



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE
EN LA RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES

**CARACTERIZACIÓN DEL
CONCRETO PERMEABLE USANDO
EL MÓDULO DE RUPTURA Y EL
PORCENTAJE DE DESGASTE**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

ING. JUAN ROBERTO FLORES PRIETO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JORGE ALARCÓN IBARRA

MORELIA, MICHOACÁN, MÉXICO, JULIO DE 2010

DEDICATORIA

Dedico la presente Maestría en Infraestructura del Transporte en la Rama de las Vías Terrestres en primer lugar a mi esposa por las seguridades de su incondicional consideración:

Arq. Adriana Mendoza Aguilar

También dedico este logro académico a mis hijos, para quienes deseo conserven la sed de la educación continua:

Teo Flores Mendoza

Roberto Vinicio Flores Mendoza

Diego Emiliano Flores Mendoza

A mis Padres quienes me dieron las bases y el coraje para seguir aprendiendo, que en paz descansen:

Profra. Sanjuana Prieto Cano

Abog. y Notario Rubén Flores Rangel

Para mis Hermanos a quienes las distancias no hacen confundir lo importante de lo vital:

Abog. Rubén Ignacio Flores Prieto (qepd)

Dr. Carlos Flores Prieto

M.D.O. Maritza Flores Prieto

M.I.E. Abog. y Notario Saúl Flores Prieto

Dr. IM José Jassón Flores Prieto

L.R.I. Sanjuana Flores Prieto

Para mis Amigos, Parientes consanguíneos y políticos, que el viaje sea cordial y creador para ambos.

Ing. Juan Roberto Flores Prieto

AGRADECIMIENTOS

El interés en el concreto hidráulico permeable va en incremento, recibí cuantiosa ayuda para esta Tesis de mucha gente. Reconozco y agradezco a las personas siguientes por sus contribuciones específicas:

Dr. Jorge Alarcón Ibarra Director de esta Tesis por su tiempo y acertadas observaciones.

Dr. Elia Mercedes Alonso Guzmán, M. en A. Wilfrido Martínez Molina y Dr. José Carlos Rubio Ávalos del Laboratorio de materiales “Ing. Luís Silva Rúelas” de la UMSNH y profesores de la materia tecnología del concreto, por su colaboración con el suministro de parte de los materiales necesarios para mi investigación, parte del equipo de pruebas y por sus invaluable comentarios.

Ing. Manuel Calderón Guzmán de “Servicios Integrados de Control de Calidad” **SICCA, laboratorio para la construcción**, por su apoyo para las primeras pruebas de resistencia a la compresión en cilindros de concreto permeable.

Dr. Carlos Chaves Negrete, Dr. Jesús Alberto Rodríguez Castro, Dr. Jaime Saavedra Rosales, M.I. Julio Alejandro Chávez Cárdenas, M.I. Felipe de Jesús Jerónimo Rodríguez, Dr. Eleazar Arreyge Rocha, Dr. Julio Cesar Orantes Avalos, Dr. Hugo Hernández Barrios, Dr. Luis Ochoa Franco, profesores de la Maestría. Para quienes el trabajo en equipo implica colaborar sin más cortapisas que la verdad.

Cindy, Gorky, Erick, Damián y Juan Pablo, compañeros de la Maestría, por su aprecio y por todo el tiempo y experiencias que hemos compartido juntos.

RESUMEN

En el manejo tradicional de las aguas pluviales, su escorrentía e infiltración, involucran la impermeabilización de las superficies de rodamiento y grandes colectores que intentan desalojar dichas aguas; en el manejo natural las superficies son permeables y permiten un porcentaje mayor de infiltración. Con los pavimentos permeables se pretende igualar las condiciones naturales en zonas urbanas, su uso como medida ecológica serán una parte de una solución más compleja a la recarga de acuíferos e inundaciones en zonas urbanas.

El concreto permeable es aquel que nos sirve como superficie de rodadura en pavimentos, de tal forma que permita la percolación de las aguas pluviales hacia las capas de la estructura del pavimento para su posterior manejo. Las capas de la estructura del pavimento se harán de tal forma que dicho tránsito pluvial no las afecte, es decir serán capas inertes a la presencia del agua.

El empleo del concreto permeable se ha hecho hasta ahora de manera empírica. El **Ecocreto®**, es un aditivo para concreto permeable que se ha venido trabajando desde 1994, este aditivo ha venido empleándose en buena parte de la República Mexicana y el extranjero, principalmente EUA, aún y cuando no ha sido caracterizado desde el punto de vista mecanicista, es decir en base al comportamiento mecánico de sus elementos, razón por la cual no ha sido aceptado por las Secretarías convocantes de nuevas obras de pavimentación, dejando en riesgo su futuro empleo por aplicaciones de éste que llegarán a fallar desde el punto de vista estructural o de servicio, como es la colmatación. El objetivo de esta Tesis de investigación es sentar las bases para la caracterización y posterior normatividad del concreto permeable en México, y su consecuente uso en pavimentos urbanos, principalmente.

En esta Tesis se buscó la caracterización del concreto permeable considerando los requerimientos de los métodos de diseño de espesores de pavimentos más usados a nivel mundial, el de la American Association of State Highways and Transportation Officials (**AASHTO**) y el de la Portland Ordinary (OPC) Cement Association (**PCA**), donde una de las variables importantes que intervienen es el Módulo de Ruptura, y dado que el desgaste es el talón de Aquiles en los concretos permeables, caracterizaremos nuestras mezclas usando el Módulo de Ruptura y el ensayo Cantabro.

ABSTRACT

In the traditional management of stormwater, the runoff and infiltration, involving the sealing of bearing surfaces and large collectors which try to take out these waters; natural management areas are porous and allow a higher percentage of infiltration. With the pervious pavements is intended to match the natural conditions in urban areas, their use as ecological measure will be a part of a more complex solution to groundwater recharge and flooding in urban areas.

The pervious concrete is one that serves as a rolling surface for paving, so allowing the percolation of rainwater into the layers of the pavement structure for later use. The layers of the pavement structure shall be of such so that such transit not affects rainfall, ie layers are inert to the presence of water.

The use of pervious concrete has been done so far empirically. The Ecocreto ® is an additive that pervious concrete been working since 1994, this additive has been employed in much of the Mexican Republic and abroad, mostly U.S., even when it has not been characterized from the standpoint of mechanistic ie based on the mechanical behavior of its elements, why was not accepted by the Secretaries conveners of new paving, leaving his future employment at risk from applications of this that they will fail from the standpoint of structural or service, such as the filling. This thesis aims to lay the foundations for subsequent characterization and regulations of pervious concrete in Mexico, and their subsequent use in urban pavements, mainly.

In this thesis, We seek the characterization of pervious concrete considering the requirements of design methods more pavement thickness used worldwide, the American Association of State Highways and Transportation Officials (**AASHTO**) and the Pórtland Ordinary (OPC) Cement Association (**PCA**), where one of the important variables involved is the modulus of rupture, and given that attrition is the Achilles heel in the pervious concrete, characterize our mixes using the modulus of rupture and testing Cantabro.

ÍNDICE

Índice de figuras	7
Índice de tablas	9
Introducción	10
Objetivos	12
Capítulo 1: Pavimentos permeables	13
1.1.- Historia.....	13
1.2.- Aplicaciones	13
1.3.- Ventajas	13
1.4.- Componentes	13
1.5.- Ejemplos	14
1.6.- Métodos de diseño	15
1.6.1.- Pavimentos rígidos tradicionales	16
1.6.2.- Pavimentos rígidos permeables	23
Capítulo 2: Concreto permeable.....	24
2.1.- Concreto permeable	24
2.2.- Componentes del concreto permeable.....	28
Capítulo 3: Metodología.....	34
3.1.- Caracterización de insumos	34
3.2.- Tipos de mezclas.....	40
Capítulo 4: Pruebas de laboratorio	42
4.1.- Prueba de permeabilidad	42
4.2.- Prueba de compresión simple	43
4.3.- Prueba de resistencia a la flexión (MR)	44
4.4.- Ensayo Cantabro, pérdida por desgaste	46
Capítulo 5: Desarrollo de las pruebas de laboratorio	47
5.1.- Pruebas para caracterización de agregados.....	47
5.2.- Prueba de permeabilidad	47
5.3.- Prueba de compresión simple	48
5.4.- Prueba de resistencia a la flexión (MR)	49
5.5.- Ensayo Cantabro, pérdida por desgaste.....	53
Capítulo 6: Resultados de las pruebas de laboratorio y evaluación de resultados.....	55
6.1.- Prueba de permeabilidad	55
6.2.- Prueba de compresión simple	56
6.3.- Prueba de resistencia a la flexión (MR)	57
6.4.- Ensayo Cantabro, pérdida por desgaste.....	61
Capítulo 7: Conclusiones	63
Referencias	64
Anexos	66

Índice de figuras

Figura 0.1 Textura del concreto permeable	11
Figura 1.1 Escurrimiento e infiltración en zonas rural, suburbana y urbana	13
Figura 1.2 Componentes del pavimento permeable.....	14
Figura 1.3 Pavimento permeable con Ecocreto®	14
Figura 1.4 Estacionamientos con el sistema Atlantis®.....	15
Figura 1.5 Cubiertas verdes con el sistema Atlantis®	15
Figura 1.6 Tablas del Catálogo Español	21
Figura 1.7 Tablas del Catálogo Español	22
Figura 2.1 Compactación del concreto permeable.....	30
Figura 2.2 Compactación del concreto permeable.....	30
Figura 2.3 Curado del concreto permeable.....	33
Figura 3.1 Banco, recolección y secado de agregados	36
Figura 3.2 Concreto permeable elaborado con diferente contenido de agua	38
Figura 3.3 Microfibra fibrafest utilizada en las mezclas “C”	39
Figura 4.1 Prueba de permeabilidad	42
Figura 4.2 Prueba de compresión simple	43
Figura 4.3 Esquema de prueba de Módulo de Ruptura	44
Figura 4.4 Fabricación y desmolde de vigas	45
Figura 4.5 Curado y pruebas de vigas	46
Figura 4.6 Prueba de desgaste de Los Ángeles	46

Figura 6.1 Prueba de permeabilidad	55
Figura 6.2 Prueba de compresión	56
Figura 6.3 Carga-Deformación probetas “A”	57
Figura 6.4 Carga-Deformación probetas “B”	57
Figura 6.5 Carga-Deformación probetas “C”	58
Figura 6.6 Módulo de Ruptura todas las muestras.....	58
Figura 6.7 Módulo de Ruptura probetas “A”	59
Figura 6.8 Módulo de Ruptura probetas “B”	60
Figura 6.9 Módulo de Ruptura probetas “C”	60
Figura 6.10 Prueba de desgaste probetas “A”	61
Figura 6.11 Prueba de desgaste probetas “B”	61
Figura 6.12 Prueba de desgaste probetas “C”	62

Índice de tablas

Tabla 2.1. Mezclas de concreto permeable en los EUA.....	26
Tabla 2.2. Diseño típico de concreto permeable en Bélgica	26
Tabla 2.3. Diseño de concreto permeable en Alemania	27
Tabla 2.4. Diseño típico de concreto permeable en Japón	27
Tabla 2.5 Tipos de suelo y subsuelo aproximado de Valores k	31
Tabla 2.6 Clasificación de Suelos AASHTO	31
Tabla 2.7 Clasificación de Suelos de ASTM	32
Tabla 3.1 Granulometría SCT	35
Tabla 3.2 Granulometría previa ASTM	35
Tabla 3.3 Granulometría para esta Tesis	35
Tabla 3.4 Requisitos a cumplir por los agregados	36
Tabla 3.5. Tipo de mezclas a utilizar	41
Tabla 5.1 Datos de prueba de permeabilidad	47
Tabla 5.2 Datos de prueba de compresión	48
Tabla 5.3 Datos de prueba de Módulo de Ruptura probetas tipo "A"	49
Tabla 5.4 Datos de prueba de Módulo de Ruptura probetas tipo "B"	49
Tabla 5.5 Datos de prueba de Módulo de Ruptura probetas tipo "C"	49
Tabla 5.6 Cálculo de prueba de Módulo de Ruptura probetas tipo "A"	50
Tabla 5.7 Cálculo de prueba de Módulo de Ruptura probetas tipo "B"	51
Tabla 5.8 Cálculo de prueba de Módulo de Ruptura probetas tipo "C"	52
Tabla 5.9 Cálculo de prueba de Ensayo Cantabro.....	53
Tabla 9.1 Datos de prueba de Módulo de Ruptura probetas tipo "A"	66
Tabla 9.2 Datos de prueba de Módulo de Ruptura probetas tipo "B"	68
Tabla 9.3 Datos de prueba de Módulo de Ruptura probetas tipo "C"	70

INTRODUCCIÓN

El problema en el manejo tradicional de las aguas pluviales, su escorrentía e infiltración, involucran la impermeabilización de las superficies de rodamiento y grandes colectores que intentan desalojar dichas aguas, esto en áreas urbanas es complicado ya que nuevos Módulos de vivienda se agregarán y con ello cantidades de agua adicionales que no habían sido consideradas en el diseño de los colectores, lo que nos lleva a una saturación de los mismos, esto aunado a un deficiente servicio de mantenimiento lleva a futuras inundaciones. Si se suma 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. En el manejo natural de las aguas pluviales las superficies son permeables, permiten un porcentaje importante de infiltración, conllevan menor mantenimiento y admiten la recarga de los mantos acuíferos mediante la infiltración de las aguas pluviales. Debería considerarse en las nuevas urbanizaciones el manejo de agua de manera lo más natural posible, por ejemplo con corredores verdes y con pavimentos permeables, como medidas ecológicas serán una parte de una solución más compleja a la recarga de mantos acuíferos e inundaciones en zonas urbanas.

La idea básica es que no todo lo que se necesita pavimentar tiene que impermeabilizarse. Con la utilización de pavimentos permeables se consigue recargar los acuíferos y reducir el volumen y el caudal máximo de escorrentía, provocado por las lluvias. También se remueven algunos contaminantes, mejorando la calidad del escurrimiento. Se pueden aplicar en cualquier tipo de suelo, incluso en aquellos con baja permeabilidad. Su instalación permite o bien infiltrar el agua directamente al suelo o almacenarla en la estructura del pavimento y después drenarla a otro lugar. En la fabricación de pavimentos permeables uno de los puntos importantes será el concreto permeable.

El concreto permeable tuvo sus principios más tempranos en Europa. En el siglo XIX, el concreto permeable fue utilizado en una variedad de usos tales como paredes con carga hidráulica, paneles prefabricados, y para pavimentar. En el Reino Unido en 1852, se construyeron dos casas usando sólo grava en el concreto. La eficacia económica parece haber sido la primera razón para su uso más temprano debido a la cantidad limitada de cemento que se empleó (Ghafoori, 1995).

No sería hasta 1923 en que el concreto permeable se vuelve a usar como material de construcción viable. Esta vez fue limitado 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 constantemente, 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 del oeste, Australia, Rusia y el medio este de EUA (Ghafoori, 1995).

Puesto que los Estados Unidos no sufrieron el mismo tipo de escaseces materiales que Europa después de la Segunda Guerra Mundial, el concreto permeable no tuvo una presencia significativa en los Estados Unidos hasta los años 70's, en que su uso comenzó no como sustituto más barato del concreto convencional, más bien por sus características de permeabilidad (Ghafoori, 1995). El problema encontrado en los Estados Unidos era el de excesivo impermeabilizado de las nuevas áreas construidas. Como siguió creciendo la urbanización, la cantidad del área impermeable aumentó. Esto tuvo un impacto negativo en el ambiente, causando la degradación en la calidad del agua. El

concreto permeable comenzó a usarse en los Estados de la Florida, Utah, y New México pero se ha extendido rápidamente a través de los Estados Unidos a Estados como California, Illinois, Oklahoma, y Wisconsin.

Aunque tuvo principios modestos, el uso del concreto permeable como sustituto del concreto convencional ha crecido hasta volverse una herramienta de funcionamiento múltiples en la industria de la construcción.

Práctico para muchos usos, el concreto permeable en pavimentos es limitado por su baja durabilidad bajo tránsito pesado, esta carencia de la resistencia restringe el uso del concreto permeable a funciones específicas. El concreto permeable limita su uso en áreas sujetas al tráfico de bajos volúmenes y cargas. Aunque se ha utilizando como paredes de carga hidráulica en casas junto a cortes (Ghafoori, 1995), se recomienda utilizarlo en estacionamientos, invernaderos, calzadas, banquetas, calles residenciales, canchas de tenis y andadores de piscinas.

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 (Fig. 0.1), que van de 2 a 8 mm, 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).

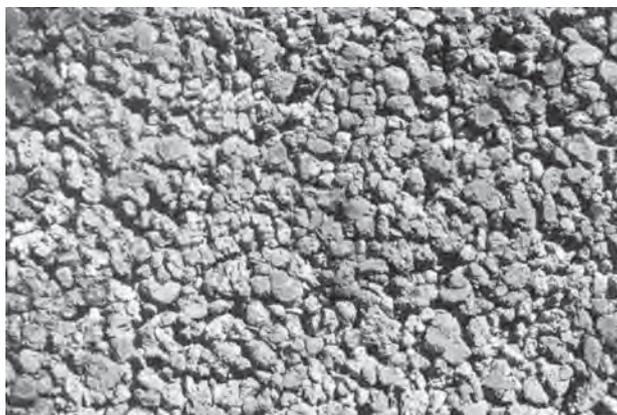


Fig. 0.1- Textura del concreto permeable.

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

OBJETIVOS

El objetivo general de esta investigación es establecer el procedimiento para caracterizar el concreto permeable considerando parámetros mecanicistas para estar en condiciones de diseñar mezclas de concreto permeable óptimas para pavimentos urbanos.

Objetivos particulares

Revisión bibliográfica sobre el tema: Se hará una revisión exhaustiva de la bibliografía existente sobre concreto permeable a nivel mundial a la fecha.

Parámetros de caracterización: Ya que el desgaste y la resistencia a la flexión son los principales parámetros de diseño en los pavimentos permeables, se tomarán como eje de esta Tesis.

Ensayos a utilizar: Para el porcentaje de desgaste usaremos el ensayo Cantabro, **NLT-352/86**, y para el Módulo de Ruptura (MR), usaremos las normas de la American Society for Testing Materials que se refieren a la fabricación y prueba de vigas para obtener el Módulo de Ruptura **ASTM C 42-03** y **ASTM C 78-02**.

Granulometrías de trabajo: Los agregados a emplear serán seleccionados con base en trabajos ya realizados y normados por la SCT para las carpetas asfálticas abiertas, usando la granulometría en ellos empleada, con la salvedad de no incluir las gravas mayores a 3/4" ni todas las arenas y finos, por lo que usaremos los agregados triturados incluidos en **ASTM C 33 No. 67** (3/4" a No. 4). El agregado triturado local es andesita.

VARIABLES DEL ESTUDIO: Se usarán distintitos aditivos como punto de comparación y observaremos el comportamiento de éstos en las mezclas de estudio, usaremos cemento Pórtland Ordinario (OPC) sólo, látex y microfibra virgen de polipropileno.

CAPÍTULO 1: PAVIMENTOS PERMEABLES

Los pavimentos permeables forman parte del abanico de soluciones viables, con que se cuentan en nuestros tiempos, para atemperar el impacto que provocamos en nuestra Biosfera, no necesariamente pavimentar debe implicar impermeabilizar.

1.1 Historia: Como ya se dijo en la introducción Los pavimentos permeables tuvieron sus primeros inicios en Europa. En el siglo XIX. En México desde 1994 los pavimentos permeables 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 Ecoconcreto® se usa en pavimentación de calles, estacionamientos y banquetas, desde Chiapas hasta Nuevo León, pero siendo la mayor aplicación en el DF en andadores y estacionamientos. En España desde 1986 se ha usado el sistema Atlantis® que permite recolectar las aguas pluviales en estacionamientos pero debido a su alto costo en pavimentaciones no ha prosperado de manera masiva, en otras partes del mundo se usan bloques permeables o adopasto con la restricción de que la superficie resultante no es muy uniforme para el tránsito de vehículos.

1.2 Aplicaciones: Cuando se habla de pavimentar en la actualidad, lo primero que se piensa es en concreto asfáltico o concreto hidráulico, pero esta Tesis plantea que los pavimentos permeables son una opción en superficies específicas como estacionamientos, calles de tráfico ligero, banquetas, áreas peatonales, haciendo que el pavimento tradicional, en estas áreas sea cosa anti ecológica.

1.3 Ventajas: Superficies de rodadura antiderrapantes, bajo costo de instalación comparado con un sistema con drenaje pluvial, incrementa el área vendible de los Fraccionamientos, debido a que ya no se requiere de lagunas de retención y las plantas de tratamiento de aguas son menores, reduce la necesidad de incrementar la capacidad de drenaje pluvial, tiene una vida promedio de 20 a 30 años promedio 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 hidroneo, reduce el ruido del tráfico, reduce el efecto invernadero ya que no conserva tanto calor como el concreto asfáltico ó hidráulico tradicional, al reducir la impermeabilización del terreno disminuye la frecuencia anual de caudales por lo que las inundaciones son menos probables.

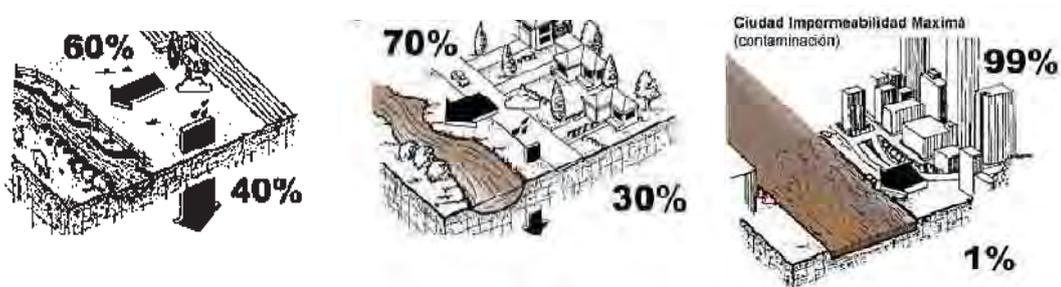


Fig. 1.1.-Escurreminto e infiltración en zonas rural, suburbana y urbana (Brown, 2003)

1.4 Componentes: Los pavimentos permeables están básicamente compuestos por cemento, agua, agregados y aditivos, complementados por la estructura propia del pavimento, a saber, capas de mejoramiento con materiales inertes, pozos de absorción en su caso o elementos de resguardo de aguas pluviales como pueden ser cisternas, elementos de contención laterales como pueden ser guarniciones y por la propia carpeta de concreto permeable que servirá de superficie de rodadura.



Fig. 1.2.-Componentes del pavimento permeable (De Buen, 2005)

1.5 Ejemplos: No sólo los colectores tradicionales permiten hacer frente a las inundaciones en las ciudades, existen modalidades innovadoras como zanjas de percolado, lagunas de retención, lagunas y zanjas con vegetación, estanques, parques inundables, pozos de absorción, una red seca basada en parques inundables y pavimentos permeables.

En cuanto a pavimentos permeables conocidos: Tenemos a la fecha 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., está trabajando en la introducción al mercado Chileno de adoquines para pavimento permeable.

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.



Fig. 1.3.-Pavimento permeable con Ecocreto® en Sayaló, Chiapas. (De Buen, 2005)

El sistema Atlantis®, desarrollado en España, emula el ciclo natural del agua, conjugando superficies muy permeables con sistemas que permiten su recogida y canalización (sólo agua), preservando y restaurando su calidad. El agua captada se depura progresivamente mediante procesos naturales de filtración y oxidación.

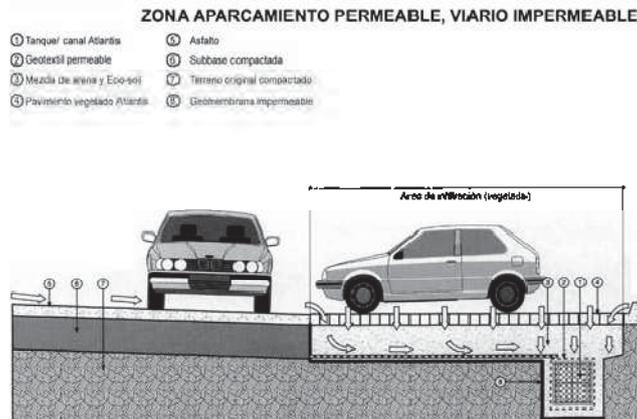


Fig. 1.4.- Estacionamientos con el sistema Atlantis®. (Atlantis®, 2006)



Fig. 1.5.- Cubiertas verdes con el sistema Atlantis®. (Atlantis®, 2006)

1.6 Métodos de diseño: Teniendo en cuenta que los sistemas para diseño de pavimentos se engloban en dos grandes vertientes: por regresión y mecanicistas, el mecanicista es el que involucra 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 trasladan a lo general mediante nomogramas como es el caso del método AASHTO de regresión, y el de la UNAM un empírico mecanicista. El diseño de pavimentos por métodos mecanicistas es complejo, utiliza la estática en materiales y la dinámica en las cargas (tráfico), condicionalmente parte de las premisas de que los

materiales son compuestos homogéneos (iguales) e isótropos (sin orientación preferida de los componentes), condiciones favorables para modelar, pero difícilmente naturales. El método empírico mecanicista, es decir un método que utiliza las bondades de ambos métodos predecesores será el ideal para el diseño de pavimentos.

Para entender las similitudes y diferencias entre los pavimentos rígidos permeables y los pavimentos rígidos tradicionales, es necesario primero resumir que son y cómo se diseñan los pavimentos rígidos tradicionales, acabaremos por concluir que los pavimentos permeables son una subdivisión, una forma de pavimento rígido tradicional con ciertas características y que se pueden calcular ó diseñar de igual manera.

1.6.1 Pavimentos rígidos tradicionales

Los pavimentos rígidos son un conjunto de capas superpuestas relativamente horizontales con calidades y espesores diferentes; deben ser funcionales en relación a la seguridad, a la eficiencia y a la rapidez de los usuarios. Además deben diseñarse para soportar las cargas que por ellos transiten y evitar las fallas provocadas tanto por las cargas como por las condiciones climáticas.

La práctica actual del análisis y diseño de pavimentos se basa en métodos básicamente empíricos, en donde el diseño se respalda en propiedades físicas de los materiales y algún índice de resistencia, como lo es el Valor Relativo de Soporte, VRS (también denominado CBR por sus siglas en inglés, *California Bearing Ratio*). Aún las metodologías basadas en métodos de regresión de resultados en tramos de prueba, como lo es el método AASHTO (1993), el cual se puede considerar como empírico en el sentido de que su aplicación está rigurosamente restringida a las condiciones que se utilizaron para su calibración. Por supuesto que ya se manejan conceptos mecanicistas como el Módulo de resiliencia, pero sólo como parámetro de cálculo que se correlaciona con el VRS, y no como una propiedad fundamental del material. En el mejor de los casos existen métodos de diseño que se les llama semi-empíricos o empírico-mecanicistas, porque ya consideran leyes de fatiga de los materiales en los cálculos de vida útil.

El problema del enfoque tradicional es que el método, siempre estará limitado por los tipos de suelos considerados, los métodos de construcción, las configuraciones vehiculares de la época, etc.

Las metodologías mecanicistas pretenden tener un enfoque puramente científico, con un marco teórico suficiente que permita el análisis completo de la mecánica del comportamiento de un pavimento, ante las acciones del clima y del tránsito vehicular. Esto es, un marco teórico en donde las propiedades fundamentales de los materiales se conocen y se pueden determinar en laboratorio o en campo.

Los pavimentos rígidos pueden ser de varios tipos: de concreto simple, con refuerzo continuo y los preesforzados; además de concreto permeable.

Entre las principales ventajas de un pavimento de concreto hidráulico podemos enumerar las siguientes: Durabilidad, bajo costo de mantenimiento, seguridad, altos Índices de servicio y mejor distribución de esfuerzos bajo las losas

Existen varios métodos de diseño de pavimentos de concreto, siendo los más usados el método AASHTO, método de la PCA y el método del Catálogo Español.

Método de diseño AASHTO (1993)

El método de diseño AASHTO es uno de métodos más utilizados a nivel internacional para el diseño de pavimentos de concreto hidráulico.

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. La convergencia del método es muy rápida.

VARIABLES DE DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS

1) **Espesor.**- El espesor del pavimento de concreto es la variable que pretendemos determinar al realizar un diseño, el resultado del espesor se ve afectado por todas las demás variables que intervienen en los cálculos.

2) **Serviciabilidad.**- La serviciabilidad se define como la habilidad del pavimento de servir al tipo de tráfico (autos y camiones) que circulan en la vía, se mide en una escala del 0 al 5 en donde 0 (cero) significa una calificación para pavimento intransitable y 5 (cinco) para un pavimento excelente. La serviciabilidad es una medida subjetiva de la calificación del pavimento.

Serviciabilidad Inicial (Po). – Es la condición que tiene un pavimento inmediatamente después de la construcción del mismo. Para pavimento de concreto AASHTO recomienda un valor de 4.5.

Serviciabilidad Final (Pt). - La serviciabilidad final tiene que ver con la calificación que esperamos tenga el pavimento al final de su vida útil. Para el caso de México se recomiendan valores entre 1.5 y 2.5.

3) **Tráfico.**- La metodología AASHTO considera la vida útil de un pavimento relacionada al número de repeticiones de carga que podrá soportar el pavimento antes de llegar a las condiciones de servicio final predeterminadas para el camino. El método AASHTO utiliza en su formulación el número de repeticiones esperadas de carga de Ejes Equivalentes, es decir, que antes de entrar a las fórmulas de diseño, debemos transformar los Ejes de Pesos Normales de los vehículos que circularán por el camino, en Ejes Sencillos Equivalentes de 18 kips (8.2 Ton) también conocidos como ESAL's.

En el cálculo de esta variable intervienen varios factores como son: el Factor de Crecimiento del Tráfico (depende de la tasa de crecimiento y de los años de vida útil), Factor de Sentido (1 ó 2), Factor de Carril (0.5 a 1.0) y, finalmente el Factor de Equivalencia del Tráfico (depende del espesor del pavimento, de la carga del eje, del tipo de eje y de la serviciabilidad final).

4) **Transferencia de Carga.**- La transferencia de carga es la capacidad que tiene una losa del pavimento de transmitir fuerzas cortantes con sus losas adyacentes, con el objeto de minimizar las deformaciones y los esfuerzos en la estructura del pavimento.

La efectividad de la Transferencia de Carga entre losas adyacentes depende de varios factores:

- a) Cantidad de Tráfico
- b) Utilización de Pasajuntas
- c) Soporte Lateral de las Losas

La utilización de pasajuntas es la manera más conveniente de lograr la efectividad en la transferencia de cargas.

Pasajuntas.- Barra de acero redondo liso $f_y = 4,200 \text{ kg/cm}^2$ la cual no se debe de adherir al concreto permitiendo el libre movimiento de losas longitudinalmente, pero si debe transferir verticalmente parte de la carga aplicada en una losa a la adyacente. Se colocan perfectamente alineadas a la mitad del espesor de la losa. El diámetro, longitud y separación de los pasajuntas está en función del espesor de las losas principalmente. Es importante considerar su empleo ya que de no hacerlo puede presentarse el efecto de "bombeo ó pumping", que se visualiza como un desnivel o escalonamiento entre las losas y una deformación en la base que se traduce en agrietamiento en las esquinas de las losas principalmente.

5) Propiedades del Concreto.- Son dos las propiedades del concreto que influyen en el diseño de un pavimento de concreto y en su comportamiento a lo largo de su vida útil:

- a) Resistencia a la tensión por flexión ($S'c$) ó Módulo de Ruptura (MR)

El Módulo de Ruptura cuantifica mediante ensayos de vigas de concreto aplicándoles cargas en los tercios de su claro de apoyo. Esta prueba está normalizada por la ASTM C78.

Los valores recomendados para el Módulo de Ruptura varían desde los 41 kg/cm^2 (583 psi) hasta los 50 kg/cm^2 (711 psi) a 28 días dependiendo del uso que vayan a tener.

b) Módulo de Elasticidad del Concreto (E_c).- El Módulo de Elasticidad del concreto está íntimamente relacionado con su Módulo de Ruptura y se determina mediante la norma ASTM C469. Existen varios criterios con los que se puede estimar el Módulo de Elasticidad a partir del Módulo de Ruptura. Los dos más utilizados son:

$$E_c = 6,750 \text{ (MR)}$$

$$E_c = 26,454 \text{ (MR)} ^{0.77}$$

6) Resistencia de la Subrasante.- La resistencia de la subrasante es considerada dentro del método, por medio del Módulo de Reacción del Suelo K, que se puede obtener directamente mediante la prueba de placa.

El Módulo de reacción de suelo de la prueba de placa corresponde a la capacidad portante que tiene el terreno natural (terreno natural y terraplén si lo hay, y se puede incrementar al tomar la contribución de la sub-base) en donde se soportará el cuerpo del pavimento.

En base a un gran número de muestras y estudios se han podido desarrollar algunos valores estimativos del Módulo de reacción del suelo en función a diferentes propiedades, y correlacionando con el SUCS y VRS.

7) Drenaje.- Es un factor determinante en el comportamiento de la estructura del pavimento a lo largo de su vida útil. Es muy importante evitar que exista presencia de agua en la estructura de soporte, dado que en caso de presentarse esta situación afectará en gran medida la respuesta estructural del pavimento. Los valores recomendados para el coeficiente de drenaje deberán estar entre 1.0 y 1.10.

8) Confiabilidad.- La confiabilidad está definida como: la probabilidad de que un pavimento desarrolle su función durante su vida útil en condiciones adecuadas para su operación. Para México los valores de confiabilidad pueden ser entre 0.50 y 0.95.

Método de la Asociación del Cemento Pórtland Ordinario (OPC) (PCA)

El método considera dos criterios de diseño:

1) Fatiga.- El Análisis por fatiga (para controlar el agrietamiento por fatiga) influye principalmente en el diseño de pavimentos de tráfico ligero (calles residenciales y caminos secundarios independientemente de si las juntas tienen ó no pasajuntas) y pavimentos con tráfico mediano con pasajuntas.

2) Erosión.- El análisis por erosión (el responsable de controlar la erosión del terreno de soporte, bombeo y diferencia de elevación de las juntas) influye principalmente en el diseño de pavimentos con tráfico mediano a pesado con transferencia de carga por trabazón de agregados (sin pasajuntas) y pavimentos de tráfico pesado con pasajuntas.

Los factores de diseño de este método son los siguientes:

1) Resistencia a la Flexión del Concreto.- La consideración de la resistencia a la flexión del concreto es aplicable en el procedimiento de diseño para el criterio de fatiga, que controla el agrietamiento del pavimento bajo la repetición de cargas. La resistencia a la flexión del concreto es determinada por la prueba del Módulo de Ruptura, norma ASTM C 78.

2) Terreno de Apoyo ó Base.- El terreno de apoyo está definido en términos del Módulo de reacción de la subrasante de Westergaard (k). Los valores de k son expresados como libras por pulgada cuadrada por pulgada (psi/in) ó más comúnmente, por libras por pulgada cúbica (pci).

3) Período de Diseño.- El período de diseño seleccionado afecta el espesor de diseño ya que determina por cuantos años y por ende a cuantos camiones deberá servir el pavimento.

4) Número de repeticiones esperadas para cada eje.- Toda la información referente al tráfico termina siendo empleada para conocer el número de repeticiones esperadas durante todo el período de diseño de cada tipo de eje. Para poder conocer estos valores tendremos que conocer varios factores referentes al tránsito, como lo es el tránsito promedio diario anual, el % que representa cada tipo de eje en el TPDA, el factor de crecimiento del tráfico, el factor de sentido, el factor de carril y el período de diseño. Se calcula con la fórmula:

$$Re = TPDA \times \%Te \times FS \times FC \times Pd \times FCA \times 365$$

Dónde: TPDA = Tránsito Promedio Diario Anual. Es importante que se especifique la composición del tráfico, es decir que se detalle el tráfico por tipo de vehículo. El método de diseño de la PCA recomienda considerar únicamente el tráfico pesado, es decir que se desprece todo el tráfico ligero como automóviles y pick-ups de 4 llantas.

FCA = Factor de Crecimiento Anual. Es el factor que nos sirve para determinar el crecimiento del tráfico para un período conocido de años. Para conocer el factor de crecimiento anual se requiere únicamente del período de diseño en años y de la tasa de crecimiento anual.

FS = Factor de Sentido. El factor de sentido se emplea para diferenciar las vialidades de un sentido de las de doble sentido, de manera que para vialidades en doble sentido se utiliza un factor de sentido de 0.5 y para vialidades en un sólo sentido un factor de 1.0.

FC = Factor de Carril. El factor de carril nos va a dar el porcentaje de vehículos que circulan por el carril de la derecha, que es el carril con más tráfico.

% Te = % del TPDA para cada tipo de eje.

Pd = Período de Diseño.

365 = días de un año.

5) Factor de Seguridad de Carga.- Una vez que se conoce la distribución de carga por eje, es decir ya que se conoce cuantas repeticiones se tendrán para cada tipo y peso de eje, se utiliza el factor de seguridad de carga para multiplicarse por las cargas por eje. Los factores de seguridad de carga pueden tomar valores entre 1.0 y 1.3 dependiendo de volúmenes de tráfico pesado.

Además de las cargas del tráfico, las losas de concreto también están sometidas a alabeos. El alabeo por humedad es la deformación cóncava hacia arriba de la losa debido a las variaciones de contenido de humedad con la profundidad de la losa. El alabeo de las losas de concreto por variaciones de temperatura se manifiesta durante el día, cuando la superficie está más caliente que la parte inferior, desarrollando esfuerzos de tensión en la parte inferior de la losa. Durante la noche, la distribución de la temperatura se revierte y los esfuerzos de tensión se desarrollan en la parte superior de la losa.

Sin embargo, dado que los efectos combinados de los alabeos por variaciones de temperatura y de humedad son muy difíciles de medir ó evaluar, no se incorporan en este método de diseño.

Una ventaja que se debe reconocer en el método del PCA es que toma el tráfico real que estima circulará sobre el pavimento, sin convertirlo en Ejes Sencillos Equivalentes.

Método del Catálogo Español:

Varios países europeos han desarrollado catálogos de estructuras de pavimentos, en los que en lugar de variar de forma continua los espesores en función del tránsito de diseño, se dividen en una serie de intervalos, a cada uno de los cuales se asigna un espesor fijo de cada una de las capas que componen el pavimento, con independencia del valor del tránsito dentro de dicho intervalo. Esta tendencia se inició en Francia en 1971, habiendo

sido seguida por España y Alemania en 1975, y después por otros países de la Comunidad Económica Europea.

El Catálogo Español es a base de tablas para diseño, la versión vigente está contenida en la Instrucción 6.1 y 2-IC "Secciones de firme" (2003), aprobada en Boletín Oficial del Estado, número 297 de 12 Diciembre de 2003, referencia BOE-A-2003-22787.

Considera que el agua es desalojada rápidamente de la estructura de pavimentos, por lo que no considera el aspecto climático.

Sólo considera el tráfico pesado, descarta el daño que pueden hacer los vehículos ligeros. IMDp similar al TDPA sin los ligeros.

Carril de proyecto: aquel que tenga la carga vehicular mayor.

Por sobre cargas (se considera que los vehículos pesados son más o podrían ser más), o por pendiente se puede pasar a el nivel siguiente superior.

Metodología: a).- Se obtiene el IMDp (vehículos pesados por día), b).- Categorías de Tránsito Pesado, c).- Base de explanada (Subyacente, Terraplén): en función del CBR, d).- Explanada (Subrasante) con Ev2, e).- Se obtiene la opción 1: Sección de firme con T y E, f).- se analizan varias opciones y se elige la más económica.

Categorías de tráfico pesado T00 a T2

Categoría de tráfico pesado	T00	T0	T1	T2
IMDp (vehículos pesados/día)	≥ 4000	< 4000 ≥ 2000	< 2000 ≥ 800	< 800 ≥ 200

Categorías de tráfico pesado T3 y T4

Categoría de tráfico pesado	T31	T32	T41	T42
IMDp (vehículos pesados/día)	< 200 ≥ 100	< 100 ≥ 50	< 50 ≥ 25	< 25

Formación de la explanada.

A los efectos de definir la estructura del firme en cada caso, se establecen tres categorías de explanada denominadas respectivamente E1, E2 y E3. Estas categorías se determinan según el módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga (E_{v2}) obtenido de acuerdo con la NLT-357 «Ensayo de carga con placa».

Módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga

Categoría de explanada	E1	E2	E3
E _{v2} (MPa)	≥ 60	≥ 120	≥ 300

Materiales para la formación de las explanadas

Símbolo	Definición del material	Artículo del PG-3	Prescripciones complementarias
IN	Suelo inadecuado o marginal.	330	Su empleo sólo será posible si se estabiliza con cal o con cemento para conseguir S-EST1 o S-EST2.
O	Suelo tolerable.	330	CBR ≥ 3 ; Contenido en materia orgánica < 1%. Contenido en sulfatos solubles (SO ₃) < 1%. Hinchamiento libre < 1%.
1	Suelo adecuado.	330	CBR ≥ 5 * **.
2	Suelo seleccionado.	330	CBR ≥ 10 * **.
3	Suelo seleccionado.	330	CBR ≥ 20 *.
S-EST1 S-EST2 S-EST3	Suelo estabilizado in situ con cemento o con cal.	512	Espesor mínimo: 25 cm. Espesor máximo: 30 cm.

* El CBR se determinará de acuerdo con las condiciones especificadas de puesta en obra, y su valor se empleará exclusivamente para la aceptación o rechazo de los materiales utilizables en las diferentes capas, de acuerdo con la figura 1.
** En la capa superior de las explanadas para la formación de la explanada, el suelo adecuado definido como tipo 1 deberá tener, en las condiciones de puesta en obra, un CBR ≥ 6 y el suelo seleccionado definido como tipo 2 un CBR ≥ 12. Asimismo, se exigirán esos valores mínimos de CBR cuando, respectivamente, se forme una explanada de categoría E1 sobre suelos tipo 1, o una explanada de categoría E2 sobre suelos tipo 2.

Fig. 1.6.- Tablas del Catálogo Español (BOE número 297 de 12/Dic/2003).

		TIPOS DE SUELOS DE LA EXPLANADA (DESMONTES) O DE LA OBRA DE TIERRA SUBYACENTE (TERRAPLENES, PEDRAPLENES O RELLENOS TODO-UNO)				
		SUELOS INADECUADOS Y MARGINALES (IN)	SUELOS TOLERABLES (0)	SUELOS ADECUADOS (1)	SUELOS SELECCIONADOS (2) y (3)	ROCA (R)
CATEGORÍA DE EXPLANADA	E1 E _{op} ≥ 60MPa					
	E2 E _{op} ≥ 120MPa					
	E3 E _{op} ≥ 300MPa					

IN Suelo inadecuado o marginal (Art. 330 del PG-3)

0 Suelo tolerable (Art. 330 del PG-3)

1 Suelo adecuado (Art. 330 del PG-3)

2 Suelo seleccionado (Art. 330 del PG-3)

3 Suelo seleccionado (Art. 330 del PG-3)

S-EST 1 Suelo estabilizado in situ (Art. 512 del PG-3)

S-EST 2 Suelo estabilizado in situ (Art. 512 del PG-3)

S-EST 3 Suelo estabilizado in situ (Art. 512 del PG-3)

HM-20 Hormigón (Art. 610 del PG-3)

tipo de material
espesor mínimo en cm

S-EST3 30
2
2

suelo de explanación o de la obra de tierra subyacente

Formación de explanada

		CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO			
		T00	T0	T1	T2
CATEGORÍA DE EXPLANADA	E1				
	E2				
	E3				

MB Mezclas bituminosas HF Hormigón de firme HM Hormigón magro vibrado GC Gravacemento SC Suelocemento ZA Zahorra artificial

Espesores mínimos en cm

Fig. 1.7.- Tablas del Catálogo Español (BOE número 297 de 12/Dic/2003). Catálogo de secciones de firme para las categorías de tráfico pesado T00 a T2, en función de la categoría de explanada.

1.6.2.- Pavimentos rígidos permeables

En la determinación del espesor de un pavimento permeable, se deben elaborar dos análisis distintos, uno para el aspecto estructural y otro para las características hidráulicas.

Para el diseño estructural de pavimentos de concreto permeable, se usarán los métodos empleados en pavimentos rígidos tradicionales, siendo los más usados el método AASHTO, método de la PCA y el método del Catálogo Español.

Los criterios del espesor y de la estructura del pavimento que resultan se deben entonces analizar para la capacidad y la permeabilidad del terreno. En muchos casos, los vacíos del pavimento se pueden utilizar como depósito de almacenaje para las bocas de tormenta, así que el espesor de los dos análisis, el estructural o del almacenaje de agua, será el que rija.

El rango práctico de los espesores de diseño para el concreto permeable es a partir de 5 a 10 pulgadas (12.50 a 25.00 centímetros) para los pavimentos.

La estructura porosa de una mezcla de concreto permeable permite no sólo la transmisión vertical del agua, sino que también permitirá flujo horizontal. Esta capacidad única debe ser considerada en establecer los perfiles del drenaje.

El empleo del Módulo de Ruptura y del porcentaje de desgaste se considera necesario para un adecuado diseño de espesores, ya que son los principales parámetros a solventar para obtener pavimentos durables y funcionales: El Módulo de Ruptura se considera ya en los procedimientos señalados para el cálculo pavimentos rígidos tradicionales, habrá que revisar este diseño considerando el porcentaje de desgaste del concreto a emplear.

CAPÍTULO 2: CONCRETO PERMEABLE

2.1 El concreto permeable está formado por cemento Pórtland Ordinario (OPC), agregado grueso, poco o nada de agregado fino, aditivos, y agua. La combinación de estos ingredientes produce un material endurecido con poros conectados, que van de 2 a 8 mm, 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. 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), la ausencia de resultados de pruebas de desgaste y resistencia a la flexión hacen necesario este trabajo de Tesis.

El concreto permeable, como ya se indicó, tuvo sus principios más tempranos en Europa. En el siglo XIX y en México se ha venido usando en pavimentos desde 1994.

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. Aunque ampliamente utilizado en los climas más cálidos, existe preocupación por el rendimiento a baja temperatura, y de congelamiento-descongelamiento y cuestiones durabilidad por desgaste. Otro posible uso del concreto permeable es como material de drenaje. En esta aplicación, el concreto permeable podría ser utilizado como material para rellenar los huecos debajo de la superficie, combinando los beneficios de apoyo con el alivio de los poros de presión. Esto es de particular interés en la mitigación de filtraciones, excavaciones inestables para cimientos, cortes de caminos, y deslizamientos de tierra en general.

La diferencia crítica está en aplicaciones en vías de alta velocidad, donde no se recomienda, en comparación con los tradicionales estacionamientos, los requerimientos 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, la adherencia, y la colmatación potencial del sistema.

Dos puntos a considerar en superficies de concreto permeable son por supuesto la reducción del ruido y la resistencia al deslizamiento, finalmente, es la cara que presentará el concreto permeable al tráfico continuo. El tamaño y graduación de agregados deberán ajustarse para alcanzar una mayor resistencia a la flexión, lo más probable es que la permeabilidad disminuya. Para aumentar la fuerza de flexión y la permeabilidad se pueden usar fibras en la mezcla; reductores de agua, con lo que la relación a/c disminuye, y de igual manera, aditivos a base de polímeros que mejoren el desempeño del concreto permeable.

Una vez que la durabilidad de las mezclas se ha establecido, el siguiente paso a considerar será la resistencia mecánica y la resistencia a la abrasión del concreto permeable para su uso como una capa de rodadura; este trabajo de investigación se avoca a estos parámetros. Para mantener la resistencia al deslizamiento y alcanzar los objetivos de un pavimento permeable, el concreto deberá mantener su permeabilidad en condiciones de servicio. Por lo tanto deberá considerarse una prueba de colmatación en el programa de mantenimiento del concreto permeable, según norma ASTM WK17606.

La mezcla (cemento, agregados, agua, y aditivos) debe tener un equilibrio entre las propiedades de adherencia, elasticidad y fragilidad.

La principal ventaja del concreto permeable contra el concreto convencional es su porosidad y consecuente permeabilidad, además se contrae menos, tiene un peso específico más bajo, y sus valores como aislante térmico son superiores al del concreto convencional.

Aunque el comportamiento físico y mecánico, es superior en muchos aspectos, el concreto permeable tiene limitaciones que deben ser consideradas al planear su uso. La resistencia de enlace entre sus partículas es más baja que en el concreto convencional y por lo tanto proporciona una resistencia a la compresión más baja. Finalmente, puesto que el uso del concreto permeable en el Mundo es bastante reciente en cuanto a pavimentos, hay una carencia de ingenieros expertos y de contratistas para su instalación.

Las características funcionales no-estructurales del concreto permeable son: disminución del ruido, mayor fricción, eliminación del hidroplaneo, eliminación del brizado, mejoramiento del drenaje para conducir aguas pluviales, disminuye la resistencia a rodar contra los pavimentos flexibles, elimina la reflexión, y la permeabilidad es óptima. El concreto permeable también tiene potencial como estrategia urbana de la disminución del calor, recarga de mantos acuíferos y manejo de aguas pluviales.

A continuación se presenta el estado del arte en cuanto a concreto permeable en otros países, donde podemos observar que la relación agua / cemento va desde 0.20 (Bélgica) ó 0.24 (Alemania) hasta 0.43 (EUA) con diferentes tipos de aditivos, también tenemos que el promedio de la relación agua / cemento es de 0.28, debemos tomar en cuenta que la relación agua / cemento promedio para un concreto hidráulico con aire incluido normalmente está entre 0.40 y 0.74, conforme al Método del A.C.I. para la dosificación de mezclas de concreto, cabe mencionar que de dicho método se puede observar que a menor relación agua / cemento la resistencia es mayor, de ahí la importancia de la relación agua cemento. (Cackler et al, 2006).

La relación agua / cemento constituye un parámetro importante de la composición del concreto. Tiene influencia sobre la resistencia, la durabilidad y la retracción del concreto.

La relación agua / cemento (a/c) es un valor característico muy importante en la tecnología del concreto. De ella dependen la resistencia y la durabilidad, así como los coeficientes de retracción (sin carga) y de fluencia (carga constante). También determina la estructura interna de la pasta de cemento endurecida.

En los EUA los poros en el concreto permeable son creados usando una graduación uniforme en la mezcla de concreto, este tipo de mezcla es colocada sobre una base granular que permite percolar directamente hacia las aguas freáticas.

Aunque existen muchas aplicaciones para el concreto permeable, la gran mayoría de sus aplicaciones en los Estados Unidos, han sido en estacionamientos y calles de muy bajo tránsito. Poco se ha usado en los hombros de carreteras y no se tiene mucha experiencia en climas que lleguen a la congelación. Véase la tabla 2.1

	Tennis et al 2004 (Kg/m ³)	NRMCA 2004 (Kg/m ³)	Schaefer et al. 2006 (Kg/m ³)
Cemento	267 a 415	178 a 356	338 a 356
Agregado	1,187 a 1,483	1,424 a 1,602	1,602
Graduación	3/4" a # 4, 3/8" a # 16, ó # 89		1/2" a # 4
Relación agua/cemento	0.27 a 0.34	0.27 a 0.43	0.27 a 0.35
Aditivos	Inclisor de aire	4% a 8% Inclisor de aire	10% látex, fibras
proporción de agregado	—	—	0.21

Tabla 2.1. Mezclas de concreto permeable en los EUA (Cackler et al, 2006)

Bélgica ha tenido más de una década de experiencia en el uso de pavimentos de concreto permeable. El uso en clima frío lo lograron con aditivos de polímeros emulsionados con 50% de sólidos. Véase la Tabla 2.2.

	Tipo / Tamaño	Composición (Kg/m ³)	% del Volumen total
Cemento	CEMIII/A42.5LA	280	9.1%
Agregado grueso	1/4" a 7/16"	1,350	49%
Agregado fino	0 a 1/16"	89	3.3%
Agua	—	56	5.6%
Aditivos	Polímero emulsionado (50% sólidos)	56	5.4%

Tabla 2.2. Diseño típico de concreto permeable en Bélgica (Cackler et al, 2006)

CEMIII/A42.5LA = cemento Pórtland de escoria de alto horno
CEM I 32,5 R = cemento Pórtland estándar (CPO)

En Alemania se investiga esta tecnología para pavimentos en condiciones de congelamiento. Véase la Tabla 2.3.

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

Tabla 2.3. Diseño de concreto permeable en Alemania (Cackler et al, 2006)

La política del Japón actual es sustituir sus pavimentos urbanos por pavimentos permeables debido a su seguridad, confort de conducción y reducción de ruidos. Véase la Tabla 2.4.

Agregado, se usa un tamaño	Mortero/ agregado	Kg/m ³					
		Agua	Cemento	a/c	Compactado	Arena fina	Grava de 5 a 13 mm y de 1.2 a 5 mm
5/16"	57%	92	315	0.29	105	209	1,424
1/2"	50%	82	292	0.28	98	198	1,502

Tabla 2.4. Diseño típico de concreto permeable en Japón (Cackler et al, 2006)

El concreto permeable según lo experimentado, aún no se ha caracterizado satisfactoriamente, es necesario desarrollar mezclas lo bastante resistentes para soportar altas cargas, drenar el agua pluvial y reducir el ruido, sin comprometer la seguridad, la fricción y la durabilidad a largo plazo.

Este trabajo propone revisar el diseños de mezclas bajo la lupa de su Módulo de Ruptura y desgaste, restringiendo su uso a nuevas zonas urbanas de bajo tráfico vehicular y estacionamientos, sin pretender solucionar completamente el problema de la recarga de los mantos acuíferos, más bien coadyuvar en la implantación de una urbanización de bajo impacto al ecosistema.

Queda camino por andar, lo importante es sentar las bases técnicas que nos lleven a ubicar el concreto permeable en la mesa de las decisiones, es decir, considerar esta opción como viable contra los pavimentos tradicionales, investigaciones futuras resolverán el dilema basadas en que sistema aporta más CO₂ a la atmosfera, por ejemplo.

2.2 Componentes del concreto permeable

Agua

Así como el agua es esencial para la vida en este planeta, es un ingrediente esencial para el concreto. Sin agua o muy poca agua, todo lo que tendremos es un montón de rocas y polvo. El exceso afectará negativamente las propiedades del concreto.

El agua es imprescindible por dos razones. Una de ellas es para hidratar el cemento y la segunda es para crear una sustancia trabajable. La hidratación del cemento es necesaria para ligar con los agregados que a su vez dan al concreto su resistencia. Por la presencia de espacios llenos de agua en el concreto se reduce su resistencia. Hay indicios de que la resistencia del concreto está directamente relacionada con la porosidad y la relación agua cemento (a/c). Esto lo demuestra el proceso de hidratación. Conforme avanza la hidratación del cemento, el volumen de sólidos se incrementa. Este volumen está en el espacio anteriormente ocupado por el cemento sin hidratar. El aumento de los sólidos en volumen indica una disminución de la porosidad.

La porosidad afecta a la resistencia pero la resistencia, en sí es una consecuencia de la unión de los agregados y el cemento. El desarrollo de la liga en mezclas con alta relación a/c es difícil debido a la separación entre partículas. Una alta relación a/c, infiere una mezcla con una alta porosidad. Por lo tanto, una alta porosidad produce una liga débil que a su vez conduce a una reducción de la resistencia.

La cantidad de agua necesaria para una hidratación completa y conseguir la máxima resistencia ha sido durante mucho tiempo tema de debate desde 1890, con Duffus Abrams. La resistencia se desarrolla en el concreto a través de la liga o unión. Esta unión se desarrolla a través de una reacción química del cemento y el agua. Esta reacción produce hidrato de silicato de calcio, también llamado gel de tobermorita.

Parte del agua es necesaria para la trabajabilidad del concreto. Esta adición de agua es necesaria debido a la floculación que ocurre en las partículas de cemento. Este flóculo disminuye la trabajabilidad e impide la hidratación. Es posible incluir aditivos para eliminar la floculación. Una vez utilizada el agua para contrarrestar este efecto se utiliza en el momento para la hidratación, reduciendo así la cantidad de agua necesaria.

El agua y su aplicación en concretos permeables es extremadamente crítica. Dado que algunos finos son eliminados del concreto permeable, la resistencia se basa en el vínculo de la pasta de cemento y su interrelación con el agregado. Al igual que con concreto convencional, muy poca agua no dará buena liga y demasiada agua asentará la pasta en la base del pavimento y tapaná los poros. La cantidad correcta de agua maximizará la resistencia sin comprometer las características de la permeabilidad del concreto permeable.

Agregados

En general, la resistencia de los agregados no se considera cuando se habla de la resistencia del concreto. La falla de las muestras del concreto de una prueba de flexión por lo general se produce entre el agregado y el cemento. Esto demuestra que la resistencia adhesiva es más débil que la resistencia del cemento y la resistencia del agregado. Todo indica que la resistencia del concreto está dictada por la resistencia de la unión y no de cada componente.

Sin embargo, en el concreto permeable la pasta de cemento es limitada y el agregado recibe de la superficie de contacto con ella para desarrollar la resistencia entre sí del concreto. Por lo tanto, el agregado debe ser más fuerte, por ejemplo, como el granito, andesita o cuarzo, daría mayor resistencia de compresión que un agregado suave como la piedra caliza.

Normalmente los agregados dentro del rango de 3/8" y 3/4" se utilizan porque su tamaño arroja como resultado grandes espacios vacíos.

El agregado utilizado para el presente estudio fue la distribución propuesta por las normas SCT para las carpetas asfálticas abiertas, la modificaremos quitándole los gravas mayores a 3/4" y todas las arenas y finos, por lo que usaremos los agregados incluidos en **ASTM C 33 No. 67** (3/4" a No. 4). El tipo de agregado utilizado es andesita y sus características se plasman más adelante en este estudio.

Relación agregado-cemento

La cantidad de agregado en relación con la cantidad de cemento es otra característica importante. A más cantidad de cemento disponible en la compactación más alta es la resistencia a la flexión. Esto tapaná los poros y es perjudicial para la función de los concretos permeables, ya que hemos considerado una sola granulometría esta relación se supondrá óptima si la permeabilidad de las distintas mezclas ensayadas es adecuada.

Compactación

El grado de compactación puede tener efectos considerables sobre la calidad del concreto permeable. Un mayor grado de compactación se produce cuando el concreto alcanza su mayor nivel de resistencia. Esto se debe a la densificación del concreto y la eliminación de huecos. Estos son los mismos vacíos necesarios para la permeabilidad del agua. Demasiada compactación por lo tanto resultará en una pérdida de permeabilidad a través del concreto y un fracaso del sistema del concreto permeable.

Inmediatamente después de vaciar el concreto se compacta con un rodillo. Se puede apisonar con un rodillo pequeño a lo largo de los bordes para facilitar la compactación a lo largo de las fronteras. El rodillo se utiliza para compactar el concreto y crear un fuerte vínculo entre la pasta de cemento y las partículas del agregado proporcionando una superficie más nivelada. El rodillo debe ser del ancho suficiente para montarlo en las fronteras y debe proporcionar una resistencia vertical mínima de 0.07 MPa. El rodillo de 3.7 m de ancho, ancho de un carril, pesa aproximadamente 270 a 320 kg. (ACI 522R-06).



Fig. 2.1 Compactación de concreto permeable con rodillo de 3.7 m. (ACI 522R-06, 2006).



Fig. 2.2 Compactación de concreto permeable con rodillo pequeño (ACI 522R-06, 2006).

Tipo de suelo

Una subrasante uniforme con la nivelación correcta es esencial para la construcción de un pavimento de calidad. La parte superior, 15 cm en promedio, salvo lo que dicte el diseño de la estructura del pavimento en cuestión, es la sub-base y debe estar compuesta por material granular (inerte) con no más de una cantidad moderada (10%) de limo o arcilla, ni con nivel de aguas freáticas superficiales, o congelado, cuando se inicia la colocación. El suelo de subrasante debe ser humedecido antes de la colocación del concreto.

El espesor del pavimento depende del Módulo de reacción de la subrasante, k , o el tipo de suelo por debajo del concreto. Investigaciones sobre los diferentes tipos de suelos nos

han proporcionado información de los diversos suelos y sus correspondientes valores de k. Estos tipos de suelos.

Tipo de Suelo	Resistencia	Valores k (PCI)
Suelos de grano fino que contienen limo con predominio de pequeñas partículas de arcilla	Baja	75-120
Arena y mezcla de grava-arena con moderadas cantidades de limo y arcilla	Medio	130-170
Arena y mezcla de grava-arena relativamente libres de finos plásticos	Alta	180-220
Sub-bases tratadas con cemento	Muy alta	250-400

Tabla 2.5 Tipos de suelo con valores aproximados de k (Mulligan, 2005).

Clase	Tipo de suelo	Calidad de suelo	Valor k (PCI)
A-1	Fragmentos de piedra, grava y arena	Excelente a Bueno	400-710
A-1-b	Fragmentos de piedra, grava y arena	Excelente a Bueno	250-590
A-2-4	Grava arcillosa o limosa y arena	Excelente a Bueno	290-710
A-2-5	Grava arcillosa o limosa y arena	Excelente a Bueno	290-710
A-2-6	Grava arcillosa o limosa y arena	Excelente a Bueno	180-340
A-2-7	Grava arcillosa o limosa y arena	Excelente a Bueno	180-340
A-3	Arena fina	Excelente a Bueno	200-340
A-4	Suelos limosos	Pobres	100-300
A-5	Suelos limosos	Pobres	50-180
A-6	Suelos arcillosos	Pobres	50-220
A-7-5	Suelos arcillosos	Pobres	50-220
A-7-6	Suelos arcillosos	Pobres	50-220

Tabla 2.6 Clasificación de Suelos AASHTO (Mulligan, 2005).

Clasificación	Tipo de suelo	Valor k (PCI)
GP	Grava mal graduada	290-590
GW	Grava bien graduada	590-710
GM	Grava limosa	250-710
GC	Grava arcillosa	250-420
SW	Arena bien graduada	250-420
SM	Arena limosa	200-420
SP	Arena mal graduada	200-290
SC	Arena arcillosa	200-250
ML	Limo de baja compresibilidad con grava o arena	140-230
MH	Limo de alta compresibilidad con grava o arena	120-180
CL	Arcilla de baja plasticidad con arena o grava	140-230
CH	Arcilla de alta plasticidad con arena o grava	100-140
OC	Limo o arcilla orgánica con grava o arena	120-180
OH	Limo o arcilla orgánica con grava o arena	100-140

Tabla 2.7 Clasificación de Suelos de ASTM (Mulligan, (2005).

Curado y la protección

La estructura de poro abierto del concreto permeable hace que el curado sea particularmente importante porque el secado puede más fácilmente ocurrir. El material de cobertura debe ser transparente, 0.15 mm o polietileno grueso de la dimensión suficiente para ser capaz de cubrir todo el ancho de un carril a lo largo. Las membranas de curado comerciales no producen resultados aceptables, la membrana puede cerrar los huecos ó no cubrirlos adecuadamente, (ACI 522R-06, 2006).

La compactación, y las operaciones de curado deben hacerse lo más cerca como sea posible para evitar la desecación de la superficie del concreto permeable. Cuando existan condiciones climáticas adversas del ambiente, tales como alta temperatura, viento, o poca humedad, se deberá rociar un retardante de evaporación en la superficie antes de la compactación. El curado debe comenzar antes de los 20 minutos seguidos a la compactación final. Antes de cubrir con el polietileno, y en caso de que el concreto haya perdido su "brillo", debe ser ligeramente rociado con el agua.

Para un correcto curado, el pavimento normalmente debe ser cubierto por 7 días para el cemento sin aditivos, y de hasta 10 días para las mezclas de concreto que incorporan aditivos al cemento. No debe ser permitido el tráfico en el pavimento durante el curado. Además, no se debe permitir el almacenamiento de materiales de construcción y de jardinería en la superficie del pavimento, ya que estos materiales pueden colmatar los poros del pavimento permeable.

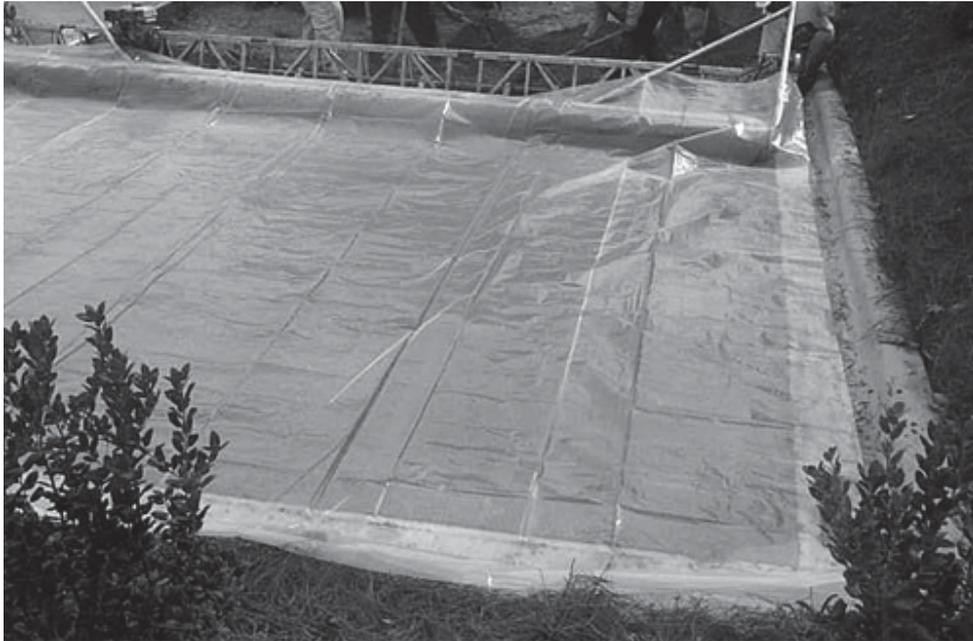


Fig. 2.3 Ejemplo de curado de concreto permeable con polietileno (ACI 522R-06, 2006).

Tráfico

El comportamiento del tráfico adquiere una importancia relevante desde el punto de vista de la eficiencia del sistema de transportes en su conjunto. El estudio y optimización de una red de tráfico, que incluyen la caracterización de la infraestructura y su capacidad, las investigaciones de campo necesarias para conocer las relaciones origen/destino canalizadas por el sistema y sus principales características (aforo por sentido, aforo de mercancías peligrosas, motivo de viaje, estacionamiento en origen-destino, ocupación de los vehículos, tiempo de viaje, etc.), la modelización macro para evaluar diferentes estrategias de actuación y la modelización micro que permite ajustar hasta el máximo detalle las características funcionales de los diferentes elementos del sistema, incluyendo un análisis pormenorizado de las intersecciones y sus diferentes métodos de regulación. De esta manera es posible maximizar la eficiencia social del espacio vial disponible, asegurando el mejor equilibrio posible entre los intereses de los diferentes agentes y usuarios del sistema.

Deberán llevarse a cabo estudios de tráfico. Los lugares por pavimentar deben ser cuidadosamente evaluados para obtener volúmenes y cargas, para todos los días de la semana y para todas las horas con el fin de obtener los datos del servicio al que el concreto permeable estará sometido en el día a día.

CAPÍTULO 3.- METODOLOGÍA

Como ya se menciona el objetivo general de esta investigación es establecer el procedimiento para caracterizar el concreto permeable considerando el Módulo de Ruptura (MR) y el porcentaje de desgaste, para conseguirlo hemos establecido dos objetivos particulares obtener el porcentaje de desgaste mediante el ensayo Cantabro NLT-352/86, y el Módulo de Ruptura (MR), según normas ASTM C 42-03 y ASTM C 78-02.

Los métodos de investigación que a seguir para alcanzar los objetivos planteados, son definitorios, clasificatorios, estadísticos, hipotético-deductivos, procedimientos de medición, obtención de resultados y divulgación de ellos a fin de hacer posible su reproducibilidad y con ello incrementar el estado del arte.

En primer lugar está la caracterización física de los insumos propios de la zona, en este caso agregados, con el fin de comprobar que cumplan con la norma **ASTM C 33 No. 67**. Para acotar se citarán las normas que deben cumplir los otros materiales a usar, tal como cemento, agua y aditivos. Seguimos estableciendo los tipos de muestras a ensayar, las pruebas de laboratorio, los datos y cálculos de las pruebas, la obtención de resultados e interpretación de estos y conclusiones.

Finalmente no se pondrá en tela de juicio el conocimiento ya obtenido por otros investigadores y aceptado por la comunidad científica. Nos centraremos en la búsqueda de estrategias válidas para incrementar el conocimiento, sin filias ni fobias hacia algún tipo de concreto.

La metodología que seguimos fue comenzar con la caracterización de los agregados, materiales pétreos, cemento, agua, relación agua / cemento y aditivos. Para continuar con la definición de mezclas a emplear que finalmente se ensayaran para cumplir con los objetivos de esta Tesis.

3.1 Caracterización de insumos

Los insumos a emplear fueron, agregados, cemento, agua y aditivos. Se tomó la decisión con base en trabajos ya realizados y normados por la SCT para las carpetas asfálticas abiertas, usar la granulometría en ellos empleada, con la salvedad de no incluir las gravas mayores a 3/4" y todas las arenas y finos, por lo que usaremos los agregados incluidos en **ASTM C 33 No. 67** (3/4" a No. 4). El agregado triturado local es andesita.

Materiales pétreos

El agregado ocupa un volumen entre el 60% y el 75% del concreto tradicional, es por ello que sus características tendrán un fuerte impacto en las propiedades tanto en estado fresco como endurecido, así como en la durabilidad del concreto tradicional y por ende en el concreto permeable.

Las características de los agregados locales debe de ser materia de estudio desde antes del diseño de concretos, a fin de contemplar las propiedades de los mismos.

Las propiedades de los agregados que afectan la trabajabilidad del concreto son: tipo de agregado, triturado o cribado, forma y textura, distribución de tamaños, contenido de finos, absorción y contenido de humedad.

Las propiedades de los agregados que afectan la resistencia del concreto son: tipo de agregado, triturado o cribado, resistencia intrínseca del agregado, tamaño máximo o distribución granulométrica, textura y limpieza.

Malla		% que pasa	
Abertura (mm)	"	Límites	
25.400	1"	100	100
19.050	3/4"	62	100
12.700	1/2"	45	70
9.520	3/8"	33	58
6.350	1/4"	22	43
4.760	No. 4	14	33
2.000	No. 10	5	19
0.074	No. 200	2	4

Tabla 3.1 Granulometría SCT, para open gray

Malla		% que pasa	
Abertura (mm)	"	Límites	
25.400	1"	100	100
19.050	3/4"	90	100
12.700	1/2"		
9.520	3/8"	20	55
6.350	1/4"		
4.760	No. 4	0	10
	No. 8	0	5

Tabla 3.2 Granulometría para concreto permeable, primeras probetas que resultaron con poca permeabilidad (ASTM C 33-03).

Malla		% que pasa	% que se retiene	Material para 6 vigas
Abertura (mm)	"			
				kg
19.050	3/4"	100.00	0.00	
12.700	1/2"	70.00	30.00	2.443
9.520	3/8"	55.00	15.00	1.221
6.350	1/4"	43.00	12.00	0.977
4.760	No. 4	0.00	43.00	3.502
			suma:	8.143

Tabla 3.3 Granulometría para esta Tesis y cantidades para fabricar 6 probetas

Para la caracterización de los agregados se tomaron tres muestras del banco "ROKA" del Grupo de Oro, Km 19+800 carretera Morelia – Salamanca, la primera de grava de 3/8", la segunda de grava de 3/4" y la tercera de arena, se pretende hacer un ajuste de curvas granulométricas y obtener la granulometría propuesta en la tabla 3.3. Al no poder llegar a un ajuste adecuado de curvas granulométricas se decide cribar las tres muestras y ya separados los tamaños formar la granulometría de la tabla 3.3.

Las pruebas que se le harán a los agregados para su caracterización son: Granulometría (M-MMP-4-04-002/02), Desgaste de Los Ángeles (M-MMP-4-04-006/02), Intemperismo acelerado (M-MMP-4-04-008/03) y Densidad relativa (M-MMP-4-04-003/02, conforme a normativa SCT 2006).

El agregado deberá cumplir con los siguientes requisitos de calidad, conforme a normas SCT, las pruebas se apreciarán en el siguiente capítulo:

Requisitos	Normas
Desgaste ó prueba de Los Ángeles	40% máximo
Intemperismo acelerado	12% máximo, utilizando sulfato de sodio
Densidad relativa	2.4 mínimo
Tipo de material	100% roca triturada
No ser potencialmente reactivos	Verificado mediante análisis petrográfico y/o la prueba química rápida

Tabla 3.4 Requisitos a cumplir por los agregados según SCT



Fig. 3.1 Banco, recolección y secado de agregados

Cemento

De acuerdo con la definición que aparece en la Norma Oficial Mexicana (NOM), el cemento Pórtland Ordinario (OPC) es el que proviene de la pulverización del clínker obtenido por fusión incipiente de materiales arcillosos y calizos, que contengan óxidos de calcio, silicio, aluminio y fierro en cantidades convenientemente dosificadas y sin más adición posterior que yeso sin calcinar, así como otros materiales que no excedan del 1% del peso total y que no sean nocivos para el comportamiento posterior del cemento, como pudieran ser los álcalis, óxidos de Na, Ca, K.

El cemento es un conglomerante hidráulico, ya que la unión es química, que mezclado con agregados pétreos (árido grueso o grava, más árido fino o arena) y agua, crea una mezcla uniforme, maleable y plástica que fragua y se endurece al reaccionar con el agua, adquiriendo consistencia pétreo, denominada concreto. Su principal función es la de aglutinar, unir.

Desde la antigüedad, se emplearon pastas y morteros elaborados con arcilla, yeso o cal para unir mampuestos en las edificaciones. Fue en la Antigua Grecia cuando empezaron a usarse tobas volcánicas extraídas de la isla de Santorini, los primeros cementos naturales. En el siglo I a. C. se empezó a utilizar el cemento natural en la Antigua Roma, obtenido en Pozzuoli, cerca del Vesubio. La bóveda del Panteón es un ejemplo de ello. En el siglo XVIII John Smeaton construye la cimentación de un faro en el acantilado de Edystone, en la costa Cornwall, empleando un mortero de cal calcinada. El siglo XIX, el albañil Joseph Aspdin patentó en 1824 el cemento Pórtland Ordinario (OPC), denominado así por su color gris verdoso oscuro. Isaac Johnson, en 1845, obtiene el prototipo del cemento moderno, con una mezcla de caliza y arcilla calcinada a alta temperatura. En el siglo XX surge el auge de la industria del cemento, debido a los experimentos de los químicos franceses Vicat y Le Chatelier y el alemán Michaélis, que logran cemento de calidad homogénea; globalizan su uso la invención del horno rotatorio para calcinación y el molino tubular y los métodos de transportar concreto fresco ideados por Juergen Hinrich Magens en 1903 (Schmitt, Heinrich y Heene, Andreas, 2004).

En esta investigación la primera variable que se tomó para establecer cuantas probetas testar, fue la cantidad de cemento y usamos 200, 250, 300, 350 y 400 kg/m³. El cemento a utilizar para la elaboración del concreto permeable fue Pórtland Ordinario (OPC) Ordinario, de marca aprobada oficialmente, Tolteca CPO 30 RB, el cual cumple lo especificado en las normas NMX - C-414 - 1999 - ONNCCE.

Agua

El agua es una abundante sustancia de la Tierra. Existe en varias formas y lugares: principalmente en los océanos y las capas polares de nuestro planeta, pero también en las nubes, lluvia, ríos y lagos. En el planeta, el agua se mueve constantemente en su ciclo constituido por la evaporación, precipitación y escorrentía. Todas las formas de vida conocidas necesitan agua para vivir.

El agua para el amasado del concreto deberá ser limpia, preferiblemente potable, desprovista de impurezas que suelen encontrarse en: pozos, aguas estancadas, pantanos, ríos con arrastre de materia orgánica, etc. No deberán tener mal olor, generalmente de emanaciones sulfurosas o tener reacción ácida. Se prohíbe expresamente usar las aguas provenientes de fuentes termales o minerales y las de fábricas que contengan vestigios de aceite, grasa, azúcar, sales de potasio y otras sales resultantes de las industrias tales como : mineras, curtiembres, tintorerías, laboratorios químicos, etc. La temperatura del agua durante la preparación del concreto deberá ser superior a 5 °C.

En resumen el agua que se emplee en la fabricación del concreto deberá cumplir con la norma NMX-C-122, debe ser potable, y por lo tanto, estar libre de materiales perjudiciales tales como aceites, grasas, materia orgánica, etc. Se considera adecuada el agua que sea apta para el consumo humano.

Relación agua / cemento

La relación agua-cemento, también conocida como razón agua/cemento, a/c, es uno de los parámetros más importantes de la tecnología del concreto, pues influye grandemente en la resistencia final del mismo. Expresa la íntima relación que existe entre el peso del agua utilizada en la mezcla y el peso del cemento. Una relación agua/cemento baja

conduce a un concreto de mayor resistencia que una relación agua/cemento alta. Pero entre más alta esta relación, el concreto se vuelve más trabajable. La menor relación a/c para obtener una hidratación completa del cemento sin aditivos se considera igual a 0.30 (Brown, D., 2003).

Se obtuvo la relación a/c óptima por el método de la PCA, de la revista Concrete Technology Today, CT043, December 2004, Vo. 25, No.3. Se tomaron y pesaron varias muestras agregándoles cantidad de agua, en peso, hasta llegar a aquella muestra que conservara la forma mostrada en la figura 3.2 b) y resultado fue una relación a/c de 0.40.



Fig. 3.2 Ejemplos de concreto permeable elaborados con diferente contenido de agua y formando una bolita: a) Muy poca agua, b) poco contenido de agua y c) Mucho contenido de agua. (Brown, D., 2003).

Aditivos

Los aditivos son productos que, introducidos en pequeña porción en el concreto, modifican algunas de sus propiedades originales, se presentan en forma de polvo, líquido o pasta y la dosis varía según el producto y el efecto deseado entre un 0.1 % y 5 % del peso del cemento.

Su empleo se ha ido generalizando hasta el punto de constituir actualmente un componente habitual del concreto. Sin embargo su empleo debe ser considerado cuidadosamente, siendo importante verificar cual es su influencia en otras características distintas de las que se desea modificar.

En primera aproximación, su proporción de empleo debe establecerse de acuerdo a las especificaciones del fabricante, debiendo posteriormente verificarse según los resultados obtenidos en obra o, preferentemente, mediante mezclas de prueba.

El empleo de los aditivos permite controlar algunas propiedades del concreto, tales como las siguientes:

- Trabajabilidad y exudación en estado fresco.

- Tiempo de fraguado y resistencia inicial de la pasta de cemento.
- Resistencia, impermeabilidad y durabilidad en estado endurecido.

La norma ASTM C 494 "Chemical Admixtures for Concrete", distingue siete tipos:

- Tipo A: Reductor de Agua
- Tipo B: Retardador de Fraguado
- Tipo C: Acelerador de Fraguado
- Tipo D: Reductor de agua y Retardador.
- Tipo E: Reductor de Agua y Acelerador.
- Tipo F: Reductor de Agua de Alto Efecto.
- Tipo G: Reductor de Agua de Alto Efecto y Retardador

Los aditivos incorporadores de aire se encuentran separados de este grupo, e incluidos en la norma ASTM C260 "Especificaciones for Air Entraining Admixtures for Concrete".

En los concretos permeables pueden usarse polímeros o silicón como aditivos siempre que sus ingredientes no interfieran con el proceso de hidratación de la mezcla y se prefieren los normados como: tipo A Reductores de agua conforme a ASTM C-494, tipo B Aditivos retardantes que cumplen con ASTM C-494 y tipo D Reductores de agua/Aditivos retardantes que cumplen con ASTM C-494.

En este trabajo nos limitaremos a tres mezclas:

A).- Sin aditivos.

B).- Con Látex (SURFAFLEX HM), 0.10% en peso de agregados, látex aniónico, polímero, aspecto líquido color crema, contenido de sólidos 62% mínimo, Peso específico 0.94, PH a 25 °C, 9 a 11, Fórmula química $C_5 H_8$, Polímero líquido tipo estireno butadieno recomendado para su empleo en mezclas en caliente como la open graded, presentación en tambores plásticos de 200 kg.

C).- Con fibra (FIBRAFEST marca Fester), 0.5% en peso de agregados, microfibra virgen de polipropileno, conforme a norma ASTM C1116-03, resistente al daño físico al mezclarse, compatible con el medio generalmente alcalino dentro de la mezcla de cemento, resistente a condiciones de agrietamiento como bióxido de carbono, de cloruros, o de sulfatos en combinación con la luz ultravioleta, el agua ó el oxígeno, mejora las características mecánicas del concreto, tiene un Módulo alto de elasticidad y de resistencia a la tensión, está tratada con dispersante y se mezcla de 3 a 5 minutos.



Fig. 3.3 Microfibra fibrafest utilizada en las mezclas "C".

3.2 Tipos de mezclas

En primer lugar dado que se ha tomado la decisión de caracterizar al concreto permeable mediante el Módulo de Ruptura y por el porcentaje de desgaste, necesitaremos considerar la fabricación de probetas para ser examinadas mediante la prueba de resistencia a la flexión (ASTM C 78-02) y el ensayo Cantabro (NLT-352/86). Las probetas a fabricar deberán ser vigas de tal manera que su espesor sea un tercio de su longitud, es decir de 6x6x18 cm y de tal forma que al llevar a la falla estas vigas sus restos sirvan para el ensayo Cantabro.

La prueba de resistencia a la flexión (ASTM C 78-02) y el ensayo Cantabro (NLT-352/86), son pues el eje de esta Tesis ya que con ellas nos proponemos caracterizar el concreto permeable que será usado en los ecológicos pavimentos permeables.

En este trabajo de investigación vamos a utilizar tres tipos de mezcla:

- 1).- Tipo A con cemento Pórtland Ordinario (OPC), esta mezcla se tomó como punto de comparación es decir que cuánto influye el usar o no los aditivos.
- 2).- Tipo B adicionado con látex aniónica HM, dado que en el concreto tradicional el látex aporta mayor Módulo de Ruptura, se decidió observar su comportamiento en el concreto permeable.
- 3).- Tipo C adicionado con Microfibra virgen de Polipropileno, puesto que en el concreto tradicional la fibra aporta mayor Módulo de Ruptura se decidió observar su comportamiento en el concreto permeable.

Con cada uno de estos aditivos se fabricaron cinco mezclas variando solamente la cantidad del cemento:

Tipo 1 para 200 kg/m³; consideramos éste como el parámetro menor ya que se requiere poco más de 200kg/m³ para lograr una resistencia a la compresión de 10 MPa en un concreto tradicional.

Tipo 2 para 250 kg/m³; se considera como parámetro intermedio.

Tipo 3 para 300 kg/m³; se considera como parámetro intermedio.

Tipo 4 para 350 kg/m³; se considera como parámetro intermedio.

Tipo 5 para 400 kg/m³, consideramos este como el parámetro superior ya que se requiere poco más de 400kg/m³ para lograr una resistencia a la compresión de 200 MPa en un concreto tradicional.

En la tabla 3.5 se plasman la cantidad de vigas por ensayar = **6** especímenes x **3** mezclas x **5** cantidades de cemento = **90** pza.

Tipo A Cemento + Pétreos + Agua

Tipo B Cemento + Pétreos + Agua + Surfaflex HM, Látex (0.10% en peso de agregados)

Tipo C Cemento + Pétreos + Agua + Microfibra virgen de Polipropileno (0.05% en peso de agregados)

Matriz de vigas por ensayar:

Cemento Kg/m ³	TIPOS DE MEZCLAS		
	A	B	C
1.- 200	A1	B1	C1
2.- 250	A2	B2	C2
3.- 300	A3	B3	C3
4.- 350	A4	B4	C4
5.- 400	A5	B5	C5

Tabla 3.5 Tipo de mezclas a utilizar.

CAPÍTULO 4.- PRUEBAS DE LABORATORIO

La resistencia a la flexión, desgaste y permeabilidad del concreto permeable son, los parámetros principales para determinar la calidad del mismo. Cuando usemos el concreto permeable como material en pavimentos necesitamos asegurarnos de que el mismo satisfice los requisitos mínimos del diseño. Nuestro objetivo es hacer las pruebas mencionadas a las mezclas de concreto permeable conforme al planteamiento de esta Tesis.

4.1 Prueba de permeabilidad

Se entiende por permeabilidad a la facilidad de movimiento de un flujo a través de un medio poroso. La permeabilidad puede definirse como velocidad de flujo producida por un gradiente hidráulico unitario. Se encuentra en plena votación la norma WK17606, método de prueba para evaluar la permeabilidad de pavimentos de concreto permeable por parte de la ASTM.

Objetivo de la prueba de permeabilidad: Determinar la capacidad de la permeabilidad para un flujo laminar de agua a través de una mezcla de concreto permeable.

Procedimiento de la prueba de permeabilidad:

- 1).- Primeramente se colocan en una probeta de 3.80 cm de diámetro un volumen de 250 ml de agua.
- 2).- Se colocan los especímenes de concreto A3, B3 y C3, por ser los especímenes que se consideraron representativos de la muestra, sobre dos superficies planas y a nivel, apoyándose en sus extremos y dejando suficiente espacio libre para que escurra el agua filtrada.
- 3).- Se comienza a vaciar el agua a velocidad constante sobre cada mezcla, midiendo con un cronómetro, el tiempo en que se filtra el agua al 100%.



Fig. 4.1 Prueba de permeabilidad

4.2 Prueba de compresión simple

La prueba de compresión simple es la más usada en los laboratorios de Control de calidad para los trabajos de rutina. Esta prueba tiene la ventaja de ser de fácil realización y de exigir equipo relativamente sencillo, Norma ASTM D2166-00.

Objetivo de prueba de compresión: determinar las características de capacidad de carga de las mezclas A-5 (Fig. 3.4) a 14 y 28 días al aplicar una carga axial. Dado que no es el objetivo principal de este trabajo la compresión simple sólo se hizo en estas dos probetas para la conocer el comportamiento en las mezclas con más cemento, teniendo como antecedentes pruebas realizadas a otras probetas y con diferentes cantidades de cemento, y tipos de aditivos, se consideró que éstas serian las representativas.

Procedimiento de la prueba de compresión simple:

- 1).- Se deben elaborar cilindros de aproximadamente 10.40 cm de diámetro y 20.00 cm de altura, u otras dimensiones de tal manera que la relación de esbeltez sea de aproximadamente 2.0, es decir la relación diámetro entre altura será de 1:2.
- 2).- Se miden el diámetro de la muestra, así como la altura y peso.
- 3).- Se coloca sobre la plataforma de la prensa el cilindro o espécimen, colocándole los aditamentos necesarios para que el espécimen quede bien cabeceado.
- 4).- Se centra bien el espécimen cuidando que la placa o balín trasmisor de carga resulte perfectamente axial.
- 5).- Se hace funcionar el mecanismo de aplicación de la carga.
- 6).- Se anotan las cargas últimas o de falla.



Fig. 4.2 Prueba de compresión simple

4.3 Prueba de resistencia a la flexión (MR).

La resistencia a la flexión es una medida de la resistencia a la tracción del concreto. Es una medida de la resistencia a la falla por momento de una viga o losa de concreto no reforzada.

La resistencia de diseño especificada a la tensión por flexión ($S'c$) o Módulo de Ruptura (MR) a los 28 días, se verifica en especímenes moldeados durante el colado del concreto, correspondientes a vigas estándar 6"X6" y mínimo 21" (15 cm x 15 cm x 53 cm), compactando el concreto por vibro compresión y una vez curados adecuadamente, se ensayan a los 7, 14 y 28 días aplicando las cargas en los tercios del claro, fabricados conforme a **ASTM C 42-03** y probados conforme a **ASTM C 78-02**.

Objetivo de la prueba de resistencia a la flexión: La determinación del Módulo de Ruptura en nuestro caso, **conforme al croquis de la ASTM los prismas serán de 6 cm x 6 cm x 26 cm** ($L/3 = 6$ cm, $L = 18$ cm), se ensayarán dos especímenes a los 7, dos a los 14 días de colado, y los otros dos restantes a los 28 días. Nos da un total de 6 vigas por mezcla y por cantidad de cemento. En principio necesitamos elaborar 6 prismas para cada tipo de mezcla y serán $3 \times 5 = 15$ mezclas. En total fabricaremos $3 \times 5 \times 6 = 90$ vigas. Se ensayarán a los 7, 14 y 28 días, para encontrar su MR.

Se dosifican los insumos para la fabricación de probetas conforme a lo proyectado y las vigas (6 cm x 6 cm x 26 cm) se llenan en una capa y se compactan con 25 golpes de la varilla punta de bala por viga y se enrasan con la varilla punta de bala.

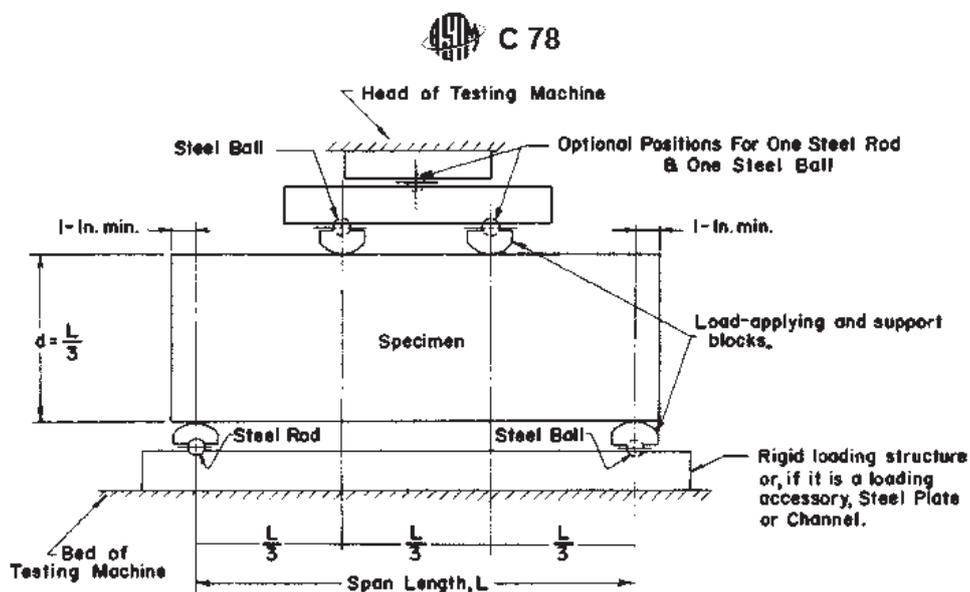


Fig. 4.3 Esquema de prueba de Módulo de Ruptura

Procedimiento de prueba: los prismas deben estar secos, sacar de la pila de curado 24 hr antes, la humedad reduce los resultados; rotar al espécimen de la prueba en su cara con respecto a su posición original de moldeado, Aplicar la carga en una razón que aumente

constantemente la tensión en la fibra extrema del prisma entre 125 psi/min y 175 psi/min (0.86 MPa/min y 1.21 MPa/min).

La razón se calcula con $r = Sbd^2/L$, para 1MPa;

r = Tasa de carga

S = Tasa de aumento de tensión en la fibra extrema

b = Ancho promedio de muestra

d = Profundidad media de muestra

L = Longitud de tramo

$r = 10.20 \times 6 \times 6^2 / 18 = 122.40 \text{ kp/min}$, equivalente a 1mm/min hasta la fractura del prisma; hacer tres mediciones para **b** (aprox 1 mm), de la cara fracturada, una en cada borde y otra al centro, de igual manera para **d**, se obtienen los promedios.

Cálculo del Módulo de Ruptura: si la falla del prisma se da en el tercio central se calcula con $MR = PL/bd^2$; si la falla se da fuera del tercio medio en máximo 5% (de ser mayor se descarta la viga) se calcula con $MR = 3Pa/bd^2$, donde P = Carga máxima aplicada, a = distancia entre la línea de falla y el apoyo más cercano; el coeficiente de variación del resultado obtenido para prismas de las mismas características debe ser menor al 16%.

Unidades: Usaremos conforme a normas SCT, es decir el SI, Sistema Internacional, no el SB, Sistema Británico.

Tabla 4.1. Características de los agregados y aditivos utilizados

Característica	Unidad	Valor	Referencia	Observaciones
Gravimetría	%	100	Norma	...
Gravimetría	%	100	Norma	...

Fabricación de probetas: una vez cribados los agregados y separados en sus diferentes tamaños se pesan las cantidades necesarias para fabricar 8 probetas, se prepara el cemento, el agua y el aditivo necesarios, se mezclan y cueban en el molde expresamente fabricado para esta Tesis, se curan en el tanque de agua y se ensayan a los 7, 14 y 28 días.



Fig. 4.4 Fabricación y desmolde de vigas.

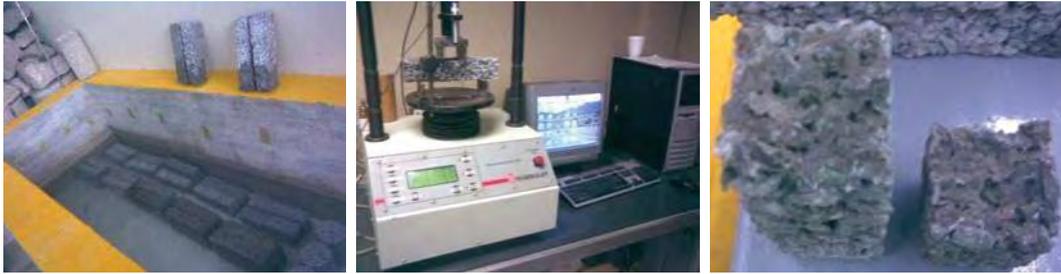


Fig. 4.5 Curado y pruebas de vigas.

4.4 Ensayo Cantabro ó pérdida por desgaste (NLT-352/86).

El objetivo de la prueba es determinar la resistencia a la abrasión de los materiales pétreos y/o del concreto y en su caso aditivos empleados.

La prueba consiste en colocar una muestra del material con características granulométricas específicas dentro un cilindro giratorio (llamado también máquina de desgaste de Los Ángeles), en donde es sometida al impacto sin balines y si con el propio cilindro durante un tiempo determinado, midiendo la variación volumétrica de la muestra, como la diferencia entre la masa, antes y después de haber sido sometida a este tratamiento.

Se calcula y se reporta como resultado de la prueba, el desgaste por abrasión, utilizando la siguiente fórmula:

$$Pa = \left(\frac{Pi - Pf}{Pi} \right) \times 100$$

Donde Pa = Desgaste por abrasión, (%)

Pi = Masa inicial de la muestra de prueba, (gr)

Pf = Masa final de la muestra de prueba, (gr)



Fig. 4.6 Prueba de desgaste de Los Ángeles.

CAPÍTULO 5.- DESARROLLO DE LAS PRUEBAS

5.1 Pruebas para caracterización de agregados

Las pruebas para caracterización de agregados realizadas fueron:

Granulometría (M-MMP-4-04-002/02), se separaron las muestras en sus diferentes tamaños.

Desgaste de Los Ángeles (M-MMP-4-04-006/02), nos dió un desgaste del 28%, menor a 40% permitido.

Intemperismo acelerado (M-MMP-4-04-008/03), nos dió de 8%, menor al 12% permitido.

Densidad relativa (M-MMP-4-04-003/02, conforme a normativa SCT 2006), nos dio de 2.68, mayor a 2.40 que es el mínimo aceptado.

El agregado es 100% roca triturada, conforme a normas, y no es potencialmente reactivo ya que es andesita.

5.2 Prueba de permeabilidad

Datos de las pruebas

Diámetro de la probeta= 3.80 cm

Volumen= 250 ml

Mezcla	Agua (l)	t (min)	Area (m ²)	l/min/m ²
A3	0.2500	0.3180	0.0011	693.19
B3	0.2500	0.4355	0.0011	506.17
C3	0.2500	0.6965	0.0011	316.49

Tabla 5.1 Prueba de permeabilidad.

La permeabilidad en cada mezcla ensayada varía de mayor a menor de A, B y C, la mezcla con sólo cemento tiene una mayor permeabilidad.

5.3 Prueba de compresión simple

Datos de las pruebas

CILINDROS COMPRESIÓN A-5, A 14 DÍAS

Muestra	Diámetro	Altura (h)	Carga (P)	Área	Esf. Comp.	Promedio
	cm	cm	Kg	cm ²	Kg/cm ²	Kg/cm ²
1	10.40	20.01	6700	84.95	78.87	
2	10.36	20.03	7300	84.30	86.60	85.30
3	10.48	20.02	7800	86.26	90.42	

CILINDROS COMPRESIÓN A-5, A 28 DÍAS

Muestra	Diámetro	Altura (h)	Carga (P)	Área	Esf. Comp.	Pomedio
	cm	cm	Kg	cm ²	Kg/cm ²	Kg/cm ²
1	10.48	20.04	8000	86.26	92.74	
2	10.53	20.06	8800	87.09	101.05	96.08
3	10.32	20.02	7900	83.65	94.44	

Tabla 5.2. Datos de prueba de compresión.

En la mezcla con sólo cemento y sin aditivos obtuvimos resultados cercanos a los 10 MPa, (100 Kg/cm²), es decir la resistencia de un concreto pobre que sólo se puede usar en plantillas, pero no para elementos estructurales de los pavimentos.

5.4 Prueba de resistencia a la flexión (MR)

Datos de las pruebas

En estas 3 tablas se plasman los promedios obtenidos en carga y área de las probetas.

Tabla 5.3 Datos de prueba de Módulo de Ruptura probetas tipo "A".

Pruebas a 28 días: probetas a tipo A					
	PROM A1	PROM A2	PROM A3	PROM A4	PROM A5
DESP	CARGA	CARGA	CARGA	CARGA	CARGA
mm	KN	KN	KN	KN	KN
max:	1.211	1.192	2.457	1.499	2.260
área	0.269	0.171	0.236	0.410	0.360

Tabla 5.4 Datos de prueba de Módulo de Ruptura probetas tipo "B"

Pruebas a 28 días: probetas a tipo B					
	PROM B1	PROM B2	PROM B3	PROM B4	PROM B5
DESP	CARGA	CARGA	CARGA	CARGA	CARGA
mm	KN	KN	KN	KN	KN
max:	0.458	0.644	0.894	1.205	1.352
área	0.100	0.108	0.135	0.334	0.188

Tabla 5.5 Datos de prueba de Módulo de Ruptura probetas tipo "C"

Pruebas a 28 días: probetas a tipo C					
	PROM C1	PROM C2	PROM C3	PROM C4	PROM C5
DESP	CARGA	CARGA	CARGA	CARGA	CARGA
mm	KN	KN	KN	KN	KN
max:	0.854	1.350	1.521	2.464	2.161
área:	1.385	1.817	2.282	3.125	2.998

Tabla 5.6 Cálculo de prueba de Módulo de Ruptura, probetas tipo "A"

Matriz para cálculo del Módulo de Ruptura (MR)								
Mezcla fabricada el	fecha de prueba	probeta	edad días	d (alto) cm	b (ancho) cm	P KN	MR MPa	MR (prom) MPa
1 kp = 0.00980665 KN; 1 kp/cm ² = 0.0980665 MPa								
A1	25/08/2008	1	7	6.02	6.03	0.870	0.72	4.73%
lunes, 18 de agosto de 2008	25/08/2008	2	7	6.09	6.00	0.844	0.68	0.70
	01/09/2008	3	14	6.00	6.02	1.028	0.85	14.69%
	01/09/2008	4	14	6.01	6.00	1.179	0.98	0.92
	15/09/2008	5	28	6.00	6.03	1.287	1.07	4.74%
	15/09/2008	6	28	6.01	6.00	1.224	1.02	1.04
A2	25/08/2008	7	7	6.00	6.00	1.417	1.18	5.47%
lunes, 18 de agosto de 2008	25/08/2008	8	7	6.00	6.01	1.497	1.25	1.21
	01/09/2008	9	14	6.02	6.03	1.559	1.28	8.19%
	01/09/2008	10	14	6.00	6.01	1.670	1.39	1.34
	15/09/2008	11	28	6.03	6.04	1.644	1.35	11.63%
	15/09/2008	12	28	6.00	6.01	1.808	1.50	1.43
A3	20/08/2008	13	7	6.00	6.02	1.621	1.35	11.78%
miércoles, 13 de agosto de 2008	20/08/2008	14	7	6.01	6.00	1.812	1.50	1.43
	27/08/2008	15	14	6.00	6.00	1.825	1.52	9.12%
	27/08/2008	16	14	6.01	6.00	1.998	1.66	1.59
	10/09/2008	17	28	6.00	6.01	2.426	2.02	6.98%
	10/09/2008	18	28	6.00	6.00	2.253	1.88	1.95
A4	26/08/2008	19	7	5.99	6.00	2.470	2.07	8.29%
martes, 19 de agosto de 2008	26/08/2008	20	7	6.00	6.02	2.280	1.89	1.98
	02/09/2008	21	14	6.01	6.00	2.544	2.11	4.79%
	02/09/2008	22	14	6.00	6.01	2.418	2.01	2.06
	16/09/2008	23	28	6.01	6.00	2.994	2.49	10.52%
	16/09/2008	24	28	6.00	6.00	2.670	2.22	2.36
A5	26/08/2008	25	7	6.00	6.02	2.515	2.09	4.02%
martes, 19 de agosto de 2008	26/08/2008	26	7	6.01	6.00	2.414	2.00	2.05
	02/09/2008	27	14	6.01	6.00	2.556	2.12	2.66%
	02/09/2008	28	14	6.00	6.02	2.488	2.07	2.09
	16/09/2008	29	28	6.01	6.00	3.303	2.74	3.86%
	16/09/2008	30	28	6.00	6.00	3.165	2.64	2.69

Tabla 5.7 Cálculo de prueba de Módulo de Ruptura, probetas tipo "B"

Matriz para cálculo del Módulo de Ruptura (MR)								
Mezcla	fecha de prueba	probeta	edad	d (alto)	b (ancho)	P	MR	MR (prom)
fabricada el			días	cm	cm	KN	MPa	MPa
1 kp = 0.00980665 KN; 1 kp/cm ² = 0.0980665 MPa								
B1	27/08/2008	1	7	6.00	6.00	0.361	0.30	9.14%
miércoles, 20 de agosto de 2008	27/08/2008	2	7	6.00	6.00	0.394	0.33	0.31
	03/09/2008	3	14	6.00	6.00	0.536	0.45	13.25%
	03/09/2008	4	14	6.00	6.00	0.465	0.39	0.42
	17/09/2008	5	28	6.00	6.00	0.643	0.54	0.62%
	17/09/2008	6	28	6.00	6.00	0.647	0.54	0.54
B2	27/08/2008	7	7	6.00	6.03	0.722	0.60	11.40%
miércoles, 20 de agosto de 2008	27/08/2008	8	7	6.01	6.00	0.803	0.67	0.63
	03/09/2008	9	14	6.00	6.01	0.748	0.62	14.53%
	03/09/2008	10	14	6.02	6.00	0.861	0.71	0.67
	17/09/2008	11	28	6.00	6.01	0.899	0.75	13.16%
	17/09/2008	12	28	6.01	6.00	1.019	0.85	0.80
B3	29/08/2008	13	7	6.00	6.01	1.156	0.96	0.43%
viernes, 22 de agosto de 2008	29/08/2008	14	7	6.01	6.00	1.153	0.96	0.96
	05/09/2008	15	14	6.02	6.00	1.306	1.08	7.63%
	05/09/2008	16	14	6.00	6.02	1.401	1.16	1.12
	19/09/2008	17	28	6.00	6.03	1.482	1.23	5.22%
	19/09/2008	18	28	6.02	6.00	1.562	1.29	1.26
B4	01/09/2008	19	7	6.00	6.02	1.302	1.08	0.96%
lunes, 25 de agosto de 2008	01/09/2008	20	7	6.05	6.00	1.332	1.09	1.09
	08/09/2008	21	14	6.00	6.03	1.787	1.48	13.68%
	08/09/2008	22	14	6.00	6.02	1.540	1.28	1.38
	22/09/2008	23	28	6.02	6.00	1.953	1.62	7.73%
	22/09/2008	24	28	6.01	6.00	1.796	1.49	1.55
B5	01/09/2008	25	7	6.01	6.00	1.146	0.95	47.50%
lunes, 25 de agosto de 2008	01/09/2008	26	7	6.00	6.04	1.696	1.40	1.18
	08/09/2008	27	14	6.01	6.00	1.811	1.50	4.49%
	08/09/2008	28	14	6.03	6.00	1.905	1.57	1.54
	22/09/2008	29	28	6.00	6.02	2.631	2.19	15.81%
	22/09/2008	30	28	6.01	6.00	2.215	1.84	2.01

Tabla 5.8 Cálculo de prueba de Módulo de Ruptura, probetas tipo "C"

Matriz para cálculo del Módulo de Ruptura (MR)								
Mezcla	fecha de prueba	probeta	edad	d (alto)	b (ancho)	P	MR	MR
fabricada el			días	cm	cm	KN	MPa	Promedio
1 kp = 0.00980665 KN; 1 kp/cm ² = 0.0980665 MPa								
C1	02/09/2008	1	7	6.01	6.00	0.580	0.48	12.60%
mañes, 26 de agosto de 2008	02/09/2008	2	7	6.00	6.01	0.652	0.54	0.51
	09/09/2008	3	14	6.02	6.00	0.840	0.70	2.06%
	09/09/2008	4	14	6.00	6.01	0.853	0.71	0.70
	23/09/2008	5	28	6.03	6.00	0.997	0.82	7.77%
	23/09/2008	6	28	6.00	6.03	0.915	0.76	0.79
C2	02/09/2008	7	7	6.01	6.00	1.183	0.98	12.79%
mañes, 26 de agosto de 2008	02/09/2008	8	7	6.00	6.01	1.030	0.86	0.92
	09/09/2008	9	14	6.01	6.00	1.363	1.13	4.43%
	09/09/2008	10	14	6.00	6.01	1.421	1.18	1.16
	23/09/2008	11	28	6.01	6.00	1.931	1.60	12.29%
	23/09/2008	12	28	6.00	6.00	1.688	1.41	1.51
C3	03/09/2008	13	7	6.00	6.01	1.365	1.14	6.02%
miércoles, 27 de agosto de 2008	03/09/2008	14	7	6.01	6.00	1.285	1.07	1.10
	10/09/2008	15	14	6.00	6.02	1.774	1.47	12.41%
	10/09/2008	16	14	6.02	6.00	1.559	1.29	1.38
	24/09/2008	17	28	6.00	6.01	1.983	1.65	6.01%
	24/09/2008	18	28	6.01	6.00	1.867	1.55	1.60
C4	03/09/2008	19	7	6.03	6.00	2.098	1.73	3.43%
miércoles, 27 de agosto de 2008	03/09/2008	20	7	6.00	6.03	2.016	1.67	1.70
	10/09/2008	21	14	6.02	6.00	2.266	1.88	3.21%
	10/09/2008	22	14	6.00	6.02	2.186	1.82	1.85
	24/09/2008	23	28	6.01	6.00	2.637	2.19	12.98%
	24/09/2008	24	28	6.00	6.01	2.291	1.91	2.05
C5	04/09/2008	25	7	6.00	6.01	2.365	1.97	1.81%
jueves, 28 de agosto de 2008	04/09/2008	26	7	6.01	6.00	2.326	1.93	1.95
	11/09/2008	27	14	6.00	6.02	2.224	1.85	14.57%
	11/09/2008	28	14	6.01	6.00	2.548	2.12	1.98
	25/09/2008	29	28	6.00	6.02	2.712	2.25	2.32%
	25/09/2008	30	28	6.01	6.00	2.775	2.30	2.28

5.5 Ensayo Cantabro

DATOS DE LAS PRUEBAS

Tabla 5.9 Cálculo de prueba de Ensayo Cantabro.

Probeta	W0	W1	Diferencia	% Desgaste	Reducción	Promedio
A51	442,20	334,50	107,70	24,36%	0,24	
A52	461,80	380,50	81,30	17,61%	0,18	
A53	467,50	380,20	87,30	18,67%	0,19	20,21%
A41	410,20	237,50	172,70	42,10%	0,42	
A42	439,30	310,70	128,60	29,27%	0,29	
A43	410,50	312,80	97,70	23,80%	0,24	31,73%
A31	400,50	27,20	373,30	93,21%	0,93	
A32	421,90	115,00	306,90	72,74%	0,73	
A33	446,50	52,80	393,70	88,17%	0,88	84,71%
A21	360,90	9,80	351,10	97,28%	0,97	
A22	394,20	9,10	385,10	97,69%	0,98	
A23	390,60	9,00	381,60	97,70%	0,98	97,56%
A11	389,10	9,00	380,10	97,69%	0,98	
A12	362,50	9,00	353,50	97,52%	0,98	
A13	382,60	9,00	373,60	97,65%	0,98	97,62%
B51	427,50	168,90	258,60	60,49%	0,60	
B52	388,70	31,50	357,20	91,90%	0,92	
B53	400,30	100,70	299,60	74,84%	0,75	75,74%
B41	402,70	30,00	372,70	92,55%	0,93	
B42	414,80	19,10	395,70	95,40%	0,95	
B43	412,40	21,70	390,70	94,74%	0,95	94,23%
B31	399,50	16,10	383,40	95,97%	0,96	
B32	358,10	11,70	346,40	96,73%	0,97	
B33	379,70	11,70	368,00	96,92%	0,97	96,54%

Tabla 5.9 Cálculo de prueba de Ensayo Cantabro (cont.)

Probeta	W0	W1	Diferencia	% Desgaste	Reducción	Promedio
B21	340.40	9.60	330.80	97.18%	0.97	
B22	336.30	9.90	326.40	97.06%	0.97	
B23	380.40	11.70	368.70	96.92%	0.97	97.05%
B11	336.50	8.70	327.80	97.41%	0.97	
B12	362.00	8.30	353.70	97.71%	0.98	
B13	363.30	10.50	352.80	97.11%	0.97	97.41%
C51	460.10	374.30	85.80	18.65%	0.19	
C52	448.00	376.90	71.10	15.87%	0.16	
C53	423.80	158.20	265.60	62.67%	0.23	19.06%
C41	412.00	322.50	89.50	21.72%	0.22	
C42	407.70	232.10	175.60	43.07%	0.43	
C43	435.70	262.30	173.40	39.80%	0.40	34.86%
C31	403.90	64.00	339.90	84.15%	0.84	
C32	386.40	41.90	344.50	89.16%	0.89	
C33	410.60	24.70	385.90	93.98%	0.94	89.10%
C21	386.00	97.80	288.20	74.66%	0.75	
C22	395.80	157.30	238.50	60.26%	0.60	
C23	392.40	141.10	251.30	64.04%	0.64	66.32%
C11	400.50	87.10	313.40	78.25%	0.78	
C12	414.00	56.10	357.90	86.45%	0.86	
C13	383.40	40.40	343.00	89.46%	0.89	84.72%

CAPÍTULO 6.- RESULTADOS DE LAS PRUEBAS Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS

6.1 Prueba de permeabilidad

Resultados de permeabilidad

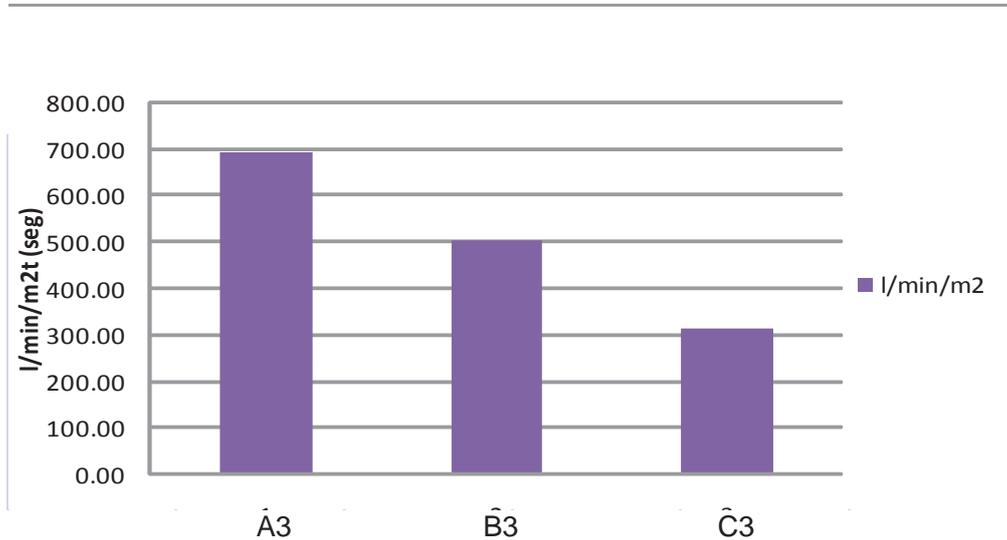


Fig. 6.1 Prueba de permeabilidad

Interpretación de los resultados de permeabilidad:

La permeabilidad en cada mezcla ensayada varía de mayor a menor de A3, B3 y C3, la mezcla con sólo cemento, A3, tiene una mayor permeabilidad, aunque los tres resultados están dentro de los parámetros esperados, entre 81 a 730 l/min/m² (ACI 522R-06). Esta prueba no es concluyente en cuanto a caracterización del concreto permeable, pero si debe cumplirse y en nuestro caso, así se ha cumplido.

6.2 Prueba de compresión simple

Resultados de la prueba de compresión simple

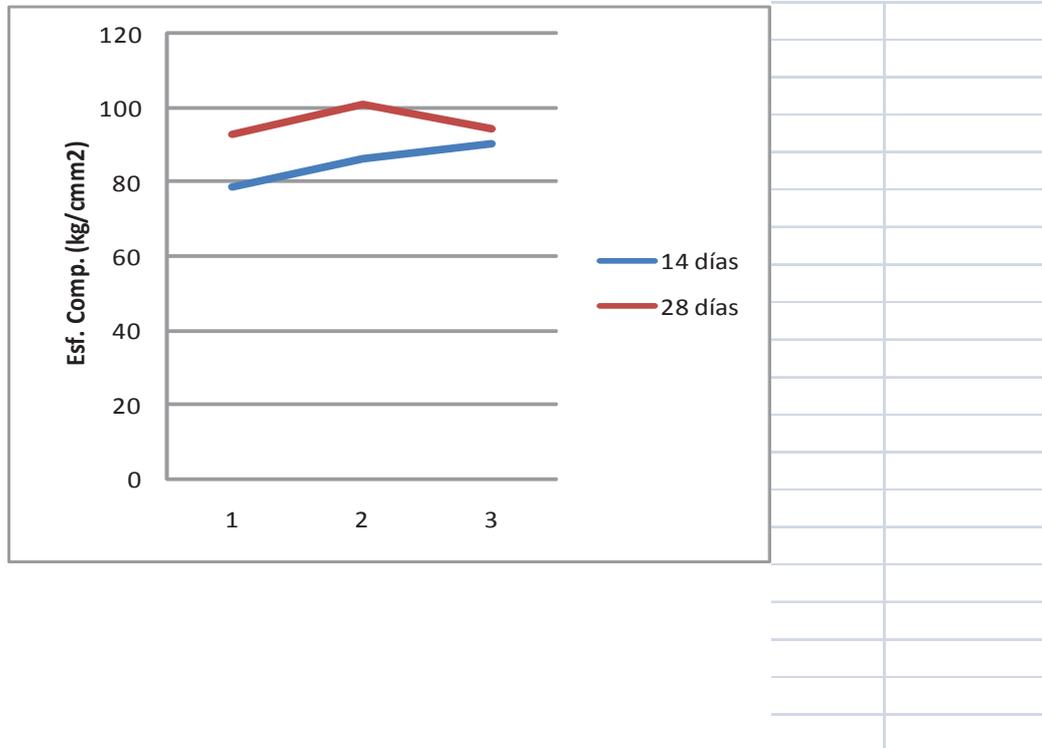


Fig. 6.2. Prueba de compresión.

Interpretación de los resultados de compresión

En la mezcla con sólo cemento y sin aditivos (Mezcla A5) obtuvimos resultados cercanos a los 10 MPa, (100 Kg/cm²), es decir la resistencia de un concreto pobre que sólo se puede usar en plantillas, pero no para elementos estructurales de los pavimentos. No es la finalidad de esta Tesis llegar a resultados óptimos sino sólo establecer los mecanismos de caracterización, se sabe que para aumentar la resistencia a la compresión se debe reducir la relación agua / cemento y esto sólo se puede hacer con aditivos fluidificantes y reductores de agua para concreto.

En pruebas previas en el Laboratorio de Servicios Integrados de Control de Calidad, SICCA, con una granulometría idéntica a la empleada en mezclas asfálticas abiertas y 450 Kg de cemento /m³ de concreto, obtuvimos resistencias a la compresión de más de 320 Kg/cm², pero también las probetas resultaron casi sólidas con poca permeabilidad, la granulometría finalmente elegida no compromete la permeabilidad y habrá que trabajar en futuras investigaciones con aditivos fluidificantes y reductores de agua para concreto, así como otras granulometrías y aditivos como polímeros como ya se ha mencionado antes.

6.3 Prueba de resistencia a la flexión (MR)

Área bajo la curva carga-deformación

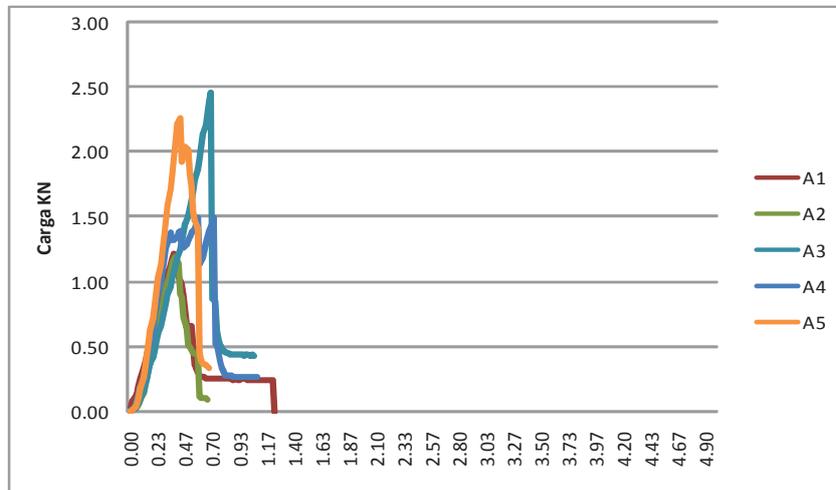


Fig. 6.3 Carga-Deformación probetas "A".

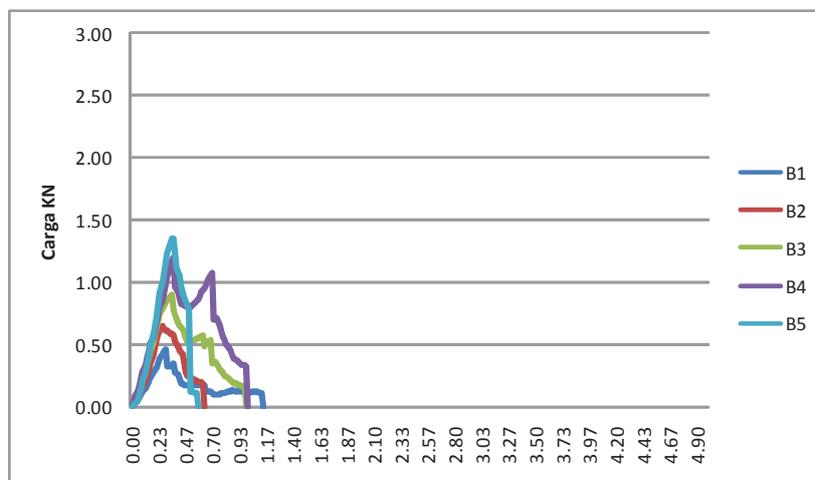


Fig. 6.4 Carga-Deformación probetas "B".

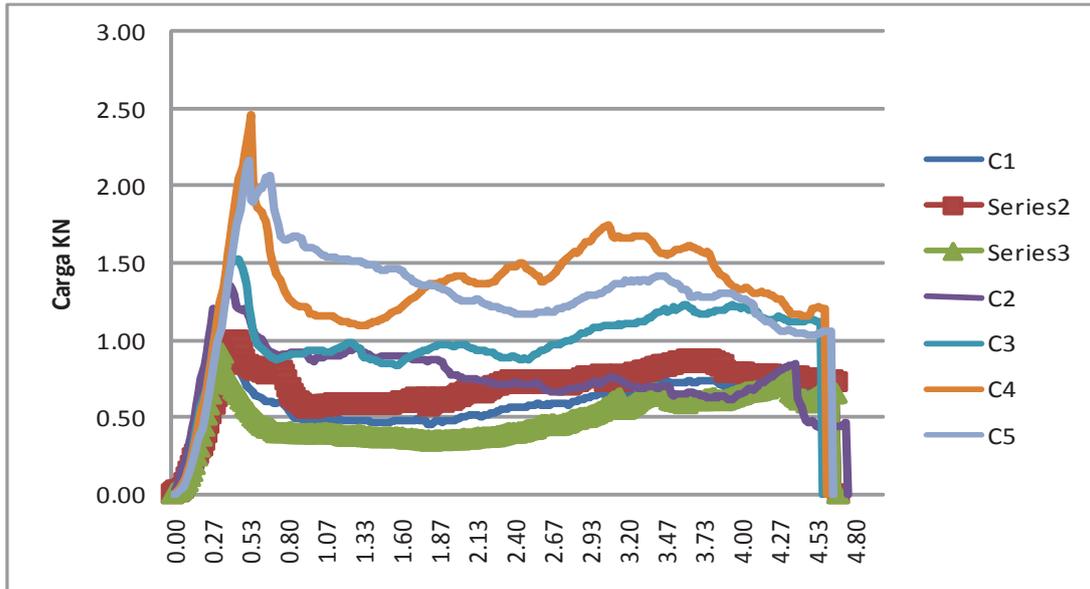


Fig. 6.5 Carga-Deformación probetas “C”.

Resultados de las pruebas de Módulo de Ruptura

Cemento Kg/m ³	Matriz de resultados: MR (28 días)		
	A (Mpa)	B (Mpa)	C (Mpa)
200	1.04	0.54	0.79
250	1.43	0.80	1.51
300	1.95	1.26	1.60
350	2.36	1.55	2.05
400 Kg/m ³	2.69	2.01	2.28

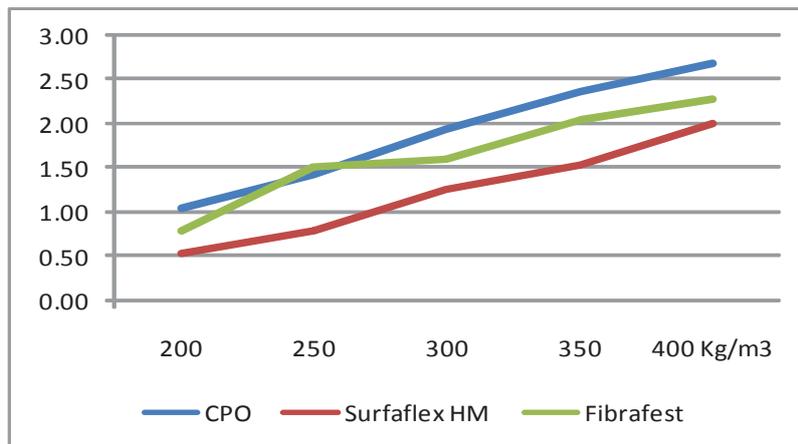


Fig. 6.6 Módulo de Ruptura todas las muestras.

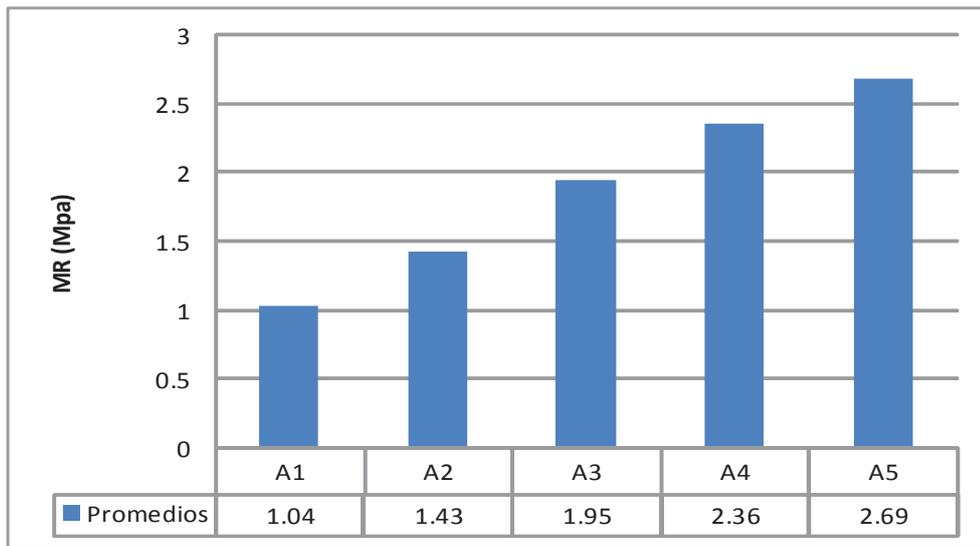


Fig. 6.7 Módulo de Ruptura probetas "A".

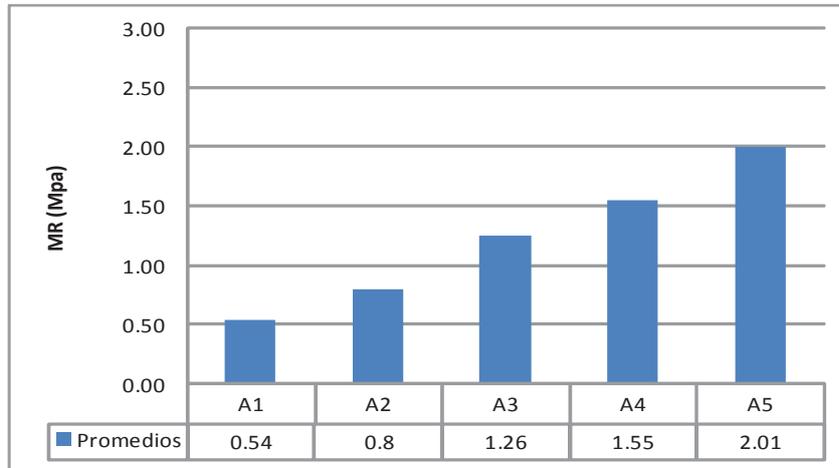


Fig. 6.8 Módulo de Ruptura probetas "B"

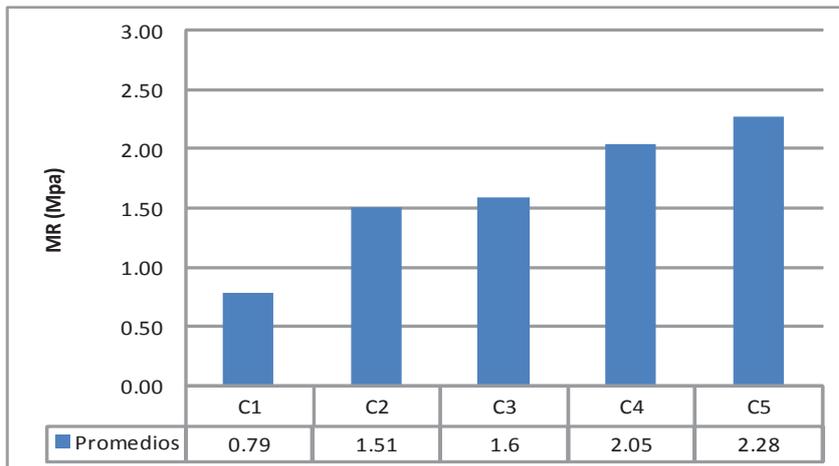


Fig. 6.9 Módulo de Ruptura probetas "C"

Interpretación de los resultados de Módulo de Ruptura

El Módulo de Ruptura (MR) se presenta entre 0.54 y 2.69 MPa (5.40 a 26.90 Kg/cm²), lo que indica que las probetas "A" que resistieron más carga son menos frágiles, también las áreas bajo la curva mayores que se pueden observar que las probetas "C" son menos frágiles, ya que permiten más deformación antes de fallar totalmente. Los valores requeridos de Módulos de Ruptura mínimos para áreas de tráfico peatonal son de 2.25 MPa (22.50 Kg/cm²) y para pavimentos de bajo tráfico vehicular de 4.2 MPa (42 Kg/cm²), Según método de diseño AASHTO (CEMEX concretos, 2006). Los concretos permeables A4, A5 y C5 se pueden emplear sólo en áreas de tráfico peatonal, para pavimentos de bajo tráfico vehicular habrá que seguir investigando con aditivos fluidificantes y reductores de agua, diversas granulometrías y polímeros.

6.4 Prueba de desgaste

Resultados de la prueba de desgaste

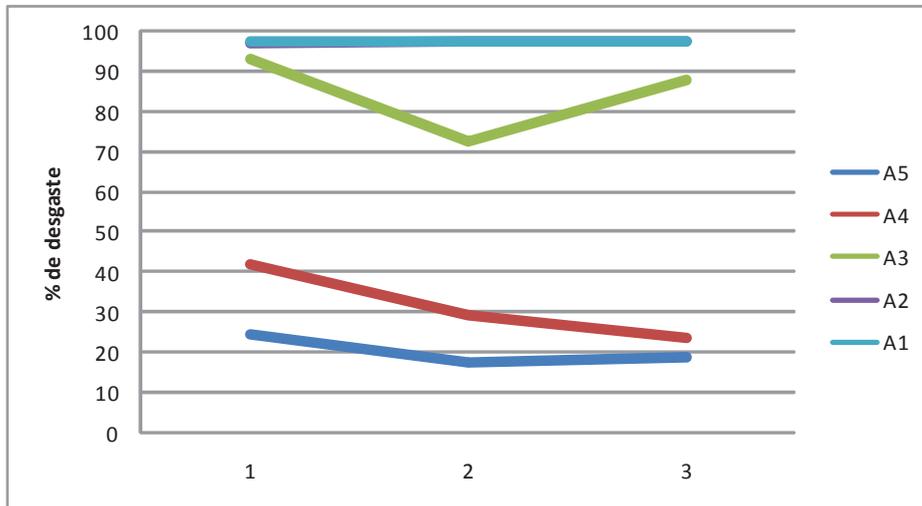


Fig. 6.10 Prueba de desgaste probetas "A"

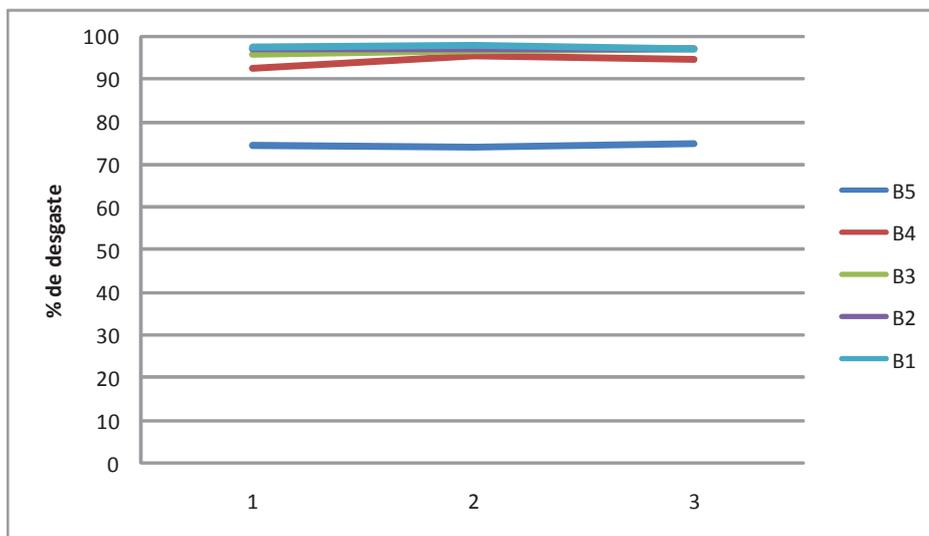


Fig. 6.11 Prueba de desgaste probetas "B".

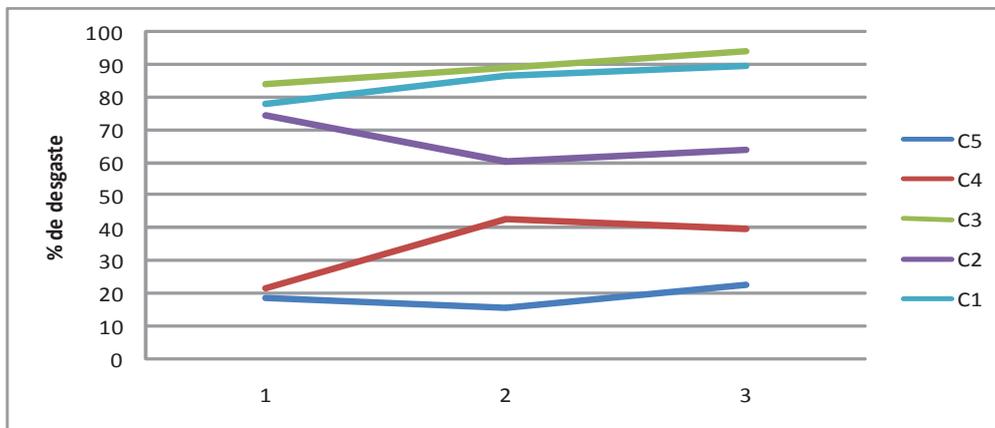


Fig. 6.12 Prueba de desgaste probetas "C"

Interpretación de los resultados de la prueba de desgaste

En la prueba de desgaste realizada mediante el ensayo Cantabro, se aprecia que las probetas de la mezcla "C" se desgastan menos, siguiendo las mezclas "A", y por último las mezclas "B" que sufrieron mucho desgaste. La diferencia entre A y C no es muy significativa (7.55%) por lo que se preferirán las A en cuanto a desempeño por desgaste, ya que las C serían mucho más caras, dada la cantidad de fibra que se empleó y si comparamos la probeta A5 con la C5 podremos observar que la probeta C5 tiene mayor porcentaje de desgaste, si sumamos a estos resultados los obtenidos en la prueba de Módulo de Ruptura donde la mezcla A5 fue superior al de la mezcla C5, optaremos por la mezcla A5.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

Se estableció un procedimiento adecuado para caracterizar el concreto permeable considerando parámetros mecanicistas, serán usando el Módulo de Ruptura y el porcentaje de desgaste obtenido por el método Cantabro, en el diseño del concreto permeable para pavimentos urbanos.

Se hizo una revisión exhaustiva de la bibliografía existente sobre concreto permeable a nivel publicado a la fecha. Concluyendo que ya es una realidad, el interés en el concreto permeable como una solución a urbanizaciones sustentables sin olvidar la economía.

Los parámetros de caracterización son el desgaste y la resistencia a la flexión porque son los principales parámetros de diseño en los pavimentos.

Los Ensayos utilizados para el porcentaje de desgaste son el ensayo Cantabro, del **NLT-352/86**, y para el Módulo de Ruptura (MR), usamos las normas de la American Society for Testing Materials que se refieren a la fabricación y prueba de vigas para obtener el Módulo de Ruptura **ASTM C 42-03** y **ASTM C 78-02**.

Los agregados empleados fueron seleccionados con base en trabajos ya realizados y normados por la SCT para las carpetas asfálticas abiertas, usando la granulometría en ellos empleada, con la salvedad de no incluir las gravas mayores a 3/4" ni todas las arenas y finos, por lo que se usaron los agregados triturados incluidos en **ASTM C 33 No. 67** (3/4" a No. 4). El agregado triturado local fue andesita, según apreciación a simple vista del banco.

Se usaron distintos aditivos como punto de comparación y observamos el comportamiento de estos en las mezclas de estudio, usamos cemento sólo, látex y microfibra virgen de polipropileno, concluyendo que las mezclas requieren otros aditivos diferentes a los empleados.

Se recomienda usar las mezclas A4 (MR = 2.36 MPa) y A5 (MR = 2.69 MPa) para áreas de tráfico peatonal, es decir donde no se tenga tráfico de vehículos, la mezcla C5 (MR = 2.28 MPa) no se recomienda porque sería muy cara y el desempeño observado no lo justifica.

En futuras líneas de investigación se recomienda emplear aditivos del tipo "D" reductores de agua y retardantes con la dosificación requerida para que la manejabilidad de la mezcla permanezca durante dos (2) horas a partir de la finalización del mezclado a la temperatura estándar de veintitrés grados centígrados (23° C) y no se produzca el fraguado después de cuatro (4) horas a partir de la finalización del mezclado. Los aditivos deberán ser certificados por la casa productora. Para asegurar la trabajabilidad de la mezcla, también se pueden utilizar un agente inclusor de aire, con los requisitos que señala la norma ASTM C 260.

En subsecuentes investigaciones se recomienda revisar cuanto varía el Módulo de Ruptura considerando "d" (espesor del pavimento) en diseños específicos de pavimentos y conservando 6 cm como "b" dado que se propone 3/4" como tamaño máximo de agregado, $19.05 \text{ mm} \times 3 = 57.15 \text{ mm}$ aproximadamente 60 mm.

REFERENCIAS

NORMATIVA

ACI 201.2R Guía para concreto durable

ACI 301 Especificaciones para el concreto estructural

ACI 325.12R Guía para el diseño de los pavimentos de concreto articulados para las calles y los caminos locales

ACI 330R Guía para el diseño y construcción de estacionamientos de concreto

ACI 522R-06 Concreto Permeable, Abril 2006

ASTM C78-94 Esfuerzo de Flexión en concretos (usando barra simple con tres puntos de carga)

ASTM C192/C 192M-95 Elaboración y curado de concreto en las pruebas de laboratorio

ASTM C260 Especifications for Air Entraining Admixtures for Concrete

ASTM C494 Especificación estándar para las adiciones químicas para el concreto

ASTM C1116 Especificación de concreto reforzado con fibra.

ASTM C-1399 Prueba para determinar el esfuerzo promedio residual del concreto reforzado con fibra.

BOE-A-2003-22787, BOE número 297 de 12 de diciembre de 2003, Tablas del Catálogo Español para diseño de pavimentos.

SCT M-MMP-404-006/02 Desgaste mediante la prueba de Los Ángeles de materiales pétreos para mezclas asfálticas

BIBLIOGRAFÍA

Axim Italcementi Group, (2006) "Pervious Concrete, Practical Application of Pervious Concrete: Mix Designs that are workable"; NRMCA Conference, U.S.A.

Brown, D. (2003) "Pervious Concrete Pavement: A Win-Win System", Revista Concrete Technology Today, Pórtland Ordinary (OPC) Cement Association, U.S.A.

Brown, H. J., (2008) "Pervious Concrete Research Compilation Past, Present and Future"; Concrete Industry Management y Middle Tennessee State University, U.S.A.

De Buen Néstor (2005). "Presentación del Ecocreto ®"

Atlantis ®, <http://www.atlantiscorp.com.au> (2006).

Cackler, E. Thomas, Ferragut Theodore, Harrington Dale S., Rasmussen R. Otto, (2006) "Evaluation of U.S. and European Concrete Pavement Noise Reduction Methods"; U.S.A.

California Stormwater BMP Handbook, (2003) "Pervious Pavements"; U.S.A.

Carrillo, C.A. y Orellana V. I., (2003) "Algunas consideraciones sobre aspectos relacionados con el Concreto Compactado con Rodillo (CCR) empleado en la Construcción de Pavimentos"; El Salvador.

Cemex Concretos, (2006) "Especificaciones de Materiales"; México.

Cañas Lazo, M. A. y Retana Martínez, M. E., (2001) "Establecimiento de una Relación entre el Módulo de Ruptura (f_r) y la Resistencia a la Compresión (f'_c) para Mezclas de Concreto Hidráulico en El Salvador"; El Salvador.

Covarrubias, J.P., (2005) "Disminución del Alabeo en: Pavimentos Urbanos y Pisos Industriales de Hormigón"; Chile.

Farny, J., (2004) "Pervious Concrete Mixtures and Properties", Revista Concrete Technology Today, Portland Ordinary (OPC) Cement Association, U.S.A.

Garnica Anguas, P. y Correa, A., (2004) "Conceptos Mecanicistas en Pavimentos", Publicación Técnica No. 258 IMT, México.

Ghafoori, Nader, Building and Nonpavement Applications of No-Fines Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, November 1995.

Huffman, D., (2005) "Understanding Pervious Concrete", Revista: Construction the Specifier, U.S.A.

Juárez Badillo, E. y Rico Rodríguez, A., (2005), "Mecánica de Suelos" Tomo I Fundamentos de la Mecánica de Suelos; Editorial Limusa; México.

Mood, G., (2006) "Fiber-Reinforced Pervious Pavement"; U.S.A.

Mulligan, A. M., (2005) "Attainable Compressive Strength of Pervious Concrete Paving Systems"; Tesis Master University of Central Florida, U.S.A.

National Concrete Consortium, (2008) "Green Highways: American Concrete Paving Industry's Perspective"; U.S.A.

National Concrete Pavement Technology Center, (2006) "Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates"; U.S.A.

Norb Delatte, P.E., (2006) "Developing a Structural Design Method for Pervious Concrete Pavement"; Cleveland State University, U.S.A.

Rico Rodríguez, A., Téllez Gutiérrez, R., y Garnica Anguas, P., (1998) "Pavimentos Flexibles. Problemática, Metodologías de Diseño y Tendencias", Publicación Técnica No. 104 IMT, México.

Schmitt, Heinrich y Heene, Andreas (2004), Tratado de Construcción. Editorial Gustavo Gili S.A., séptima edición, Barcelona.

Wang, K., Schaefer, V. R., Kevern, J. T., y Suleiman, M.T., (2006) "Development of Mix Proportion for Functional and Durable Pervious Concrete"; U.S.A.

ANEXOS

Prueba de Módulo de Ruptura

Tabla 9.1 Datos de prueba de Módulo de Ruptura probetas tipo "A"

Pruebas a 28 días: probetas a tipo A					
	PROM A1	PROM A2	PROM A3	PROM A4	PROM A5
DESP	CARGA	CARGA	CARGA	CARGA	CARGA
mm	KN	KN	KN	KN	KN
max:	1.211	1.192	2.457	1.499	2.260
área	0.269	0.171	0.236	0.410	0.360
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.017	0.033	0.007	0.007	0.007	0.006
0.033	0.079	0.011	0.009	0.016	0.013
0.050	0.112	0.019	0.027	0.047	0.036
0.067	0.155	0.036	0.043	0.095	0.069
0.083	0.204	0.063	0.073	0.139	0.120
0.100	0.257	0.093	0.110	0.197	0.180
0.117	0.318	0.138	0.156	0.260	0.255
0.133	0.375	0.191	0.204	0.331	0.341
0.150	0.422	0.253	0.256	0.409	0.428
0.167	0.481	0.322	0.309	0.487	0.522
0.183	0.537	0.385	0.366	0.569	0.623
0.200	0.597	0.463	0.421	0.656	0.724
0.217	0.664	0.535	0.479	0.740	0.820
0.233	0.733	0.604	0.540	0.827	0.926
0.250	0.803	0.679	0.602	0.916	1.028
0.267	0.867	0.748	0.657	1.002	1.134
0.283	0.930	0.822	0.717	1.088	1.246
0.300	0.989	0.896	0.779	1.177	1.354
0.317	1.041	0.963	0.840	1.267	1.471
0.333	1.081	1.031	0.907	1.336	1.589
0.350	1.129	1.090	0.968	1.387	1.713
0.367	1.174	1.150	1.029	1.328	1.834
0.383	1.211	1.174	1.078	1.326	1.958
0.400	1.088	1.192	1.129	1.346	2.089
0.417	1.024	1.136	1.188	1.378	2.215
0.433	1.004	0.900	1.248	1.400	2.260
0.450	0.969	0.880	1.313	1.262	1.922
0.467	0.883	0.729	1.383	1.269	2.003
0.483	0.667	0.651	1.454	1.285	2.044
0.500	0.650	0.511	1.505	1.321	2.020
0.517	0.662	0.495	1.569	1.345	1.826
0.533	0.661	0.469	1.624	1.378	1.736
0.550	0.357	0.448	1.697	1.408	1.540

0.567	0.331	0.435	1.780	1.451	1.471
0.583	0.301	0.430	1.866	1.499	1.410
0.600	0.277	0.112	1.948	1.137	0.456
0.617	0.268	0.104	2.036	1.186	0.393
0.633	0.262	0.101	2.128	1.240	0.366
0.650	0.259	0.101	2.207	1.296	0.355
0.667	0.257	0.093	2.299	1.344	0.344
0.683	0.255		2.384	1.401	0.336
0.700	0.255		2.457	1.452	
0.717	0.255		0.864	1.497	
0.733	0.255		0.845	0.526	
0.750	0.253		0.623	0.515	
0.767	0.251		0.559	0.380	
0.783	0.251		0.510	0.340	
0.800	0.251		0.464	0.310	
0.817	0.251		0.458	0.282	
0.833	0.253		0.449	0.279	
0.850	0.249		0.449	0.273	
0.867	0.249		0.446	0.273	
0.883	0.248		0.446	0.271	
0.900	0.249		0.446	0.271	
0.917	0.248		0.442	0.271	
0.933	0.248		0.442	0.269	
0.950	0.249		0.437	0.269	
0.967	0.249		0.440	0.266	
0.983	0.249		0.433	0.268	
1.000	0.248		0.440	0.264	
1.017	0.248		0.440	0.268	
1.033	0.248		0.433	0.268	
1.050	0.248		0.437	0.264	
1.067	0.245		0.433	0.266	
1.083	0.248			0.264	
1.100	0.245				
1.117	0.243				
1.133	0.245				
1.150	0.245				
1.167	0.243				
1.183	0.243				
1.200	0.243				
1.217	0.243				
1.233	0.000				

Tabla 9.2 Datos de prueba de Módulo de Ruptura probetas tipo "B"

Pruebas a 28 días: probetas a tipo B					
	PROM B1	PROM B2	PROM B3	PROM B4	PROM B5
DESP	CARGA	CARGA	CARGA	CARGA	CARGA
mm	KN	KN	KN	KN	KN
max:	0.458	0.644	0.894	1.205	1.352
área	0.100	0.108	0.135	0.334	0.188
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.017	0.026	0.017	0.049	0.045	0.009
0.033	0.041	0.032	0.080	0.082	0.022
0.050	0.058	0.056	0.118	0.128	0.056
0.067	0.078	0.090	0.162	0.181	0.096
0.083	0.101	0.122	0.202	0.234	0.153
0.100	0.123	0.160	0.248	0.282	0.212
0.117	0.149	0.205	0.301	0.336	0.277
0.133	0.173	0.247	0.350	0.397	0.348
0.150	0.202	0.292	0.401	0.453	0.417
0.167	0.236	0.348	0.451	0.509	0.497
0.183	0.268	0.404	0.512	0.554	0.571
0.200	0.300	0.470	0.575	0.619	0.654
0.217	0.307	0.528	0.631	0.679	0.731
0.233	0.343	0.578	0.688	0.735	0.817
0.250	0.385	0.620	0.739	0.798	0.910
0.267	0.422	0.644	0.784	0.859	1.001
0.283	0.444	0.619	0.806	0.925	1.088
0.300	0.458	0.606	0.832	0.993	1.172
0.317	0.328	0.608	0.862	1.057	1.246
0.333	0.324	0.587	0.881	1.116	1.315
0.350	0.335	0.582	0.894	1.175	1.352
0.367	0.341	0.574	0.771	1.205	1.352
0.383	0.277	0.523	0.727	0.967	1.233
0.400	0.254	0.481	0.672	0.932	1.108
0.417	0.218	0.449	0.641	0.863	1.047
0.433	0.192	0.433	0.631	0.833	0.962
0.450	0.186	0.424	0.620	0.828	0.913
0.467	0.179	0.275	0.542	0.817	0.878
0.483	0.175	0.249	0.526	0.808	0.813
0.500	0.179	0.242	0.525	0.803	0.783
0.517	0.177	0.230	0.526	0.808	0.123
0.533	0.173	0.221	0.531	0.822	0.123
0.550	0.175	0.216	0.533	0.840	0.116
0.567	0.173	0.214	0.541	0.850	0.112
0.583	0.169	0.203	0.549	0.869	
0.600	0.171	0.196	0.561	0.895	
0.617	0.171	0.191	0.573	0.926	

0.633	0.177		0.490	0.954	
0.650	0.119		0.506	0.980	
0.667	0.119		0.522	1.011	
0.683	0.121		0.537	1.043	
0.700	0.112		0.350	1.075	
0.717	0.097		0.360	0.701	
0.733	0.097		0.357	0.720	
0.750	0.101		0.326	0.714	
0.767	0.102		0.299	0.651	
0.783	0.106		0.283	0.599	
0.800	0.109		0.268	0.566	
0.817	0.116		0.252	0.535	
0.833	0.119		0.240	0.504	
0.850	0.123		0.229	0.480	
0.867	0.126		0.206	0.458	
0.883	0.130		0.195	0.413	
0.900	0.126		0.190	0.391	
0.917	0.126		0.185	0.380	
0.933	0.130		0.175	0.370	
0.950	0.128		0.170	0.350	
0.967	0.128		0.167	0.340	
0.983	0.128		0.164	0.333	
1.000	0.126		0.000	0.329	
1.017	0.117				
1.033	0.117				
1.050	0.121				
1.067	0.123				
1.083	0.123				
1.100	0.119				
1.117	0.112				
1.133	0.108				

Tabla 9.3 Datos de prueba de Módulo de Ruptura probetas tipo "C"

Pruebas a 28 días: probetas a tipo C					
	PROM C1	PROM C2	PROM C3	PROM C4	PROM C5
DESP	CARGA	CARGA	CARGA	CARGA	CARGA
mm	KN	KN	KN	KN	KN
max:	0.854	1.350	1.521	2.464	2.161
area:	1.385	1.817	2.282	3.125	2.998
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.017	0.009	0.032	0.007	0.009	0.004
0.033	0.015	0.067	0.019	0.022	0.017
0.050	0.024	0.110	0.039	0.037	0.028
0.067	0.035	0.166	0.067	0.065	0.054
0.083	0.062	0.227	0.104	0.106	0.088
0.100	0.093	0.290	0.155	0.155	0.123
0.117	0.127	0.351	0.208	0.203	0.161
0.133	0.166	0.424	0.281	0.259	0.211
0.150	0.208	0.497	0.359	0.322	0.259
0.167	0.253	0.579	0.424	0.387	0.313
0.183	0.302	0.660	0.501	0.457	0.370
0.200	0.342	0.744	0.575	0.530	0.435
0.217	0.395	0.831	0.653	0.614	0.504
0.233	0.456	0.921	0.699	0.691	0.576
0.250	0.517	1.015	0.783	0.780	0.655
0.267	0.582	1.109	0.868	0.868	0.736
0.283	0.648	1.201	0.956	0.959	0.821
0.300	0.707	1.176	1.046	1.053	0.908
0.317	0.765	1.123	1.138	1.150	0.997
0.333	0.815	1.178	1.226	1.244	1.086
0.350	0.854	1.228	1.324	1.349	1.181
0.367	0.819	1.275	1.419	1.452	1.276
0.383	0.831	1.318	1.490	1.559	1.370
0.400	0.838	1.350	1.496	1.660	1.466
0.417	0.831	1.328	1.499	1.763	1.553
0.433	0.835	1.291	1.518	1.858	1.650
0.450	0.833	1.212	1.521	1.949	1.747
0.467	0.813	1.197	1.520	2.044	1.845
0.483	0.768	1.196	1.465	2.124	1.949
0.500	0.736	1.204	1.410	2.206	2.044
0.517	0.703	1.183	1.347	2.295	2.122
0.533	0.696	1.155	1.216	2.383	2.161
0.550	0.681	1.106	1.138	2.464	1.906
0.567	0.662	1.059	1.048	2.029	1.890
0.583	0.649	1.026	1.012	1.894	1.927
0.600	0.641	1.014	0.975	1.860	1.971

0.617	0.636	1.001	0.950	1.836	1.979
0.633	0.621	0.980	0.928	1.796	2.005
0.650	0.612	0.952	0.917	1.774	2.047
0.667	0.605	0.932	0.904	1.704	2.051
0.683	0.607	0.924	0.896	1.577	2.065
0.700	0.605	0.919	0.889	1.514	1.970
0.717	0.597	0.911	0.886	1.475	1.842
0.733	0.595	0.907	0.876	1.434	1.744
0.750	0.600	0.902	0.882	1.391	1.666
0.767	0.597	0.905	0.888	1.350	1.653
0.783	0.586	0.910	0.893	1.315	1.648
0.800	0.567	0.912	0.891	1.297	1.646
0.817	0.545	0.911	0.900	1.270	1.654
0.833	0.528	0.919	0.902	1.253	1.661
0.850	0.509	0.921	0.907	1.238	1.667
0.867	0.499	0.918	0.902	1.233	1.667
0.883	0.497	0.924	0.904	1.224	1.660
0.900	0.493	0.924	0.910	1.220	1.654
0.917	0.484	0.923	0.913	1.215	1.609
0.933	0.480	0.917	0.922	1.214	1.600
0.950	0.476	0.898	0.928	1.207	1.598
0.967	0.479	0.873	0.928	1.172	1.598
0.983	0.478	0.867	0.931	1.174	1.596
1.000	0.476	0.865	0.931	1.176	1.583
1.017	0.481	0.878	0.930	1.160	1.568
1.033	0.479	0.882	0.933	1.153	1.559
1.050	0.481	0.887	0.933	1.155	1.552
1.067	0.486	0.892	0.922	1.157	1.547
1.083	0.486	0.896	0.915	1.161	1.538
1.100	0.486	0.900	0.919	1.153	1.536
1.117	0.487	0.902	0.922	1.155	1.532
1.133	0.487	0.900	0.930	1.155	1.529
1.150	0.487	0.900	0.941	1.146	1.525
1.167	0.489	0.902	0.947	1.131	1.522
1.183	0.487	0.906	0.952	1.125	1.525
1.200	0.481	0.911	0.962	1.122	1.527
1.217	0.477	0.921	0.971	1.123	1.523
1.233	0.478	0.933	0.976	1.120	1.517
1.250	0.480	0.938	0.979	1.113	1.516
1.267	0.481	0.938	0.978	1.109	1.514
1.283	0.481	0.943	0.952	1.103	1.510
1.300	0.485	0.945	0.940	1.101	1.508
1.317	0.487	0.933	0.941	1.094	1.507
1.333	0.481	0.924	0.894	1.094	1.497
1.350	0.482	0.917	0.889	1.098	1.492
1.367	0.484	0.913	0.888	1.101	1.488
1.383	0.482	0.907	0.882	1.107	1.484
1.400	0.474	0.897	0.876	1.114	1.488
1.417	0.474	0.889	0.866	1.118	1.484

1.433	0.476	0.887	0.858	1.123	1.466
1.450	0.472	0.887	0.854	1.131	1.458
1.467	0.472	0.892	0.845	1.139	1.452
1.483	0.473	0.891	0.843	1.144	1.452
1.500	0.476	0.891	0.846	1.151	1.455
1.517	0.476	0.893	0.844	1.159	1.460
1.533	0.476	0.893	0.841	1.169	1.460
1.550	0.477	0.895	0.844	1.181	1.460
1.567	0.480	0.898	0.832	1.192	1.460
1.583	0.482	0.898	0.840	1.200	1.460
1.600	0.480	0.894	0.850	1.211	1.451
1.617	0.483	0.894	0.861	1.225	1.447
1.633	0.480	0.891	0.870	1.233	1.421
1.650	0.478	0.892	0.878	1.248	1.410
1.667	0.481	0.887	0.889	1.257	1.395
1.683	0.486	0.882	0.893	1.272	1.378
1.700	0.487	0.873	0.903	1.284	1.371
1.717	0.489	0.875	0.911	1.294	1.365
1.733	0.484	0.874	0.917	1.309	1.358
1.750	0.484	0.871	0.925	1.324	1.354
1.767	0.483	0.870	0.932	1.338	1.356
1.783	0.483	0.867	0.936	1.346	1.354
1.800	0.462	0.865	0.937	1.356	1.359
1.817	0.463	0.867	0.945	1.363	1.356
1.833	0.471	0.868	0.954	1.367	1.350
1.850	0.476	0.870	0.960	1.369	1.350
1.867	0.482	0.867	0.965	1.373	1.341
1.883	0.487	0.865	0.970	1.374	1.333
1.900	0.472	0.858	0.967	1.376	1.330
1.917	0.482	0.823	0.969	1.382	1.322
1.933	0.482	0.805	0.973	1.391	1.309
1.950	0.487	0.803	0.964	1.399	1.302
1.967	0.481	0.779	0.962	1.410	1.291
1.983	0.485	0.770	0.962	1.418	1.278
2.000	0.491	0.768	0.967	1.421	1.270
2.017	0.493	0.761	0.969	1.414	1.265
2.033	0.502	0.755	0.971	1.411	1.255
2.050	0.508	0.749	0.967	1.415	1.250
2.067	0.507	0.753	0.965	1.396	1.250
2.083	0.514	0.751	0.953	1.390	1.248
2.100	0.517	0.751	0.945	1.386	1.251
2.117	0.521	0.748	0.939	1.381	1.257
2.133	0.521	0.748	0.938	1.371	1.259
2.150	0.524	0.742	0.936	1.363	1.259
2.167	0.508	0.736	0.933	1.363	1.250
2.183	0.511	0.736	0.934	1.367	1.237
2.200	0.519	0.734	0.927	1.373	1.234
2.217	0.524	0.731	0.922	1.371	1.225
2.233	0.526	0.729	0.922	1.373	1.219

2.250	0.532	0.725	0.917	1.382	1.216
2.267	0.536	0.716	0.909	1.385	1.212
2.283	0.539	0.718	0.900	1.400	1.212
2.300	0.546	0.714	0.895	1.411	1.209
2.317	0.550	0.714	0.881	1.426	1.200
2.333	0.554	0.711	0.886	1.448	1.195
2.350	0.561	0.713	0.888	1.459	1.192
2.367	0.563	0.712	0.887	1.477	1.189
2.383	0.563	0.714	0.895	1.482	1.185
2.400	0.569	0.718	0.891	1.473	1.178
2.417	0.565	0.722	0.883	1.484	1.172
2.433	0.565	0.723	0.878	1.496	1.168
2.450	0.565	0.716	0.876	1.502	1.164
2.467	0.564	0.711	0.873	1.507	1.164
2.483	0.575	0.711	0.880	1.492	1.164
2.500	0.577	0.714	0.876	1.464	1.169
2.517	0.580	0.716	0.889	1.452	1.168
2.533	0.578	0.716	0.890	1.439	1.164
2.550	0.578	0.720	0.904	1.432	1.171
2.567	0.590	0.720	0.912	1.417	1.174
2.583	0.590	0.716	0.917	1.419	1.177
2.600	0.586	0.701	0.926	1.382	1.179
2.617	0.588	0.687	0.932	1.380	1.181
2.633	0.589	0.677	0.941	1.391	1.185
2.650	0.587	0.676	0.952	1.400	1.179
2.667	0.590	0.668	0.963	1.415	1.179
2.683	0.591	0.662	0.965	1.428	1.178
2.700	0.590	0.664	0.967	1.447	1.187
2.717	0.593	0.666	0.969	1.460	1.198
2.733	0.591	0.664	0.973	1.479	1.205
2.750	0.597	0.667	0.979	1.502	1.214
2.767	0.593	0.674	0.989	1.520	1.212
2.783	0.587	0.679	0.995	1.532	1.215
2.800	0.599	0.682	0.999	1.553	1.224
2.817	0.605	0.685	1.002	1.568	1.225
2.833	0.606	0.686	1.008	1.579	1.239
2.850	0.610	0.684	1.019	1.563	1.250
2.867	0.616	0.690	1.030	1.579	1.260
2.883	0.622	0.694	1.037	1.600	1.272
2.900	0.626	0.694	1.047	1.616	1.281
2.917	0.628	0.701	1.053	1.637	1.291
2.933	0.634	0.707	1.061	1.642	1.291
2.950	0.638	0.718	1.066	1.655	1.289
2.967	0.641	0.725	1.075	1.670	1.285
2.983	0.645	0.731	1.077	1.685	1.291
3.000	0.650	0.707	1.079	1.702	1.296
3.017	0.654	0.715	1.081	1.713	1.308
3.033	0.661	0.727	1.087	1.726	1.315
3.050	0.649	0.742	1.090	1.735	1.321

3.067	0.657	0.754	1.089	1.750	1.332
3.083	0.668	0.757	1.086	1.728	1.341
3.100	0.674	0.755	1.094	1.679	1.352
3.117	0.678	0.753	1.091	1.666	1.359
3.133	0.692	0.750	1.095	1.676	1.365
3.150	0.699	0.746	1.099	1.676	1.363
3.167	0.642	0.734	1.097	1.663	1.369
3.183	0.646	0.726	1.099	1.664	1.382
3.200	0.657	0.718	1.102	1.665	1.378
3.217	0.667	0.701	1.105	1.666	1.376
3.233	0.677	0.701	1.107	1.666	1.383
3.250	0.688	0.701	1.106	1.670	1.380
3.267	0.683	0.699	1.109	1.676	1.382
3.283	0.691	0.692	1.111	1.676	1.378
3.300	0.707	0.690	1.115	1.674	1.383
3.317	0.714	0.690	1.118	1.678	1.386
3.333	0.719	0.690	1.125	1.676	1.385
3.350	0.720	0.696	1.137	1.666	1.380
3.367	0.727	0.701	1.146	1.654	1.393
3.383	0.736	0.697	1.155	1.637	1.403
3.400	0.738	0.695	1.166	1.614	1.408
3.417	0.735	0.688	1.177	1.594	1.415
3.433	0.731	0.690	1.183	1.573	1.418
3.450	0.736	0.696	1.195	1.566	1.410
3.467	0.734	0.701	1.204	1.561	1.406
3.483	0.741	0.701	1.174	1.557	1.395
3.500	0.728	0.696	1.191	1.563	1.393
3.517	0.725	0.649	1.187	1.568	1.373
3.533	0.725	0.644	1.211	1.574	1.365
3.550	0.727	0.646	1.186	1.585	1.360
3.567	0.727	0.645	1.207	1.587	1.355
3.583	0.729	0.648	1.220	1.589	1.325
3.600	0.727	0.655	1.226	1.600	1.324
3.617	0.729	0.657	1.232	1.605	1.322
3.633	0.738	0.658	1.211	1.617	1.319
3.650	0.742	0.666	1.207	1.609	1.282
3.667	0.731	0.660	1.201	1.600	1.281
3.683	0.733	0.653	1.181	1.598	1.285
3.700	0.736	0.649	1.177	1.594	1.287
3.717	0.738	0.647	1.166	1.594	1.274
3.733	0.742	0.643	1.166	1.572	1.278
3.750	0.748	0.638	1.160	1.568	1.278
3.767	0.745	0.631	1.170	1.572	1.276
3.783	0.745	0.625	1.181	1.560	1.276
3.800	0.746	0.624	1.183	1.533	1.282
3.817	0.741	0.628	1.179	1.493	1.293
3.833	0.727	0.634	1.185	1.470	1.289
3.850	0.724	0.632	1.190	1.448	1.296
3.867	0.720	0.632	1.196	1.430	1.298

3.883	0.703	0.632	1.192	1.414	1.300
3.900	0.703	0.629	1.198	1.399	1.305
3.917	0.706	0.616	1.212	1.382	1.296
3.933	0.711	0.613	1.215	1.373	1.296
3.950	0.712	0.619	1.226	1.354	1.291
3.967	0.716	0.631	1.209	1.345	1.281
3.983	0.716	0.644	1.213	1.337	1.274
4.000	0.718	0.649	1.207	1.332	1.266
4.017	0.722	0.654	1.213	1.331	1.265
4.033	0.720	0.658	1.211	1.339	1.259
4.050	0.720	0.669	1.197	1.338	1.255
4.067	0.722	0.683	1.194	1.330	1.244
4.083	0.718	0.686	1.194	1.317	1.231
4.100	0.720	0.681	1.197	1.308	1.168
4.117	0.720	0.687	1.183	1.308	1.160
4.133	0.719	0.703	1.156	1.309	1.157
4.150	0.723	0.718	1.142	1.313	1.142
4.167	0.727	0.727	1.142	1.311	1.131
4.183	0.727	0.733	1.131	1.311	1.120
4.200	0.731	0.744	1.132	1.304	1.114
4.217	0.734	0.757	1.130	1.296	1.109
4.233	0.735	0.766	1.135	1.289	1.092
4.250	0.742	0.775	1.144	1.280	1.081
4.267	0.744	0.785	1.148	1.270	1.071
4.283	0.751	0.798	1.144	1.263	1.061
4.300	0.756	0.806	1.144	1.243	1.060
4.317	0.760	0.816	1.131	1.231	1.062
4.333	0.764	0.822	1.129	1.213	1.063
4.350	0.708	0.835	1.114	1.190	1.061
4.367	0.707	0.840	1.115	1.175	1.051
4.383	0.697	0.838	1.121	1.170	1.044
4.400	0.694	0.844	1.118	1.168	1.046
4.417	0.683	0.630	1.120	1.164	1.048
4.433	0.683	0.567	1.116	1.159	1.045
4.450	0.681	0.519	1.119	1.157	1.039
4.467	0.670	0.484	1.125	1.157	1.034
4.483	0.677	0.472	1.131	1.162	1.030
4.500	0.681	0.470	1.124	1.166	1.028
4.517	0.688	0.474	1.126	1.206	1.034
4.533	0.694	0.461	1.122	1.211	1.037
4.550	0.703	0.443	1.120	1.214	1.042
4.567	0.706	0.435	1.119	1.211	1.046
4.583	0.700	0.437	0.000	1.209	1.051
4.600	0.696	0.439		1.206	1.056
4.617	0.699	0.435		0.000	1.060
4.633	0.709	0.438			1.062
4.650	0.690	0.431			0.000
4.667	0.690	0.437			
4.683	0.000	0.439			

4.700		0.444			
4.717		0.446			
4.733		0.455			
4.750		0.463			
4.767		0.000			