



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

“Desarrollo de cementantes especiales para concretos ecológicos”

Opción de titulación
Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ciencias (Construcción)

Presenta:

Ing. Marina Fernanda Alvarez Hormaeche

Dirigido por:

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

SINODALES

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza
Presidente

Dra. Teresa López Lara
Secretario

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel
Vocal

Dr. José Gabriel Ríos Moreno
Suplente

Dr. Francisco Javier García Rodríguez
Suplente

Dr. Aurelio Domínguez González Director de
la Facultad

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Directora de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro. México
Diciembre 2015

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.

RESUMEN

El problema en el manejo habitual de las aguas pluviales, su escorrentía e infiltración, implican la impermeabilización de las superficies de rodamiento y grandes colectores que pretenden despedir dichas aguas, esto asociado a un descaminado servicio de mantenimiento lleva a futuras inundaciones. El objetivo de esta investigación es realizar una caracterización mecánica del concreto permeable estableciendo condiciones de diseño de mezcla de concreto óptimas, es decir que sea permeable sin perder su resistencia. Basados en un diseño de experimentos, se fabricaron nuevos concretos ecológicos según las necesidades requeridas por medio del desarrollo y caracterización de cementantes, agregados y aditivos logrando concretos porosos que promueven la competitividad con los diseños actualmente empleados.

Palabras clave: condiciones óptimas, permeabilidad, resistencia, caracterización, cementante, aditivos.

SUMMARY

The problem in the usual handling stormwater runoff and infiltration its involve waterproofing bearing surfaces and Major collectors seeking to dismiss those waters , THIS Associate an un l erred Servicing wears a future floods. Objective of the research is to esta mechanical characterization of pervious concrete Laying the design conditions Optimas mix concrete , it is said to be permeable to lose his sin Resistance. They based on a design of experiments , new concrete were manufactured according to the needs required ecological through the development and characterization of cementitious , aggregate and additives achieving concrete porous that promote competitiveness with designs currently employed .

ÍNDICE

RESUMEN	2
SUMMARY	3
ÍNDICE	4
Índice de Cuadros	6
Índice de figuras	8
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1 Descripción del problema.....	10
1.2 Justificación	11
1.3 Hipótesis y Objetivos.....	13
2. REVISIÓN DE LA LITERATURA	15
2.1 Antecedentes	15
2.2 Estudios realizados en concretos ecológicos	20
2.3 Diferentes diseños de concretos permeables en el mundo.....	25
2.4 Sistemas de concretos permeables	29
2.4.1 Ecocreto	29
2.4.2 Sistema Atlantis	31
3. METODOLOGÍA	33
3.1 Métodos de diseño	33
3.1.1 Método de la Portland Cement Association	33
3.1.2 Método de diseño AASHTO para concretos convencionales.....	34
3.2 Variables del concreto ecológico: Componentes y sus comportamientos.	35
3.3 Pruebas mecánicas	38
3.3.1 Medición de permeabilidad	38
3.3.2 Modelo de percolación.....	41
3.3.3 Prueba de resistencia a la compresión	43
3.4 Determinación de la consistencia normal de los cementantes hidráulicos	43
3.5 Determinación de la consistencia normal	46
3.6 Caracterización de los agregados.....	47
3.7 Experimentación en laboratorio.....	48
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	60

5. CONCLUSIONES	83
6. BIBLIOGRAFÍA	85

Índice de Cuadros

Cuadro		Página
2.1	Mezclas de concreto permeable en Estados Unidos	27
2.2	Diseño de concreto permeable en Bélgica	28
2.3	Diseño de concreto permeable en Japón	28
2.4	Diseño de concreto permeable en Alemania	29
2.5	Clasificación y tipo de aditivos	35
3.1	Clasificación y tipo de aditivos	40
3.2	Normas ASTM	51
3.3	Peso volumétrico seco y varillado (P.V.S.V.)	54
3.4	Peso volumétrico seco y suelto (P.V.S.S.)	55
3.5	Tabla general de pesos volumétricos secos y sueltos	55
3.6	Proporcionamiento de agregados para las mezclas de concretos ecológicos	57
3.7	Cantidad de agregados para la elaboración de concretos ecológicos	59
3.8	Proporción y cantidad de agregados para las mezclas con la inclusión de aditivos	62
4.1	Resultados de la prueba de resistencia a la compresión realizados a las probetas cilíndricas en sus diferentes edades etapa 1.	67
4.2	Gráfica de resultados de las pruebas de resistencia a la compresión realizadas a las probetas en la primer etapa de investigación.	
4.3	Resultados de las pruebas de permeabilidad realizadas en las probetas cilíndricas en sus diferentes edades, etapa 1.	
4.4	Gráfica de resultados de las pruebas de permeabilidad realizadas a las probetas en la primer etapa de investigación.	
4.5	Resultados de las pruebas de resistencia a la compresión realizadas a las probetas en sus diferentes edades, etapa2.	
4.6	Gráfica de resultados de las pruebas de resistencia a la compresión realizadas a las probetas en la segunda etapa de investigación.	
4.7	Resultados de las pruebas de permeabilidad realizadas en las probetas cilíndricas en sus diferentes edades, etapa 2.	
4.8	Gráfica de resultados de las pruebas de permeabilidad realizadas a las probetas en la segunda etapa de investigación.	
4.9	Gráfica comparativa entre la permeabilidad y la resistencia a la compresión de las probetas a la edad de 3 días.	
4.1	Gráfica comparativa entre la permeabilidad y la resistencia a la compresión de las probetas a la edad de 7 días.	
4.11	Gráfica comparativa entre la permeabilidad y la resistencia a la	

4.12 compresión de las probetas a la edad de 14 días.
Gráfica comparativa entre la permeabilidad y la resistencia a la compresión de las probetas a la edad de 28 días.

Índice de figuras

Figura		Página
2.1	Modelo esquemático de concreto permeable	19
2.2	Efecto de la inclusión de árido con alto contenido inicial de vacíos	22
2.3	Concreto ecológico	23
2.4	Sistema constructivo de un concreto ecológico	26
2.5	Sistema constructivo de un concreto permeable	26
2.6	Parque deportivo en Valencia España construido con Ecocreto	30
2.7	Estadio de futbol en Jalisco, México.	31
2.8	Calle pavimentada con concreto ecológico en Manzanillo, Colima, México.	31
2.9	Jardinera en Asturias, España.	32
2.1	Sistema Atlantis	33
2.11	Sistema Atlantis	34
3.1	Clasificación granulométrica de los agregados gruesos	52
3.2	Agregados gruesos	53
3.3	Pesos volumétricos	54
3.4	Especímenes de mezclas en laboratorio.	60
3.5	Elaboración de mezclas con inclusión de aditivos	61
4.1	Probetas cilíndricas de concretos permeables	64
4.2	Probetas cilíndricas con diferentes tamaños de agregados	66
4.3	Proceso de desarrollo de cementante para concreto ecológico	70
4.4	Resultados de las pruebas de resistencia a la compresión, etapa 2	74
4.5	Resultados de la prueba de permeabilidad a las probetas de concretos ecológicos de la segunda etapa, donde se incluyeron distintos tipos de aditivos	75
4.6	Desarrollo de concretos ecológicos con aditivos	75

1. INTRODUCCIÓN

“El concreto permeable es el llamado concreto sin agregados finos. El vacío que existe en este tipo de concretos permite que el agua y el aire pasen a través de su estructura. Puede ser utilizado en aplicaciones medioambientales tales como hormigón permeable para pavimento, de purificación de agua de hormigón, que absorbe el ruido de hormigón, hormigón permeable al aire, y otras aplicaciones de ingeniería civil y arquitectura.” (Park y Tia, 2004). “Por otra parte, el concreto permeable contiene una gran cantidad de huecos y por lo tanto su densidad y la conductividad térmica son menores que las de un concreto convencional.” (Park et al., 2005).

El concreto permeable está formado por Cemento Pórtland Ordinario (OPC), agregado grueso, poco agregado fino, aditivos y agua. La combinación de estos ingredientes produce un material endurecido con poros conectados que van de 2 a 8 mm y que permiten que el agua percole fácilmente. “El porcentaje de vacíos puede variar de 18% a 35%, con una resistencia a la compresión de 2.8 a 28 MPa (28 a 280 kg/cm²). La permeabilidad puede variar con el tamaño del agregado y la densidad de la mezcla, pero generalmente caen en el rango de 81 a 730 l/min/m².” (ACI 522R-06).

1.1 Descripción del problema

El problema en el manejo habitual de las aguas pluviales, su escorrentía e infiltración, implican la impermeabilización de las superficies de rodamiento y grandes colectores que pretenden despedir dichas aguas, esto en áreas urbanas es complicado ya que nuevos módulos de vivienda se sumarán y con ello aumentos de agua adicionales que no habían sido estimadas en el diseño de los colectores, lo que nos lleva a una saturación de los mismos, esto asociado a un descaminado servicio de mantenimiento lleva a futuras inundaciones. Si se adiciona la sobre explotación de los mantos acuíferos, impidiéndoles su recuperación, llevamos este recurso hídrico a los extremos, falta agua potable para los habitantes y cuando llueve torrencialmente las inundaciones afectan las áreas pobladas.

Hoy en día, se hace cada vez más necesario contar con pisos de concretos ecológicos que permitan la filtración de agua hacia el subsuelo. Sin embargo, para la construcción de éstos, se presentan varios problemas, sobre todo debido a que este tipo de concretos permeables tienen muy baja resistencia tanto a la flexión, como a la compresión, además de que generalmente se desmoronan. Existe el caso, por ejemplo, de los concretos sin finos, los cuales son permeables pero se desmoronan fácilmente. No alcanza la suficiente resistencia como para permitir su manejo en cualquier tipo de usos, lo cual lo limita a ser utilizado en estacionamientos y pisos peatonales.

El concreto permeable tiene limitaciones que deben de ser consideradas al planear su uso ya que la resistencia de enlace entre sus partículas es más baja que la de un concreto convencional, lo que significa que proporciona una resistencia a la compresión más baja, además, puesto que el uso de este tipo de concretos es reciente en cuanto a pavimentos existe una carencia de ingenieros expertos para su instalación.

Si bien, es práctico para muchos usos, el concreto ecológico en pavimentos es limitado por su baja durabilidad bajo tránsito pesado, esta carencia de la resistencia restringe su uso a funciones específicas. El concreto permeable limita su uso en áreas sujetas al tráfico de bajos volúmenes y cargas y se recomienda utilizarlo en estacionamientos, calzadas, banquetas, calles residenciales, entre otros.

En la actualidad, los concretos ecológicos son utilizados en espacios públicos de afluencia peatonal como parques, banquetas y andadores, además en estacionamientos y calles de poco tráfico entre otros; se pretende que con el concreto ecológico, producto del trabajo de investigación, se pueda utilizar también en vialidades de mediano tráfico donde es necesaria la implementación de este tipo de pavimentos contribuyendo en la disminución de saturación del drenaje conjuntamente con una baja de costos económicos por daños superficiales cuyo origen son los encharcamientos.

1.2 Justificación

En el manejo natural de las aguas pluviales las superficies que son permeables, permiten un porcentaje importante de infiltración, resisten menos mantenimiento y admiten la recarga de los mantos acuíferos mediante la infiltración de las aguas pluviales. Debería suponerse en las nuevas urbanizaciones el manejo de agua de manera lo más natural posible, por ejemplo con corredores verdes y con suelos permeables, como medidas ecológicas serán parte de una solución más compleja a la recarga de mantos acuíferos e inundaciones en zonas urbanas.

Con la utilización de concretos permeables se consigue recargar los mantos acuíferos y reducir el volumen, así como el caudal de escorrentía provocado por las lluvias, además, estos tipos de concretos se pueden aplicar en cualquier tipo

de suelo, su instalación permite o bien infiltrar el agua directamente al suelo o almacenarla en la estructura del pavimento y después drenarla a otro lugar.

Al no contar con herramientas que especifiquen explícitamente la elaboración de un concreto ecológico o normativa alguna en el País, el diseño de experimentos permite la creación de nuevos concretos ecológicos o permeables según las necesidades requeridas por medio del desarrollo y caracterización de cementantes especiales que tengan la capacidad de permeabilidad, lleva a la búsqueda y generación de nuevos sistemas de concretos porosos que promueven la competitividad con los diseños actualmente empleados con el objetivo de disminuir los costos y contribuir con el medio ambiente sin perder de vista las condiciones de calidad.

Las propiedades de la matriz cementante de un concreto permeable permiten la permeabilidad y el control óptimo del flujo de agua; por tal motivo, los insumos desarrollados en la investigación podrán captar y reutilizar el agua. Además, para evitar que el agua se filtre a diversas partes del suelo, el concreto debe colocarse sobre una matriz cementante, cuya resistencia permite sellar el flujo de agua hacia la profundidad. El trabajo del tipo de agregados será el de aumentar las propiedades de resistencia de la matriz cementante.

Es necesario el desarrollo y fabricación de nuevos cementantes que mejoren las propiedades mecánicas de un concreto ecológico y que continúen su permeabilidad.

Se pretende que al variar las proporciones en la mezcla, se obtengan diferentes niveles de resistencia controlables, que el uso de este producto pueda ser utilizado en cualquier clima, que no presente degradación, que el cementante utilizado reaccione con el cemento dándole mucha mayor resistencia a la compresión.

Las ventajas que presentan los concretos ecológicos son superficies de rodadura antiderrapantes, bajo costo de instalación comparado con un sistema con drenaje pluviales, reduce la necesidad de incrementar la capacidad de drenaje pluvial, tiene una vida promedio de 20 a 30 años según su correcta fabricación, recarga

los mantos acuíferos directamente, filtra los agentes que pueden contaminar las aguas subterráneas y dañar ecosistemas, percola el agua en vez de crear espejos de agua en la superficie de rodamiento con lo que mejora la visibilidad y reduce el hidroplaneo y el ruido del tráfico, así como el efecto de invernadero ya que no conserva tanto calor como el concreto convencional, al reducir la impermeabilización del terreno disminuye la frecuencia anual de caudales por lo que las inundaciones son menos probables.

Los métodos tradicionales, los planteados y formulados requieren de un trabajo de análisis absoluto y profundo de las variables con la finalidad de generar mejoras, las cuales se verán reflejadas en nuevas versiones de concretos ecológicos.

Cuando se habla de pavimentar en la actualidad, lo primero que se piensa es en el concreto hidráulico, pero en esta tesis se plantea que los concretos permeables sean una opción en superficies específicas como estacionamientos, banquetas, calles de tráfico ligero, áreas peatonales, además de contribuir así con el medio ambiente.

El porqué de esta Tesis se centra en que aún y cuando el concreto permeable esté siendo utilizado en México desde 1994 (De Buen, 2005), no se ha caracterizado conforme a sus propiedades mecánicas, esto lleva a su diseño y uso basándose únicamente en conceptos empíricos, con el riesgo de crear desconfianza entre los consumidores, si este concreto permeable llega a ser de menor vida útil que los concretos convencionales condenaría al no uso de pavimentos permeables futuros.

1.3 Hipótesis y Objetivos

Hipótesis

El uso de aditivos para cementos hidráulicos incrementará la resistencia a compresión de los concretos ecológicos sin disminuir considerablemente su permeabilidad.

Objetivo General

Realizar una caracterización mecánica del concreto permeable estableciendo condiciones de diseño de mezcla de concreto óptimas.

Objetivos específicos

- Fabricar un concreto 100% permeable con un cemento hidráulico.
- Fabricar un concreto permeable con aditivos.
- Desarrollo de un programa matemático a partir de resultados de permeabilidad y resistencia previos.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1 Antecedentes

“El concreto es el material más usado en todo el mundo, principalmente en la industria de la construcción, lo cual genera un elevado impacto ambiental que debe ser mitigado desde el diseño del material, su producción y hasta su aplicación en las construcciones” (Villas, 1995). “El concreto es un material durable, económico y versátil; de tipo compuesto formado por una matriz de liga que tiene como función principal mantener unida y aglutinada a la mezcla; y diversos dispersoides que son los materiales aglutinados y que dan volumen y cuerpo al compuesto” (Shackelford, 1995).

“En el 2009 un estimado de 70 billones de toneladas de cemento fue producido únicamente en los Estados Unidos. La gente en la actualidad está más informada y más a tono acerca de los efectos negativos que la raza humana deja atrás para las futuras generaciones. La palabra verde está en boca de todos, y cada faceta de la industria actual intenta reducir su huella de carbono” (Maier y Durham, 2012).

“El concreto permeable se utiliza como una de las soluciones para la disminución de la escorrentía ya que permite que el agua de lluvia fluya hacia la superficie de la tierra. El concreto ecológico es una mezcla de concreto especialmente colocado con poco o ningún agregado fino, donde hay muchos poros más grandes a través de la estructura que en el concreto convencional” (Tenis et al., 2004).

Las aplicaciones más difundidas del concreto permeable incluyen la pavimentación y tratamientos de superficie para permitir el drenaje. Se necesita más investigación para extender su empleo en otros campos y para verificar su funcionamiento en diferentes entornos

“El concreto permeable tuvo sus principios más prematuros en Europa. En el siglo XIX, fue utilizado en una pluralidad de usos tales como paredes con carga

hidráulica y para pavimentar. En el Reino Unido en 1852, se construyeron dos casas usando sólo grava en el concreto. La validez económica parece haber sido la primera razón para su uso más temprano debido a la cantidad limitada de cemento que se empleó. Años después, en 1923 fue que el concreto permeable reapareció y se utilizó como material de construcción viable, sin embargo, esta vez fue restringido a la construcción de hogares en áreas tales como Escocia, Liverpool, Londres y Manchester. Debido a su bajo costo el uso del concreto permeable en Europa aumentó continuamente, especialmente en los tiempos de la Segunda Guerra Mundial. El uso del concreto permeable continuó ganando renombre y su uso se extendió a lugares tales como Venezuela, África, Rusia y Estados Unidos” (Ghafoori, 1995).

Debido a que Estados Unidos no sufrió el mismo tipo de insuficiencias materiales que Europa después de la Segunda Guerra Mundial, el concreto permeable no tuvo una presencia propia en este país hasta los años 70's, en que su uso comenzó por sus características de permeabilidad y no como sustituto más barato del concreto convencional. El problema encontrado en los Estados Unidos era el excesivo impermeabilizado de las nuevas áreas construidas. Como siguió creciendo la urbanización, la cantidad del área impermeable aumentó. Esto tuvo un golpe perjudicial en el ambiente, causando la degradación en la calidad del agua.

El concreto permeable comenzó a usarse en diferentes estados de Estados Unidos, tales como Florida, New México y Utah, pero se extendió rápidamente en el país hasta llegar a los estados de Oklahoma, Wisconsin, Illinois y California.

El concreto ecológico ha tenido iniciaciones modestas, sin embargo, su uso como sustituto del concreto convencional ha crecido hasta volverse una herramienta de funcionamiento múltiples en la industria de la construcción, este tipo de concreto está formado por Cemento Pórtland Ordinario (OPC), agregado grueso, poco agregado fino, aditivos y agua. La combinación de estos ingredientes produce un material endurecido con poros conectados que van de 2 a 8 mm y que permiten que el agua percole fácilmente. “El porcentaje de vacíos puede variar de 18% a

35%, con una resistencia a la compresión de 2.8 a 28 MPa (28 a 280 kg/cm²). La permeabilidad puede variar con el tamaño del agregado y la densidad de la mezcla, pero generalmente caen en el rango de 81 a 730 l/min/m².” (ACI 522R-06).

En México los concretos ecológicos o también llamados permeables y porosos, tuvieron sus principios desde 1994, donde fueron puestos en práctica en áreas cercanas a árboles para la reducción de escurrimientos pluviales y aumentar la permeabilidad en ciertas áreas, así mismo el Ecocreto® se usa en pavimentación de calles, estacionamientos y banquetas.

El sistema Atlantis® se ha utilizado en España desde 1986, el cual permite recolectar las aguas pluviales en estacionamientos pero debido a su alto costo en pavimentaciones no ha progresado de manera masiva, en otras partes del mundo se usan bloques permeables o adopasto con la limitación de que la superficie resultante no es muy uniforme para el tránsito de vehículos.

“La investigación sobre materiales de concretos permeables (ecológicos) dio inicio en los países desarrollados, como Estados Unidos de América y Japón desde 1980. Sin embargo, los resultados obtenidos en estas investigaciones demostraban que la resistencia a la compresión del material era relativamente baja debido a su porosidad, alcanzando alrededor de 20 a 30 MPa, razón por la cual, el uso de este tipo de concreto sólo se podía aplicar en áreas específicas, tal como banquetas, estacionamientos, parques, entre otros.” (Nader y Shivaji, 1995).

La diferencia crítica está en aplicaciones en vías de alta velocidad, donde no se recomienda, en comparación con los tradicionales estacionamientos, los requerimientos no varían en la dureza de la capa de rodadura, es decir está directamente relacionado el porcentaje de desgaste. La durabilidad del material debe estar equilibrada con la porosidad. En la superficie de un concreto permeable se debe de considerar la reducción del ruido así como la resistencia de éste. El tamaño de los agregados deberá de ajustarse para lograr una mayor resistencia

tanto a la flexión como a la compresión, lo que probablemente es que la permeabilidad del concreto ecológico disminuya. Para que esto no pase y se aumente la resistencia así como la permeabilidad del concreto se pueden utilizar diferentes aditivos, como reductores de agua, con lo que la relación agua-cemento disminuye y mejoran el desempeño de este tipo de concretos.

Es de suma importancia considerar la resistencia mecánica de un concreto poroso para su uso como una capa de rodadura sin perder los objetivos de concreto permeable, es decir, manteniendo su permeabilidad sin perder sus resistencias. El diseño de la mezcla del concreto ecológico (cemento, agua, agregados y aditivos) deberá tener un equilibrio entre las propiedades de fragilidad, adherencia y elasticidad.

“Establecer una norma y un método de selección del tipo de cemento o matriz de liga para que se puedan realizar las mezclas adecuadas de concreto sin afectar sus propiedades, aunado con otras opciones o estrategias se podrían reducir mucho los costos y sobre todo el impacto al medio ambiente por sobreutilización de materias primas nuevas, sobre todo el cemento” (Hernández, 2008).

La figura 2.1 muestra un modelo esquemático del concreto permeable, el cual es un material compuesto poroso donde el agregado forma la estructura del concreto y la pasta de cemento une al agregado. “En estos tipos de concretos existen poros con diámetros mayores a 1 mm, por tal motivo el agua puede pasar a través del concreto rápidamente, sin embargo, la resistencia de un concreto ecológico es relativamente baja debido a la porosidad” (Hernández, 2008).

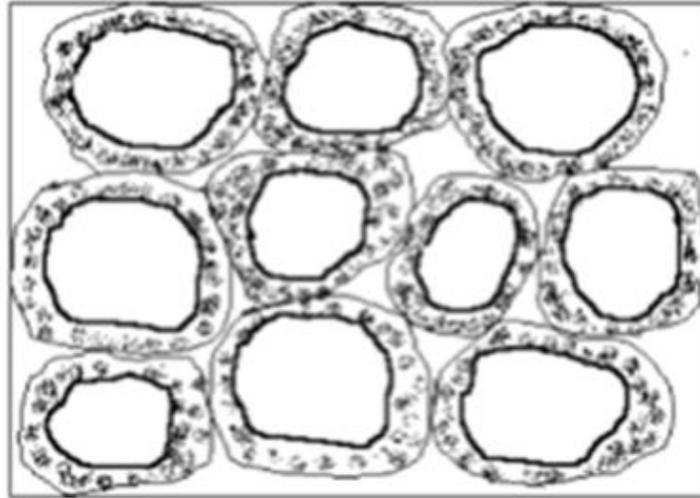


Figura 2.1 Modelo esquemático de concreto permeable.

Fuente: Hernández M (2008).

“La matriz del concreto permeable alrededor de sus poros es en sí mismo porosa, pero la filtración de agua a través del concreto convencional es insignificante en comparación con el flujo a través de los macroporos y por lo tanto se asume cero desde una tasa de infiltración típica, o permeabilidad, para un bloque de concreto permeable es del orden de 0.2 a 1 cm/s” (Montes y Haselbach, 2006).

“La porosidad de un concreto ecológico por lo general varía de 15-30%, donde el agua fluye a través de una capa de concreto permeable con tasas de 0.2cm/s a más de 1 cm/s dependiendo de los materiales y la colocación del concreto” (Montes et al., 2005.; Tenis et al., 2004).

La principal ventaja de un concreto permeable respecto al concreto convencional es su permeabilidad, resultado de la porosidad de éste, además de que sus valores como aislante térmico son superiores al de un concreto tradicional.

Sus características funcionales son el mejoramiento del drenaje para el manejo y conducción de aguas pluviales, recargar los mantos acuíferos, disminución de calor así como la disminución del ruido y la eliminación del hidroplaneo, además de que la permeabilidad es óptima.

2.2 Estudios realizados en concretos ecológicos

“El cemento Pórtland no es un material respetuoso del medio ambiente ya que su fabricación genera grandes cantidades de emisiones de gases de efecto invernadero y también consume una gran cantidad de recursos naturales y energía. Como la industria del cemento se está adaptando a las regulaciones ambientales más estrictas, la utilización de subproductos materiales cementantes suplementarios en la fabricación de cemento mezclado se ha destacado por la ingeniería, ecología y los beneficios económicos. Sin embargo, existen inconvenientes de cementos mezclados que no han sido todavía completamente resueltos, ejemplo de esto son sus bajas resistencias iniciales” (Zhang et al., 2012).

Huang et al., (2010) llevaron a cabo un estudio por medio de un experimento de laboratorio con el objetivo de mejorar las propiedades de resistencia del concreto permeable a través de la incorporación de polímeros de látex.

Tan et al., (2003) estudiaron el potencial de arena que obstruyen los cilindros llenos de los agregados de granito. “La reducción en los valores de permeabilidad debido a la obstrucción en los sistemas de agregado grueso también puede ser analizado por la ecuación Kozeney- Carmen, la cual es una fórmula empírico teórico. Sin embargo, esta ecuación es por lo general para sistemas en los que el material de la construcción, si se distribuye completamente a través del agregado, puede llenar los huecos para reducir efectivamente la permeabilidad del sistema obstruido a cero y puede que no sea muy representativo de la superficie de la obstrucción potencial para pavimentos de concreto permeable en el campo.”

Haselbach et al., (2006) llevaron a cabo en laboratorio simulaciones de escorrentía en un cemento Pórtland con bloques de concreto permeable obstruidos con una capa superficial de arena. “El resultado de este estudio fue que el sistema de

concreto permeable obstruido con arena, como se usa en la sub-base, tuvo una escorrentía insignificante tanto para el 2% y el 10% con superficies inclinadas con simulaciones de intensidades de lluvia de hasta 100 frecuencias al año para la región de Columbia en Carolina del Sur. En su estudio observaron que existía escorrentía cuando las intensidades de lluvia representaban una condición que podría imitar el efecto aditivo de la lluvia directa y el escurrimiento adicional de las superficies vecinas que llegan a la superficie de concreto permeable. Además, establecieron una ecuación de permeabilidad efectiva para el concreto permeable donde intervenían la relación entre la permeabilidad del sistema de bloque de arena como obstrucción para el concreto permeable, la porosidad del bloque cerca de la superficie y la permeabilidad de la arena.”

Según Castro et al., (2009) “el sistema de dosificación se basa en la cantidad de vacíos disponibles originalmente en el árido y que es reducido al agregar la pasta de cemento. Si se utiliza un árido con elevado porcentaje de huecos (por ejemplo 40%), y se agrega un volumen de pasta de cemento igual al 25% del volumen total, la pasta llenará solo parcialmente los vacíos disponibles quedando un volumen de vacíos de 15%.” Para un volumen unitario de árido, la densidad de la mezcla puede obtenerse sumando la masa de los componentes y dividiéndola por el volumen unitario, obteniéndose lo que llamaremos densidad teórica, mostrada en la siguiente ecuación:

$$Densidad\ teórica = (A + C + W) \quad (1)$$

Donde:

A : Masa del árido.

C : Masa del cemento.

W : Masa del agua.

De acuerdo resultados obtenidos en estudios de laboratorio se recomienda utilizar razones w/c entre 0.27 y 0.43 para mezclas de concreto ecológico. “Las mezclas

con w/c menores presentan muy baja resistencia y desprendimiento superficial de áridos, mientras que las mezclas con w/c mayores presentan escurrimiento de la pasta de cemento y disminución notoria del porcentaje de vacíos. Para las mezclas con razón w/c constante, existe una cantidad óptima de cemento que maximiza la resistencia a flexotracción; este comportamiento puede ser explicado por el efecto de la unión de los áridos y el reducido volumen de pasta de cemento sobre la resistencia a flexotracción de estas mezclas” (Castro et al., 2009).

En la figura 2.2 se puede observar que “una vez que los materiales son mezclados y el hormigón es compactado, la pasta no sólo llena los huecos entre los áridos sino que también se introduce entre las partículas de agregado, separándolas e incrementando el volumen original del árido, por lo que el volumen final será mayor por efecto de este "esponjamiento" de la mezcla” (Castro et al., 2009).

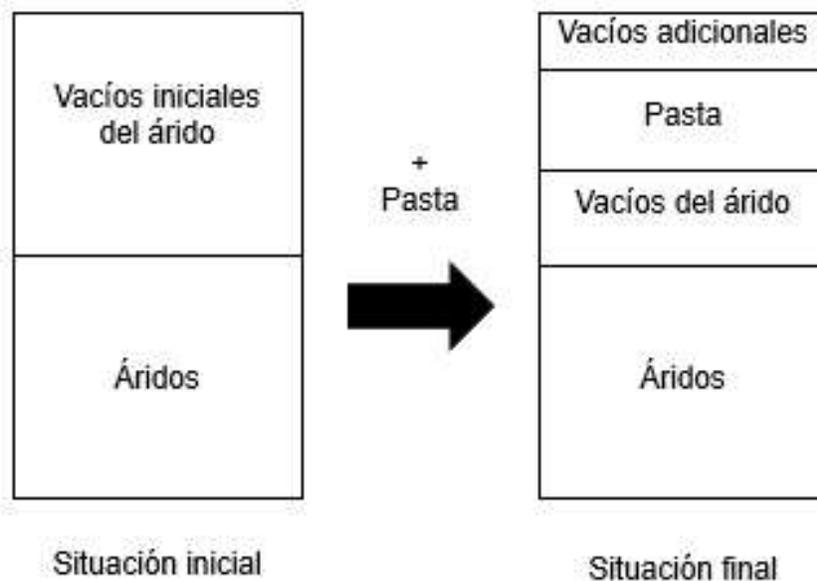


Figura 2.2 Efecto de la inclusión de árido con alto contenido inicial de vacíos.

Fuente: Castro 2009.

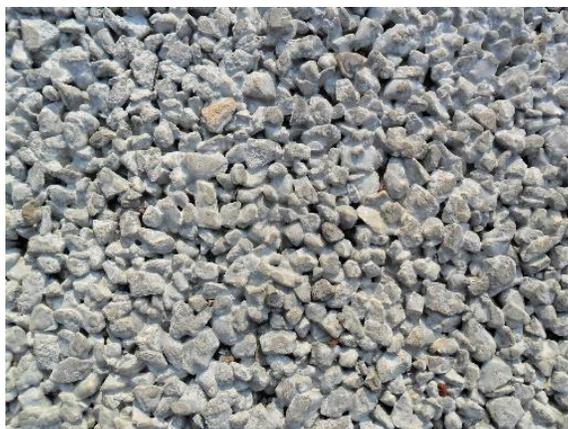


Figura 2.3 Concreto ecológico

Fuente: Elaboración propia

Proske et al., (2014), “demostraron que los hormigones con contenidos de cemento inferiores a 125 kg/m³ fueron capaces de cumplir con la trabajabilidad requerida habitual, la fuerza (40 Mpa) y propiedades mecánicas. La profundidad de carbonatación de hormigones con 150-175 kg/m³ de cemento era igual o menor que la profundidad de los hormigones convencionales. ”La reducción del volumen de agua en la mezcla de concreto permite una reducción significativa del clinker de cemento Portland, basado en el uso de superplastificante y altos cementos reactivos , así como la optimización de la distribución del tamaño de partícula” (Proske et al., 2014).

“El concreto permeable es el llamado concreto sin agregados finos. El vacío que existe en este tipo de concretos permite que el agua y el aire pasen a través de su estructura. Puede ser utilizado en aplicaciones medioambientales tales como hormigón permeable para pavimento, de purificación de agua de hormigón, que absorbe el ruido de hormigón, hormigón permeable al aire, y otras aplicaciones de ingeniería civil y arquitectura” (Park y Tia, 2004). Por otra parte, “el concreto permeable contiene una gran cantidad de huecos y por lo tanto su densidad y la conductividad térmica son menores que las de un concreto convencional” (Park et al., 2005).

“Cuando pequeños materiales como la tierra y la arena fina son transportados por el agua de lluvia a través de los poros de concreto ecológico, los restos eventualmente pueden reducir la eficacia del drenaje y la permeabilidad del concreto. Dicha obstrucción puede conducir a inundaciones, además de ser susceptible a los ciclos de congelación-descongelación del concreto” (Deo et al., 2010).

Zaetang et al., (2013), utilizaron tres tipos de agregados ligeros, los cuales eran, agregados diatomita, agregados de piedra pómez y árido reciclado de hormigón celular curado en autoclave como agregados grueso, éstos redujeron la densidad y la conductividad térmica en comparación con la de concreto permeable que contiene áridos naturales.

De acuerdo a Phung et al., (2013), “se puede determinar el coeficiente de permeabilidad de la pasta de cemento en un tiempo relativamente corto en comparación con otros métodos (dentro de 1 semana para la permeabilidad de 1,013 m / s),” sin embargo “hay muchas cuestiones relacionadas con el concreto permeable que todavía necesitan de mayor investigación para mejorar la vida y el rendimiento durante el servicio” (Gupta, 2013, además de que “hay pocos estudios publicados sobre las propiedades del concreto permeable” (Wong et al., 2007).

“Hay diferencias significativas en la evaluación de la condición del pavimento de un concreto convencional y de un pavimento de concreto permeable” (Golroo y Tighe, 2011).

“El uso de los Concretos Ecológicos es una de las mejores prácticas de manejo de aguas recomendadas por la Agencia de Protección Ambiental” (EPA, 2004).

2.3 Diferentes diseños de concretos permeables en el mundo.

En la actualidad, se hace cada vez más necesario contar con pisos de concreto ecológicos que permitan la filtración de agua hacia el sub-suelo.(Zouaghi, et al., 2000). Sin embargo, para la construcción de pisos permeables de concreto, se presentan serios problemas, sobre todo debido a que éstos tienen muy baja resistencia tanto a la flexión, como a la compresión, además de que generalmente se desmoronan. (Kevern et al., 2010). Existe el caso, por ejemplo, de los concretos sin finos, los cuales son permeables pero se desmoronan fácilmente.

Los concretos ecológicos no alcanzan la suficiente resistencia como para permitir su manejo en cualquier tipo de usos, lo cual los limita a ser utilizados únicamente en espacios públicos, como estacionamientos, calles de tráfico regular o bajo, y pisos peatonales.

A los concretos ecológicos se les conoce también como concretos sin arenas (agregados finos) o monoagregados, esto provoca su debilidad, en este trabajo de investigación se busca realizar una combinación de agregados con el objetivo de lograr su máxima permeabilidad sin perder resistencia, además de buscar una mejor adherencia con diferentes cementantes hidráulicos y poliméricos (base poliestireno) que logren una buena combinación cemento agregado que pueda disminuir costos sin perder sus propiedades. (Graubner et al., 2009).

Los concretos permeables están fundamentalmente compuestos por cemento, agua, agregados y aditivos, complementados por la estructura propia del pavimento, como pozos de absorción, cisternas o elementos de contención laterales como pueden ser guarniciones y por la propia carpeta de concreto permeable que servirá de superficie de rodadura. (Park y Tia, 2004).

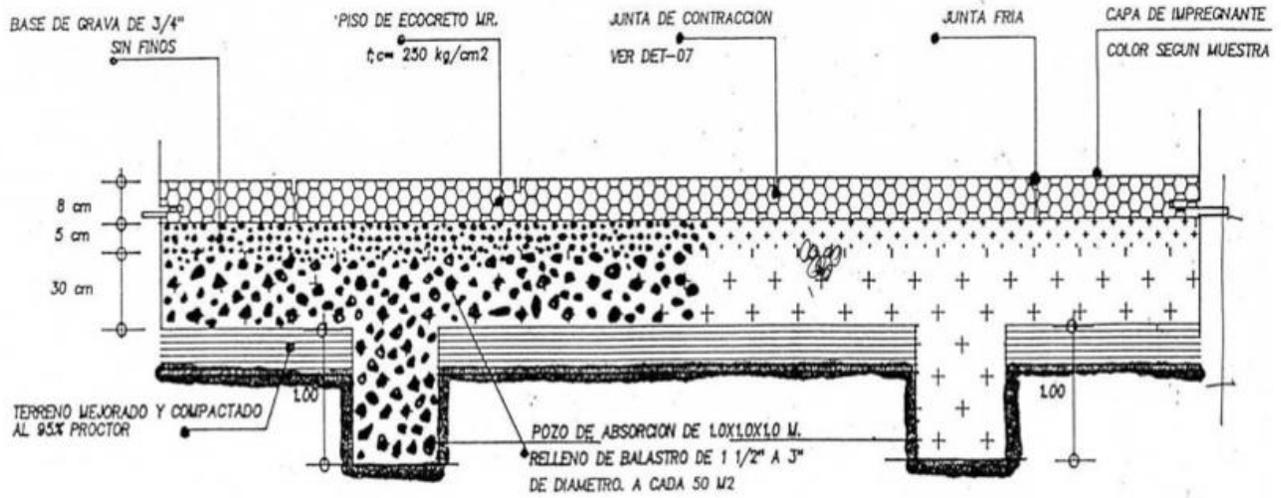


Figura 2.4 Sistema constructivo de un concreto ecológico.

Fuente: Tennis (2004).

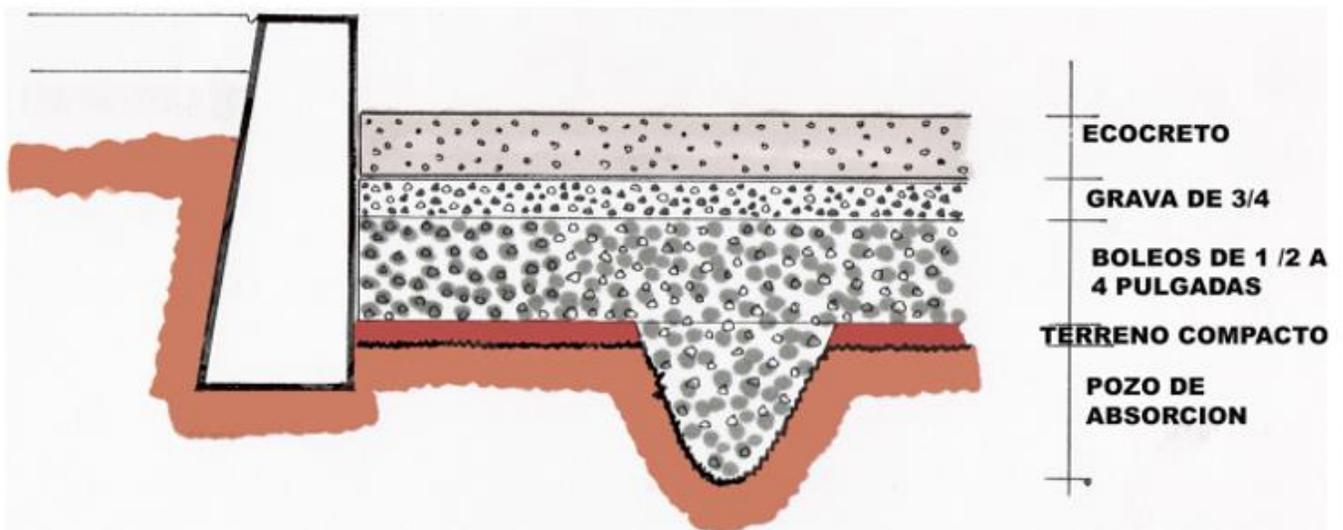


Figura 2.5 Sistema constructivo de un concreto permeable.

Fuente: Zaetang (2013).

Estados Unidos ha implementado políticas de sustentabilidad en el concreto desde hace varios años en su lucha contra el cambio climático, disminuyendo los efectos de islas de calor, así como dar un mejor manejo a las aguas de las lluvias. La siguiente tabla muestra diferentes mezclas de concretos permeables en Estados Unidos.

Cuadro 2.1 Mezclas de concreto permeable en Estados Unidos.

	Tennis et al. 2004 (kg/m3)	NRMCA 2004 (kg/m3)	Schaefer et al. 2006 (kg/m3)
Cemento	267 - 415	178 - 356	338 - 356
Agregado	1187 - 1483	1424 - 1602	1602
Graduación	3/4" - #4, 3/8" - #16 o #89		1/2" - #4
Relación agua/cemento	0.27 - 0.34	0.27 - 0.43	0.27 - 0.35
Aditivos	incluser de aire	4% - 8% incluser de aire	10% látex, fibras
Proporción del agregado	-	-	0.21

Fuente: Cackler et al. 2006.

Bélgica ha tenido más de una década de experiencia en el uso de concretos permeables. El uso en clima frío lo lograron con aditivos de polímeros emulsionados con 50% de sólidos.

Cuadro 2.2 Diseño de concreto permeable en Bélgica

	Tipo / tamaño	Composición (kg/m3)	% del volumen total
Cemento	CEMIII/A42.5 LA	280	0.091
Agregado grueso	1/4" - 7/16"	1350	0.49
Agregado fino	0 - 1/16"	89	3.30%
Agua	-	56	5.60%
Aditivos	Polímero emulsionado (50% sólidos)	56	5.40%

Fuente: Cackler et al. 2006.

En Japón se propone sustituir sus pavimentos urbanos por pavimentos permeables debido a su confort de conducción, reducción de ruidos, seguridad y contribución al medio ambiente, mientras que en Alemania se investiga sobre las condiciones de congelamiento para los concretos ecológicos.

Cuadro 2.3 Diseño de concreto permeable en Japón

Agregado, se usa un tamaño	Mortero / agregado	Agua (Kg/m3)	Cemento (Kg/m3)	a/c (Kg/m3)	Compactado	Arena fina (Kg/m3)	Grava de 5 a 13mm y de 1.2 a 5mm
5/16"	57%	92	315	0.29	105	209	1,424
1/2"	50%	82	292	0.28	98	198	1,502

Fuente: Cackler et al. 2006.

Cuadro 2.4 Diseño de concreto permeable en Alemania

	Tipo / tamaño	Composición (kg/m3)
Cemento	CEM I 32,5 R	400
Agregados	5/16" a 3/8"	1,498
Aditivos	Fibras	1.5% (en volumen)
Relación agua/cemento		0.24 a 0.30

Fuente: Cackler et al. 2006.

2.4 Sistemas de concretos permeables

No sólo los colectores habituales y usuales permiten hacer frente a las inundaciones en las ciudades, existen peculiaridades innovadoras como zanjas de percolado, lagunas de retención, lagunas y zanjas con vegetación, estanques, pozos de absorción y pavimentos permeables. (Park et al., 2005).

2.4.1 Ecocreto®

En cuanto a pavimentos permeables conocidos se tienen en la actualidad pavimentos permeables con Ecocreto®, un piso granular alemán que se hace de mezcla de resinas epóxicas y se usa en estacionamientos, similar al adopasto con el poro menos abierto. La empresa Prefabricados de Hormigón Grau S.A. de C.V., está trabajando en la introducción al mercado Chileno de adoquines para pavimentos permeables.

Ecocreto® es un material similar al concreto hidráulico, hecho de agregados pétreos seleccionados, agua, cemento y el aditivo Ecocreto®. Ellos forman un producto moldeable y permeable.



Figura 2.6 Parque deportivo en Valencia España construido con Ecocreto.

Fuente: Ecocreto®

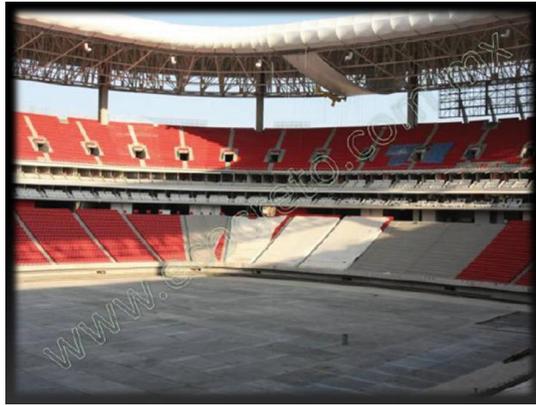


Figura 2.7 Estadio de futbol en Jalisco, México.

Fuente: Ecocreto®



Figura 2.8 Calle pavimentada con concreto ecológico en Manzanillo, Colima, México.

Fuente: Ecocreto®



Figura 2.9 Jardinera en Asturias, España.

Fuente: Ecocreto®

2.4.2 Sistema Atlantis®

El sistema Atlantis® desarrollado en España, desafía al ciclo natural del agua, conjugando superficies muy permeables con sistemas que permiten su almacenamiento y canalización de agua, resguardando y reponiendo su calidad. El agua captada se depura progresivamente mediante procesos naturales de filtración y oxidación.

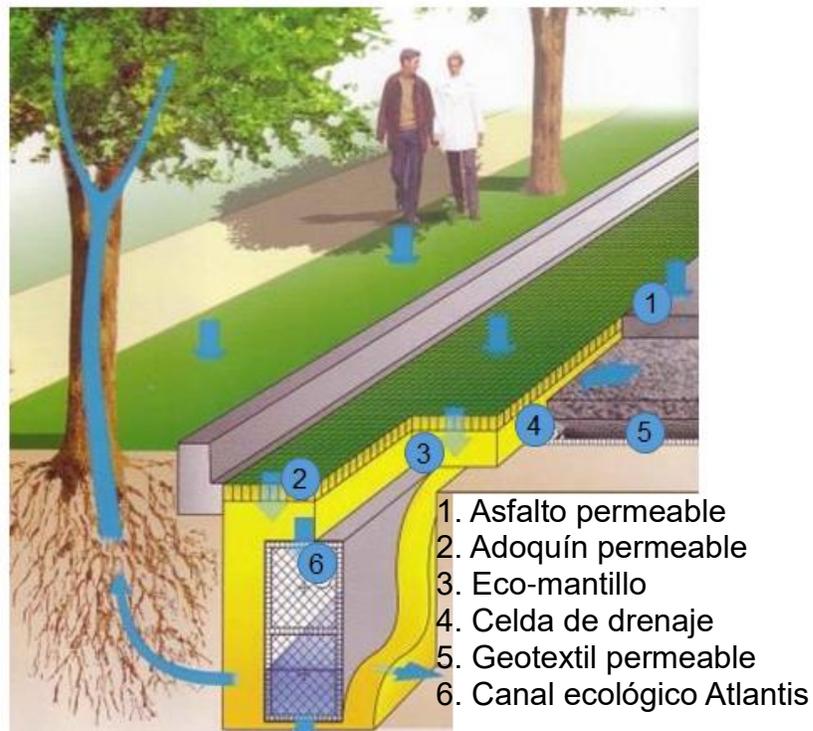


Figura 2.10 Sistema Atlantis

Fuente: Atlantis®



Figura 2.11 Sistema Atlantis

Fuente: Atlantis®

3. METODOLOGÍA

3.1 Métodos de diseño

Los sistemas para diseño de pavimentos se engloban en dos grandes vertientes: por regresión y mecanicistas, el mecanicista es el que envuelve las características mecánicas de los elementos de diseño y no sólo mediante ensayos realizados en tramos de prueba, de donde se toman resultados que se transponen a lo general mediante tablas como es el caso del método AASHTO. El diseño de pavimentos por métodos mecanicistas es ininteligible, utiliza la estática en materiales y la dinámica en las cargas (tráfico), condicionalmente parte de las premisas de que los materiales son compuestos homogéneos e isótropos, condiciones favorables para modelar, pero difícilmente naturales. El método empírico mecanicista, es decir un método que utiliza las clemencias de ambos métodos antecesores será el ideal para el diseño de los pavimentos.

Es necesario sintetizar que son y cómo se diseñan los pavimentos rígidos convencionales para así poder entender las similitudes y diferencias entre los pavimentos rígidos permeables y los pavimentos rígidos convencionales, , concluiremos por citar que los pavimentos permeables son una subdivisión, una representación de concreto convencional con ciertas características y que se pueden calcular o diseñar de igual manera.

3.1.1 Método de la Portland Cement Association

Fue lanzado originalmente en 1966 y revisado en 1984. Este método es un procedimiento empírico mecanicista basado en respuestas de pavimentos matemáticamente calculadas. Es calibrado con ensayos de campo y rutas en servicio. Limita las tensiones desarrolladas en el pavimento además de las deflexiones desarrolladas en bordes y esquinas y es un limitante para bajo tránsito pesado y para elevado tránsito pesado.

Factores involucrados en el diseño:

- Las propiedades mecánicas del hormigón.
- Capacidad soporte de la subrasante, así como su espesor y tipo.
- Periodo de diseño.
- Tránsito.
- Transferencia de cargas en bordes y en juntas transversales.
- Factor de seguridad de cargas.

3.1.2 Método de diseño AASHTO para concretos convencionales

El procedimiento de diseño normal es suponer un espesor de pavimento y calcular los ejes equivalentes, posteriormente evaluar todos los factores adicionales de diseño, si se cumple el equilibrio en la ecuación, el espesor supuesto es el resultado del problema, en caso de no haber equilibrio en la ecuación, se deberán recalcular tomando como base el valor anterior.

Factores involucrados en el diseño AASHTO (1993):

- Serviciabilidad inicial y final
- Confiabilidad.
- Factor de transferencia de carga.
- Módulo de rotura y elasticidad del hormigón.
- Tránsito en ejes equivalentes.
- Módulo de reacción de la subrasante.
- Coeficiente de drenaje.
- Desvío global.

3.2 Variables del concreto ecológico: Componentes y sus comportamientos.

Cemento hidráulico

La principal función del cemento es la de unir y aglutinar, el cemento es un conglomerante hidráulico porque su unión es química, el cual al ser mezclado con agregados pétreos y agua, crea una mezcla uniforme y maleable que fragua y se endurece cuando reacciona con el agua creando la sustancia denominada concreto.

Agua

El agua es de suma importancia para hidratar al cemento y para crear una sustancia manejable. En su aplicación en concretos ecológicos es considerablemente crítica.

Es necesario mantener al cemento hidratado ya que une a los agregados, los cuales dan la resistencia, cuando existen espacios llenos de agua en el concreto permeable, éstos reducen su resistencia. La resistencia de un concreto está directamente relacionada con la porosidad y su relación agua-cemento (a/c). Con el proceso de hidratación del cemento, el volumen de sólidos aumenta y se encuentra en el espacio que estuvo ocupado por el cemento sin hidratar; cuando existe un aumento de los sólidos en el volumen revela una disminución en la porosidad. El exceso de agua afecta de manera negativa a las propiedades del concreto. La porosidad afecta a la resistencia; el progreso de la liga en mezclas con alta relación agua –cemento es difícil debido a la dispersión que existe entre sus partículas. Cuando en la estructura del concreto existe una relación alta de agua-cemento, desprende una mezcla con alta porosidad, por lo que una alta porosidad provoca una liga débil lo que incita a una menor resistencia. Entonces, la resistencia de un concreto permeable se desarrolla a través de la unión, la cual experimenta una reacción química entre el cemento y el agua. La cantidad adecuada de agua maximizará la resistencia sin comprometer las características de la permeabilidad del concreto poroso.

Relación agua - cemento

Esta relación influye considerablemente en la resistencia del concreto permeable, ésta formula la relación existente entre el peso del cemento y el peso del agua utilizada en la mezcla. Una relación agua-cemento baja trasfiere a un concreto de mayor resistencia, sin embargo, cuando más alta es esta relación, el concreto se vuelve más débil. La menor relación de agua-cemento para obtener una hidratación completa del cemento sin incluir un aditivo se considera igual a 0.30. (Brown, D., 2003).

La relación agua – cemento constituye un parámetro importante de la composición de un concreto. Tiene influencia sobre la resistencia, durabilidad y en los concretos permeables, también de su permeabilidad. Ésta relación es el valor característico más importante de la tecnología del concreto, además de que determina la estructura interna de la pasta de cemento endurecida.

Se puede modificar la relación agua-cemento de un concreto variando tanto en su contenido de agua como el de cemento. Ambos métodos producen el mismo resultado sobre la calidad de la pasta de cemento endurecida, pero no sobre las propiedades del concreto fresco. Existen posibilidades de modificar una mezcla de concreto para adaptarla a una exigencia particular.

Entre menos porosa sea la pasta de cemento, mucho más resistente es el concreto, por lo tanto, cuando se mezcle el concreto no se debe usar una cantidad mayor de agua que la necesaria. La relación mínima agua-cemento para la hidratación total es aproximadamente de 0.22 a 0.25.

Agregados

En los concretos porosos la pasta de cemento es limitada y el agregado recibe de la superficie de contacto para desarrollar la resistencia del concreto.(Haselbach et

al., 2006). El tamaño de los agregados en los concretos ecológicos generalmente se encuentran dentro del rango de 3/8" y 3/4", utilizando estos tamaños porque generan grandes espacios de vacíos.

Tamaño máximo o granulometría de agregados gruesos.

La estructura interna de un concreto poroso puede describirse como un conjunto de partículas de agregado grueso, en contacto y unidad entre sí por puentes constituidos por el mortero que forman la arena y el conglomerante; éstos son los que movilizan la resistencia del concreto. El número de puentes que se forman por unidad de volumen es función principalmente del tamaño y la gradación del agregado grueso.

Relación agregado - cemento

Cuando en la estructura del concreto permeable existe más cantidad de cemento es más alta la resistencia a flexión, si ocurre esto, se tapan los poros y resultará como nocivo para la función de este tipo de concretos. (Field et al., 1982).

Aditivos

Los aditivos modifican algunas de las propiedades originales del concreto, su empleo debe ser considerado cuidadosamente, es de suma importancia identificar cual es su influencia en otras características distintas a las que se desea alterar. Los aditivos se presentan en distintas formas, siendo éstas en pasta, polvo o líquidos y sus dosis varían de acuerdo al producto y el efecto que se desea, entre 0.1% y 5% del peso del cemento. La proporción de empleo de éstos se establece de acuerdo a las especificaciones de cada fabricante y se deben de verificar mediante mezclas de prueba.

Según la norma ASTM C494 existen siete distintos tipos de aditivos, los cuales se clasifican de la siguiente manera:

Cuadro 3.1 Clasificación y tipo de aditivos.

Tipo	Función
A	Reductor de agua
B	Retardador de fraguado
C	Acelerador de fraguado
D	Reductor de agua y retardador
E	Reductor de agua y acelerador
F	Reductor de agua de alto efecto
G	Reductor de agua de alto efecto y retardador

Fuente: ASTM C494

El uso de los aditivos permite controlar el tiempo de fraguado y la resistencia inicial de la pasta de cemento, la resistencia, impermeabilidad y durabilidad en estado endurecido, así como la trabajabilidad y exudación en estado fresco.

3.3 Pruebas mecánicas

El marco teórico de esta investigación se llevará a cabo de acuerdo al modelo de percolación, código de diseño ACI 318 – Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural, en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto.

3.3.1 Medición de permeabilidad

El grado de permeabilidad (Redon et al., 1999), se mide por su coeficiente de permeabilidad, el cual se basa en la ley propuesta por Darcy en el Siglo XIX, la cual señala:

$$V = K * i$$

Donde:

V = velocidad de escurrimiento de un fluido a través del suelo

K = coeficiente de permeabilidad propio y característico

i = gradiente hidráulico, el cual representa la relación entre la diferencia de niveles (H) y la distancia (L) que el agua recorre

Las expresiones matemáticas de la ecuación de la Ley de Darcy se refieren a la figura X, en la que un caudal de agua entra al concreto poroso, se almacena por algún tiempo en la estructura del concreto y migra a través de los poros.

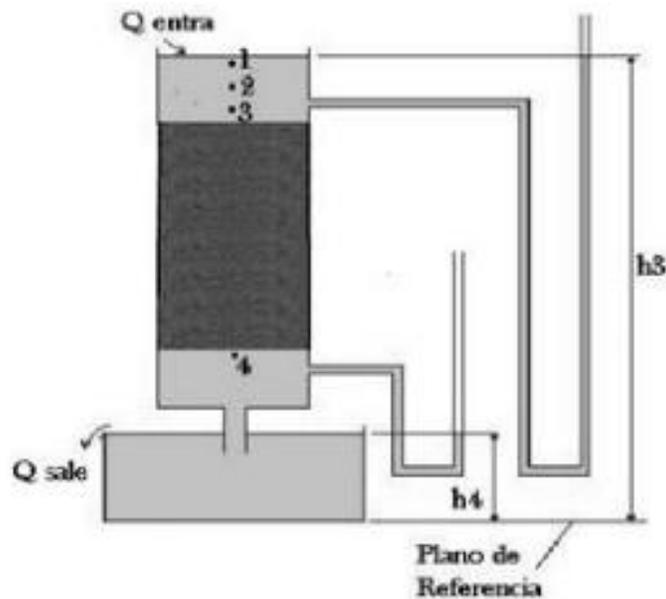


Fig. 3.1 Ley de Darcy- Esquema muestra de concreto poroso

Fuente: Redon et al., 1999.

La permeabilidad del concreto se calcula a partir de una condición de presión hidrostática sobre una de sus caras y corresponde a la velocidad o al caudal de agua que atraviesa el material, debido justamente a la diferencia de presión entre la cara en contacto con el agua y la cara que no lo está. El flujo de agua a través

del concreto debido al empuje del líquido (gracias a la gravedad) depende de factores externos al material como la altura de la lámina de agua y el espesor del elemento pero también de factores internos como la capacidad del material para contener el agua. El parámetro que en este caso describe la calidad del material es el coeficiente de permeabilidad del agua (K) de Darcy, si bien la ASTM no cuenta con una norma para su determinación la AASHTO si dispone de metodologías para su medida. La medición de la permeabilidad del concreto del coeficiente de Darcy solo se puede hacer una vez que el concreto está saturado. Este coeficiente (K) de un concreto describe la facilidad con la que el material puede ser penetrado por el agua, puede variar en dos órdenes de magnitud o más. Una clasificación de este parámetro aparece en la tabla X.

Tabla X. Clasificación de la permeabilidad del concreto de acuerdo a la NTC 44836

Tipo de concreto	Coefficiente Darcy K (m/s)
Concreto de baja permeabilidad	$< 10^{-12}$
Concreto de mediana permeabilidad	10^{-10} a 10^{-12}
Concreto de alta permeabilidad	$> 10^{-10}$

Fuente: Castro 2009.

También existen factores que influyen en la permeabilidad de un suelo, por ejemplo, la viscosidad del fluido, el tamaño, y la continuidad de poros (Redon et al., 1999).

En laboratorio, la medida del coeficiente de permeabilidad se realiza por medio de permeámetros, los que pueden ser de nivel constante o nivel variable dependiendo del tipo de concreto analizado. “La importancia de este coeficiente, es vital para poder determinar la capacidad de las bombas para rebajar el nivel freático en una excavación y para poder determinar la velocidad de asentamiento de una estructura al escurrir el agua, entre otros” (Wang et al., 2006).

3.3.2 Modelo de percolación

“La teoría de percolación ha sido inspirada en el proceso del flujo del agua a través de un medio poroso. Podría decirse que esta teoría es la transmisión de una propiedad a través de un medio, tomando en cuenta las propiedades de éste” (Pérez-Rea et al., 2009).

Sahimi (1994) explica que el uso moderno de los procesos de percolación fue desarrollado por Flory (1941) y Stockmayer (1943), “donde describían la reacción de moléculas ramificantes que formaban macromoléculas; este proceso de polimerización puede conducir a la formación de una red muy grande de moléculas conectadas por enlaces químicos.”

Según Pérez-Rea et al., (2009), años más tarde, Broadbent y Hammersley (1957) trabajaron con el concepto de la dispersión de partículas de fluido hipotéticas a través de un medio aleatorio, utilizando la teoría de la percolación. “Refiriéndose al término fluido como un flujo de calor, vapor, líquido, corriente eléctrica o cualquier propiedad que pueda moverse a través de un medio y al término medio, que es donde se lleva al fluido, puede ser un suelo, un espacio poroso, entre otros. La propagación de un fluido a través de un medio desordenado involucra elementos aleatorios y su mecanismo puede ser de dos diferentes tipos, en el primero, la aleatoriedad se atribuye al fluido en un proceso de difusión y en el segundo, se atribuye en un proceso de percolación.”

“La teoría de la Percolación estudia los fenómenos que se presentan cuando una sustancia quiere cruzar de un lado a otro de un espacio cubierto por otra sustancia e investiga en qué condiciones se puede dar y en cuales no la percolación. La percolación es un concepto fisicoquímico con el que se designa la filtración de un fluido en un medio poroso. Está determinado por la porosidad del medio. Cuando la porosidad es alta, por arriba de cierto umbral, el fluido se cuela por toda la

estructura. Si por el contrario es baja, el líquido no pasa. Este fenómeno es considerado crítico, de todo o nada” (Montes y Haselbach, 2006).

Sahimi et al., (1990) reportaron numerosas aplicaciones de la teoría de percolación al estudio del flujo a través de medios porosos.

Sahimi (1994) “señala que los modelos de percolación se inician con la construcción de una red, la cual representa al medio o a la propiedad que se quiera modelar. Estas redes pueden representar estructuras de los materiales o bien, las formas en que las propiedades se distribuyen en el medio.”

“Existen dos problemas en la teoría de percolación. El problema de percolación enlazada o percolación consolidada, en éste, los lazos de la red están ocupados aleatoriamente e independientemente de los otros con probabilidad (p), estos lazos pueden estar abiertos o vacantes, cuando están abiertos al flujo, reacción y difusión, son elementos conductores microscópicos de un compuesto, cuando están vacantes están cerrados al flujo o corriente, o han sido desconectados, son elementos aislante de un compuesto. Diferentes modelos de redes de percolación se han utilizado en diferentes áreas científicas y su uso ha sido aplicado para la predicción de propiedades de diferentes materiales. Aunque estos métodos aparecieron en la década de 1950, su uso en ciertas áreas de la ciencia como la mecánica de suelos es muy reciente y escaso. Hasta ahora, los modelos de percolación han sido únicamente aplicados a medios porosos para modelar propiedades hidráulicas y de conductividad eléctrica; sin embargo, pueden tener un gran potencial en el campo del modelado de comportamiento esfuerzo-deformación de materiales. ” (Pérez-Rea et al., 2009).

3.3.3 Prueba de resistencia a la compresión

“Esta prueba es la más utilizada en los laboratorios de control de calidad para los trabajos de rutina” Norma ASTM D2166-00.

El objetivo de la prueba de compresión es determinar las características de capacidad de carga de las mezclas, así como dar a conocer el comportamiento de las mismas.

Para el desarrollo y procedimiento de la prueba de compresión se deben de elaborar cilindros de tal manera que la relación de esbeltez sea de aproximadamente 2.0, es decir, la relación diámetro entre altura será de 1:2. Después se tiene que medir el diámetro de la muestra, así como la altura y peso. Una vez realizadas dichas mediciones se procede a colocar el cilindro sobre la plataforma de la máquina universal, colocando los complementos necesarios para que el espécimen quede bien cabeceado, se centra el cilindro, teniendo en cuenta que la placa transmisora de carga resulte afinadamente axial, entonces se hace funcionar el mecanismo de aplicación de carga de la máquina y se anotan las cargas últimas o de falla.

3.4 Determinación de la consistencia normal de los cementantes hidráulicos

Esta norma establece el método de ensayo bajo el cual se efectúa la determinación de la consistencia normal aplicable a los cementantes hidráulicos, empleando el aparato Vicat y se complementa con las siguientes normas mexicanas vigentes:

NMX-C-057-ONNCCE Industria de la Construcción- Cementantes hidráulicos. Determinación de la consistencia normal.

NMX-C-085-ONNCCE Industria de la Construcción- Cementos Hidráulicos-Método estándar para el mezclado de pastas y morteros cementantes hidráulicos.

Equipo:

Balanza mecánica

La capacidad de la balanza debe ser, por lo menos, igual a la carga total máxima, la cual se aplica en cualquier momento. La tolerancia de mantenimiento, debe ser mayor de 0.05% de la carga de ensayo, dentro del rango de pesaje. Hay que tener una escala visible y legible, en la cual se puedan obtener lecturas de la mitad de tolerancia de aceptación dentro del rango de pesaje, estos es, que se puedan obtener lecturas de por lo menos 0.025% de la carga de ensayo.

Pesas

Las variaciones permitidas en las pesas deben darse conforme a lo recomendado en la norma vigente.

Balanza electrónica

La capacidad de la balanza debe ser, por lo menos, igual a la carga total máxima, la cual se aplica en cualquier momento.

Probetas

Las probetas deben ser de vidrio, de capacidad apropiada (lo suficientemente grande para medir el agua de mezclado, la pasta y la mezcla de mortero en una sola operación). Estas probetas deben ser subdivididas en por lo menos 5 ml, con las excepciones siguientes:

- Las líneas de graduación pueden ser omitidas para los primeros 5 ml, en las probetas de 159 ml.
- Las líneas de graduación pueden ser omitidas para los primeros 25 ml, en las probetas de 250 ml.
- Las líneas de graduación pueden ser omitidas para los primeros 50 ml, en las probetas de 500 ml.

- Las líneas principales deben estar marcadas, por lo menos en las tres cuartas partes del diámetro, alrededor del cuerpo de la probeta, y debe estar marcado el volumen por el número correspondiente.

Aparato de vicat

El aparato de Vicat consta de una barra móvil B, la cual tiene un extremo C, con un diámetro de 10 mm y una longitud mínima de 50 mm. En el otro extremo de la barra B, lleva una aguja desmontable de 1 mm de diámetro y 50 mm de longitud.

- La barra B se puede subir, bajar y fijar al soporte A en la posición deseada, aflojando o apretando el tornillo E.
- Montado sobre esta barra B, se encuentra un indicador F graduado en milímetros, que se desplaza sobre ella. De esta manera se puede ajustar y fijar a cero en la escala I, por medio del tornillo de apriete que tiene el mismo indicador.

Cuchara plana

Debe de cumplir los requisitos establecidos en la norma mexicana NMX-C- 061-ONNCCE.

Mezclador mecánico

Debe cumplir los requisitos establecidos en la norma mexicana NMX-C-085-ONNCCE.

Condiciones ambientales:

Temperatura y humedad

La temperatura ambiente del laboratorio debe mantenerse entre 20°C y 27°C, los materiales de agua de mezclado y equipo utilizado en el ensayo deben estar a una temperatura de 23°C \pm 2°C. Por su parte, la humedad relativa del laboratorio debe

ser mínimo de 50% con lo estipulado en la norma mexicana NMX-C-085-ONNCCE.

Procedimiento/elaboración de la pasta:

Mezclar 650 g de cemento con una cantidad de agua destilada, conforme al método establecido en la norma mexicana NMX-C-085-ONNCCE. Ajustar la cantidad correcta de acuerdo a lo establecido en el punto 5.3 de esta norma.

Moldeo del espécimen:

Con las manos protegidas con guantes de hule, se debe formar una bola de pasta de cemento y lanzar de una mano a otra, seis veces; se deben mantener las manos separadas a una distancia aproximada de 15 cm, después, con la bola de pasta en la palma de una mano y el molde troncocónico en la otra, se debe introducir dentro del molde troncocónico por la base mayor empujándola hasta llenarlo. El sobrante de la pasta sobre la base mayor se debe quitar mediante un movimiento de la palma de la mano, aproximadamente a 90° de la dirección del movimiento con el que se introdujo la bola de pasta en el molde, enseguida se debe colocar el molde por su base mayor sobre la placa H y el sobrante de la pasta se debe quitar de la base menor, mediante un corte oblicuo con el filo de la cuchara inclinada ligeramente sobre la base superior. Se debe alisar la superficie con el filo de la cuchara, sin presionar la pasta.

3.5 Determinación de la consistencia normal

Llevar todo el conjunto por la placa, pasta y molde al aparato Vicat, procurando que quede centrado respecto de la barra B; deslizar la barra B hasta hacer que toque la parte C la superficie de la pasta confinada en el molde; luego, ajustar el índice corredizo sobre la barra B al acero superior de la escala, o bien, hacer una lectura inicial y soltar la barra inmediatamente. Esto no debe exceder los 30 segundos, a partir del instante en que se terminó de hacer la pasta (en seguida del

momento que se detuvo el mezclado), el aparato debe permanecer libre de vibraciones durante el ensayo.

Se considera que la pasta tiene una consistencia normal cuando la barra B con extremo C baje 10 mm \pm 1 mm a partir de la superficie original en un intervalo de 30 segundos, contados desde el instante en que se soltó dicha barra. Se deben hacer varios ensayos con distintos porcentajes de agua destilada, hasta que sea obtenida la consistencia normal. Hacer cada ensayo con una porción de cemento.

Cálculos

La cantidad de agua destilada que se requiere para obtener la consistencia normal (CN), se expresa en porcentaje de la masa del cemento seco, calculándose hasta décimos de por ciento y reportándose al 0.5% más próximo.

Precisión

La desviación estándar para un mismo operador y un mismo laboratorio ha sido encontrada de 0.25; la desviación estándar entre laboratorios ha sido encontrada de 0.45. Por lo tanto, los resultados de dos ensayos realizados correctamente por el mismo operador y mismo laboratorio no deben diferir en no más de 0.7%. Los resultados de dos ensayos realizados correctamente entre laboratorios no deben diferir en no más de 1.3% en el 95% de los casos.

3.6 Caracterización de los agregados

Se caracterizarán algunas de las propiedades de los agregados en base a las normas ASTM para estandarizar la calidad de éstos. En la tabla 1 se presentan las normas en las que se basará la caracterización:

Cuadro 3.2 Normas ASTM

ASTM C29	Método de prueba estándar para la densidad aparente y huecos en el agregado.
---------------------	--

ASTM C33	Especificación estándar de los agregados del concreto.
ASTM C127	Método de prueba estándar para la densidad, densidad relativa y absorción de agregado grueso.
ASTM C136	Método de prueba estándar para el análisis de tamiz de finos y gruesos.
ASTM C138	Método de prueba estándar para la densidad, rendimiento y contenido de aire.
ASTM C192	Práctica estándar para preparación y curado de especímenes de ensayo de concreto en el laboratorio.

Fuente: Normas ASTM

3.7 Experimentación en laboratorio

En laboratorio se realizaron diferentes diseños de mezclas para ver cuál cumplía con las mejores características, tanto de permeabilidad como de resistencia a la compresión. Se trabajó en dos etapas, la primer etapa consiste en el desarrollo de cementantes para concretos ecológicos resistentes y permeables para de ahí partir a la segunda etapa, la cual radica en el desarrollo de cementantes incluyendo diferentes tipos de aditivos.

ETAPA 1

Para poder realizar dichos diseños primero se tuvo que realizar una clasificación granulométrica de los agregados gruesos con los cuales se trabajaría, ésta es la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado tal como se determina por análisis de tamices como se observa en las figuras 1,2, 3 y 4. El tamaño de la partícula (ver figura 5, 6 y 7) del agregado se determinó por medio de tamices de malla de alambre con aberturas cuadradas y se caracterizaron algunas de las propiedades de éstos con base a lo indicado en la norma ASTM C33, obteniéndose la granulometría adecuada para el diseño y elaboración de concretos ecológicos que va desde los $\frac{3}{8}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{4}$ ".



a)

Figura 3.2 Clasificación granulométrica de los agregados gruesos.

Figura 3.2 a) Cribado de agregados gruesos

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.2 b) Cribado de agregados gruesos

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.2 c) Cribado de agregados gruesos

Fuente: Elaboración propia

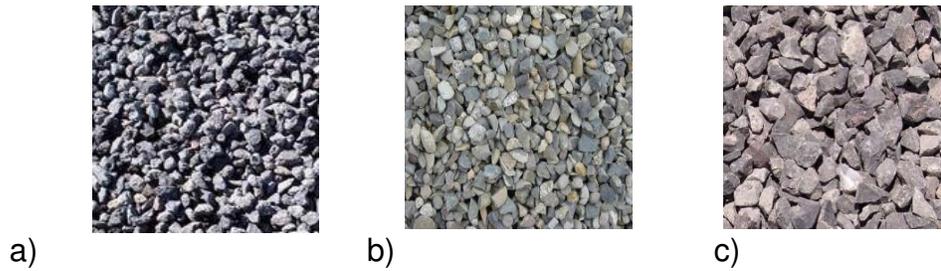


Figura 3.3 Agregados gruesos

3.3 a) Agregado grueso 3/8"

3.3 b) Agregado grueso 1/2"

3.3 c) Agregado grueso 3/4"

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.4 Pesos volumétricos

Fuente: Elaboración propia

Una vez realizada la clasificación de los agregados gruesos se calcularon sus pesos volumétricos (seco y compacto) con base a la norma ASTM C1688. El peso volumétrico de un agregado es el peso del agregado que se requiere para llenar un recipiente con un volumen unitario especificado.

En la tabla 3.3 se muestra el peso volumétrico seco y varillado (p.v.s.v.) de cada uno de los tres distintos tamaños de agregados gruesos y en el cuadro 3.4 el peso volumétrico seco y suelto (p.v.s.s.). Así mismo, la tabla 3.5 enseña el contenido en general de los pesos volumétricos obtenidos en las pruebas.

Cuadro 3.3 Peso volumétrico seco y varillado (P.V.S.V.)

Tamaño grava	Peso 1 (Kg)	Peso 2 (Kg)	Volumen (L)	D1	D2	P.V.S.V. (Kg/l)
1/2"	14.18	14.14	9.69	1.46	1.46	1.4611
3/4"	14.88	14.78	9.69	1.54	1.53	1.5302
3/8"	13.81	13.87	9.69	1.42	1.43	1.4281

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.4 Peso volumétrico seco y suelto (P.V.S.S.)

Tamaño grava	Peso (Kg)	Volumen (L)	P.V.S.S. (Kg/l)
1/2"	13.6	9.69	1.3992
3/4"	13.5	9.69	1.3981
3/8"	12.7	9.69	1.3135

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.5 Tabla general de pesos volumétricos secos y sueltos

Tamaño grava	P.V.S.S. (Kg/l)	P.V.S.V. (Kg/l)
1/2"	1.3992	1.4611
3/4"	1.3981	1.5302
3/8"	1.3135	1.4281

Fuente: Elaboración propia

Diseño y proporcionamiento de mezclas

Una vez obtenidos los pesos volumétricos de los agregados gruesos con granulometrías que van desde 3/8" hasta 3/4", se optó por un factorial de experimentos para el diseño de las mezclas, donde se varió consistentemente la variable de interés (contenido de cemento y agua) y se midió la variable de respuesta (permeabilidad), con el fin de medir la influencia de la relación agregado-cementante. Cada mezcla se elaboró con distinto proporcionamiento de agregado, así como de relación agua-cemento (a/c). Se diseñaron 15 mezclas bajo condiciones de laboratorio utilizando normativa ASTM desarrollada para concreto convencional, ya que no existe normativa específica para concreto permeable.

Las mezclas se identificaron como MX, donde la X corresponde a la numeración, desde el 1 hasta el 15 en orden cronológico como se muestra en la tabla 3.6, donde el proporcionamiento se refiere a la cantidad de cada uno de los tres distintos tamaños de agregado, la muestra M1 por ejemplo, con proporciones de 1/3 de agregado de 3/8", 1/3 de agregado de 1/2" y 1/3 de agregado de 3/4" con relación a/c de 0.43.

Cuadro 3.6 Proporcionamiento de agregados para las mezclas de concretos ecológicos

Nombre de la mezcla	Proporción			Relación agua - cemento (w/c)	Cantidad	
	3/8"	1/2"	3/4"		Cemento (Kg)	Agua (Lt)
	Proporción	Proporción	Proporción			
M1	1/3.	1/3.	1/3.	0.43	13.48	5.81
M2	1/4.	1/4.	1/2.	0.43	13.48	5.81
M3	1/2.	1/2.		0.6	1.89	1.2

M4	1/5.	3/10.	1/2.	0.5	2.52	1.26
M5	1/5.	3/10.	1/2.	0.5	3	1.5
M6	1/3.	1/3.	1/3.	0.5	3	1.5
M7	1/2.	1/2.		0.5	2.52	1.26
M8	1/2.	1/2.		0.5	3.372	1.686
M9	1/2.	1/2.		0.5	4.8	2.4
M10	1/5.	3/10.	1/2.	0.5	4.8	2.4
M11	1/3.	1/3.	1/3.	0.5	4.8	2.4
M12	1/5.	3/10.	1/2.	0.5	6	3
M13	1/3.	1/3.	1/3.	0.5	5	2.5
M14	1/2.	1/2.		0.5	5	2.5
M15	1			0.5	5.6	2.8

Fuente: Elaboración propia

Para las mezclas se utilizaron probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura; para cada mezcla se efectuaron un total de 12 probetas para desarrollar pruebas de compresión y permeabilidad a cada una de ellas dando un total de 180 probetas, las pruebas de se realizaron a las edades de 3, 7, 14 y 28 días. La tabla 3.7 muestra la cantidad de agregados gruesos (kilogramos) que se utilizaron para los distintos diseños de mezcla, así como la relación agua-cemento (a/c) de éstas.

Cuadro 3.7 Cantidad de agregados para la elaboración de concretos ecológicos.

Nombre de la mezcla	Cantidad (Kg)			Relación agua - cemento (w/c)	Cantidad	
	3/8"	1/2"	3/4"		Cemento (Kg)	Agua (Lt)
M1	6.73	8.16	9.54	0.43	13.48	5.81
M2	5.05	6.09	14.28	0.43	13.48	5.81
M3	10.09	12.23		0.6	1.89	1.2
M4	4.04	7.32	14.28	0.5	2.52	1.26
M5	4.04	7.32	14.28	0.5	3	1.5
M6	6.73	8.16	9.54	0.5	3	1.5
M7	10.1	12.23		0.5	2.52	1.26
M8	10.1	12.23		0.5	3.372	1.686
M9	10.1	12.23		0.5	4.8	2.4
M10	4.04	7.32	14.28	0.5	4.8	2.4

M11	6.73	8.16	9.54	0.5	4.8	2.4
M12	4.04	7.32	14.28	0.5	6	3
M13	6.73	8.16	9.54	0.5	5	2.5
M14	10.1	12.23		0.5	5	2.5
M15	26			0.5	5.6	2.8

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.5 se observan algunas de las probetas cilíndricas con distintos proporcionamientos de agregados así como relación agua-cemento (a/c) que se realizaron en la investigación bajo condiciones de laboratorio.



Figura 3.5 Especímenes de mezclas en laboratorio.

Fuente: Elaboración propia

Las pruebas de resistencia a la compresión se realizaron bajo condiciones de laboratorio, en la máquina universal y de acuerdo a la norma ASTM C39. Los

cilindros se coronaron con almohadillas de neopreno y se ensayaron a las edades de 3, 7, 14 y 28 días respectivamente.

Para las pruebas de permeabilidad se utilizó un permeámetro de carga constante y se validaron con la teoría de percolación, la cual estudia los fenómenos que se presentan cuando una sustancia quiere cruzar de un lado a otro de un espacio cubierto por otra sustancia e investiga en qué condiciones se puede dar y en cuales no la percolación.

ETAPA 2

De acuerdo a los datos y resultados obtenidos en la etapa uno de la investigación se procedió a comenzar con los trabajos en laboratorio de la etapa dos, los cuales consisten en que se eligieron los cuatro mejores diseños de mezcla para ahora incluir en su matriz cementante un aditivo tipo fluidificante para reducir agua y conocer el comportamiento del cementante. Las mezclas que resultaron con mejores características tanto de compresión como de permeabilidad y con las que se trabaja en la segunda etapa de esta investigación fueron las identificadas como M12, M13, M14 Y M15.

Esta etapa consiste en incluir un aditivo en la matriz cementante del concreto permeable para reducir el agua de acuerdo con la norma ASTM C494 y conocer los comportamientos de éste en el concreto. El aditivo que se está utilizando es un aditivo fluidificante reductor de agua. El efecto de los aditivos en las mezclas mejora las resistencias y no afecta de forma importante la permeabilidad del concreto.

En esta etapa de investigación y desarrollo de cementantes especiales para concretos ecológicos de acuerdo a sus necesidades se realizaron 3 probetas para cada edad (3, 7, 14, 28 días) y cada mezcla (M12, M13, M14, M15) dando un total de 48 probetas.



Figura 3.6 Elaboración de mezclas con inclusión de aditivos.

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.8 Proporción y cantidad de agregados para las mezclas con la inclusión de aditivos.

Nombre de la mezcla	Proporción y cantidad						Relación agua/cemento	Cantidad (gr)			
	3/8"		1/2"		3/4"			Cemento	Agua	Aditivo fluidificante	Aditivo acelerante
	Proporción	Cantidad (gr)	Proporción	Cantidad (gr)	Proporción	Cantidad (gr)					
M1	01	472.99					0.28	215.8	80.95	4.5	4.5
M2	1	473					0.29	200	60.32	4	4
M3	1	673					0.29	200	60.32	4	4
M4	1	773					0.29	200	60.32	4	4
M5			1	775			0.29	200	60.32	8	8
M6	1	1550					0.29	400	120.64	16	16



Fuente: Elaboración propia

Las pruebas de resistencia a la compresión se realizaron bajo condiciones de laboratorio, en la máquina universal y de acuerdo a la norma ASTM C39. Los morteros se coronaron con azufre y se ensayaron a las edades de 3, 7, 14 y 28 días respectivamente.

Para las pruebas de permeabilidad se utilizó un permeámetro de carga constante y se validaron con la teoría de percolación, la cual estudia los fenómenos que se presentan cuando una sustancia quiere cruzar de un lado a otro de un espacio cubierto por otra sustancia e investiga en qué condiciones se puede dar y en cuales no la percolación. La percolación es un concepto fisicoquímico con el que se designa la filtración de un fluido en un medio poroso. Está determinado por la porosidad del medio. Cuando la porosidad es alta, por arriba de cierto umbral, el fluido se cuela por toda la estructura. Si por el contrario es baja, el líquido no pasa. Este fenómeno es considerado crítico, de todo o nada.

Respecto a las pruebas de porosidad, los poros en el concreto determinan la exposición ambiental del material y daños provenientes de los líquidos y de los gases que lo penetran, tales como dióxido de carbono, oxígeno, agua, sulfatos, cloruros, entre otros. Estos elementos o compuestos originan diversas reacciones químicas (Torres et al., 2007).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la etapa 1 las mezclas se elaboraron con distintos proporcionamientos de agregado, así como de relación agua-cemento (a/c), diseñadas bajo condiciones de laboratorio utilizando normativa ASTM, en la figura 4.1 se observan algunas de las diferentes probetas cilíndricas realizadas en laboratorio.



a)



b)



c)

Figura 4.1 Probetas cilíndricas de concretos permeables.

4.1 a) Probeta cilíndrica M4

4.2 b) Probeta cilíndrica M2

4.3 c) Probeta cilíndrica M3

Fuente: Elaboración propia

Las mezclas se identificaron como MX, donde la X corresponde a la numeración, desde el 1 hasta el 15 en orden cronológico, en la figura 4.2 se observan más probetas cilíndricas de distintas mezclas de diseño.



a)



b)



c)



d)



e)



f)



g)



h)



i)



j)



k)

Figura 4.2 Probetas cilíndricas con diferentes tamaños de agregados.

4.2 a) M11

4.2 b) M8

4.2 c) M15

4.2 d) M9

4.2 e) Probetas cilíndricas en curado

4.2 f) Distintas mezclas de concretos ecológicos

4.2 g) M7

4.2 h) M13

4.2 i) M2

4.2 j) M4

4.2 k) M3

Fuente: Elaboración propia

Prueba de resistencia a la compresión

Los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión desarrolladas en laboratorio a cada una de las 180 probetas de los 15 distintos diseños de mezclas a sus diferentes edades (3, 7, 14 y 28 días) se muestran en la tabla 4.1

Cuadro 4.1 Resultados de la prueba de resistencia a la compresión realizados a las probetas cilíndricas en sus diferentes edades etapa 1.

Mezcla	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)											
	Edades											
	3	Media	Desv. Std.	7	Media	Desv. Std.	14	Media	Desv. Std.	28	Media	Desv. Std.
M1	38 38 38	38	37.5		0			0			0	
M2	39.2 40 39.2	39.5	39		0			0			0	
M3	3.16 3.46 3.75	3.46	2.92	11.2 10.2 11	10.8	10.3	14.6 15.7 14.2	14.8	14.3	16 18 18	17.2	16.8
M4	4.12 3.76 4.82	4.23	3.73	7.5 8.65 8.77	8.31	7.81	11.3 11.8 12.4	11.8	11.3	14 14 16	14.7	14.2

M5	5.3 3 5.5 6.1	5.64	5.13	12. 3 13. 1 14. 2	13.2	12.7	14. 4 14. 7 15. 9	15	14.5	17 17 17	17.1	16.6
M6	6.5 3 6.7 8 6.9 2	6.74	6.23	14 14 14. 2	14.1	13.6	16. 9 14. 8 16. 5	16.1	15.6	19 19 18	18.9	18.5
M7	6.5 4 6.6 5 6.8 3	6.67	6.15	14. 5 14. 3 13. 1	14	13.5	16. 2 15. 6 15. 9	15.9	15.4	18 17 18	17.8	17.3
M8	9.9 8 9.5 2 10	9.84	9.33	17. 4 18. 1 18. 8	18.1	17.6	21. 1 20. 7 21. 3	21.1	20.6	23 24 24	23.7	23.2
M9	14. 3 15. 2 15. 4	14.9	14.4	22. 7 24. 8 25	24.2	23.7	24. 9 27. 4 26. 7	26.3	25.9	29 30 29	29.3	28.7
M10	15. 6 16. 7 16. 3	16.2	15.7	23. 1 24. 3 25	24.1	23.6	27. 3 26. 5 27. 3	27.1	26.6	29 29 30	29.5	29
M11	16. 5 16. 9 16. 9	16.8	16.3	25. 9 26. 1 26. 1	26	25.5	28. 6 37. 4 29. 3	31.8	31.5	33 33 34	33.3	32.8
M12	25. 3 26	26	25.5	34. 1 34.	34.7	34.2	41. 2 42.	41.9	41.5	43 44	43.7	

	26. 7			9 35. 1			1 42. 4			44		
M13	24. 2 24. 7 22. 3	23.7	23.2	32 31. 1 32. 7	31.9	31.4	39. 8 40 40	39.9	39.4	42 42	42.4	
M14	22. 8 22. 9 21. 8	22.5	22	30. 1 30 30. 5	30.2	29.7	38. 9 39. 9 39	39.3	38.8	42 42 42	42	
M15	21. 9 21. 2 21	21.4		31. 8 31 28. 5	30.4	30	40. 3 41. 3 39. 6	40.4	39.9	43 43 43	42.9	

Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.3 se observan los resultados de las probetas cilíndricas de las pruebas de resistencia a la compresión, las cuales se realizaron bajo condiciones de laboratorio en la máquina universal, a cada una de las probetas elaboradas, se coronaron con almohadillas de neopreno en sus diferentes edades (3, 7, 14, 28 días).

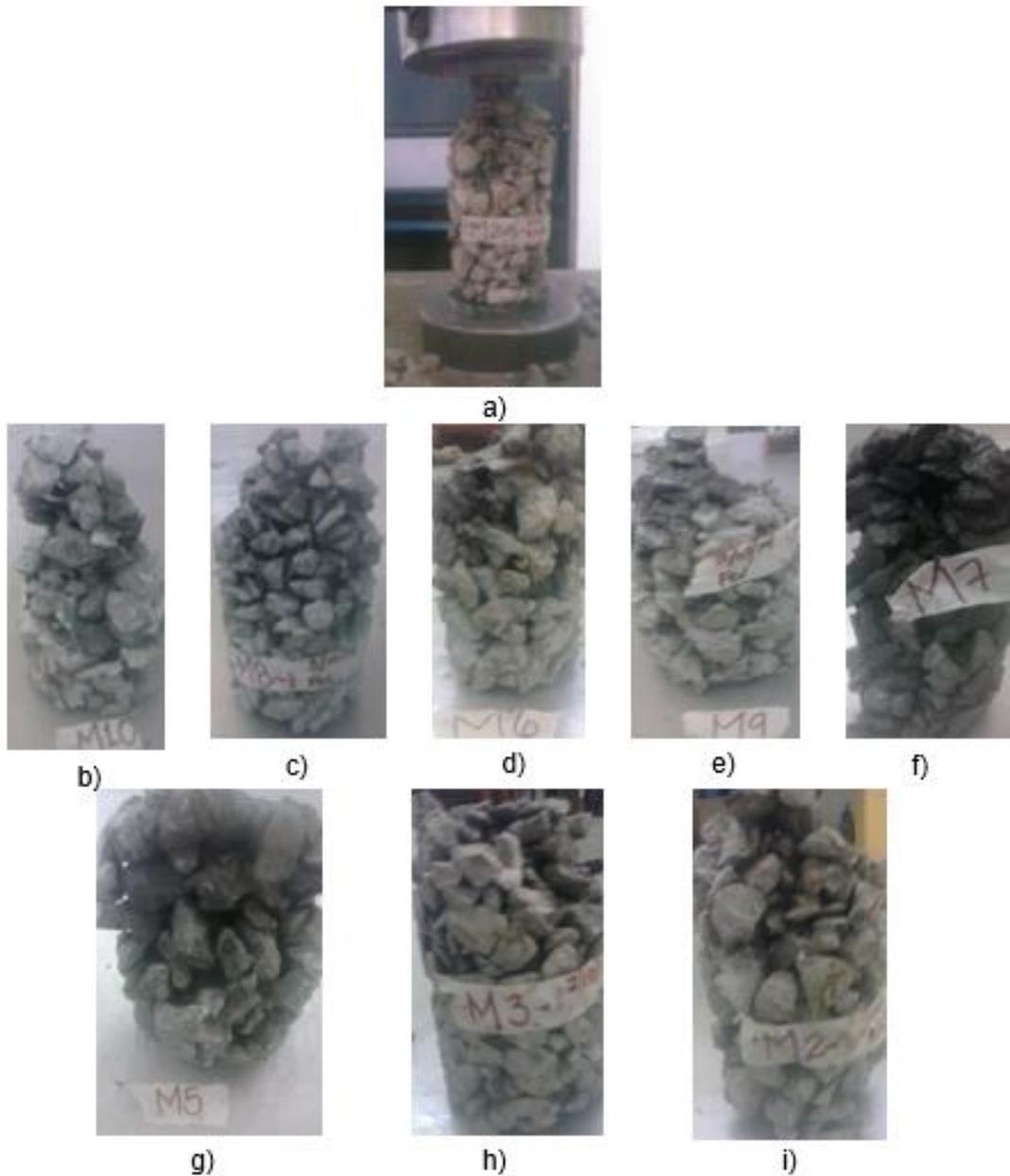


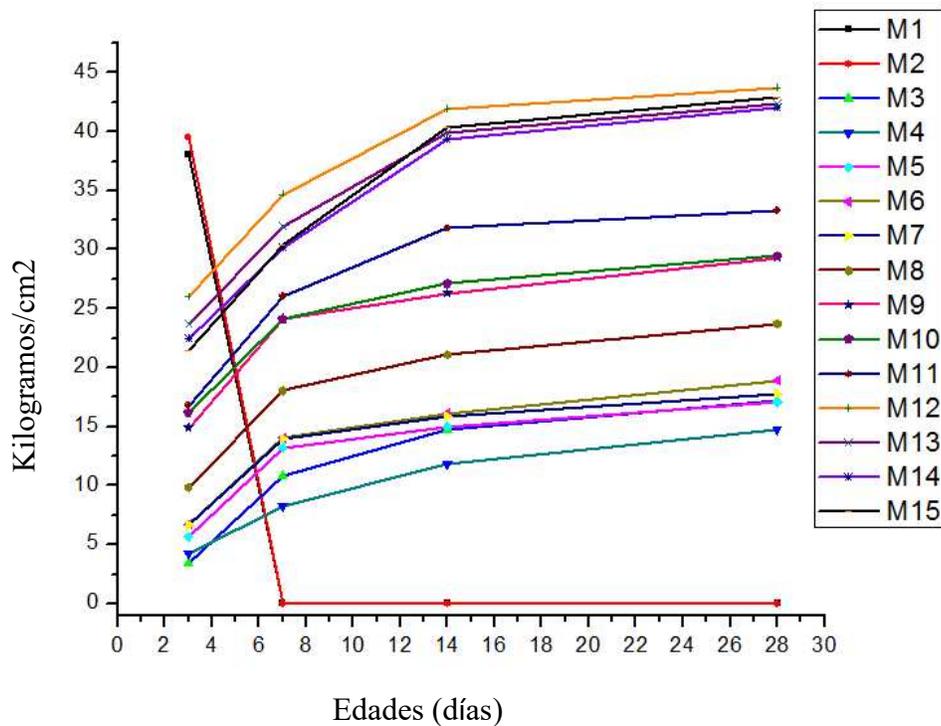
Figura 4.3 Pruebas de resistencia a la compresión.

a) Probeta cilíndrica M2 en prueba de resistencia a la compresión

- b) Falla de la mezcla M10 a la prueba de resistencia a la compresión
- c) Falla de la mezcla M8 a la prueba de resistencia a la compresión
- d) Falla de la mezcla M6 a la prueba de resistencia a la compresión
- e) Falla de la mezcla M9 a la prueba de resistencia a la compresión
- f) Falla de la mezcla M7 a la prueba de resistencia a la compresión
- g) Falla de la mezcla M5 a la prueba de resistencia a la compresión
- h) Falla de la mezcla M3 a la prueba de resistencia a la compresión
- i) Falla de la mezcla M2 a la prueba de resistencia a la compresión

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.2 Gráfica de resultados de las pruebas de resistencia a la compresión en la primer etapa de investigación.



Fuente: Elaboración propia

Cabe señalar que para las seis primeras muestras de las dos primeras mezclas los resultados obtenidos a la edad de 3 días indicaban que existía un concreto resistente pero con muy poca permeabilidad, por lo que se decidió ya no elaborar pruebas mecánicas a estas mezclas en las edades faltantes (7, 14 y 28 días).

Prueba de permeabilidad

Las pruebas de permeabilidad para las mezclas (M1-M15) se realizaron utilizando un modelo de permeámetro de carga constante en sus diferentes edades (3, 7, 14, 28 días) de acuerdo con la norma ACI 522-R. En las siguientes imágenes se observa las probetas cilíndricas efectuándose la prueba de resistencia a la compresión en la máquina universal así como los resultados de cómo quedaron las probetas cilíndricas después de que se realizara la prueba de compresión a la resistencia.

Para las pruebas de permeabilidad se utilizó un permeámetro de carga constante y se validaron con la teoría de percolación, la cual estudia los fenómenos que se presentan cuando una sustancia quiere cruzar de un lado a otro de un espacio cubierto por otra sustancia e investiga en qué condiciones se puede dar y en cuales no la percolación. La percolación es un concepto fisicoquímico con el que se designa la filtración de un fluido en un medio poroso. Está determinado por la porosidad del medio. Cuando la porosidad es alta, por arriba de cierto umbral, el fluido se cuela por toda la estructura. Si por el contrario es baja, el líquido no pasa. Este fenómeno es considerado crítico, de todo o nada.

Cuadro 4.3 Resultados de las pruebas de permeabilidad realizadas en las probetas cilíndricas en sus diferentes edades, etapa 1.

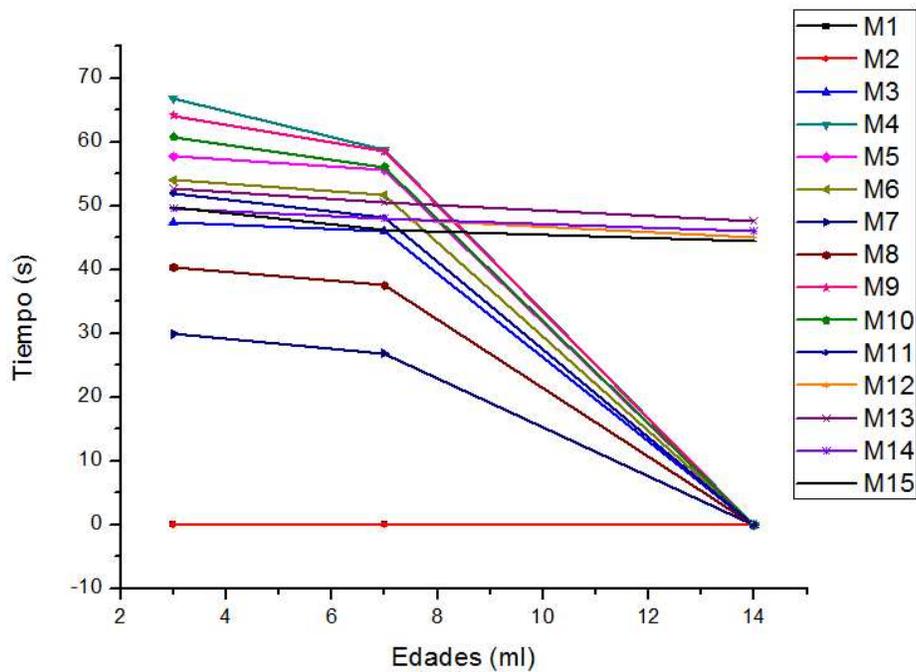
Mezcla	PERMEABILIDAD									
	Agua (ml)	Edad (3 días)	Media	Desv. Std.	Edad (7 días)	Media	Desv. Std.	Edad (14 días)	Media	Desv. Std.

M1	-	-								
M2										
M3	350	44.21			45.35					
	350	48.08	47.46	47.02	49.38	45.99	45.56		0	
	350	50.09			43.23					
M4	350	01:13.0			59.29					
	350	59.09	66.76	66.51	58.54	58.64	58.14		0	
	350	01:08.2			58.09					
M5	350	58.05			56.05					
	350	57.43	57.69	57.19	55.19	55.57	55.07		0	
	350	57.58			55.46					
M6	350	54.17			52.16					
	350	53.29	53.95	53.45	51.29	51.61	51.11		0	
	350	54.39			51.39					
M7	350	29.12			26.39					
	350	29.39	29.85	29.35	27.08	26.86	26.35		0	
	350	31.03			27.1					
M8	350	40.17			37.17					
	350	41.23	40.32	39.82	37.25	37.49	36.99		0	
	350	39.56			38.06					
M9	350	01:10.1			59.39					
	350	01:00.1	64.1	63.74	59.02	58.49	57.99		0	
	350	01:02.1			57.06					
M10	350	01:02.6			56.56					
	350	59.54	60.75	60.26	54.53	56.06	55.57		0	
	350	01:00.1			57.08					
M11	350	53.16			49.13					
	350	50.45	51.93	51.44	47.52	48.08	47.58		0	
	350	52.18			47.58					
M12	350	49.07			47.18			45.28		
	350	49.19	49.52	49.02	47.19	47.92	47.43	47.03	45.11	44.63
	350	50.29			49.39			43.01		
M13	350	52.59			50.29			48.19		
	350	53.45	52.68	52.18	52.35	50.58	50.09	48.09	47.66	47.17
	350	52.01			49.09			46.71		
M14	350	50.18			48.19			45.32		

	350	49.39	49.61	49.11	48.37	48	47.5	48.16	45.96	45.48
	350	49.27			47.45			44.39		
M15	350	49.52			46.67			43.07		
	350	50.09	49.68	49.18	46.25	46.19	45.69	46.19	44.52	44.03
	350	49.43			45.66			44.29		

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.4 Gráfica de resultados de las pruebas de permeabilidad a las probetas en la primer etapa de investigación.



Fuente: Elaboración propia

ETAPA 2

Los primeros resultados de las pruebas de resistencia de compresión y permeabilidad de las probetas cilíndricas con la inclusión de un aditivo se muestran en la siguiente tabla. Se prevén resultados de 100kg/cm² en su resistencia a compresión a la edad de 28 días. La figura 4.4 muestra el proceso de desarrollo de cementante para un concreto ecológico.



Figura 4.4 Proceso de desarrollo de cementante para concreto ecológico.

Fuente: Elaboración propia



Figura 4.5 Morteros de cementante para concreto ecológico.

Fuente: Elaboración propia



Figura 4.6 Desarrollo de concretos ecológicos con aditivos

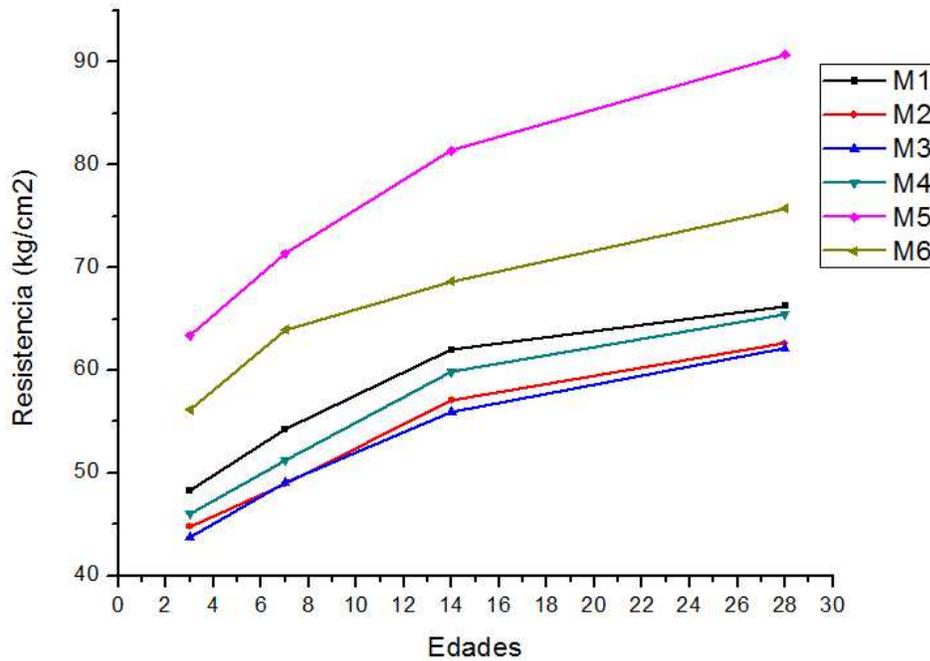
Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.5 Resultados de las pruebas de resistencia a la compresión, etapa 2.

NOMBRE DE LA MEZCLA	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (kg/cm ²)			
	EIDADES			
	3	7	14	28
M1	45.76	53.23	61.26	67.23
	48.98	56.74	62.71	66.39
	50.12	52.91	62.05	65.12
M2	40.98	45.32	53.47	60.22
	45.63	50.31	58.91	64.26
	47.87	51.29	59.01	63.33
M3	41.29	46.06	52.65	63.44
	43.32	49.31	56.4	61.27
	46.67	51.82	58.79	61.82
M4	48.65	52.04	60.12	64.04
	46.03	51.92	60.02	67.29
	43.54	49.77	59.33	65.02
M5	65.32	72.38	83.28	93.36
	60.12	69.27	79.19	90.12
	64.76	72.49	81.77	88.74
M6	57.82	65.99	67.03	78.2
	55.25	63.72	70.47	73.49
	55.43	62.1	68.54	75.66

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.6 Gráfica de resultados de las pruebas de resistencia a la compresión a las probetas en la segunda etapa de investigación.



Fuente: Elaboración propia

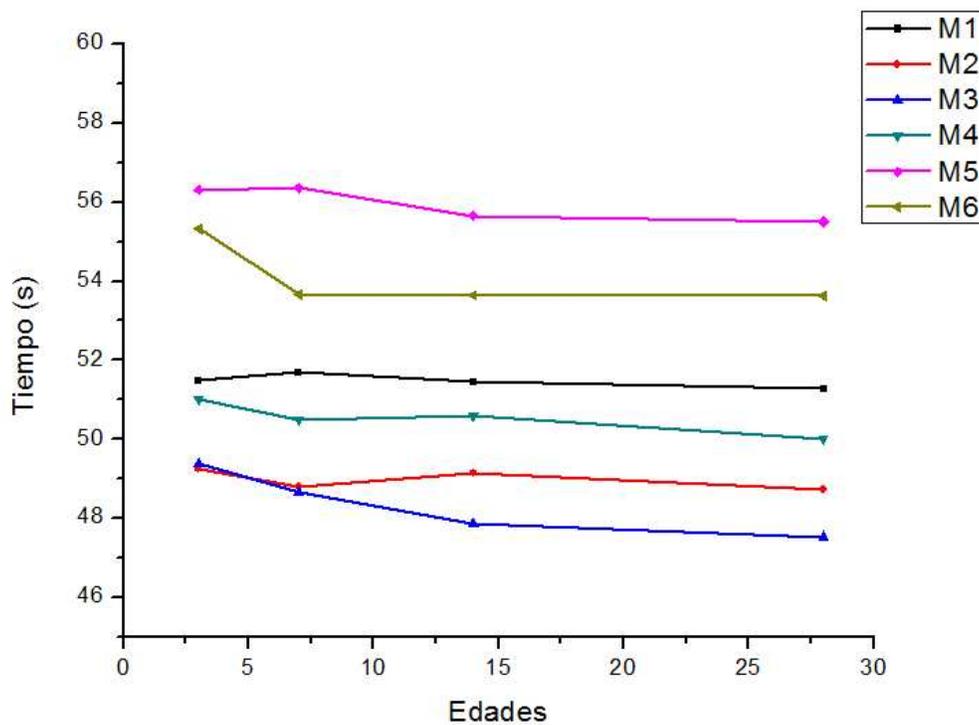
Cuadro 4.7 Resultados de la prueba de permeabilidad a las probetas de concretos ecológicos de la segunda etapa, donde se incluyeron distintos tipos de aditivos.

NOMBRE DE LA MEZCLA	PERMEABILIDAD (EDAD- DÍAS/SEGUNDOS)				
	AGUA (ml.)	3 DÍAS (SEG)	7 DÍAS (SEG)	14 DÍAS (SEG)	28 DÍAS (SEG)
M1	350	52.45	52.56	52.3	51.52
	350	50.57	52.31	49.56	51.28
	350	51.43	50.2	52.51	51.03
M2	350	49.38	49.25	49.01	49.02
	350	49.07	48.11	49.12	48.59

	350	49.32	49.02	49.32	48.55
M3	350	49.56	48.57	47.4	48.04
	350	48.55	48.23	48.12	48.03
	350	50.01	49.16	48.02	46.53
M4	350	57:36.0	52.12	51.58	50.02
	350	50.09	50.01	50.16	49.57
	350	53:45.6	49.35	50.05	50.44
M5	350	57.5	57.33	55.52	55.03
	350	56.32	57.21	56.38	55.17
	350	55.12	54.55	55.08	56.31
M6	350	54.17	55.54	53.1	53.44
	350	55.58	52.33	53.28	53.06
	350	56.23	53.12	54.53	54.38

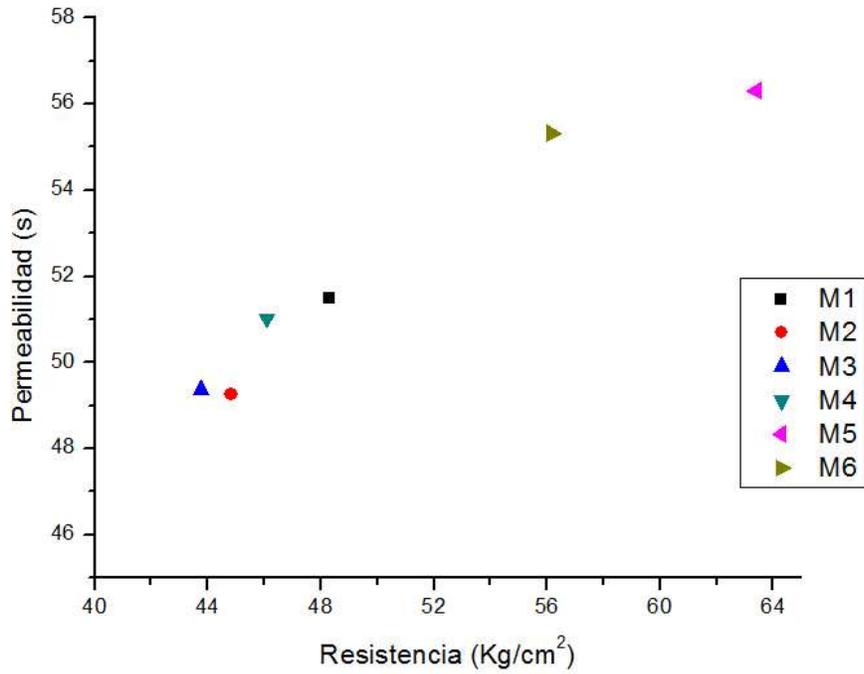
Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.8 Gráfica de resultados de las pruebas de permeabilidad realizadas a las probetas en la segunda etapa de investigación.



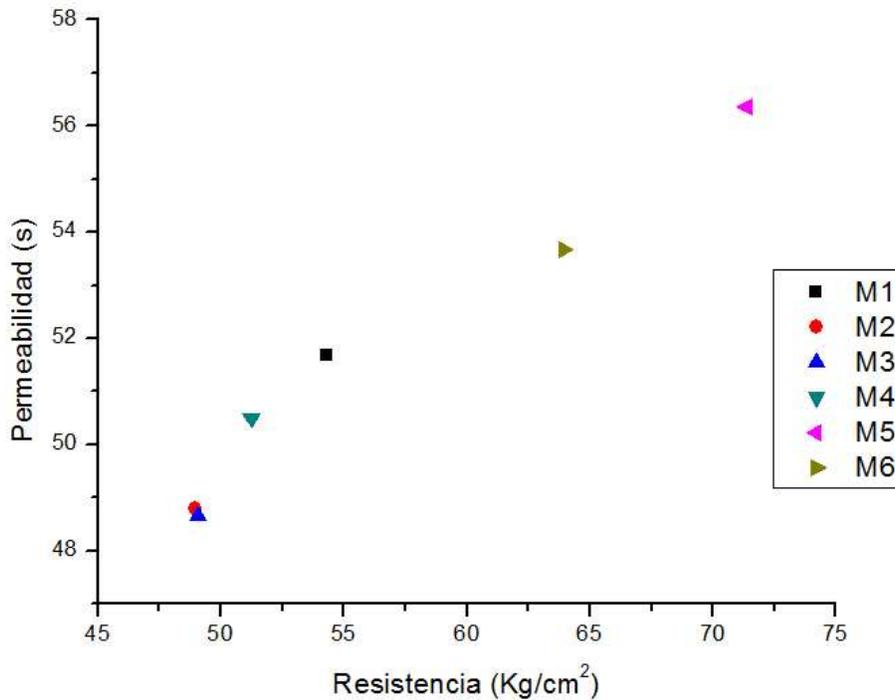
Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.9 Gráfica de comparación entre la permeabilidad y resistencia a compresión de las probetas a la edad de 3 días.



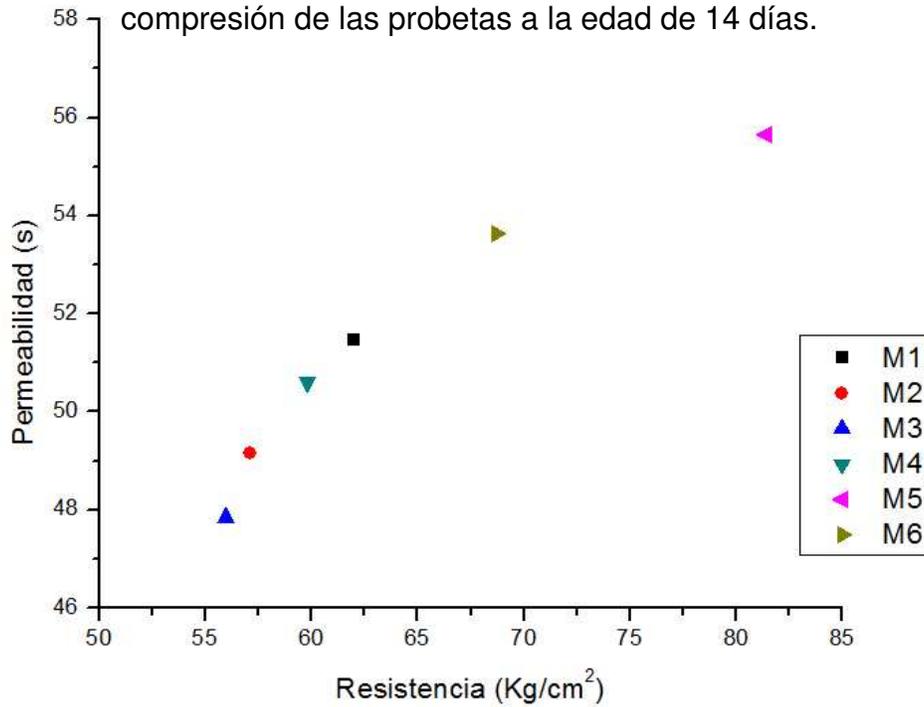
Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.10 Gráfica de comparación entre la permeabilidad y resistencia a compresión de las probetas a la edad de 7 días.



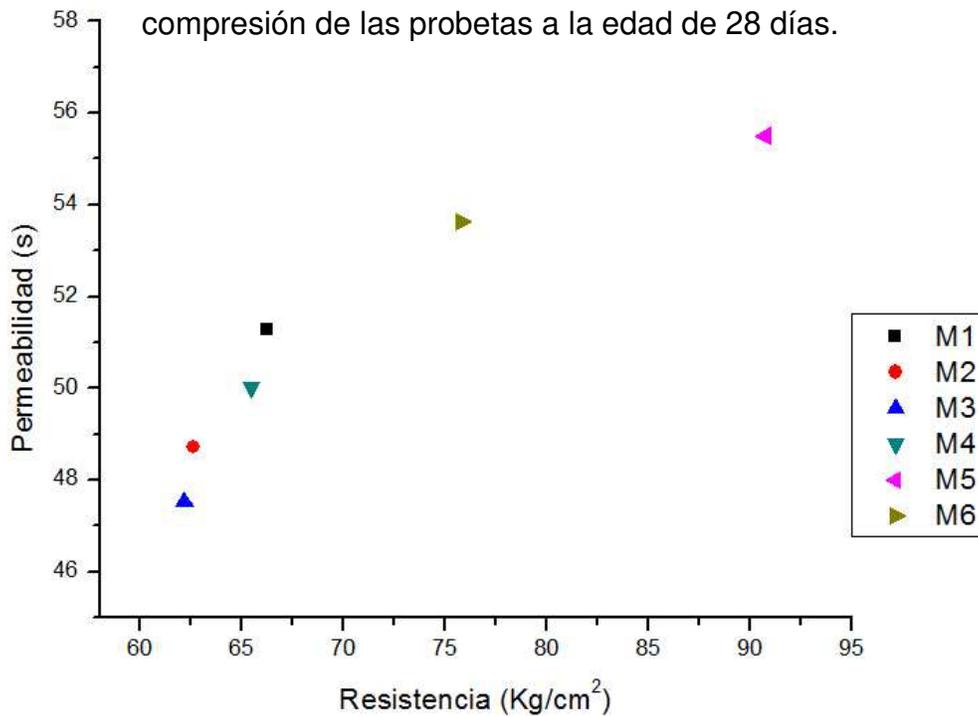
Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.11 Gráfica de comparación entre la permeabilidad y resistencia a compresión de las probetas a la edad de 14 días.



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.12 Gráfica de comparación entre la permeabilidad y resistencia a la compresión de las probetas a la edad de 28 días.



Fuente: Elaboración propia

Durante la primer etapa de trabajo en esta investigación se consiguió la granulometría adecuada para el diseño y elaboración de concretos ecológicos. ($\frac{3}{8}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{4}$ "). Además se obtuvo la densidad del agregado, la cual es vital para poder determinar el contenido de éstos en los diferentes diseños de mezclas. Se logró el mejor proporcionamiento de diseño de mezcla para un concreto permeable de acuerdo a las necesidades de uso y una vez realizadas las pruebas mecánicas (permeabilidad y compresión), se lograron concretos ecológicos y se consiguieron los cuatro mejores diseños para seguir con los trabajos en laboratorio en una segunda etapa.

Es importante recalcar que el concreto permeable es un tipo especial de concreto con alto grado de porosidad cuya principal característica es permitir el paso del agua a través de su estructura porosa, por lo que es considerado como un material de construcción sustentable, por su buen manejo de las aguas pluviales.

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que el concreto ecológico es un material cuya resistencia y permeabilidad dependen de la influencia de ciertas variables, que, por lo general, las que afectan de manera positiva a la resistencia del material, lo hacen de forma negativa con la permeabilidad.

La permeabilidad del agua es un fenómeno por el cual se produce el movimiento de agua a través del concreto, como consecuencia de una presión exterior, que la mayoría de las veces se genera por la altura del nivel del agua sobre el punto considerado, de acuerdo a los resultados obtenidos y las pruebas realizadas se puede determinar que, si la red de capilares del concreto es muy fina, debido a diámetros muy pequeños de los capilares, el caudal de circulación resulta despreciable.

Con la absorción se pudo observar que el agua que se encuentra en contacto con el concreto no saturado, y que pasa por el por absorción capilar, lo hace con mayor velocidad a medida que el diámetro de los capilares es mayor; por este motivo para que un concreto ecológico sea impermeable la red capilar debe ser muy fina, por otra parte, entre más fina sea la red capilar mayor será la absorción del concreto.

De acuerdo a lo estudiado se puede observar que la velocidad de penetración por absorción en un concreto seco puede ser mucho más rápida que el del mismo volumen de agua que atraviesa el mismo concreto bajo un gradiente de presión, es decir por permeabilidad. La absorción es más rápida pero su velocidad va aminorando a medida que el concreto se satura, una vez la red porosa del material está saturada el movimiento del agua por absorción se detiene.

El costo de un concreto ecológico es más barato respecto a un concreto convencional, en la siguiente tabla se presenta una comparación entre el concreto ecológico y otros tipos de concretos.

Tipo de pavimento	Asfalto	Concreto hidráulico	Concreto estampado	Concreto ecológico
Base y sub-base	100%	100%	100%	65%
Excavación	100%	100%	100%	60%
Riego de impregnación	100%	100%	100%	0%
Riego de liga	100%	100%	100%	0%
Cimbra	0%	100%	100%	100%
Acero de refuerzo	0%	100%	100%	0%
Carpeta	47%	90%	100%	62%
Riego de sello	100%	0%	0%	0%
Moldes	0%	0%	100%	0%
Drenaje pluvial	100%	100%	100%	0%
Total	58%	98%	100%	53%

Se realizó un modelo matemático el cual describe teóricamente el análisis y la descripción del análisis donde se aplican los resultados del estudio al objeto del cual se partió mediante la construcción de éste, que es el proceso en el que se convirtió nuestros resultados de las pruebas de permeabilidad y resistencia a la compresión realizados en cada una de las probetas a un lenguaje matemático. La utilidad de este modelo matemático radica en que nos ayuda a estudiar cómo se comportan las estructuras complejas frente a aquellas situaciones que no podemos observar con facilidad en el ámbito real.

```
#pragma hdrstop
#pragma argsused

#include <tchar.h>
#include <stdio.h>
#include <iostream>
#include <conio.h>

void CaptNvaMezc();
void ImpRes();
void AnAXDias();
void GuardarArch();

struct reg {
    float R1;
    float R2;
    float R3;
    float R11;
    float R12;
    float R13;
    float R21;
    float R22;
    float R23;
    float R31;
    float R32;
    float R33;
    float P1;
    float P2;
    float P3;
    float P11;
    float P12;
    float P13;
    float P21;
    float P22;
```

```

clrscr();
gotoxy(25,7);
printf("1.)Capturar nueva mezcla\n");
gotoxy(25,8);
printf("2.)Imprimir resultados\n");
gotoxy(25,9);
printf("3.)Analizar mezcla a ciertos días\n");
gotoxy(25,10);
printf("4.)Guardar en Archivo\n");
gotoxy(25,12);
printf("S.)Salir\n");
c=getche();
switch (c){
    case '1':
        {
            CaptNvaMezc();
            break;
        }
    case '2':
        {
            ImpRes();
            break;
        }
    case '3':
        {
            AnAXDias();
            break;
        }
    case '4':
        {
            GuardarArch();
            break;
        }
}

```

```

        Mezcla[i].PMinX=(-Mezcla[i].b2/(2*Mezcla[i].a2));
        Mezcla[i].PMinY=(Mezcla[i].c2-((Mezcla[i].b2
*Mezcla[i].b2)/(4*Mezcla[i].a2)));
        printf("Ecuaciones de las parabolas de M%d:\n",i);
        printf("\nResistencia: y=%fx^2 + %fx + %f
\n",Mezcla[i].a,Mezcla[i].b,Mezcla[i].c);
        printf("Permeabilidad: y=%fx^2 %fx + %f
\n",Mezcla[i].a2,Mezcla[i].b2,Mezcla[i].c2);
        printf("\nLa resistencia maxima es:\nA los %f dias, con
una resistencia de:%f kg/cm^2\n",Mezcla[i].PMaxX,Mezcla[i].PMaxY);
        printf("\nEl tiempo minimo de la permeabilidad es:\nA los
%f dias, con un tiempo de:%f segundos\n\n
\n",Mezcla[i].PMinX,Mezcla[i].PMinY);
    }
    getch();
    return;
}

void AnAXDias()
{
    int dias,i;
    float Re,Per;
    clrscr();
    printf("A cuantos dias desea analizar las mezclas?\n\n");
    scanf("%d",&dias);
    for (i = 0; i < n1; i++) {

Re=(Mezcla[i].a*dias*dias)+(Mezcla[i].b*dias)+(Mezcla[i].c));
        Per=((Mezcla[i].a2*dias*dias)+(Mezcla[i].b2
*dias)+(Mezcla[i].c2));
        printf("Para M%d\nResistencia:%f kg/cm^2\nPermeabilidad:%f
segundos\n\n",i,Re,Per);
    }
    getch();
    return;
}

```

CONCLUSIONES

Con la caracterización de los materiales y obteniendo las mejores propiedades, la tendencia buscada en esta investigación es que el nuevo producto sea: resistente, manejable, permeable y que sea predecible, es decir que se conozcan sus comportamientos. El resultado logrado es un concreto ecológico, el cual rompe con los esquemas comunes de agua, cemento y los dos agregados (arena y grava), para incorporar elementos innovadores que logren comparar y mejorar las características de un concreto convencional de acuerdo a las necesidades requeridas, trayendo como consecuencia beneficios tales como el social y ecológico.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la primer etapa, las pruebas índice de permeabilidad, muestran que, sacando un promedio del total de los concretos ecológicos elaborados en laboratorio la permeabilidad es de 100% en un lapso de tiempo de 46 segundos por cada 350 ml de agua; es importante insistir que la principal característica de una mezcla porosa es su capacidad de infiltración. La permeabilidad de estas mezclas se obtuvo usando agregados con un volumen significativo de huecos entre las partículas y con ausencia de finos, y una cantidad reducida de pasta de cemento, la cual fue controlada principalmente por la porosidad de la pasta de cemento. Los resultados muestran que existe una dosificación de concreto permeable, la cual permite obtener resistencias altas, manteniendo una excelente permeabilidad en el concreto.

Con los resultados se obtenidos en la investigación se verifica que la resistencia del concreto depende de la adherencia entre la pasta de cemento y las partículas de agregado grueso. Así mismo, la falta de agua provoca la falta de adherencia, mientras que el exceso de agua puede generar la obstrucción de los poros. En el primer caso se pudo observar que las mezclas con falta de agua presentaban fallas prematuras de la superficie, mientras que en las mezclas que presentaban

exceso de ésta perdieron la capacidad de filtración de la superficie, es decir, perdieron permeabilidad.

Cabe mencionar que con lo visto en estos trabajos se puede afirmar que un concreto con vacíos pierde resistencia, el cementante reacciona con el cemento y lo potencializa haciéndolo más resistente y aumentando considerablemente su adherencia.

El concreto permeable conseguido en esta investigación, es un material de estructura abierta compuesto por cemento Pórtland, agregado grueso, aditivos (2 tipos) y agua. La combinación de estos ingredientes produce un material endurecido con poros interconectados, cuyo tamaño varía de 3/8" a 3/4" de pulgadas, lo que permite el paso de agua. El contenido de vacíos puede variar de un 18 a un 35 %, con resistencias a compresión de 100kg/cm², lo que significa que el concreto ecológico logrado cumple con los requisitos de permeabilidad y resistencia deseados, además su velocidad de drenaje depende del tamaño de agregado y de la densidad de la mezcla, el cual varía en el rango de 81 a 710 l/min/m².

En cuanto a costos, el concreto ecológico puede usarse como una alternativa en áreas de estacionamiento y reducir la necesidad de construir pozos de retención para almacenar el agua pluvial. El mismo pavimento actuará como área de retención, lo que reducirá el costo de la construcción de pozos de retención, la instalación de bombas, los tubos de drenaje, y su mantenimiento o permitir sistemas de alcantarillado de menor tamaño.

6. BIBLIOGRAFÍA

[1] ACI Committee 522. 522R-06: pervious concrete. Farmington Hills, USA: American Concrete Institute; 2006.

[2] AC308 Specification for concrete aggregates.

[3] ACI 301-10 Specifications for Structural concrete.

[4] ASTM C33 Especificación Estándar de los agregados del concreto.

[5] ASTM C618 Especificación estándar para puzolana natural calcinada para su uso en el concreto.

[6] ASTM C150/C150M-12 Especificación normalizada para cemento Pórtland.

[7] ASTM C136 Método de prueba estándar para el análisis de tamiz de finos y gruesos.

[8] ASTM C29 Método de prueba estándar para la densidad aparente y huecos en el agregado.

[9] ASTM C128 Método de prueba estándar para la densidad, densidad relativa y absorción de agregado fino.

[10] ASTM C127 Método de prueba estándar para la densidad, densidad relativa y absorción de agregado grueso.

[11] ASTM C138 Método de prueba estándar para la densidad, rendimiento y contenido de aire.

[12] ASTM C143 Método de prueba estándar para la depresión del hormigón.

[13] ASTM C78 Método de prueba estándar para resistencia a la flexión del concreto.

[14] ASTM C1688/C1688M Method for Density and Void Content of Freshly Mixed Pervious Concrete.

[15] ASTM C192 Práctica estándar para preparación y curado de especímenes de ensayo de concreto en el laboratorio.

[16] ASTM-C-187-04 Standard test method for normal consistency of hydraulic cement.

[17] ASTM C595/C595M Standard Specification for Blended Hydraulic Cements.

[18] ASTM C494/C494M Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete.

[19] ASTM C1157/C1157M Standard Performance Specification for Hydraulic Cement.

[20] ASTM C1602/C1602M Standard Specification for mixing water used in the production of hydraulic cement concrete.

[21] A Haselbach, Liv., M. Valavala, S. Montes. 2006. Permeability predictions for sand-clogged Portland cement pervious concrete pavement systems. University of South Carolina, Civil and Environmental Engineering, 300 Main Street, Columbia, SC 29208, USA.

[22] Castro, J., Hernán de Solminihaç., C. Videla, and B. Fernández. 2009. Estudio de dosificaciones en laboratorio para pavimentos porosos de hormigón. Purdue University, Estados Unidos. Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile. Revista Ingeniería de Construcción Vol. 24 N°3, Diciembre de 2009 PAG. 271-284

[23] Deo, O., M. Sumanasooriya, and N. Neithalath. 2010. Permeability reduction in pervious concretes due to clogging: experiments and modeling. *J Mater Civil Eng* (May):2010:741-751.

[24] EPA. National menu for BMP practices post-construction storm water management. Washington (DC): US Environmental Protection Agency; 2004.

[25] Field R, Masters H, Singer M. An overview of porous pavement research. *J Am Water Res Assoc* 1982;18(2):265–70.

[26] Nader, G., and D. Shivaji. 1995. Development of no-fines concrete pavement applications. *J. Transp. Eng.*, May/June (1995) 283-288.

[27] Golroo, A., and S. L. Tighe. 2011. Alternative modeling framework for pervious concrete pavement condition analysis. *Pavement & Infrastructure Management*, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Waterloo, 200 University Avenue West, Waterloo, Ontario, Canada N2L 3G.

[28] Graubner C.-A, Hock C, Proske T, Schneider C. Leadership through sustainability- New challenges for the concrete industry. In: *The 11th annual international fib symposium. Concrete: 21st Century Superhero- Building a Sustainable Future*, London, 22-24 June 2009. Lausanne, Federation Internationale du Béton (fib), 2009. ISBN 978-1-904482-60-4.

[29] Gupta, R. 2013. Monitoring in situ performance of pervious concrete in British Columbia-A pilot study. *Civil & Environmental Engineering Program Department of Mechanical Engineering, University of Victoria, Canada*. 2013.

[30] Haselbach, Liv., M. Valavala, S. Montes. 2006. Permeability predictions for sand-clogged Portland cement pervious concrete pavement systems. *University of South Carolina, Civil and Environmental Engineering, 300 Main Street, Columbia, SC 29208, USA*.

[31] Hernández M. 2008. Diseño Sustentable de materiales de construcción; caso del concreto de matriz de cemento Pórtland. México.

[32] Huang, B., H. Wu, X. Shu, and E. G. Burdette. 2010. Laboratory evaluation of Permeability and strength of polymer-modified pervious concrete. Dept. of Civil and Environmental Engineering. The University of Tennessee, Knoxville, TN 37996, USA.

[33] Kevern JT, Wang K, Schaefer VR. Effect of coarse aggregate on the freeze–thaw durability of pervious concrete. J Mater Civil Eng (May):2010;469–75. Schokker AJ. The sustainable concrete guide – strategies and examples. U.S. Green Concrete Council; 2010.

[34] Maier, L. Patrick, A. Stephan, and Durham. 2012. Beneficial use of recycled materials in concrete mixtures. Construction and Building Materials 29 (2012): 428–437.

[35] Montes, F., Valavala, S., Haselbach, L., 2005. A new test method for porosity measurements of portland cement pervious concrete. Journal of ASTM International 2 (1).

[36] Montes, F., and L. Haselbach. 2006. Hydraulic conductivity of pervious concrete. Environmental Engineering Science, accepted for publication.

[37] NOM-Z-013-SCFI-1997 “Guía para la redacción y presentación de normas mexicanas”.

[38] NOM-08-SCFI-2002 “Sistema general de unidades de medida”.

[39] Park SB, D. S. Seo, and J. Lee. 2005. Studies on the sound absorption characteristics of porous concrete based on the content of recycled aggregate and target void ratio. *Cem Concr Res* 2005;35(9):1846–54.

[40] Park S-B, and M. Tia. 2004. An experimental study on the water-purification properties of porous concrete. *Cem Concr Res* 2004;34(2):177–84.

[41] Pérez- Rea, M. L., J. Horta, C. Santiago, T. López, J. Bosco, and V. Castaño. 2009. Hybrid percolation and finite element model for the micromechanical analysis of soils. Universidad Autónoma de Querétaro, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, Cerro de las Campanas s/n, Col. Niños Héroeas, 76010, Querétaro, Qro., México.

[42] Proske, T., S. Hainer, M. Rezvani, and C. A. Graubner. 2014. Eco-friendly concretes with reduced water and cement content-mix design principles and application in practice. Technische Universität Darmstadt, Franziska-Braun-Strabe 3, 64287, Germany. 2014

[43] Phung, Q, T., N. Maes, G. De Schutter, D. Jacques, and G. Y. 2013. Determination of water permeability of cementitious materials using a controlled constant flow method. Institute for Environment, Health, and Safety, Belgian Nuclear Research Centre (SCKCEN), Boeretang 200, B2400 Mol, Belgium
b Magnel. Laboratory for Concrete Research, Department of Structural Engineering, Ghent University, B9052 Ghent, Belgium
c Microlab, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, P.O. Box 5048, 2600 GA Delft, The Netherlands.

[44] Redon C., L. Chermant, J.L. Chermant, and M. Coster. 1999. Automatic image analysis and morphology of fiber reinforced concrete. *Cem Concr Compos* 1999;21:403–12.

[45] Shackelford, J. F. 1995. *Ciencia de materiales para ingenieros*. Pearson Education, México.

[46] Tennis, P.D., M.L. Leming, and D.J. Akers. 2004. *Pervious Concrete Pavements*. Portland Cement Association (PCA), Skokie, IL.

[47] Villas, B. R. C. 1995. *Sustainable Development and the Advanced Materials*. Johnson Editos, Brazil.

[48] Wang K., V.R. Schaefer, J.T. Kevern, and M.T. Suleiman. 2006. Development of mix proportion for functional and durable pervious concrete, Proceedings in CD of the 2006 Concrete Technology Forum, Nashville, National Ready Mix Concrete Association; 2006.

[49] Wong J.M., F.P. Glasser, M.S. Imbabi. 2007. Evaluation of thermal conductivity in air permeable concrete for dynamic breathing wall construction. *Cem Concr Compos* 2007;29(9):647–55.

[50] Zaetang, Y., A. Wongsas, V. Sata, P. Chindaprasirt. 2013. Use of lightweight aggregates in pervious concrete. Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand.

[51] Zhang, T., Q. Yu, J. Wei, and P. Zhang. 2012. Efficient utilization of cementitious materials to produce sustainable blended cement. School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, 510640 Guangzhou, People's Republic of China.

[52] Zouaghi, A., Kumagai, M., Nakazawa, T., 2000. Fundamental study on some properties of pervious concrete and its applicability to control stormwater run-off. *Transactions of the Japan Concrete Institute* 22, 43–50.

