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0
25.00	100	100	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0
19.00	100	100	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0
12.50	100	90	99.1	100.0	100.0	100.0	100.0	99.1	0.9
9.51	70	40	10.1	100.0	100.0	100.0	100.0	10.1	89.9
4.75	15	0	1.5	100.0	100.0	100.0	100.0	1.5	98.5
2.36	5	0	1.5	100.0	100.0	100.0	100.0	1.5	98.5
1.18	0	0	1.5	100.0	100.0	100.0	100.0	1.5	98.5
0.60	0	0	1.5	100.0	100.0	100.0	100.0	1.5	98.5
0.30	0	0	1.4	100.0	100.0	100.0	100.0	1.4	98.6
0.15	0	0	1.4	100.0	100.0	100.0	100.0	1.4	98.6
0.075	0	0	1.4	100.0	100.0	100.0	100.0	1.4	98.6
TM	19.00	M. FINURA	6.81	%A. GRUESO	98.5				
TMN	12.50	PASA T 200	1.41	%A. FINO	0.1				

TAMICES "US STANDARD"



METODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD Y LA ABSORCION DEL AGREGADO GRUESO (NTC 178)

PROYECTO	CONCRETO PERMEABLE	FECHA	25/03/2021
DESCRIPCION	ARENA ALUVIAL Y GRAVA TMN 1/2"	CONSULTOR	J.VIVAS
CANTERA	SALDAÑA		

DETERMINACION DE LA MASA UNITARIA Y LOS VACIOS ENTRE PARTICULAS DE AGREGADOS (NTC 82)

(G) Masa Agregado + Molde (g)				Masa del recipiente de la medida	MASA UNITARIA (Kg/m³)				
AGREGADO FINO		AGREGADO GRUESO			AGREGADO FINO		AGREGADO GRUESO		
Suelto	Compactado	Suelto	Compactado	T=	Volumen del recipiente de medida	Suelto	Compactado	Suelto	Compactado
7490	7858	19394	20106	5348	g	1437.2	1579.22	972.11	1021.27
7584	7934	19482	20146						
7428	7932	19366	20124	V=	0.01447				
					cm ³				

METODO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD Y LA ABSORCION DEL AGREGADO FINO (NTC 237)

Masa En El Aire De La Muestra Secada Al Horno	A	=	496.2	g
Masa en el aire de la muestra en condicion S.S.S	S	=	501.4	g
Masa del frasco lleno de agua hasta la marca de calibración	B	=	635.7	g
Masa del frasco+Agua+Material (Hasta la marca de calibración)	C	=	946.2	g
Densidad aparente (g/cm ³)	D_s aparente 23°C =	2.593	Densidad Nominal (g/cm ³)	D_s nominal 23°C = 2.665
Densidad Saturada y Superficialmente Seca (g/cm ³)	D_s aparente (base s.s.s) 23°C =	2.620	Absorción	Absorción (%) = 1.05
Porcentaje de vacíos en el agregado suelto	% de Vacíos Suelto =	50.42	Porcentaje de vacíos en el agregado Compactado	% de Vacíos Compactado = 45.52

METODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD Y LA ABSORCION DEL AGREGADO GRUESO (NTC 178)										
Masa en el aire de la muestra secada al horno	A	=	2045.4	g						
Masa en el aire de la muestra en condicion S.S.S	B	=	2068.1	g						
Masa de la muestra en condicion S.S.S sumergida	C	=	1290.0	g						
Densidad aparente (g/cm3)		D_s aparente 23°C =	2.622	Densidad Nominal (g/cm3)		D_s nominal 23°C =	2.701			
Densidad Saturada y Superficialmente Seca (g/cm3)		D_s aparente (base s.s.s) 23°C =	2.651	Absorción		Absorción (%) =	1.11			
Porcentaje de vacios en el agregado suelto		% de Vacios Suelto =	61.44	Porcentaje de vacios en el agregado Compactado		% de Vacios Compactado =	59.49			

Tabla 16. Resultados Concreto permeable (sin agregado fino, sin fibras)

METODO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A COMPRESION (ASTM C39)										
ID	EDAD (Días)	FECHA DE ENSAYO	MASA (Kg)	DENSIDAD	d (mm)	h (mm)	VELOCIDAD (MPa/s)	AREA (mm2)	CARGA (KN)	CARGA ESPECIFICA (MPa)
6	7	21/04/2021	2.930	2996.28	101.00	221.00	0.2	8011.8	47.6	5.95
7	7	21/04/2021	2.845	3167.57	102.00	207.00	0.2	8171.3	32.3	3.95
8	7	21/04/2021	2.813	3006.11	103.00	216.00	0.2	8332.3	68.2	8.19
9	14	28/04/2021	2.918	2947.47	99.00	200.00	0.2	7697.7	63.1	8.20
10	14	28/04/2021	2.946	2845.55	102.00	203.00	0.2	8171.3	58.9	7.21
11	14	28/04/2021	3.056	3025.74	101.00	200.00	0.2	8011.8	119.8	14.96
1	28	05/05/2021	2.922	2729.31	101.00	212.00	0.2	8011.8	42.1	5.25
2	28	05/05/2021	3.022	2768.92	102.00	214.00	0.2	8171.3	48	5.87
3	28	05/05/2021	3.014	2774.56	102.00	213.00	0.2	8171.3	41.4	5.07

ANALISIS ESTADISTICO										
Edad	R (Mpa)	Relación de esbeltez	S (dest)	Superior	Inferior	REV	Error	Aprob	R (Mpa)	S (dest)
7	5.95	2.19	+/- 2.12	8.15	3.91	VERDADERO	+/- 2.04	5.95	4.95	+/- 1.41
	3.95	2.03				VERDADERO	+/- 0.04	3.95		
	8.19	2.10				FALSO				
14	8.20	2.02	+/- 4.22	14.34	5.91	VERDADERO	+/- 2.29	8.20	7.71	+/- 0.70

	7.21	1.99				VERDADERO	+/- 1.30	7.21		
	14.96	1.98				FALSO				
28	5.25	2.10	+/- 0.42	5.82	4.98	VERDADERO	+/- 0.57	5.25	5.16	+/- 0.13
	5.87	2.10				FALSO				
	5.07	2.09				VERDADERO	+/- 0.09	5.07		

METODO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A FLEXION (ASTM C78)

ID	EDAD (Días)	FECHA DE ENSAYO	MASA (Kg)	b (mm)	h (mm)	l (mm)	Velocidad (MPa/s)	Área (mm ²)	Carga (KN)	Carga Especifica (Mpa)
1	14	28/04/2021	20.300	153.00	136.00	496.00	0.1	18865.9	15	0.79
2	14	28/04/2021	21.240	150.00	148.00	494.00	0.1	21904.0	14	0.62
3	14	28/04/2021	21.030	151.00	147.00	498.00	0.1	21753.1	14	0.63
4	28	05/05/2021	21.280	157.00	152.00	499.00	0.1	24182.2	12	0.48
5	28	05/05/2021	20.590	151.00	147.00	496.00	0.1	24514.3	14	0.56
6	28	05/05/2021	21.280	157.00	152.00	499.00	0.1	24182.2	14	0.57

ANALISIS ESTADISTICO

Edad	R (Mpa)	S (dest)	Superior	Inferior	REV	Error	Aprob	R (Mpa)	S (dest)
14	0.79	+/- 0.10	0.775	0.585	FALSO			0.63	+/- 0.01
	0.62				VERDADERO	+/- 0.04	0.62		
	0.63				VERDADERO	+/- 0.05	0.63		
28	0.48	+/- 0.05	0.586	0.487	FALSO			0.57	+/- 0.01
	0.56				VERDADERO	+/- 0.07	0.56		
	0.57				VERDADERO	+/- 0.02	0.57		

Tabla 17. Resultados concreto permeable sin agregado fino, 3% fibras sintéticas

METODO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A COMPRESION (ASTM C39)

ID	EDAD (Días)	FECHA DE ENSAYO	MASA (Kg)	DENSIDAD	d (mm)	h (mm)	VELOCIDAD (MPa/s)	AREA (mm ²)	CARGA (KN)	CARGA ESPECIFICA (MPa)
15	7	21/04/2021	2.810	3017.39	100.00	184.00	0.2	7854	53.5	6.95
18	7	21/04/2021	2.530	2750.00	100.00	184.00	0.2	7854	36.7	4.68
22	7	21/04/2021	2.776	2754.63	101.00	202.00	0.2	8011.8	34.3	4.29
14	14	28/04/2021	2.850	2794.12	100.00	204.00	0.2	7854	39.7	5.05
21	14	28/04/2021	2.896	2729.41	100.00	204.00	0.2	7854	21.1	2.68
13	14	28/04/2021	2.784	2812.74	99.00	208.00	0.2	7697.7	53.3	6.93
16	28	12/05/2021	2.722	2541.55	102.00	210.00	0.2	8171.3	26.3	3.22

17	28	12/05/2021	2.732	2639.61	100.00	207.00	0.2	7854.0	21.5	2.73
20	28	12/05/2021	2.902	2736.45	101.00	210.00	0.2	8011.8	37.9	4.73

ANALISIS ESTADISTICO										
Edad	R (Mpa)	Relación de esbeltez	S (dest)	Superior	Inferior	REV	Error	Aprob	R (Mpa)	S (dest)
7	6.95	1.84	+/- 1.44	6.743	3.870	FALSO			4.49	+/- 0.28
	4.68	1.84				VERDADERO	+/- 0.81	4.68		
	4.29	2.00				VERDADERO	+/- 0.42	4.29		
14	5.05	2.04	+/- 2.13	7.016	2.757	VERDADERO	+/- 2.29	5.05	5.99	+/- 1.33
	2.68	2.04				FALSO				
	6.93	2.10				VERDADERO	+/- 0.09	6.93		
28	3.22	2.06	+/- 1.04	4.60	2.52	VERDADERO	+/- 1.38	3.22	3.98	+/- 1.07
	2.73	2.07				VERDADERO				
	4.73	2.08				FALSO	+/- 0.13	4.73		

METODO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A FLEXION (ASTM C78)										
ID	EDAD (Días)	FECHA DE ENSAYO	MASA (Kg)	b (mm)	h (mm)	l (mm)	Velocidad (MPa/s)	Area (mm ²)	Carga (kN)	Carga Especifica (Mpa)
7	14	28/04/2021	21.030	151.00	146.00	495.00	0.1	21458.1	12	0.55
8	14	28/04/2021	23.688	155.00	146.00	498.00	0.1	22026.5	20	0.89
9	14	28/04/2021	23.688	152.00	146.00	496.00	0.1	21600.2	13	0.62
10	28	12/05/2021	20.744	149.00	148.00	498.00	0.1	21758.0	11	0.52
11	28	12/05/2021	23.531	150.00	146.00	500.00	0.1	21316.0	14	0.63
12	28	12/05/2021	20.149	144.00	148.00	496.00	0.1	21027.8	14	0.66

ANALISIS ESTADISTICO										
Edad	R (Mpa)	S (dest)	Superior	Inferior	REV	Error	Aprob	R (Mpa)	S (dest)	
14	0.55	+/- 0.18	0.866	0.507	VERDADERO	+/- 0.04	0.55	0.59	+/- 0.05	
	0.89				FALSO					
	0.62				VERDADERO	+/- 0.11	0.62			
28	0.52	+/- 0.07	0.677	0.530	FALSO			0.65	+/- 0.02	
	0.63				VERDADERO	+/- 0.10	0.63			
	0.66				VERDADERO	+/- 0.02	0.66			

Tabla 18. Resultados concreto permeable (sin agregado fino, 5% fibras sintéticas).

METODO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A COMPRESION (ASTM C39)

ID	EDAD (Días)	FECHA DE ENSAYO	MASA (Kg)	DENSIDAD	d (mm)	h (mm)	VELOCIDAD (MPa/s)	AREA (mm ²)	CARGA A (KN)	CARGA ESPECIFICA (MPa)
25	7	03/05/2021	2.896	2770.36	101.00	207.00	0.2	8011.8	50.3	6.28
26	7	03/05/2021	2.822	2673.74	101.00	209.00	0.2	8011.8	50.1	6.26
27	7	03/05/2021	2.853	2680.16	99.00	201.00	0.2	8011.8	50.9	6.38
32	14	10/05/2021	3.076	2779.43	102.00	217.00	0.2	8171.3	54.9	6.72
30	14	10/05/2021	3.088	2725.51	103.00	220.00	0.2	8332.3	57.4	6.89
31	14	10/05/2021	3.166	2807.11	103.00	219.00	0.2	8332.3	74.2	8.91
33	28	24/05/2021	3.080	2794.66	103.00	214.00	0.2	8332.3	91.4	10.97
35	28	24/05/2021	2.792	2723.90	100.00	205.00	0.2	7854.0	77.7	9.89
36	28	24/05/2021	3.054	2798.24	102.00	214.00	0.2	8171.3	91.3	11.18

ANALISIS ESTADISTICO										
Edad	R (Mpa)	Relación de esbeltez	S (dest)	Superior	Inferior	REV	Error	Aprob	R (Mpa)	S (dest)
7	6.28	2.05	+/- 0.06	6.371	6.242	VERDADERO	+/- 0.09	6.28	6.27	+/- 0.01
	6.26	2.07				VERDADERO	+/- 0.02	6.26		
	6.38	2.03				FALSO				
14	6.72	2.13	+/- 1.22	8.725	6.288	VERDADERO	+/- 0.43	6.72	6.81	+/- 0.12
	6.89	2.14				VERDADERO	+/- 0.60	6.89		
	8.91	2.13				FALSO				
28	10.97	2.08	+/- 0.69	11.37	9.99	VERDADERO	+/- 0.40	10.97	11.08	+/- 0.15
	9.89	2.05				FALSO				
	11.18	2.10				VERDADERO	+/- 0.19	11.18		

Tabla 19. Resultados concreto permeable (sin agregado fino, 7% fibras sintéticas).

METODO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A COMPRESION (ASTM C39)										
ID	EDAD (Días)	FECHA DE ENSAYO	MASA (Kg)	DENSIDAD	d (mm)	h (mm)	VELOCIDAD (MPa/s)	AREA (mm ²)	CARGA (KN)	CARGA ESPECIFICA (MPa)
38	7	05/05/2021	3.158	3050.47	101.00	205.00	0.2	8011.8	104.2	11.00
42	7	05/05/2021	3.198	3029.27	102.00	207.00	0.2	8171.3	52.1	6.37
40	7	05/05/2021	2.878	2794.17	100.00	206.00	0.2	7854.0	95.6	12.17
37	14	12/05/2021	3.034	2852.25	101.00	208.00	0.2	8011.8	81.8	10.21
39	14	12/05/2021	2.926	2855.61	99.00	207.00	0.2	7697.7	85.8	12.14
43	14	12/05/2021	2.996	2846.42	102.00	209.00	0.2	8171.3	91.6	12.21
44	28	26/05/2021	2.938	2769.61	102.00	208.00	0.2	8171.3	106.4	13.02
47	28	26/05/2021	3.044	2928.33	99.00	210.00	0.2	7697.7	113.3	14.72

48	28	26/05/2021	2.974	2763.68	102.00	211.00	0.2	8171.3	83.3	10.20
----	----	------------	-------	---------	--------	--------	-----	--------	------	-------

ANALISIS ESTADISTICO										
Edad	R (Mpa)	Relacion de esbeltez	S (dest)	Superior	Inferior	REV	Error	Aprob	R (Mpa)	S (dest)
7	11.00	2.03	+/- 3.07	12.914	6.779	VERDADERO	+/- 1.91	11.00	11.59	+/- 0.83
	6.37	2.03				FALSO				
	12.17	2.06				VERDADERO	+/- 0.74	12.17		
14	10.21	2.06	+/- 1.14	12.655	10.385	FALSO			12.18	+/- 0.05
	12.14	2.09				VERDADERO	+/- 1.76	12.14		
	12.21	2.05				VERDADERO	+/- 0.45	12.21		
28	13.02	2.04	+/- 2.28	14.93	10.36	VERDADERO	+/- 1.91	13.02	13.87	+/- 1.20
	14.72	2.12				VERDADERO	+/- 0.21	14.72		
	10.20	2.07				FALSO				

METODO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A FLEXION (ASTM C78)										
ID	EDAD (Días)	FECHA DE ENSAYO	MASA (Kg)	b (mm)	h (mm)	l (mm)	Velocidad (MPa/s)	Área (mm ²)	Carga (KN)	Carga Especifica (Mpa)
19	14	12/05/2021	21.521	155.00	150.00	500.00	0.1	23250.0	19	0.82
20	14	12/05/2021	22.656	154.00	150.00	500.00	0.1	23100.0	19	0.83
21	14	12/05/2021	23.531	153.00	152.00	500.00	0.1	23566.1	20	0.85
22	28	26/05/2021	22.450	149.00	149.00	502.00	0.1	22053.0	20	0.89
23	28	26/05/2021	21.647	152.00	155.00	501.00	0.1	24345.3	18	0.93
24	28	26/05/2021	20.612	155.00	149.00	502.00	0.1	22941.0	18	0.96

ANALISIS ESTADISTICO										
Edad	R (Mpa)	S (dest)	Superior	Inferior	REV	Error	Aprob	R (Mpa)	S (dest)	
14	0.82	+/- 0.02	0.849	0.818	VERDADERO	+/- 0.00	0.82	0.83	+/- 0.01	
	0.83				VERDADERO	+/- 0.01	0.83			
	0.85				FALSO					
28	0.89	+/- 0.04	0.962	0.892	FALSO			0.95	+/- 0.02	
	0.93				VERDADERO	+/- 0.04	0.93			
	0.96				VERDADERO	+/- 0.00	0.96			

Tabla 20. Resultados concreto permeable con 5% de agregado fino, sin fibras sintéticas.

METODO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A COMPRESION (ASTM C39)										
---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

ID	EDAD (Días)	FECHA DE ENSAYO	MASA (Kg)	DENSIDAD AD	d (mm)	h (mm)	VELOCIDAD AD (MPa/s)	AREA (mm ²)	CARGA (KN)	CARGA ESPECIFICA A (MPa)
49	7	19/05/2021	3.456	3226.29	104.00	206.00	0.2	8494.9	57.8	6.80
50	7	19/05/2021	3.144	2963.87	102.00	209.00	0.2	8118.5	52.8	6.51
51	7	19/05/2021	3.200	2925.81	104.00	210.00	0.2	8494.9	67.9	7.99
53	14	26/05/2021	3.100	2909.3	101.00	211.00	0.2	8011.8	60.5	7.55
54	14	26/05/2021	3.284	3096.65	101.00	210.00	0.2	8011.8	77.5	9.68
55	14	26/05/2021	2.992	2807.02	102.00	209.00	0.2	8171.3	85.3	10.44
57	28	09/06/2021	3.096	2991.87	102.00	205.00	0.2	8145.9	94.1	10.21
58	28	09/06/2021	3.186	3123.22	101.00	202.00	0.2	8011.8	52.3	6.53
59	28	09/06/2021	3.128	2961.69	101.00	207.00	0.2	8102.6	93.2	10.06

ANÁLISIS ESTADÍSTICO										
Edad	R (Mpa)	Relación de esbeltez	S (dest)	Superior	Inferior	REV	Error	Aprob	R (Mpa)	S (dest)
7	6.80	1.98	+/- 0.78	7.884	6.316	VERDADERO	+/- 1.08	6.80	6.66	+/- 0.21
	6.51	2.05				VERDADERO	+/- 0.19	6.51		
	7.99	2.02				FALSO				
14	7.55	2.09	+/- 1.50	10.721	7.725	FALSO			10.06	+/- 0.54
	9.68	2.08				VERDADERO	+/- 1.95	9.68		
	10.44	2.05				VERDADERO	+/- 0.28	10.44		
28	10.21	2.01	+/- 2.08	11.02	6.85	VERDADERO	+/- 0.81	10.21	10.14	+/- 0.11
	6.53	2.00				FALSO				
	10.06	2.05				VERDADERO	+/- 0.96	10.06		

MÉTODO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A FLEXIÓN (ASTM C78)										
ID	EDAD (Días)	FECHA DE ENSAYO	MASA (Kg)	b (mm)	h (mm)	l (mm)	Velocidad (MPa/s)	Área (mm ²)	Carga (KN)	Carga Especifica (Mpa)
25	14	26/05/2021	22.846	151.00	152.00	502.00	0.1	23258.0	18	0.76
26	14	26/05/2021	23.035	152.00	152.00	501.00	0.1	23412.1	18	0.76
27	14	26/05/2021	21.028	150.00	148.00	502.00	0.1	21904.0	13	0.58
28	28	09/05/2021	24.034	153.00	157.00	503.00	0.1	25142.0	20	0.79
29	28	09/05/2021	21.376	154.00	152.00	503.00	0.1	23702.1	13	0.54
30	28	09/05/2021	19.082	151.00	135.00	505.00	0.1	18346.5	19	0.75

ANÁLISIS ESTADÍSTICO										
Edad	R (Mpa)	S (dest)	Superior	Inferior	REV	Error	Aprob	R (Mpa)	S (dest)	

14	0.76	+/- 0.10	0.804	0.596	VERDADERO	+/- 0.16	0.76	0.76	+/- 0.00
	0.76				VERDADERO	+/- 0.16	0.76		
	0.58				FALSO				
28	0.79	+/- 0.13	0.828	0.559	VERDADERO	+/- 0.04	0.79	0.77	+/- 0.03
	0.54				FALSO				
	0.75				VERDADERO	+/- 0.08	0.75		

Tabla 21. Resultados concreto permeable con 5% de agregado fino, 3% de fibras sintéticas.

METODO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A COMPRESION (ASTM C39)										
ID	EDAD (Días)	FECHA DE ENSAYO	MASA (Kg)	DENSIDAD	d (mm)	h (mm)	VELOCIDAD (MPa/s)	AREA (mm ²)	CARGA (KN)	CARGA ESPECIFICA (MPa)
61	7	20/05/2021	3.194	2962.76	103.00	209.00	0.2	8332.3	64.3	7.72
63	7	20/05/2021	2.896	2659.55	103.00	211.00	0.2	8332.3	67.3	8.08
64	7	20/05/2021	3.182	2921.20	100.00	200.00	0.2	7905.9	48.7	6.16
65	14	27/05/2021	2.992	2767.3	102.00	212.00	0.2	8171.3	76.8	9.40
67	14	27/05/2021	2.936	2795.13	101.00	208.00	0.2	8011.8	74.3	9.28
68	14	27/05/2021	2.91	2718.1	101.00	212.00	0.2	8011.8	61.5	7.68
70	28	10/06/2021	3.200	2948.3	102.00	202.00	0.2	8171.3	89.1	9.65
71	28	10/06/2021	3.146	2951.50	102.00	209.00	0.2	8171.3	72.6	8.89
72	28	10/06/2021	3.008	2920.39	100.00	206.00	0.2	7854	65.8	8.38

ANALISIS ESTADISTICO										
Edad	R (Mpa)	Relación de esbeltez	S (dest)	Superior	Inferior	REV	Error	Aprob	R (Mpa)	S (dest)
7	7.72	2.03	+/- 1.02	8.341	6.299	VERDADERO	+/- 0.62	7.72	7.90	+/- 0.25
	8.08	2.05				VERDADERO	+/- 1.78	8.08		
	6.16	2.00				FALSO				
14	9.40	2.08	+/- 0.96	9.747	7.826	VERDADERO	+/- 0.35	9.40	9.34	+/- 0.08
	9.28	2.06				VERDADERO	+/- 1.45	9.28		
	7.68	2.10				FALSO				
28	9.65	1.98	+/- 0.64	9.61	8.33	FALSO	+/- 0.04	9.65	9.27	+/- 0.54
	8.89	2.05				VERDADERO	+/- 0.72	8.89		
	8.38	2.06				VERDADERO				

METODO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A FLEXION (ASTM C78)

ID	EDAD (Días)	FECHA DE ENSAYO	MASA (Kg)	b (mm)	h (mm)	l (mm)	Velocidad (MPa/s)	Area (mm ²)	Carga (KN)	Carga Especifica (Mpa)
31	14	27/05/2021	17.454	149.00	125.00	500.00	0.1	15520.8	13	0.85
32	14	27/05/2021	16.208	149.00	131.00	499.00	0.1	17046.6	7	0.41
33	14	27/05/2021	19.292	152.00	129.00	502.00	0.1	16862.9	14	0.83
34	28	09/05/2021	20.781	150.00	142.00	500.00	0.1	20164.0	12	0.61
35	28	09/05/2021	21.980	154.00	143.00	503.00	0.1	20994.3	17	0.83
36	28	09/05/2021	16.803	151.00	129.00	501.00	0.1	16751.9	19	0.87

ANALISIS ESTADISTICO											
Edad	R (Mpa)	S (dest)	Superior	Inferior	REV	Error	Aprob	R (Mpa)	S (dest)		
14	0.85	+/- 0.25	0.945	0.448	VERDADERO	-+/- 0.40	0.85	0.84	+/- 0.01		
	0.41				FALSO						
	0.83				VERDADERO					+/- 0.12	0.83
28	0.61	+/- 0.14	0.910	0.630	FALSO	+/- 0.20	0.83	0.85	+/- 0.03		
	0.83				VERDADERO					+/- 0.04	0.87
	0.87				VERDADERO					+/- 0.04	0.87

Tabla 22. Resultados concreto permeable con 5% de agregado fino, 5% de fibras sintéticas.

METODO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A COMPRESION (ASTM C39)										
ID	EDAD (Días)	FECHA DE ENSAYO	MASA (Kg)	DENSIDA D	d (mm)	h (mm)	VELOCID AD (MPa/s)	AREA (mm ²)	CARGA (KN)	CARGA ESPECIFIC A (MPa)
85	7	26/05/2021	3.054	2823.86	103.00	210.00	0.2	8332.3	74.6	8.95
87	7	26/05/2021	2.766	2658.59	102.00	204.00	0.2	8171.3	65.4	8.00
88	7	26/05/2021	3.008	2859.03	101.00	210.00	0.2	8011.8	67.5	8.42
89	14	02/06/2021	3.434	3211.34	101.00	210.00	0.2	8128.1	105.2	12.94
90	14	02/06/2021	3.122	2951.14	100.00	209.00	0.2	7980.1	72.1	9.03
91	14	02/06/2021	3.140	2926.3	102.00	210.00	0.2	8192.1	51.6	6.30
93	28	17/06/2021	2.900	2777.96	101.00	209.00	0.2	8011.8	66.3	8.27
95	28	17/06/2021	2.9	2737.78	101.00	206.00	0.2	8064.3	79.7	9.89
96	28	17/06/2021	2.9	2785.21	102.00	207.00	0.2	8065.3	82.2	10.12

ANALISIS ESTADISTICO

Edad	R (Mpa)	Relación de esbeltez	S (dest)	Superior	Inferior	REV	Error	Aprob	R (Mpa)	S (dest)
7	8.95	2.04	+/- 0.48	8.933	7.981	FALSO			8.21	+/- 0.30
	8.00	2.00				VERDADERO	+/- 0.02	8.00		
	8.42	2.08				VERDADERO	+/- 0.51	8.42		
14	12.94	2.08	+/- 3.34	12.761	6.086	FALSO			9.03	+/- 4.93
	9.03	2.09				VERDADERO	+/- 2.94	9.03		
	6.30	2.06				VERDADERO	+/- 0.21	2.06		
28	8.27	2.07	+/- 1.01	10.43	8.42	FALSO			10.01	+/- 0.16
	9.89	2.04				VERDADERO	+/- 0.54	9.89		
	10.12	2.03				VERDADERO	+/- 0.31	10.12		

METODO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A FLEXION (ASTM C78)

ID	EDAD (Días)	FECHA DE ENSAYO	MASA (Kg)	b (mm)	h (mm)	l (mm)	Velocidad (MPa/s)	Área (mm ²)	Carga (KN)	Carga Especifica (Mpa)
37	14	02/06/2021	21.929	150.00	160.00	504.00	0.1	24000.0	17	0.78
38	14	02/06/2021	22.772	150.00	160.00	499.00	0.1	24000.0	17	0.78
39	14	02/06/2021	21.830	153.00	153.00	499.00	0.1	23877.2	19	0.81
40	28	17/06/2021	20.314	153.00	142.00	503.00	0.1	20567.3	18	0.86
41	28	17/06/2021	22.376	152.00	150.00	501.00	0.1	22800.0	22	0.97
42	28	17/06/2021	21.133	152.00	144.00	499.00	0.1	21012.5	20	0.92

ANALISIS ESTADISTICO

Edad	R (Mpa)	S (dest)	Superior	Inferior	REV	Error	Aprob	R (Mpa)	S (dest)
14	0.78	+/- 0.02	0.807	0.773	VERDADERO	+/- 0.01	0.78	0.80	+/- 0.02
	0.78				VERDADERO				
	0.81				FALSO	+/- 0.00	0.81		
28	0.86	+/- 0.06	0.972	0.862	FALSO			0.95	+/- 0.04
	0.97				VERDADERO	+/- 0.11	0.97		
	0.92				VERDADERO	+/- 0.05	0.92		

METODO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A COMPRESION (ASTM C39)

ID	EDAD (Días)	FECHA DE ENSAYO	MASA (Kg)	DENSIDAD	d (mm)	h (mm)	VELOCIDAD (MPa/s)	AREA (mm ²)	CARGA (KN)	CARGA ESPECIFICA (MPa)
97	7	28/05/2021	3.134	2926.24	102.00	210.00	0.2	8171.3	105.5	12.91
98	7	28/05/2021	3.130	2894.93	102.00	212.00	0.2	8171.3	106.8	13.07
100	7	28/05/2021	3.048	2910.22	102.00	209.00	0.2	8171.3	113.9	13.94
102	14	03/06/2021	3.316	3038.59	102.00	213.00	0.2	8187.3	112.6	13.76

103	14	03/06/2021	3.264	3071.76	100.00	210.00	0.2	7980.1	91.7	14.49
104	14	03/06/2021	3.344	2973.42	102.00	220.00	0.2	8187.3	107.1	14.08
105	28	17/06/2021	2.900	2832.28	99.00	202.00	0.2	7744.4	109.6	15.99
106	28	17/06/2021	3.058	2908.06	100.00	206.00	0.2	7905.9	141.7	16.91
107	28	17/06/2021	3.102	2994.7	102.00	205.00	0.2	8171.3	142.6	17.46

ANALISIS ESTADISTICO										
Edad	R (Mpa)	Relacion de esbeltez	S (dest)	Superior	Inferior	REV	Error	Aprob	R (Mpa)	S (dest)
7	12.91	2.06	+/- 0.55	13.861	12.752	VERDADERO	+/- 0.95	12.91	13.31	+/- 0.55
	13.07	2.08				VERDADERO	+/- 0.32	13.07		
	13.94	2.05				FALSO				
14	13.76	2.09	+/- 0.37	14.476	13.744	VERDADERO	+/- 0.72	13.76	13.92	+/- 0.23
	14.49	2.10				FALSO				
	14.08	2.16				VERDADERO	+/- 0.40	14.08		
28	15.99	2.04	+/- 0.74	17.53	16.04	FALSO			17.19	+/- 0.39
	16.91	2.06				VERDADERO	+/- 0.62	16.91		
	17.46	2.01				VERDADERO	+/- 0.07	17.46		

METODO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A FLEXION (ASTM C78)										
ID	EDAD (Días)	FECHA DE ENSAYO	MASA (Kg)	b (mm)	h (mm)	l (mm)	Velocidad (MPa/s)	Área (mm ²)	Carga (KN)	Carga Especifica (Mpa)
43	14	03/06/2021	22.251	151.00	153.00	503.00	0.1	23565.1	18	0.78
44	14	03/06/2021	22.133	151.00	157.00	500.00	0.1	24813.3	20	0.91
45	14	03/06/2021	21.600	151.00	151.00	503.00	0.1	22953.0	21	0.92
46	28	18/06/2021	22.232	151.00	157.00	500.00	0.1	24813.3	25	0.98
47	28	18/06/2021	22.771	152.00	157.00	503.00	0.1	24977.7	25	0.97
48	28	18/06/2021	20.407	151.00	147.00	503.00	0.1	21753.1	20	0.82

ANALISIS ESTADISTICO										
Edad	R (Mpa)	S (dest)	Superior	Inferior	REV	Error	Aprob	R (Mpa)	S (dest)	
14	0.78	+/- 0.08	0.948	0.792	FALSO			0.92	+/- 0.01	
	0.91				VERDADERO	+/- 0.12	0.91			
	0.92				VERDADERO	+/- 0.03	0.92			
28	0.98	+/- 0.09	1.013	0.834	VERDADERO	+/- 0.03	0.98	0.98	+/- 0.01	
	0.97				VERDADERO	+/- 0.14	0.97			
	0.82				FALSO					

Lista de referencias

- ACI. (2010). Report on Pervious Concrete. In *ACI Commitee 522* (Issue March).
<https://www.concrete.org/Portals/0/Files/PDF/Previews/522R-10web.pdf>
- Agar-Ozbek, A. S., Weerheijm, J., Schlangen, E., & Van Breugel, K. (2013). Investigating porous concrete with improved strength: Testing at different scales. *Construction and Building Materials*, *41*, 480–490.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.040>
- Ahmed, A. M., Hussein, A. H., & Hammood, M. T. (2019). Recycling of disposal Polypropylene Blister Tablets and Strapping ties as fiber reinforcement for Pervious concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *584*(1).
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/584/1/012031>
- Akand, L., Yang, M., & Wang, X. (2018). Effectiveness of chemical treatment on polypropylene fibers as reinforcement in pervious concrete. *Construction and Building Materials*, *163*, 32–39. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.068>
- AlShareedah, O., Nassiri, S., Chen, Z., Englund, K., Li, H., & Fakron, O. (2019). Field performance evaluation of pervious concrete pavement reinforced with novel discrete reinforcement. *Case Studies in Construction Materials*, *10*, e00231.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00231>
- AlShareedah, O., Nassiri, S., & Dolan, J. D. (2019). Pervious concrete under flexural fatigue loading: Performance evaluation and model development. *Construction and Building Materials*, *207*, 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.111>
- Angela Susan Hager. (2008). SUSTAINABLE DESIGN OF PERVIOUS CONCRETE PAVEMENTS. *Education*, August.
- Argos. (2019). PAVIMENTOS DE CONCRETO: ENSAYO DE COMPRESIÓN VS. ENSAYO DE FLEXIÓN. <https://www.360enconcreto.com/blog/que-hacer-cuando/ensayo-compresion-ensayo-flexion-del-concreto>
- Argos, C., & Arango, S. E. (2016a). *Concreto permeable (1 de 2)*. 3, 80–85.
- Argos, C., & Arango, S. E. (2016b). *Concreto permeable (2 de 2)*. 3, 80–85.
- Bhutta, M. A. R., Tsuruta, K., & Mirza, J. (2012). Evaluation of high-performance porous

- concrete properties. *Construction and Building Materials*, 31, 67–73.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.024>
- Bonicelli, A., Arguelles, G. M., & Pumarejo, L. G. F. (2016). Improving Pervious Concrete Pavements for Achieving More Sustainable Urban Roads. *Procedia Engineering*, 161, 1568–1573. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.628>
- Bonicelli, A., Giustozzi, F., & Crispino, M. (2015). Experimental study on the effects of fine sand addition on differentially compacted pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 91, 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.012>
- Bonicelli Alessandra, G. M. G. F. (2016). Improving Pervious Concrete Pavements for Achieving More Sustainable Urban Roads. *Procedia Engineering*, 161, 1568–1573. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.628>
- Brake, N. A., Allahdadi, H., & Adam, F. (2016). Flexural strength and fracture size effects of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 113, 536–543. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.045>
- Caetano, H., Rodrigues, J. P. C., & Pimienta, P. (2019). Flexural strength at high temperatures of a high strength steel and polypropylene fibre concrete. *Construction and Building Materials*, 227, 116721. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116721>
- Chandrappa, A. K., & Biligiri, K. P. (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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.054>
- Chandrappa, A. K., & Biligiri, K. P. (2017). Flexural-fatigue characteristics of pervious concrete: Statistical distributions and model development. *Construction and Building Materials*, 153, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.081>
- Chang, J. J., Yeih, W., Chung, T. J., & Huang, R. (2016). Properties of pervious concrete made with electric arc furnace slag and alkali-activated slag cement. *Construction and Building Materials*, 109, 34–40. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.049>
- Chen, J., Yin, X., Wang, H., & Ding, Y. (2018). Evaluation of durability and functional

- performance of porous polyurethane mixture in porous pavement. *Journal of Cleaner Production*, 188, 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.297>
- Chen, Y., Wang, K., Wang, X., & Zhou, W. (2013). Strength, fracture and fatigue of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 42, 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.006>
- Crouch, L. K., Smith, N., Walker, A. C., Tim R. Dunn, A., & Sparkman, A. (2006). *Determining Pervious PCC Permeability with a Simple Triaxial Flexible-Wall Constant Head Permeameter*. 931, 8 مرامش; ص 99-117.
- Dávila, C. J. M. C. A. y P. (2011). *INFLUENCIA DE LAS FIBRAS DE POLIPROPILENO EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO EN ESTADOS PLÁSTICO Y ENDURECIDO*. 2, 36.
- Debnath, B., & Sarkar, P. P. (2019). Permeability prediction and pore structure feature of pervious concrete using brick as aggregate. *Construction and Building Materials*, 213, 643–651. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.099>
- Deo, O., & Neithalath, N. (2011). Compressive response of pervious concretes proportioned for desired porosities. *Construction and Building Materials*, 25(11), 4181–4189. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.055>
- Eidan, J., Rasoolan, I., Rezaeian, A., & Poorveis, D. (2019). Residual mechanical properties of polypropylene fiber-reinforced concrete after heating. *Construction and Building Materials*, 198, 195–206. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.209>
- Giustozzi, F. (2016). Polymer-modified pervious concrete for durable and sustainable transportation infrastructures. *Construction and Building Materials*, 111, 502–512. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.136>
- Grubeša, I. N., Barišić, I., Ducman, V., & Korat, L. (2018). Draining capability of single-sized pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 169, 252–260. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.037>
- Guzmán, D. S. de. (n.d.). *Tecnología del concreto y del mortero*.
- Hesami, S., Ahmadi, S., & Nematzadeh, M. (2014). Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement. *Construction and Building*

- Materials*, 53, 680–691. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.070>
- 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.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.025>
- Ibrahim, A., Mahmoud, E., Yamin, M., & Patibandla, V. C. (2014). Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties. *Construction and Building Materials*, 50, 524–529.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.022>
- Kayhanian, M., Li, H., Harvey, J. T., & Liang, X. (2019). Application of permeable pavements in highways for stormwater runoff management and pollution prevention: California research experiences. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 8(4), 358–372. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2019.01.001>
- Kevern, J. T. (2015). Evaluating permeability and infiltration requirements for pervious concrete. *Journal of Testing and Evaluation*, 43(3), 544–553.
<https://doi.org/10.1520/JTE20130180>
- Kia, A., Wong, H. S., & Cheeseman, C. R. (2017). Clogging in permeable concrete: A review. *Journal of Environmental Management*, 193(September), 221–233.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.018>
- Kim, Y. J., Gaddafi, A., & Yoshitake, I. (2016). Permeable concrete mixed with various admixtures. *Materials and Design*, 100, 110–119.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.109>
- Korat, L., Ducman, V., & Netinger, I. (2015). *Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete*. 78, 69–76.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.073>
- Lian, C., & Zhuge, Y. (2010a). Optimum mix design of enhanced permeable concrete - An experimental investigation. *Construction and Building Materials*, 24(12), 2664–2671. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.057>
- Lian, C., & Zhuge, Y. (2010b). Optimum mix design of enhanced permeable concrete - An experimental investigation. *Construction and Building Materials*, 24(12), 2664.

- Lian, C., Zhuge, Y., & Beecham, S. (2011). The relationship between porosity and strength for porous concrete. *Construction and Building Materials*, 25(11), 4294–4298. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.05.005>
- Liu, T., Wang, Z., Zou, D., Zhou, A., & Du, J. (2019). Strength enhancement of recycled aggregate pervious concrete using a cement paste redistribution method. *Cement and Concrete Research*, 122(May), 72–82. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.004>
- López-Carrasquillo, V., & Hwang, S. (2017). Comparative assessment of pervious concrete mixtures containing fly ash and nanomaterials for compressive strength, physical durability, permeability, water quality performance and production cost. *Construction and Building Materials*, 139, 148–158. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.052>
- Lopez, R., Pialarissi, S., Pujadas, P., & Aguado, A. (2017). *Innovaciones y avances en el ambito de los pavimentos urbanos para smart cities*. 8.
- Lu, G., Renken, L., Li, T., Wang, D., Li, H., & Oeser, M. (2019). Experimental study on the polyurethane-bound pervious mixtures in the application of permeable pavements. *Construction and Building Materials*, 202, 838–850. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.051>
- Magesvari, M. U., & Narasimha, V. L. (2013). Studies on Characterization of Pervious Concrete for Pavement Applications. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 104, 198–207. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.112>
- Meddah, M. S., & Hago, A. W. (2017). ScienceDirect Effect of granular fraction combinations on pervious concrete performance. *Materials Today: Proceedings*, 4(9), 9700–9704. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.250>
- Meininger, R. C. (1988). *Pervious Concrete lar Paving*.
- Mohammed, B. S., Liew, M. S., Alaloul, W. S., Khed, V. C., Hoong, C. Y., & Adamu, M. (2018). Properties of nano-silica modified pervious concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 8(January), 409–422. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.03.009>
- National Ready Mixed Concrete Association •. (n.d.). *PIP 3 – Acceptance Testing of*

Pervious Concrete.

- Nguyen, D. H., Sebaibi, N., Boutouil, M., Leleyter, L., & Baraud, F. (2014). A modified method for the design of pervious concrete mix. *Construction and Building Materials*, 73, 271–282. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.088>
- Paul, T. D., Michael, L. L., David, A. J., Tennis, P. D., Leming, M. L., & Akers, D. J. (2004). *Pervious Concrete Pavements : Vol. Portland C* (Issue January 2004). Portland Cement Association. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Diseño y Control de Mezclas de Concreto*.
- 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. <https://doi.org/10.1260/2046-0430.4.1.77>
- Rangelov, M., Nassiri, S., Chen, Z., Russell, M., & Uhlmeier, J. (2017). ScienceDirect Quality evaluation tests for pervious concrete pavements ' placement. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10(3), 245–253. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.01.007>
- Rangelov, M., Nassiri, S., Haselbach, L., & Englund, K. (2016). Using carbon fiber composites for reinforcing pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 126, 875–885. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.035>
- Rehder, B., Banh, K., & Neithalath, N. (2014). Fracture behavior of pervious concretes: The effects of pore structure and fibers. *Engineering Fracture Mechanics*, 118, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2014.01.015>
- Rostami, R., Zarrebini, M., Mandegari, M., Sanginabadi, K., Mostofinejad, D., & Abtahi, S. M. (2019). The effect of concrete alkalinity on behavior of reinforcing polyester and polypropylene fibers with similar properties. *Cement and Concrete Composites*, 97(August 2018), 118–124. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.12.012>
- Saadeh, S., Ralla, A., Al-Zubi, Y., Wu, R., & Harvey, J. (2019). Application of fully permeable pavements as a sustainable approach for mitigation of stormwater runoff. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 8(4), 338–350. <https://doi.org/10.1016/j.ijst.2019.02.001>

- Sartipi, M., & Sartipi, F. (2019). Stormwater retention using pervious concrete pavement: Great Western Sydney case study. *Case Studies in Construction Materials*, *11*, e00274. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00274>
- Schaefer, V. R., & Kevern, J. T. (2011). *An Integrated Study of Pervious Concrete Mixture Design for Wearing Course Applications An Integrated Study of Pervious Concrete Mixture Design for Wearing*.
- Shu, X., Huang, B., Wu, H., Dong, Q., & Burdette, E. G. (2011). Performance comparison of laboratory and field produced pervious concrete mixtures. *Construction and Building Materials*, *25*(8), 3187–3192. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.002>
- Sun, J. (2013). Strength criterion for ecological light porous concrete under multiaxial stress. *Construction and Building Materials*, *44*, 663–670. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.062>
- Tabatabaieian, M., Khaloo, A., & Khaloo, H. (2019). An innovative high performance pervious concrete with polyester and epoxy resins. *Construction and Building Materials*, *228*, 116820. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116820>
- Tang, C. W., Cheng, C. K., & Tsai, C. Y. (2019). Mix design and mechanical properties of high-performance pervious concrete. *Materials*, *12*(16). <https://doi.org/10.3390/ma12162577>
- Torres, A., Hu, J., & Ramos, A. (2015). The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, *95*, 850–859. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.187>
- Wang, D., Ju, Y., Shen, H., & Xu, L. (2019). Mechanical properties of high performance concrete reinforced with basalt fiber and polypropylene fiber. *Construction and Building Materials*, *197*, 464–473. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.181>
- Wang, H., Li, H., Liang, X., Zhou, H., Xie, N., & Dai, Z. (2019). Investigation on the mechanical properties and environmental impacts of pervious concrete containing fly ash based on the cement-aggregate ratio. *Construction and Building Materials*, *202*, 387–395. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.044>

- Xie, N., Akin, M., & Shi, X. (2019). Permeable concrete pavements: A review of environmental benefits and durability. *Journal of Cleaner Production*, *210*, 1605–1621. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.134>
- Xu, G., Shen, W., Huo, X., Yang, Z., Wang, J., Zhang, W., & Ji, X. (2018). Investigation on the properties of porous concrete as road base material. *Construction and Building Materials*, *158*, 141–148. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.151>
- Zhang, A., Li, Z., Zhou, M., Cao, Y., Jiang, B., & Qiu, S. (2011). Research on permeable concrete interface structure. *2011 International Conference on Electric Technology and Civil Engineering, ICETCE 2011 - Proceedings*, 3410–3412. <https://doi.org/10.1109/ICETCE.2011.5775780>
- Zhong, R., & Wille, K. (2015). Material design and characterization of high performance pervious concrete. *Construction and Building Materials*, *98*, 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.027>
- Zhong, R., & Wille, K. (2016). Compression response of normal and high strength pervious concrete. *Construction and Building Materials*, *109*, 177–187. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.051>
- Zhong, R., & Wille, K. (2018). Influence of matrix and pore system characteristics on the durability of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, *162*, 132–141. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.175>
- Zhou, H., Li, H., Abdelhady, A., Liang, X., Wang, H., & Yang, B. (2019). Experimental investigation on the effect of pore characteristics on clogging risk of pervious concrete based on CT scanning. *Construction and Building Materials*, *212*, 130–139. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.310>
- Zhou, J., Zheng, M., Wang, Q., Yang, J., & Lin, T. (2016). Flexural fatigue behavior of polymer-modified pervious concrete with single sized aggregates. *Construction and Building Materials*, *124*, 897–905. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.136>
- Zhu, H., Yu, M., Zhu, J., Lu, H., & Cao, R. (2019). Simulation study on effect of permeable pavement on reducing flood risk of urban runoff. *International Journal of*

Transportation Science and Technology, 8(4), 373–382.

<https://doi.org/10.1016/j.ijst.2018.12.001>