

Análisis de la flexo tracción del concreto permeable



Abstract

The principal goal in this project is to determine the rupture modulus or the strength to the slip tensile of the porous concrete and by the way correlate this data with the strength to the compression that this kind of material has. Besides it pretends to make the design of porous concrete pavement and give an exact account of advantages that this material has according the pluvial collection and the environmental protection.

To determine the rupture modulus of porous concrete there was applied a process of test in the days 7th, 14th and 28th, specimens through the slip test. Also, to know its strength to the tensile, there was used the indirect tensile test or Brazilian test taking, in the last case, specimens and to fail at the same ages mentioned before. According to the last investigations that determined the strength of the compression, it makes the correlate between the given results and the strength values, and gives result the relation between the rupture modulus and the strength to the compression at the porous concrete.

Likewise, there was proceed the design of porous concrete pavement for a project that is localized in Cachi, Paraiso, Cartago. This design was made with the procedure of the AASHTO and there was taken like reference to determine the concrete rupture modulus the final result of this investigation. Finally, there were compare this kind of pavements with other kinds in the economical aspect.

Keywords: porous concrete, rupture modulus, tensile strength, pavement.

Resumen

El siguiente proyecto tiene como principal objetivo determinar el módulo de ruptura o la resistencia a la flexo tracción del concreto permeable y así correlacionar estos datos con la resistencia a la compresión que posee este tipo de material. Además se pretende realizar el diseño de un pavimento en concreto permeable y así concretar las grandes ventajas que posee este material en cuanto a la recolección de aguas y a la protección del ambiente.

Para determinar el módulo de ruptura del concreto permeable se procedió a fallar, a los siete, catorce y veintiocho días, muestras mediante el ensayo a flexión. Asimismo para conocer su resistencia a la tracción se hizo uso de la prueba a tensión indirecta o prueba brasileña tomando, como en el caso anterior, especímenes y fallándolos a las mismas edades antes mencionadas. Tomando como base estudios realizados con anterioridad que determinaron la resistencia a la compresión, se realizó la correlación entre los resultados obtenidos y los valores de resistencia, y así se determinó la relación que existe entre el módulo de ruptura y la resistencia a la compresión del concreto permeable.

Igualmente, se procedió a realizar el diseño del pavimento en concreto permeable para un proyecto de bien social ubicado en Cachi, Paraíso de Cartago. Este diseño se efectuó mediante el procedimiento que establece la AASHTO y se tomó como referencia para determinar el módulo de ruptura del concreto, el obtenido mediante los ensayos hechos en esta investigación. Finalmente, se realizó un estudio económico para comparar este tipo de pavimento con otros equivalentes.

Palabras clave: Concreto permeable, módulo de ruptura, resistencia a la tensión, pavimento

Análisis de la flexo tracción del concreto permeable

Análisis de la flexo tracción del concreto permeable

CINDY SOLANO CERDAS

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

JULIO DEL 2009

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

Prefacio.....	1
Resumen Ejecutivo.....	2
Introducción.....	4
Marco Teórico.....	5
Metodología.....	25
Resultados.....	27
Análisis de los Resultados.....	43
Conclusiones.....	54
Recomendaciones.....	55
Apéndices.....	56
Anexos.....	77
Referencias.....	106

Prefacio

Una de las principales causas del mal estado de las carreteras es el mal manejo de las aguas y la poca capacidad hidráulica que estas poseen. Esto causa, entre otras cosas, erosión en la superficie de ruedo y miles de millones en gastos por la pérdida de soporte que está sufriendo la infraestructura vial de nuestro país.

Además debido al cambio del uso del suelo en las zonas más pobladas del país, la escorrentía superficial ha aumentado considerablemente en las zonas más bajas, por lo que la permeabilidad de los pavimentos se ha convertido en un agravante de la condición de erosión.

Para darle solución a estos problemas o por lo menos mitigarlos de una manera eficiente y utilizando tecnología que ayuda al medio ambiente, se presenta la opción de construir pavimentos en concreto permeable que brindan una excelente propuesta a esta problemática.

Este tipo de concreto presenta mayor cantidad de agregado grueso, mientras que el agregado fino está en menor proporción. Esto da como resultado un porcentaje de vacíos entre el 15 al 30%. Es decir es básicamente una mezcla de agua, cemento y agregado grueso. Además, en algunas ocasiones se le adiciona una pequeña cantidad de agregado fino y aditivos para mejorar sus propiedades tanto en estado fresco como endurecido. Su utilización se puede dar en pavimentos, aceras, etc., donde el agua es conducida y absorbida a través del mismo, lo cual evita el incremento de la escorrentía superficial. Entre sus ventajas está que reduce el agua de escorrentía en las carreteras producida por las lluvias, mejora la protección de los lagos y arroyos, restablece y purifica las aguas subterráneas, elimina el estancamiento de las aguas de lluvia y permite un desarrollo más eficiente de las tierras de alto valor urbanístico.

Por tratarse de un pavimento, una de las características del desempeño de este es su comportamiento con las fuerzas de flexión por lo que se vuelve de vital importancia la

determinación de módulo de ruptura de este tipo de pavimentos.

Por lo tanto, el propósito del presente estudio es la determinación del módulo de ruptura del concreto permeable para poder correlacionarlo con datos ya existentes que se refieren a su resistencia a la compresión, y de esta manera poder contar con datos o parámetros para el diseño de pavimentos con este material.

Este proyecto no hubiera podido realizarse sin la ayuda de mi padre y de mi madre quienes han sabido darme el apoyo que he necesitado desde el inicio de mi carrera y me han impulsado a ser mejor cada día.

También quiero agradecer de una manera especial a la empresa Holcim, en especial a los técnicos del Centro Tecnológico (CETEC) quienes me ayudaron en cada etapa de mi proyecto y tuvieron la paciencia necesaria para que este llegara a feliz término. Asimismo, agradezco a los técnicos del Centro de Investigación en Vivienda y Construcción (CIVCO) del Instituto Tecnológico de Costa Rica, quienes me ayudaron a desarrollar parte de los objetivos de este estudio.

A mi novio, Bosco, quien ha sido un pilar muy importante en mi vida, quien me apoya y me brinda toda su confianza en cada proyecto que emprendo y quien ha sabido tener la paciencia para afrontar conmigo los momentos más difíciles.

Y, finalmente, a mis dos profesores guías: Mauricio Araya y Álvaro Aguilar quienes han dado un valioso aporte a este proyecto con el aporte de sus conocimientos y enseñanzas.

Resumen ejecutivo

El deterioro de la infraestructura de nuestro país y especialmente el de las carreteras, es un problema que debe solucionarse de forma eficiente y debe seguir los más altos estándares en cuanto a tecnología y calidad.

El uso de tecnologías “verdes” en la construcción es una solución que brinda estas características y, lo más importante, ayuda a la conservación del medio ambiente.

El presente informe titulado *Análisis de la flexo tracción del concreto permeable*, brinda los datos necesarios para diseñar de una forma más concisa y exacta los pavimentos elaborados en concreto permeable y consecuentemente, busca mitigar la contaminación y el deterioro de las carreteras del país. En este se analiza, por medio de pruebas elaboradas en laboratorio, esfuerzos como flexión (módulo de ruptura) y tensión y los correlaciona con esfuerzos a compresión. Además, el presente documento ofrece información que hasta hoy es escasa en las referencias bibliográficas sobre el tema en estudio.

Primeramente se presenta una reseña sobre las características, ventajas y desventajas del concreto permeable, así como su historia y estudios previos que se han realizado para determinar las características y el comportamiento de este material.

Además, se incluye un breve resumen de los ensayos realizados para determinar los esfuerzos de flexión y tensión, así como el equipo utilizado y las correlaciones existentes entre estos esfuerzos y la resistencia a la compresión.

También se estudia las consideraciones que se deben tomar en cuenta para el diseño estructural e hidrológico del pavimento, la cantidad de tormenta esperada, las características del pavimento y las propiedades del suelo donde va a reposar la estructura.

El objetivo principal del proyecto fue determinar el módulo de rotura del concreto permeable y su correlación con resistencias a la compresión ya establecidas en estudios preliminares.

Para lograr este objetivo se procedió a realizar una investigación bibliográfica sobre este tipo de material con la intención de comparar los datos con los resultados obtenidos con el estudio. Posteriormente, se realizaron ensayos de laboratorio para determinar cuál diseño de mezcla resultaba óptimo para realizar este análisis. Este diseño fue escogido entre otros tres diseños, dos de ellos proporcionados por el Ing. Roberto Fernández, quien realizó un estudio sobre este material como parte de su proyecto de graduación; y el tercero fue dado por Concretos Holcim.

Estos tres diseños fueron evaluados después de catorce días de curado. Luego, para la escogencia de la mezcla óptima, se consideró la permeabilidad del concreto en estado endurecido, mediante la elaboración de un permeámetro de carga constante, y su resistencia a la flexión mediante el ensayo respectivo. Además, en el análisis de las mezclas se tomaron en cuenta aspectos como trabajabilidad de los diseños de mezcla así como la influencia que tienen los agregados sobre el esfuerzo de flexión obtenido.

Obtenidos los resultados de esta evaluación, se escogió la mezcla que presentaba las mejores características en cuanto a permeabilidad y flexión y se procedió a realizar los ensayos respectivos.

Se realizaron dos vigas para cada edad de curado (7,14 y 28 días de curado) y se les aplicó el ensayo a flexión determinando de esta manera su módulo de ruptura. Además, se fabricaron cuatro cilindros para cada edad de curado (7,14 y 28 días) con el mismo diseño de

mezcla escogido, realizándoles el ensayo de tensión indirecta o prueba brasileña.

Con la obtención de estos datos se procedió a procesarlos por medio del programa computacional MS Excel.

Posteriormente, se analizaron los datos obtenidos y se realizaron, en primera instancia, curvas de desarrollo que mostraron el incremento de la resistencia tanto en flexión como en tensión, dependiendo del tiempo de duración de las muestras en curado.

Además, se realizaron curvas que correlacionaron estos esfuerzos con las resistencias a la compresión presentadas en el trabajo de investigación del Ing. Fernández, y las correlaciones que existen entre el módulo de ruptura y el esfuerzo a tensión indirecta.

Otro asunto desarrollado en este trabajo fue la elaboración de un diseño de pavimento en concreto permeable, tomando en consideración los resultados obtenidos relacionados con el módulo de ruptura de este material.

Este diseño de pavimento corresponde a un proyecto ubicado en Cachí, Paraíso de Cartago, el cual se encuentra en etapa de trámites, y corresponde a un proyecto de bien social que consta de aproximadamente 89 viviendas.

La metodología utilizada para el diseño estructural fue la establecida por AASHTO, lo que dio como resultado un espesor de pavimento de 15 cm. Además, se realizó un diseño hidrológico para determinar el espesor de sub base que la estructura debe tener, tomando en cuenta la capacidad de volumen de agua de lluvia que esta pueda almacenar. Esto se realizó mediante el uso del método racional descrito en los conceptos hidráulicos. Con base en este método el espesor de la sub base se determinó en 50 cm.

Por otro lado, ya que el suelo donde descansará la estructura, resultó ser un terreno que no puede evacuar el agua hacia el acuífero, por sí mismo, se procedió a colocar un tubo de diámetro de 30,48 cm (12 pulgadas) para realizar esta función

Con base en los resultados obtenidos, se establecieron algunas conclusiones relacionadas con el porcentaje que representa el módulo de ruptura y la tensión con respecto al esfuerzo de compresión. Por último, se recomienda continuar con la investigación de este tipo de concreto para mejorar cada vez más su caracterización, tal y como sucede con el concreto convencional

Introducción

Con el inicio de la época lluviosa en nuestro país, también se inicia un problema de grandes magnitudes que está acabando con la infraestructura vial de nuestro país; se trata del mal manejo de aguas de escorrentía que existe en las carreteras.

Una solución a esta problemática es la utilización de pavimentos en concreto permeable. Este tipo de material presenta mayor cantidad de agregado grueso en su composición, mientras que el agregado fino se encuentra presente en menor proporción y en algunos casos no se encuentra del todo. Este tipo de material se utiliza en aceras, parqueos, en pavimentos de bajos niveles de tránsito, etc., permite que el agua de lluvia sea absorbida a través de él, y evita de esta manera el aumento del agua de escorrentía, elemento que es muy dañino para el buen funcionamiento de las carreteras de nuestro país.

Este tipo de concreto se ha estado utilizando en Estados Unidos por la US Environmental Protection Agency (EPA), quienes por medio de enmiendas instan a las municipalidades a utilizar este tipo de material en la infraestructura vial. Con ello también reducen la contaminación del agua logrando un mantenimiento periódico al pavimento. Por otra parte, en el 2006, el comité 522 del Instituto Americano del Concreto (ACI), publicó un documento que discute los principales usos y aplicaciones de los concretos permeables, así como las características deseadas en cuanto a

diseño de mezclas y propiedades en estado fresco y endurecido.

Además, cabe destacar que en nuestro país existen estudios preliminares de este tipo de concreto realizados por el Ing. Roberto Fernández Arrieta, quien elaboró un proyecto titulado *Concreto Permeable: Balance entre su resistencia y su permeabilidad*. Estos estudios sirvieron de base para la realización de este proyecto puesto que constituyen una introducción al tema desarrollado.

El objetivo general del presente proyecto fue determinar el módulo de ruptura del concreto permeable para establecer o analizar una correlación entre los datos obtenidos y los resultados que obtuvo el Ing. Fernández en el proyecto antes mencionado. Estos datos serán de gran ayuda a la hora de diseñar un pavimento en este material pues no existen datos que comprueben o estudien el esfuerzo a la flexotracción del concreto permeable.

Igualmente se pretende analizar la correlación que existe entre la resistencia a la compresión del pavimento permeable y la resistencia a la tensión indirecta de este material.

Asimismo, con la obtención de estos datos, se diseñó un pavimento en concreto permeable para un proyecto de bien social ubicado en Cachí, en Paraíso de Cartago. Con esto se buscó crear conciencia sobre la utilización de tecnología que ayuda al medio ambiente incorporándola en el ámbito de la construcción.

Marco Teórico

Concreto permeable

Definición

El agua de escorrentía o agua superficial es un tema importante en la construcción de cualquier estructura civil. Al realizar la obra se debe planear muy a fondo un adecuado sistema de drenaje para evitar este problema.

El agua que cruza la superficie del pavimento puede causar contaminantes tóxicos, erosionar el paisaje, crear problemas de inundaciones que ocasionan riesgos a la ecología y recargan los mantos acuíferos. El pavimento en concreto permeable es una de las nuevas tecnologías que permite el desarrollo urbanístico mientras regula el agua de escorrentía evitando todos los problemas antes mencionados.

El concreto permeable es un material que se compone de agregado grueso, cemento y agua. A diferencia del concreto convencional, este tipo de material no contiene agregado fino (arena) en su mezcla inicial, aunque estos pueden ser introducidos en el proceso de compactación.

El agregado grueso que suele ser de un mismo tamaño, debe ser tal, que sus puntos de contacto estén siempre juntos por la pasta que conforman el cemento y el agua, resultando así un concreto con altos porcentajes de vacíos, los cuales están en el rango de un 15 a un 35%, que si funcionan de una manera correcta permiten la rápida percolación del agua dentro del concreto.

En el concreto permeable pueden pasar de 122 a 204 litros de agua por minuto por metro cuadrado de superficie.

Al comparar las características del concreto permeable y las del concreto convencional se puede decir que el concreto permeable tiene menor resistencia a la compresión, una mayor permeabilidad y un menor peso unitario, aproximadamente un 70% del concreto convencional.



Figura 1. Concreto poroso

Fuente: What, Why and How Pervious Concrete?NRMCA

Historia

El concreto permeable tuvo sus inicios en Europa en el Siglo XIX. Este tipo de material fue utilizado para una variedad de aplicaciones tales como paredes, paneles prefabricados y pavimentos. En 1852, en el Reino Unido, se construyeron dos casas de habitación utilizando solamente grava y concreto. Este tipo de material se utilizó principalmente por los costos de eficiencia que tenía, ya que en ese tiempo el uso de cemento era muy limitado.

En 1923, el concreto permeable ya era reconocido como un material de construcción viable económica y estructuralmente. Su uso se incrementó de gran manera después de la Segunda Guerra Mundial, puesto que el alto costo de los ladrillos y del transporte de materiales, hizo que el concreto permeable tuviera un gran auge, especialmente en la construcción de casas de habitación.

Posteriormente siguió ganando popularidad en regiones como Venezuela, el Oeste de África, Australia y Rusia.

En los Estados Unidos se comenzó a utilizar alrededor de 1970, pero no con la intención de abaratar costos, como sucedió en Europa, sino por sus características de permeabilidad. El problema que se dio fue que en Estados Unidos se incrementaron las áreas construidas con material impermeable, generando altos niveles de agua de escorrentía y consecuentemente inundaciones. Esto dio como resultado un impacto negativo en el ambiente, causó erosión y bajó en grandes niveles la calidad del agua.

El uso del concreto permeable en Estados Unidos se inició en los estados de Florida, Utah y Nuevo México, extendiéndose más tarde a California, Illinois, Oklahoma y Wisconsin.

Usos

El concreto permeable tiene muchas aplicaciones, pero su utilización es limitada para soportar grandes pesos. Esto restringe su uso solo para funciones específicas. A pesar de esto suele ser utilizado para la construcción de casas, parqueos, jardines, calles, aceras, calles residenciales, canchas de tenis y piscinas.



Figura 2. Algunos usos del concreto permeable
Fuente: Pervious Concrete Pavements. P. Tennis et al

Ventajas y desventajas

Utilizar concreto permeable como material de construcción tiene múltiples ventajas. Una de ellas es que incrementa la permeabilidad en comparación con el concreto convencional. Además posee menor peso unitario y una menor insolación térmica. El concreto permeable reduce las altas temperaturas urbanas y suburbanas que se crean cuando la energía solar es absorbida por superficies oscuras tales como asfalto o tejados. Así pues ayuda a reducir el calentamiento global porque refleja gran parte de la luz solar en vez de absorberlo y convertirlo en calor. Refleja entre el 35 al 40%, mientras que una calle recién pavimentada refleja sólo entre el 5 al 10%. Debido a su color más claro, este tipo de material requiere menos iluminación por la noche, por lo que reduce de esta manera el consumo de electricidad.

Por otro lado, permite que la vegetación sea regada, haciendo que el agua y el aire se transfieran a las raíces dejando que los árboles florezcan incluso en áreas muy desarrolladas. Los acuíferos son recargados por la infiltración del agua en el suelo, el agua de escorrentía es reducida y se provee de una buena calidad al agua que es drenada. Igualmente reduce la cantidad de agua de escorrentía en áreas pavimentadas, permitiendo la utilización de alcantarillado con diámetros pequeños.

Aparte de todas estas ventajas el concreto permeable brinda sustanciales reducciones del ruido. Esto implica un gran alivio para el ambiente puesto que la interacción entre los neumáticos de los automóviles y el pavimento

causa un gran daño medio ambiente. La estructura abierta del pavimento permeable causa una diferencia en el tiempo de llegada de las ondas de sonido reflejadas, ya que la superficie porosa minimiza el aire atrapado y reduce la generación del ruido mientras los poros absorben el sonido por fricción interna. Decece de esta manera el nivel de intensidad del ruido gracias a estos pavimentos porosos que lo absorben (Oled et la. 2003). Según investigaciones, agregados de tamaños pequeños generalmente producen una respuesta silenciosa, en el rango de 3 a 10% más abajo del nivel de ruido permitido.

Los factores clave para que esta ventaja tenga efecto son la porosidad, el tamaño, la abertura y el espesor de la capa del poro. Para que un concreto poroso tenga una capacidad de absorber el ruido efectivo se recomienda una porosidad de 15-25% del volumen total del material.

A pesar de estas ventajas el concreto permeable tiene limitaciones que deben ser consideradas cuando exista la posibilidad de utilizarlo. Por ejemplo, no puede ser utilizado cuando existan cargas muy grandes sobre la superficie de rodamiento, y el agrupamiento entre sus partículas es menor a la de un concreto convencional haciendo que exista una menor resistencia a la compresión.

Estudios previos

Para la creación de una estructura de concreto permeable de óptima calidad, permeabilidad, resistencia a la compresión y capaz de soportar fuerzas de tensión y flexión, es necesario considerar la cantidad de agua, la cantidad de cemento, tipo y tamaño de agregado y compactación. Una gran cantidad de experimentos previos (los cuales se resumen a continuación) a esta investigación han conducido a determinar comparaciones en estos elementos y se han establecido como punto de comparación para desarrollar este proyecto de investigación.

En 1976, V.M Malhotra estudió la relación del concreto permeable con sus aplicaciones y propiedades. Este investigador dio detalles acerca de su consistencia, dosificación de materiales, peso unitario, compactación y curado para maximizar la permeabilidad de este material. Incluso condujo varios experimentos y falló varios

cilindros de prueba. De esta manera logró encontrar la correlación entre la resistencia a la compresión del concreto permeable y las propiedades de los materiales. Asimismo concluyó que la resistencia a la compresión del concreto permeable depende de la relación agua cemento y del tamaño del agregado.

En 1998, Richard Meininger realizó experimentos de laboratorio y presentó múltiples ejemplos con variedad de propiedades de los materiales que incluían la relación agua cemento, tamaño de agregado, compactación y tiempo de curado. Los resultados obtenidos fueron similares a los de Malhotra, pero descubrió una relación entre la compresión a los 28 días y el contenido de agua mientras utilizaba tamaños de agregado de 3/8" y una relación agregado cemento de 6/1. Posteriormente, investigó la correlación entre la compresión a los 28 días y el peso unitario. Los resultados de estos experimentos indicaron que una óptima relación agua cemento puede maximizar la permeabilidad de este tipo de concreto, pero no necesariamente incrementan su resistencia a la compresión. En sus estudios también relacionó el contenido de aire con la resistencia a la compresión dando como resultado que al incrementar la cantidad de aire decece la resistencia a la compresión porque el espacio que ocupa el agregado ahora tiene aire reduciendo el material estructural del concreto.

En 1995, extensos estudios conducen a Nades Ghafoori a investigar sobre cuestiones relacionadas con el concreto permeable. En su investigación descubrió que en varios sitios de los Estados Unidos utilizaban el concreto permeable para sistemas de pavimento. Este investigador realizó un estudio que comparaba la resistencia a la compresión en varios sitios, y examinó características en varios pavimentos y la relación agua cemento y agregado cemento. Posteriormente, inspeccionó aplicaciones del concreto permeable fuera de Estados Unidos y comparó las resistencias a la compresión. Ghafoori condujo varios experimentos de laboratorio con cuatro diferentes ejemplos de concreto permeable y determinó la relación entre la resistencia a la compresión y sus múltiples variables tales como curado, relación agua cemento, relación agregado cemento y energía de compactación. Finalmente, utilizó los datos que obtuvo y determinó los espesores apropiados de pavimento para diferentes sub bases y

módulos de ruptura, basado en el método de la AASHTO y PCA, basándose en diferentes categorías de tráfico.

En el 2003, Paul Klieger, estudio los efectos de la cantidad de aire sobre la resistencia y durabilidad del concreto convencional. Su investigación muestra el impacto de la presencia del aire sobre la conformación del concreto. Concluye que la reducción en la resistencia a la compresión con presencia de aire decrece dependiendo si el tamaño de agregado y el contenido de cemento decrecen. La resistencia a la compresión del concreto permeable depende de la relación agua cemento, la relación agregado cemento, tamaño de agregado, compactación y curado. Los experimentos incluso indican que el concreto permeable es beneficioso en ciertas áreas pero es restringido en áreas sujetas a grandes volúmenes de tráfico.

Más tarde, en el año 2006, Crouch y otros investigadores publicaron un escrito donde se podían estudiar los resultados que ellos obtuvieron en cuanto a la resistencia a la compresión utilizando diversos tipos de agregado y distintas energías de compactación.

En el mismo año, La Asociación de Concreto Premezclado de Tennessee, publicó una serie de especificaciones preliminares para los materiales, mezclas, procesos constructivos e inspección referentes al concreto permeable. Estas especificaciones constituyen una serie de normas que se debían cumplir en Estados Unidos para el uso de este tipo de material.

Un año después, en el 2006, Youngs del Consejo de Promoción de Cemento de Nevada y California dio detalles acerca de la utilización del concreto permeable en California, recomendando diseños de mezcla y consideraciones para realizarlas. Además, en febrero de ese mismo año, el Centro Tecnológico de Pavimentos de Concreto de Iowa, dio a conocer un documento que brinda los parámetros de diseño de mezclas de pavimento permeable en climas fríos, incluyendo materiales, manera de mezclarlos y las proporciones de los materiales.

El Comité 522 del Instituto Americano del Concreto publicó también en el 2006, los diferentes usos y aplicaciones de los concretos permeables así como las características que se deben conseguir en cuanto a mezclas, materiales y características mecánicas.

En nuestro país se publicó un estudio hecho por el Ing. Roberto Fernández Arrieta,

titulado *Concreto permeable: Diseño de mezclas para evaluar su resistencia a la compresión uniaxial y su permeabilidad*. Ese trabajo se tomó como referencia para el presente proyecto, pues como parte de este se utilizaron los diseños de mezcla que tuvieron mejores resultados en cuanto a resistencia y permeabilidad.

En esta investigación Fernández Arrieta analizó el efecto que tienen propiedades como relación agua/cemento, relación agregado grueso/cemento, peso unitario, contenido de vacíos y tipo de agregado grueso sobre las mezclas de concreto permeable. Los resultados que obtuvo le permitieron observar tendencias de comportamiento entre estas propiedades y la resistencia y permeabilidad del material.

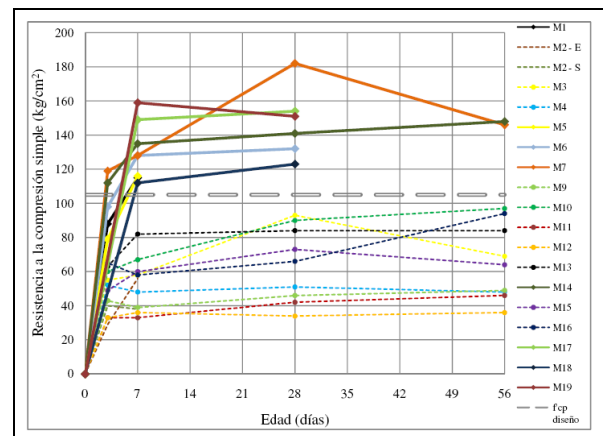


Fig. 3. Curvas de desarrollo de la resistencia a la compresión uniaxial. Fuente: Trabajo de graduación, Ing. Roberto Fernández

En la siguiente figura se muestra un resumen de las variables que afectan la resistencia del concreto permeable indicadas en el trabajo realizado por el Ing. Fernández. Cabe destacar que de todas las mezclas elaboradas por el Ing. Fernández se utilizaron solamente las que presentaban mayor resistencia a la compresión y mayor permeabilidad, pues estos resultaron parámetros importantes para cumplir con los objetivos planteados en el presente estudio.

¹ "Curvas de desarrollo de la resistencia a la compresión uniaxial" tomadas del proyecto de graduación del Ing. Roberto Fernández,

Mezcla	Procedencia del agregado grueso	Tamaño máximo del agregado grueso $T_{m\acute{a}x}$ (mm)	Relación agregado grueso/cemento (AG/c)	Resistencia a la compresión uniaxial (kg/cm ²)	Permeabilidad (cm/s)	Peso unitario (kg/m ³)	Contenido de aire (%)	Relación agua/cemento w/c
M1	río	12	3,7	137	-	-	-	0,37
M2 - E	río	12	4,0	67	-	1444	41	0,33
M2 - S	río	12	4,0	45	-	1167	52	0,33
M3	río	12	4,0	93	1,52	1517	41	0,27
M4	río	12	4,5	51	1,56	1814	27	0,30
M5	río	9,5	4,0	138	1,63	2114	14	0,32
M6	río	9,5	4,5	132	1,37	1940	23	0,27
M7	río	12	4,3	182	1,38	2063	17	0,31
M8	río	12	4,3	132	-	2057	17	0,28
M9	cantera	12	4,3	46	1,39	1760	27	0,22
M10	río	16	4,5	90	1,77	1934	23	0,23
M11	cantera	12	4,5	42	1,63	1720	28	0,27
M12	río	12	4,5	34	1,42	1866	26	0,24
M13	río	16	4,0	84	1,73	1940	22	0,26
M14	río	12	4,0	141	1,49	1980	22	0,26

Fig 4. Tabla resumen de las variables que afectan al concreto permeable
Fuente: Trabajo de graduación, Ing. Roberto Fernández²

² Tomado del proyecto de graduación del Ing. Roberto Fernández "Concreto Permeable: diseño de mezclas para evaluar su resistencia a la compresión uniaxial y su permeabilidad"

Materiales

El concreto permeable utiliza los mismos materiales que el concreto convencional, con la excepción de que el agregado fino es eliminado y la proporción de agregado grueso es mayor para tener una conexión entre las partículas. Esto da las propiedades necesarias al concreto endurecido, pero solo se obtendrán los resultados esperados si se le da la correcta mezcla, curado y compactación que este tipo de material requiere.

Cemento

En el concreto permeable se pueden utilizar los cementos Portland comunes de acuerdo con la ASTM C150 y ASTM C1157. También es posible utilizar materiales cementantes suplementarios como puzolanas (ASTM C618). Para efectos del estudio realizado se utilizó cemento de uso general según la norma RTCR-383 que rige para los cementos usados en Costa Rica para la elaboración de las mezclas.

Agregados

Los agregados finos son limitados en una mezcla de concreto permeable y los agregados gruesos mantienen una granulometría cerrada.

Comúnmente se utilizan granulometrías de agregado grueso incluidas en ASTM C 33 (19mm, 12 mm y 25 mm). Además, también es posible utilizar un solo tamaño de agregado, incluso la norma ASTM D 448 puede ser utilizada para definir la granulometría. Tamaños grandes de agregados dan una superficie mucho más áspera, pero para parqueos, pavimentos de bajos volúmenes de tránsito y calles de urbanizaciones, se utilizan agregados de tamaños más pequeños por razones estéticas.

Generalmente relaciones agregado grueso/cemento en el rango de 4.0 a 4.5 por masa son utilizadas. Relaciones más altas han sido utilizadas en estudios de laboratorio (Malhotra 1976) pero se han dado sustanciales reducciones en la resistencia.

Por otro lado, tanto agregados redondeados (grava) como agregados angulares pueden ser usados para producir concreto

permeable. Típicamente, en este tipo de concreto, se dan mayores resistencias si se utilizan agregados redondeados, aunque los agregados angulares generalmente son adecuados. Los agregados para pavimentos deben ser conforme a ASTM D 448, mientras que la ASTM C 33 cubre los agregados utilizados para construcciones en general.

Al igual que el concreto convencional, el concreto permeable requiere agregados que tengan una condición de superficie seca para quitar de la superficie la humedad sobre los agregados. Se debe tomar en cuenta que el control del agua es importante en las mezclas de concreto permeable. Los agregados deben estar totalmente secos a la hora de hacer la mezcla, puesto que agua extra en los agregados ayuda a incrementar la cantidad de agua de mezcla e incrementa la relación agua cemento del concreto.

Aditivos

Los aditivos químicos pueden ser usados en el concreto permeable para obtener propiedades especiales al igual que en el concreto convencional. Esto porque el rápido tiempo de fraguado asociado con el concreto permeable, hace que aditivos como retardantes y estabilizadores de hidratación sea comúnmente usado en las mezclas.

El concreto permeable al ser una mezcla con relaciones agua cemento tan bajas, da como resultado un producto poco trabajable, por lo tanto el uso de aditivos plastificantes es de gran importancia.

Además, se ha encontrado que el uso de látex y sílice proveen características especiales al concreto ya que le brindan mayores resistencias (en el caso del látex) y la obtención de porcentajes de vacíos mayores (sílice). También se ha comprobado que el uso de fibras aumenta la resistencia a la flexión y a la compresión de los elementos elaborados en concreto permeable (Tennis,2004).



Fig. 5. Trabajabilidad del concreto poroso utilizando aditivos
Fuente: Pervious Concrete Brochure. Euclid Chemicals

Variables que afectan las características del concreto permeable

Agua

El agua es el ingrediente principal de todo concreto. Sin agua el concreto se puede convertir en una pila de rocas y polvo y con mucha agua puede resultar una mezcla sin ninguna función estructural.

El contenido de agua en una mezcla de concreto es importante por dos razones: la primera porque hidrata el cemento y segunda porque hace la mezcla más trabajable. La hidratación en el cemento es necesaria para que los materiales se unan y lograr que el material tenga mayor resistencia. Asimismo, la presencia de agua llena los vacíos dando también una mayor resistencia. La resistencia del concreto está directamente relacionada con la porosidad y la relación agua cemento (a/c). El incremento de los sólidos indica un decrecimiento en la porosidad. La porosidad afecta la resistencia pero la resistencia por sí misma es el resultado de la interconexión entre las partículas. Esta conexión es difícil en mezclas con altos contenidos de a/c por las distancias que pueden existir entre ellas. Una alta relación a/c significa una alta porosidad,

pero una alta porosidad bien distribuida puede dar como resultado una buena resistencia.

La cantidad de agua que se requiere para darle una buena hidratación a la mezcla ha sido grandemente debatida. Se ha hablado que la resistencia en el concreto se da por la conexión entre las partículas, las cuales se dan por la reacción química entre el cemento y el agua.

El agua y su aplicación en el concreto permeable es extremadamente crítica. Poca agua da como resultado poca interconexión entre las partículas y mucha cantidad de agua da como consecuencia una pasta tal que no da la porosidad que se requiere. Una correcta cantidad de agua maximiza la resistencia sin comprometer las características permeables que diferencian a este material.





Fig. 6. Ejemplos de concreto permeable con diferentes contenidos de agua, 1. Con mucha cantidad de agua, 2. Cantidad correcta de agua, 3. Con demasiada agua
Fuente: Fuente: Pervious Concrete Pavements. P. Tennis et al

Tipo de agregado y tamaño

Habitualmente la resistencia del agregado no es considerada cuando se habla de la resistencia del concreto convencional. Las pruebas en cilindros de concreto convencional a compresión arrojan resultados en donde la falla se da en la interface agregado-pasta. Por lo tanto, se pone en prueba que la resistencia del concreto es determinada por la resistencia de la conexión de las partículas y no por sus componentes individuales.

En el concreto permeable la pasta de cemento es limitada y el agregado actúa sobre las superficies de contacto entre uno y otro para así brindar la resistencia deseada. Por lo tanto, las características del agregado que se utilice representan un factor importante en el comportamiento de las mezclas del concreto permeable.

Según investigaciones realizadas, se ha comprobado que tamaños de agregado mayores dan una menor resistencia y una permeabilidad mayor, así pues los agregados provenientes de río, los cuales son lisos y redondeados, dan mayores resistencias al concreto permeable puesto que disminuyen la cantidad de vacíos en la mezcla comparándolos con mezclas que utilizan agregados angulosos.

Relación agregado cemento

La relación agregado cemento es también una característica importante a la hora de realizar una mezcla de concreto permeable. Relaciones bajas agregado/cemento implica que existe un mayor porcentaje de pasta capaz de brindar una mayor resistencia, sin embargo, al aumentar el porcentaje de pasta en la mezcla, esta también perderá permeabilidad pues ocupa mayor cantidad de vacíos. Por otra parte, el uso de agregado fino en las mezclas de concreto permeable es limitada y en muchos de los casos su uso es nulo, aunque se ha comprobado que su utilización aumenta la trabajabilidad del material beneficiando su manejo y colocación.

Relación de vacíos

El concreto permeable contiene entre un 15 a un 25% de vacíos, que se originan debido a la ausencia de finos en la mezcla. Estos hacen que el agua de lluvia se infiltre en la estructura del pavimento, almacenándose y drenándose con facilidad hacia la sub-base.

El contenido de vacíos es proporcional al diseño de mezcla y a la energía de compactación que se utiliza cuando el pavimento es construido. También existe una correlación entre el porcentaje de vacíos y la resistencia a la compresión, puesto que si la relación de vacíos aumenta la resistencia, la compresión decrece. Además, la permeabilidad del concreto permeable disminuye al reducir el porcentaje de vacíos en la mezcla. Por lo tanto, esta relación es de gran importancia al querer obtener un balance entre permeabilidad y resistencia.

Compactación

La energía de compactación puede tener importantes efectos sobre las funciones del concreto permeable. Un alto grado de compactación puede dar lugar a grandes resistencias en el concreto, densificando el concreto y eliminando los vacíos, los cuales son importantes para la permeabilidad del concreto.

De modo general se conoce que el uso de compactación cierra los vacíos, aumentando

de esta manera la resistencia pero disminuyendo la permeabilidad.

Opción de construcción verde

El concreto permeable es considerado como una excelente alternativa para mitigar los efectos de la contaminación del agua de lluvia sobre los pavimentos, ayudando de gran manera a la preservación del medio ambiente.

Este tipo de material actúa como un filtro, puesto que el agua puede fluir a través del pavimento a la sub-base eliminando los contaminantes que se encuentran en gran medida en las aguas municipales. Lógicamente estos contaminantes, al pasar a través del filtro, previenen también la contaminación de los mantos acuíferos.

Además de funcionar como purificador de agua se ha demostrado que el concreto permeable reduce el efecto de calor que generan las altas temperaturas en el pavimento.

En Estados Unidos, por ejemplo, se han dado a conocer enmiendas para instar a las municipalidades a reducir el agua de escorrentía y proveer de tratamiento especial a las mismas. Estas políticas se han implementado en dos fases. En la fase primera se dan requerimientos para monitorear y tratar el agua de lluvia por municipalidades de 100 000 habitantes, descargas de industrias y sitios de construcción. En la fase segunda se permite incrementar la responsabilidad a municipalidades con más de 100 000 habitantes y sitios de construcción de más de un acre (EPA 1996). Además, da programas de regulación y prácticas para ayudar a controlar la cantidad de contaminantes en las carreteras.

En cuanto a los efectos hidrológicos, el concreto permeable lleva a cabo dos tareas: almacena el agua de lluvia y la infiltra por la estructura de pavimento, además de tratar el agua tanto mecánica como biológicamente. Por lo tanto, es un excelente medio para manejar la gran cantidad de agua de escorrentía que fluye por las carreteras en época lluviosa.

Propiedades mecánicas

Propiedades del concreto fresco

Las mezclas del concreto permeable se comparan con las del concreto convencional. El revenimiento, cuando es medido, es generalmente menor que 20 mm, aunque si es mayor a 50 mm también puede ser usado., aunque generalmente el revenimiento de este tipo de material es cero. Cuando se pone en el sitio y se compacta, los agregados son adheridos unos con otros y exhiben las características de una matriz abierta.

Para control de calidad, el peso unitario es la medida usada porque algunas características como el revenimiento no pueden ser medidas con exactitud para el concreto permeable. La medida del peso unitario se debe hacer usualmente una hora entre la mezcla y la puesta en el sitio. Sin embargo, puede ser controlado usando retardantes y estabilizadores de hidratación que extienden el tiempo de trabajabilidad a más de 1.5 horas dependiendo de la dosificación.

Resistencia

La resistencia del concreto permeable depende más que todo de las propiedades de la pasta y de la interface entre la pasta y el agregado. Al mejorar la resistencia del concreto permeable, tres componentes deben ser mejorados: la resistencia de la pasta, el espesor de la pasta alrededor del agregado y la conexión entre agregado y pasta. Según estudios preliminares, estos objetivos pueden ser logrados alternando el proceso de mezcla, usando tamaños pequeños de agregado y/o utilizando aditivos.

La resistencia es el punto principal para el diseño de pavimentos de concreto. El concreto permeable al tener un alto porcentaje de vacíos (15-35%) y sin tener en su mezcla agregado fino, posee valores de compresión, tensión y flexión relativamente bajos comparados con el concreto convencional.

Para un pavimento de concreto permeable, se ha recomendado utilizar valores a la compresión a los 28 días y a la tensión de 175 kg/cm² y 35 kg/cm² respectivamente. En los

Estados Unidos se han utilizado mezclas típicas que reportan valores a la compresión de 56 a 210 kg/cm².

Como ya se ha dicho con anterioridad, el uso del concreto permeable ha sido específico especialmente para parqueos y para pavimentos con bajos volúmenes de tránsito. Es por esto que los diseños de mezcla utilizados en este país tienen resistencias a la flexión de 11 a 25 kg/cm². Además, se ha comprobado que tamaños pequeños de agregado producen mayor resistencia a la flexión debido al incremento del área de contacto entre las partículas de agregado.

La relación entre la resistencia a la flexión y la resistencia a la tensión ha sido investigada por la Asociación del Concreto en Florida. Ellos reportan que la resistencia a la tensión es de 65% de la resistencia a la flexión. Sin embargo, también se ha reportado que el concreto permeable que contiene polímeros de látex como aditivo puede tener resistencias a la tensión cercanas al 90% de la resistencia a la flexión. Muchos factores influyen en la resistencia a la flexión particularmente el grado de compactación, la porosidad y la relación agregado/cemento.

Mezclas utilizadas en Europa y Japón a menudo incorporan un agregado más pequeño que el que se utiliza en Estados Unidos. Además, le adicionan una pequeña cantidad de arena. Estas diferencias han aumentado sustancialmente los valores de resistencia sobre las losas de concreto. Por otra parte, algunas mezclas belgas incorporan arena y una emulsión de látex produciendo resistencias a la compresión a los 28 días de más de 322 kg/cm².

Por otra parte, también se ha desarrollado una fórmula denominada "factor de vacíos", la cual permite conocer la resistencia a la compresión y a la tensión requerida para pavimentos en concreto permeable, estableciendo un punto de comparación entre el concreto poroso y el concreto convencional, pues lo relaciona entre sí.

Este "factor de vacíos" se obtiene al dividir el peso del concreto convencional (aproximadamente 2400 kg/cm³) entre el peso del concreto poroso obtenido por medio de la prueba de peso unitario. El resultado obtenido se multiplica por las resistencias obtenidas en el laboratorio ya sea por compresión o tensión según el caso.

Porosidad y permeabilidad

La principal función del concreto permeable es facilitar el movimiento del agua dentro de la estructura y para que esta sea realizada, los vacíos interconectados deben estar presentes en el concreto endurecido. Una alta porosidad generalmente está asociada a bajas resistencias, mientras que bajas porosidades producen resistencias altas. Ferguson (2005) y Tennis et al. (2004), reportaron las propiedades del concreto permeable utilizado en Estados Unidos indicando una relación de vacíos de 14 al 31% y un coeficiente de permeabilidad de 0,0254 a 0,6096 cm/s (36 a 864 pulgadas/hora). Además, se reportó que relaciones de vacíos entre 15 y 25% producen valores de resistencia mayores de 140 kg/cm² y una permeabilidad cercana a 0,339 cm/s (480 pulgadas/hora).

Por otra parte, Kajjo et al. (1998) comprobó que para producir mayores resistencias a la flexión, se debe tener una relación de vacíos cercana al 15%, obteniendo de esta manera una permeabilidad de 0,010 cm/s (14.4 pulgadas/hora) y una resistencia a la flexión de 46 kg/cm². Olek et al. (2003) reportó también que con una relación de vacíos cercana al 20% obtuvo permeabilidades de 1,016 cm/s (1440 pulgadas/hora), mientras que con una relación de vacíos de 20-29% obtuvo resistencias a la flexión de 28 a 35 kg/cm².

Densidad

La densidad del concreto permeable depende de las propiedades y proporciones de los materiales utilizados y los procedimientos de compactación que se hagan en el sitio. En este, las densidades en el orden de 1600 kg/m³ a 2000 kg/m³ son comunes.

Medida de la resistencia a flexión y tracción

La resistencia a la flexión es una característica mecánica que tiene gran importancia, principalmente, en estructuras de pavimentos en donde se dan esfuerzos de tracción producto de la flexión de las placas al pasar los vehículos.

Cabe destacar que el concreto tiene muy baja resistencia a la tracción, sin embargo, esta

propiedad tiene gran importancia al tomar en cuenta el agrietamiento del concreto por la restricción de la contracción debido al secado o por la disminución de la temperatura.

Ensayo de flexotracción

La resistencia a la flexión del concreto se determina por medio de ensayos con vigas de sección cuadrada elaboradas, tomando como referencia la norma ASTM C-192 y C-31. A menudo se refiere al módulo de rotura.

El ensayo, el cual se encuentra descrito en la norma ASTM C-78, consiste en apoyar las vigas a 2,5 cm como mínimo de sus extremos, dejando una luz de 45 cm y cargándolas en dos puntos situados en los dos tercios medios de la luz. Cuando se alcanza su esfuerzo máximo, este es llamado módulo de rotura (MR), el cual se calcula de la siguiente manera siempre y cuando la falla ocurra dentro del tercio medio de la luz libre de la viga:

$$MR = \frac{PL}{bd^2}$$

Donde:

MR=módulo de rotura del concreto en kg/cm²

P=Carga máxima aplicada en kg

L=Luz libre entre apoyos en cm

b=Ancho de la viga en cm

d=Altura de la viga en cm

Si la falla se diera fuera del tercio medio de la viga, pero no se encuentra separada de esta por más de una longitud equivalente al 5% de la luz libre, el módulo de rotura se calcula de la siguiente forma:

$$MR = \frac{3Pa}{bd^2}$$

Donde:

a=distancia entre la línea de rotura y el apoyo más próximo, medida a lo largo del eje longitudinal de la cara inferior de la viga en cm.

Además, se debe tomar en cuenta que si la falla ocurre fuera del tercio medio de la viga y a

una distancia este mayor al 5% de la luz libre de la viga, el ensayo se debe repetir.

Por otro lado, la norma ASTM C-293 tiene como procedimiento apoyar las vigas de la forma descrita con anterioridad, pero aplicando la carga en el centro de la luz. Para esta aplicación, el módulo de rotura se debe calcular de la siguiente manera:

$$MR = \frac{3PL}{2bd^2}$$



Fig 7. Ensayo para determinar la resistencia a la flexión
Fuente: Fotografías tomadas durante la investigación

Ensayo de resistencia a la tracción

Esta propiedad mecánica del concreto es difícil de medir por medio de ensayos directos, por lo complejo que resulta montar las muestras y por las dudas que se generan sobre los esfuerzos secundarios inducidos por los elementos que sujetan las muestras.

Es por esto que L. Carneiro y A. Bercellos implementaron un método indirecto que se denominó "Tensión indirecta" o "prueba brasileña" en su honor. Este método también se desarrolló en Japón. El ensayo consiste en cargar a compresión un cilindro convencional de 15 x 30 cm, a lo largo de dos líneas diametralmente opuestas, es decir; colocando el cilindro acostado. Este ensayo se encuentra en la norma ASTM C-496 y el cálculo a la tracción indirecta se calcula así:

$$T = \frac{2P}{\pi Ld}$$

Donde:

T=Resistencia a la tracción indirecta en kg/cm²

P=Carga máxima aplicada en kg

L=Longitud del cilindro en cm

D=Diámetro del cilindro en cm

Estudios han indicado que esta resistencia a la tracción indirecta es de aproximadamente un 15% más alta que la que se obtiene en ensayos de tracción directa.



Fig 8. Ensayo de tracción indirecta o prueba brasileña
Fuente: Fotografías tomadas durante la investigación

Correlación de los ensayos

Es predecible que a medida que aumenta la resistencia a la compresión del concreto aumenta también su resistencia a la flexión. Esta correlación entre estos dos ensayos se presenta no de una forma lineal sino más bien parabólica, es decir, al aumentar la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión también aumenta pero en menor proporción.

Además, cabe mencionar que el módulo de rotura tiene valores que van entre un 10% y un 20% de la resistencia a la compresión. Si no se dispone de ensayos de flexión puede darse una relación aproximada, la cual es sugerida por el Comité Europeo del Concreto mediante la siguiente ecuación:

$$MR = K \sqrt{f'c}$$

En donde:

MR= Módulo de rotura del concreto en kg/cm²

f'c= Resistencia a la compresión en kg/cm²

K= Valor que varía entre 2 y 2,7 (El Comité Europeo recomienda 2,5 y el ACI 3)

También se ha encontrado que existe una buena correlación entre el módulo de rotura y la resistencia a la tracción indirecta, la cual es independiente de la edad y del tipo de agregado válido para cualquier mezcla.

Mantenimiento

La mayoría de los pavimentos hechos en concreto permeable funcionan muy bien con poco o ningún mantenimiento. Correctamente instalado y mantenido, el concreto permeable puede durar décadas. Su mantenimiento consiste, primeramente, en eliminar o prevenir cualquier sustancia que pueda tapar sus vacíos, tales como suelo, rocas, hojas y otras materias que se filtran en el pavimento y que no permiten que el agua fluya libremente a través de ellos, provocando que su función primordial decrezca. Además, se debe hacer una apropiada instalación de la base, la cual debe estar libre de material orgánico, raíces y tener una compactación del 94% o más.

Si se instala incorrectamente, el concreto poroso se podría deteriorar en pocos meses, debido al tráfico y a la lluvia.

Puede ser necesario aspirar anualmente o más seguido. Esto para remover contaminantes de la superficie de los pavimentos. Otras opciones de limpieza pueden incluir la remoción del polvo o lavar a presión. El lavado a presión puede restaurar entre el 80 a 90% de la permeabilidad en algunos casos.



Fig.9. Aspecto del concreto permeable antes y después de darle mantenimiento
Fuente: Concreto Permeable, NRMCA, ASTM

Diseño del pavimento en concreto permeable

Bases para el diseño

Dos factores determinan el espesor del pavimento en concreto permeable: las propiedades hidráulicas como la permeabilidad y el volumen de vacíos y las propiedades mecánicas como la resistencia y la rigidez. El concreto permeable usado en sistemas de pavimento debe ser diseñado para soportar las cargas de tráfico y contribuir positivamente al tratamiento específico del agua de lluvia. El diseñador debe seleccionar las apropiadas propiedades del material, el apropiado espesor del pavimento y otras características necesarias para que pueda soportar los requerimientos hidrológicos y las cargas de tráfico. Análisis separados son necesarios para determinar los requerimientos hidráulicos y estructurales, y así diseñar el apropiado espesor del pavimento.

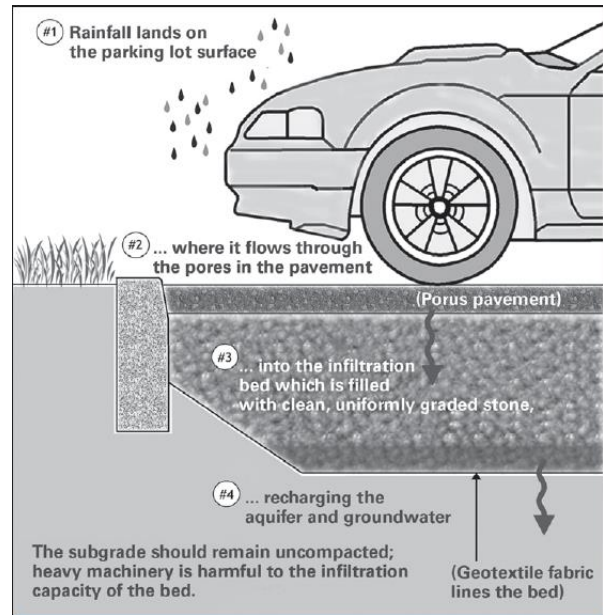


Figura 10. Sistema de pavimento poroso
Fuente: Pop Corn Pavement, Tecnology News, Iowa

Consideraciones para el diseño hidrológico

El diseño del pavimento en concreto permeable debe considerar muchos factores. Las tres consideraciones primarias son la cantidad de tormenta esperada, las características del pavimento y las propiedades del suelo donde va a reposar la estructura.

Primeramente se deben estudiar las condiciones hidrológicas que el pavimento debe tener. La cantidad de agua de escorrentía es menor que el total de agua de tormenta porque una porción de la lluvia es capturada en pequeñas depresiones en el suelo (almacenamiento depresión), alguna se infiltra en el suelo y alguna se queda en la superficie del suelo. El agua de escorrentía es una función de las propiedades del suelo, particularmente de la relación de infiltración: arenas y suelos secos pueden tomar el agua rápidamente, mientras que las arcillas no absorben virtualmente el agua durante el tiempo que se necesita para mitigar el efecto de agua de escorrentía. El agua de escorrentía también puede ser afectada por la naturaleza de la tormenta. Por otra parte, diferentes tamaños de tormenta pueden resultar en diferentes cantidades de agua de escorrentía,

por esto el diseño apropiado de la tormenta es importante.

En muchas situaciones, el concreto permeable simplemente reemplaza una superficie impermeable. En otros casos, el sistema de pavimento en concreto permeable puede ser diseñado para retener mucho más agua de lluvia que el pavimento no puede retener. Estas dos aplicaciones son llamadas mitigación del agua de escorrentía “pasiva” y “activa” respectivamente.

Un sistema de mitigación pasiva puede capturar parte del agua que escurre por el sistema de pavimento, pero no necesariamente elimina todo el exceso de agua de escorrentía de las superficies adyacentes impermeables. Un sistema de mitigación activa es diseñado para mantener el agua de escorrentía en niveles específicos. El concreto permeable usado en un sistema de mitigación activa debe tratar el agua de escorrentía de propiedades adyacentes incluyendo edificios, áreas pavimentadas en concreto convencional impermeable y zonas adyacentes. Cuando se usa un sistema de mitigación activa, bordes, cunetas, drenajes y cobertura del suelo deben asegurarse de que el flujo de agua en el pavimento permeable no lleven sedimentos ya que pueden obstruir el sistema.

Tormenta

Una tormenta es un conjunto de lluvias que tienen una misma perturbación meteorológica y con características claramente definidas. Puede durar desde unos pocos minutos hasta varias horas o días, abarcando grandes extensiones de terreno hasta pequeñas zonas en varias regiones.

El agua de escorrentía es afectada por la naturaleza de la tormenta, es decir, una gran tormenta dará como resultado mucho más agua de escorrentía. Las tormentas tienen una distribución o un patrón de intensidades de lluvia, donde la máxima intensidad de lluvia ocurre en algún punto después de que la tormenta ha comenzado. Diferentes tamaños de tormentas pueden resultar en diferentes cantidades de agua de escorrentía y la selección de un apropiado diseño de tormenta es importante. Las grandes tormentas ocurren con menor frecuencia y son típicamente diseñadas basadas en su periodo de retorno.

Elementos fundamentales en el análisis de tormentas

En el análisis de las tormentas hay que considerar:

La intensidad

Esta corresponde a la cantidad de agua caída por unidad de tiempo. Interesa principalmente al analizar una tormenta la intensidad máxima que se haya presentado, y se expresa de esta manera:

$$i_{\text{máx}} = P/t$$

Donde:

$i_{\text{máx}}$ = Intensidad máxima en mm/hora

P=Precipitación en altura de agua en mm

T=Tiempo en horas

La duración

La duración es el tiempo que transcurre entre el comienzo y el fin de la tormenta. Así, pues, también se define el periodo de duración como un determinado periodo tomado en minutos u horas dentro del total que dura la tormenta.

La frecuencia

Esta es el número de veces que se repite una tormenta, de iguales características, intensidades y duraciones definidas en un periodo más o menos largo, tomado generalmente en años.

Período de retorno

Este período es un intervalo de tiempo promedio, dentro del cual un evento de “X” magnitud puede ser igualado o excedido, por lo menos una vez en promedio. La selección de un apropiado periodo de retorno es importante porque muestra la cantidad de lluvia que debe ser considerada para el diseño.

Diseño hidrológico del pavimento

Cuando se diseñan sistemas de manejo de aguas en concreto permeable dos condiciones deben ser consideradas: permeabilidad y capacidad de almacenamiento. El exceso de agua de escorrentía (causada por la baja permeabilidad o inadecuada capacidad de almacenamiento) puede ser prevenido.

Permeabilidad

En general, la permeabilidad del concreto no es un criterio crítico de diseño. Diseñadores aseguran que la permeabilidad debe ser la suficiente para acomodar toda la lluvia que cae sobre la superficie del concreto permeable. Un sistema de pavimento permeable de moderada porosidad puede tener valores típicos de 143 L/m²/min, el cual es equivalente a una razón de infiltración de 6,077 cm/s (8600 mm/hora) de 100 veces la infiltración que las arenas saturadas. Sin embargo, la razón de flujo a través de la sub-rasante puede ser más restrictiva.

La tasa de infiltración del agua de escorrentía capturada del sistema de pavimento en concreto permeable en la sub-rasante es controlada por la infiltración del suelo. La permeabilidad de los pavimentos en concreto permeable debería ser retenida por un mantenimiento rutinario en servicio, el cual puede consistir en un aspirado periódico (anualmente por ejemplo).

Capacidad de almacenamiento

La capacidad de almacenamiento de un sistema en concreto permeable típicamente es diseñada para específicos eventos de tormenta, los cuales son dictados por diferentes requerimientos locales. El total de volumen de lluvia es importante, pero la razón de infiltración del suelo debe ser considerada.

La capacidad total de almacenamiento de un sistema en concreto permeable incluye la capacidad del pavimento en concreto permeable, la capacidad de la sub-base usada y la cantidad de agua se infiltra en el sistema dentro del suelo donde está asentado el sistema. La capacidad de almacenamiento teórica del concreto permeable

es su porosidad efectiva: qué porción del concreto permeable puede ser llenado con lluvia. Si el concreto permeable tiene 15% de porosidad efectiva, entonces cada 25 mm de profundidad del pavimento puede sostener 4 mm de lluvia.

Otra importante fuente de almacenamiento es la sub-base. Piedra limpia compactada usada como una sub-base tiene una porosidad de diseño de 40%, un agregado convencional con un alto contenido de finos puede tener una baja porosidad. El efecto de la sub-base sobre la capacidad de almacenamiento de un sistema de pavimento en concreto permeable puede ser significativo.

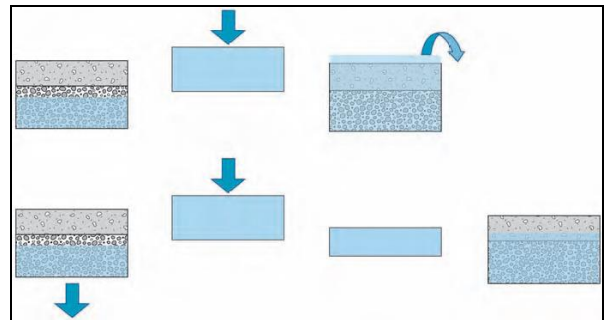


Figura 11. Infiltración del agua de lluvia dentro del suelo incrementando la capacidad de almacenamiento del sistema de pavimento en concreto poroso.

Fuente: Pervious Concrete, when it rains...it drains, NRMCA

Suelos para sub base y sub rasante

La infiltración dentro de la sub-rasante es importante tanto para sistemas pasivos y activos. Estimar la razón de infiltración para propósitos de diseño es impreciso, y el proceso actual de infiltración del suelo es complejo. Un modelo simple es generalmente aceptable para estas aplicaciones y para estimaciones iniciales para diseños preliminares pueden ser hechos con precisiones satisfactorias usando estimaciones conservadoras para razones de infiltración.

Como una regla general, suelos con una razón de percolación de 12 mm/hr son apropiados para sub-rasantes. Suelos arcillosos y otras capas impermeables pueden obstaculizar la función del pavimento permeable y debe ser modificado para que tenga una apropiada retención y percolación de la precipitación. En algunos casos, las capas impermeables

necesitan ser excavadas y reemplazadas. Si los suelos son impermeables, un espesor grande de sub-base porosa debe ser puesta en el sitio. La profundidad actual debe proveer el volumen de retención adicional requerido para cada proyecto. Un suelo con granulometría abierta (piedra o grava, sub-base de cemento portland con granulometría abierta (ACPA 1994) y arena pueden dar apropiadas sub-rasantes para retener y almacenar el agua, reduciendo los efectos del rápido almacenamiento de agua de escorrentía sobre la superficie y reduciendo la compresibilidad. Para suelos existentes que tienen mucha arena y son permeables, una sub-base de granulometría abierta generalmente no es requerida, a menos que esto facilite la puesta en el sitio. Una sub-rasante de grava y arena es apropiada para colocar el concreto permeable.

En muy pocos casos, suelos drenantes pobres, con bajas razones de infiltración pueden ser usados para el diseño. Pero diseños en suelos con contenido de arcilla deben ser aprovechados con cierto cuidado. Es importante recordar que la escorrentía natural es relativamente alta en áreas con suelos arcillosos, incluso con cobertura natural y un apropiado diseño y construcción de un pavimento en concreto permeable puede dar un beneficio positivo en muchas situaciones. Para propósitos de diseño, el tiempo total de retención (el tiempo del 100% de la capacidad de almacenamiento que puede soportar) debe ser lo más corto posible, y generalmente no debe exceder los 5 días (Malcolm 2003).

Otra opción para suelos pobremente drenantes es instalar canales de drenaje a través de la sub-rasante. En este caso, se necesita considerar el tema de la calidad del agua, tal como los contaminantes de esta.

Consideraciones para el diseño estructural

El concreto permeable es un material único que tiene una matriz y características diferentes al concreto convencional u otros materiales para pavimento. Aunque estas características son diferentes de las de los concretos convencionales pueden ser medibles. Proyectos de buenos a excelentes han tenido una vida de servicio de 20

a 30 años dando una gran evidencia de que este tipo de material puede ser durable, si se tienen sub-rasantes aceptables y si es construido adecuadamente.

Diseño estructural del pavimento

Los pavimentos en concreto permeable pueden ser diseñados usando cualquiera de los procedimientos estándar (AASHTO, WinPAS, PCAPAV, ACI 325.9R o ACI 330R) o utilizando números estructurales derivados de un procedimiento para diseñar pavimento flexible. A pesar de los procedimientos utilizados, las guías para las propiedades del suelo para la sub-rasante, características de los materiales del concreto permeable y cargas de tráfico deben ser consideradas.

Suelos para sub base y sub rasante

El diseño del pavimento permeable debe tener una capa de base permeable de aproximadamente de 15 a 30 cm (6 a 12 in). La sub-base permeable puede tener un tamaño máximo de agregado de 25 mm o una sub-rasante natural que tenga predominantemente arena con moderadas cantidades de arcillas y suelo pobremente graduado. Cada tipo de material ofrece buenos valores de soporte como los definidos en el módulo de reacción de la sub-rasante (k). Si el k no excede los 54 MPa/m y valores de 40 a 48 MPa/m, generalmente son apropiados suelos a los cuales se les conoce sus características mecánicas.

CUADRO 1. TIPOS DE SUELO PARA SUBRASANTE Y RANGO DE VALORES APROXIMADOS DE K				
Tipo de suelo	Soporte	Valores de k psi/in³ (Mpa/m)	CBR	Valores R
Suelos granulados finos en el cual las partículas de arcilla predominan	Bajo	75 a 120 (20 a 34)	2,5 a 3,5	10 a 22
Mezclas de arena y arena granulada con cantidades moderadas de arena y arcilla	Mediano	130 a 170 (35 a 49)	4,5 a 7,5	29 a 41
Mezclas de arena y arena granulada relativamente libres de finos plásticos	Alto	180 a 220 (50 a 60)	8,5 a 12	45 a 52

Fuente: Porous Concrete Pavements Paul D. Tennis y otros

El módulo de reacción compuesto de la subrasante es definido por relaciones teóricas entre valores de k (ASTM D 1196 y AASHTO T222 o estimado del módulo elástico del suelo de la subrasante.

$$k = M_R / 19.4$$

K=pci

M_R=módulo de resiliencia del suelo (psi)

$$k = 2.03M_R$$

M_R=MPa

K=MPa/m

Determinando el módulo de la subrasante in situ en condición de servicio saturada puede incrementarse la factibilidad del diseño.

Arcillas y suelos altamente expansivos

Provisiones especiales de diseño deben ser considerados en el diseño de pavimentos en concreto permeable, para áreas con suelos con

grandes cantidades de arcillas de alta compresibilidad y suelos expansivos. Es recomendable que suelos con altos materiales orgánicos deben ser removidos y reemplazados con suelos que contengan alto contenido de material grueso. También el diseño debe tener un filtro de arena, piedra de granulometría abierta y grava para dar un apropiado contenedor e incrementar los valores de soporte. Otra alternativa de diseño es sub-base de arena puesta sobre un drenaje que contiene partículas finas. En lugar del suelo arenoso, un pavimento permeable de agregado con granulometría abierta, puede dar una sub-base para una superficie que contenga una mezcla con agregados de 9 mm.

Cargas de tráfico

El tráfico anticipado que puede transitar en un pavimento permeable puede ser caracterizado como el equivalente a 85 kN (18000 lb) (ESALS), tráfico diario regular, o tráfico de camiones diario regular. Desde que el impacto de los camiones sobre el pavimento es más grande que los automóviles, la estimación de camiones usados en un pavimento permeable es crítico para diseñar un pavimento de larga vida útil.

Otros factores de diseño

Dependiendo del método de diseño de pavimentos utilizado, otros factores como tráfico y resistencia del concreto deben ser considerados. Por ejemplo, si el procedimiento de diseño de la AASHTO es usado, temas como el factor de serviciabilidad final, transferencia de cargas en las juntas y bordes de soporte son consideraciones importantes. El factor de serviciabilidad final para concreto permeable es más consistente que para el pavimento convencional. En las juntas, los diseñadores deben dar crédito para la transferencia de cargas por los agregados interconectados. Si los bordillos, aceras son usados en los filos del pavimento, se deben utilizar los factores para soporte de pavimento.

Propiedades de los materiales para el diseño del pavimento

La resistencia a la flexión del concreto en un pavimento rígido es muy importante para el diseño. El diseño de pavimentos rígidos está basado en la resistencia del pavimento, que distribuye las cargas uniformemente a la subrasante. Sin embargo, pruebas han determinado que la resistencia a la flexión del concreto permeable puede estar sujeto a gran variabilidad; por lo tanto, es común medir la resistencia a la compresión y usar relaciones empíricas para estimar las resistencias a la flexión para utilizar en el diseño. Desde la resistencia se determina el nivel de actuación del pavimento y su vida de servicio, las propiedades del concreto permeable deben ser cuidadosamente evaluadas.

Un diseño de mezcla para un pavimento permeable debe dar amplios rangos de resistencia y valores de permeabilidad dependiendo del grado de compactación. Ensayos de pre-construcción determinan la relación entre la compresión o tensión y la resistencia a la flexión, así como el peso unitario y el contenido de vacíos para los materiales propuestos.

Método AASHTO para el diseño de pavimentos rígidos

Variables por considerar en este método:

Ejes simples equivalentes de 82 kN a lo largo del período de diseño

Para la aplicación de este método se necesita la transformación de 85 kN (8.0 toneladas métricas ó 18.000 lbs.) los ejes de diferentes pesos que circulan por el pavimento durante su período de diseño.

Conforme el número de carriles en ambas direcciones, el tránsito que se debe tomar en cuenta es el que pasa por el carril de diseño, generalmente se considera que en cada dirección circule el 50% del total del tránsito, además dependiendo del lugar puede variar entre un 30 a un 70%.

Desviación normal estándar Z_r

Define para un conjunto de variables como espesor de las capas, características de los materiales, condiciones de drenaje, etc., el tránsito que puede soportar el pavimento por diseñarlo a lo largo de su período de diseño.

Error estándar combinado (S_o)

Este valor representa la desviación estándar conjunta e incluye el número de ejes que puede soportar un pavimento hasta que su índice de serviciabilidad descienda por debajo de un determinado índice de serviciabilidad final.

Se recomiendan los siguientes intervalos:

Para pavimentos rígidos: 0.30-0.40

En construcción nueva: 0.35

En sobre capas: 0.40

Variación del índice de serviciabilidad ΔPSI

El índice de serviciabilidad final P_t , es el valor más bajo que pueda ser admitido en un pavimento antes de efectuar una rehabilitación, un refuerzo o una reconstrucción.

Como este valor es el más bajo que una carretera puede admitir hasta llegar a su deterioro, se recomienda que para carreteras de primer orden (de mayor tránsito) se utilice un valor de 2.5 y para carreteras menos importantes se utilice un valor de 2.

Para la escogencia del índice de serviciabilidad inicial (P_o), es necesario considerar los métodos de construcción, ya que de estos depende la calidad del pavimento. Se ha recomendado, según ensayos, que se utilice para pavimentos rígidos un valor de 4.5 y para pavimentos flexibles un valor de 4.2. Por lo tanto, el índice de serviciabilidad se obtiene restándole a la serviciabilidad inicial (P_o) la serviciabilidad final (P_t).

Coeficiente de drenaje

Este valor se da dependiendo de dos variables, las cuales son:

- La calidad del drenaje: se determina por el tiempo que tarda el agua infiltrada en ser evacuada de la estructura del pavimento.
- Exposición de saturación: porcentaje de tiempo durante el año en que un

pavimento está expuesto a niveles de humedad que se aproximan a la saturación. Depende de la precipitación media anual y de las condiciones de drenaje.

Coeficiente de transmisión de carga (J)

Se utiliza para tomar en cuenta la capacidad del pavimento rígido de transmitir las cargas a través de los extremos de las losas (juntas o grietas). La determinación de su valor depende del tipo de pavimento (reforzado en las juntas, de armadura continua, etc.), del tipo de hombro (de asfalto o concreto), la colocación de elementos de transmisión de carga (pasadores en los pavimentos con juntas, acero en los armados continuos, etc.).

Módulo de elasticidad del concreto E_c

Este valor se puede determinar conforme la norma ASTM C-469 o al correlacionarlo con otras características del material. En algunos códigos se ha determinado que este valor se puede obtener mediante las siguientes ecuaciones:

CUADRO 2. CORRELACIÓN ENTRE LAS RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN Y EL MÓDULO DE ELASTICIDAD E_c		
Tipo de agregado y origen	Módulo de elasticidad E_c (Mpa)	Módulo de elasticidad E_c (kg/cm²)
Grueso-ígneo	$E_c = 5500 \times (f_c)^{1/2}$	$E_c = 17000 \times (f_c)^{1/2}$
Grueso-metamórfico	$E_c = 4700 \times (f_c)^{1/2}$	$E_c = 15000 \times (f_c)^{1/3}$
Grueso-sedimentario	$E_c = 3600 \times (f_c)^{1/2}$	$E_c = 11500 \times (f_c)^{1/4}$
Sin información	$E_c = 3900 \times (f_c)^{1/2}$	$E_c = 12500 \times (f_c)^{1/5}$

Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimento AASHTO 1993

Factor de pérdida de soporte (L_s)

Es el valor que se le otorga a la pérdida de soporte que pueden llegar a tener las losas de un

pavimento rígido, por erosión en la sub-base producto de las corrientes de agua o por los

asentamientos diferenciales de la sub-rasante. Se pueden determinar conforma el siguiente cuadro:

CUADRO 3. VALORES DEL FACTOR DE PÉRDIDA DE SOPORTE LS, POR EL TIPO DE SUB BASE O BASE	
Tipos de sub base o base	Factor de pérdida de soporte
Sub bases granulares tratadas con cemento (Mr: de 7000 a 14000 Mpa)	0,00 a 1,00
Sub bases tratadas con cemento (Mr: de 3500 a 7000 Mpa)	0,00 a 1,00
Bases asfálticas (Mr: de 2500 a 7000 Mpa)	0,00 a 1,00
Sub bases estabilizadas con asfaltos (Mr: de 300 a 2000 Mpa)	0,00 a 1,00
Estabilización con cal (Mr: de 150 a 1000 Mpa)	1,00 a 3,00
Materiales granulares sin tratar (Mr: de 100 a 300 Mpa)	1,00 a 3,00
Suelos finos y sub rasantes naturales (Mr: de 20 a 300 Mpa)	2,00 a 3,00

Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimentos AASHTO 1993

Módulo de reacción k

El módulo de reacción de la superficie es el valor de la capacidad de soporte del suelo. Esta capacidad depende del módulo de resiliencia de la sub-rasante y sub-base, así como del módulo de elasticidad de la sub-base.

Para la determinación del módulo de elasticidad de la sub-base se puede hacer la correlación con el uso de parámetros como el CBR y el valor R, cabe destacar que el módulo de elasticidad de la sub-base no sea mayor de 4 veces del valor de la sub- rasante.

Metodología

Para la selección de la mezcla que se utilizaría para la realización de las pruebas de tensión y flexión de concreto permeable, se emplearon tres diseños de mezcla diferentes para seleccionar la mezcla óptima tomando en cuenta su trabajabilidad, permeabilidad y resistencia a la flexión a los siete días de curado.

Los diseños de mezcla que se utilizaron fueron los planteados como óptimos por el Ing. Roberto Fernández, en el estudio realizado por este investigador mencionado con anterioridad. Ese trabajo constituyó un antecedente para el presente estudio.

Primeramente se procedió a determinar la humedad de los agregados siguiendo la norma ASTM C566-97 y luego se corrigió cada diseño por la humedad correspondiente.

Se siguió el procedimiento de mezcla para cada uno de los diseños presentado por el Ing. Fernández con el fin de reproducir, a cabalidad, cada una de las mezclas y de aproximarse lo mejor posible a los resultados que él obtuvo. El procedimiento seguido fue el siguiente:³

1. Introducir el agregado grueso a la mezcladora
2. Añadir un contenido de cemento menor al 5% por peso y batir durante un minuto o hasta cubrir por completo el agregado grueso.
3. Añadir el agregado fino (cuando se utilice).
4. Añadir el cemento y mezclar durante unos segundos todos los materiales
5. Añadir aproximadamente el 90% del agua con la mezcladora encendida de manera lenta y observar el comportamiento de la mezcla para determinar si requiere más agua
6. Mezclar tres minutos

7. Dejar reposar durante un minuto la mezcla
8. Mezclar dos minutos más durante los cuales se añade, el aditivo

9. Realizar la prueba de revenimiento según ASTM C-143
10. Añadir más agua en caso de ser, y se procede a realizar nuevamente la prueba de revenimiento.

Después de hacer la mezcla se moldearon dos vigas de 15x15x30 cm de dimensión para determinar la resistencia a la flexión a los catorce días de curado y un cilindro de 10x20 cm para la prueba de permeabilidad. Para esta prueba se trabajó con un permeámetro de carga constante, el cual se describe en la sección de anexos.

Cabe destacar que el moldeo de tanto de vigas como de cilindros es de vital importancia para obtener de forma eficiente un concreto permeable con las características idóneas.

Método de moldeo utilizado para los especímenes

A continuación se describe el método tradicional para el moldeo de vigas y cilindros así como el uso de vibradores. Además se muestra la metodología utilizada para el moldeo de vigas y cilindros usados en esta investigación justificando de esta manera su utilización.

Primeramente hay que colocar el concreto en los moldes utilizando una pala o cucharón. El concreto se coloca en capas conforme la siguiente tabla:

³ Proyecto de graduación "Concreto Permeable: diseño de mezclas para evaluar su resistencia a la compresión uniaxial y su permeabilidad". Ing. Roberto Fernández.

Espécimen	Forma de compactación	Número de capas
Cilindro 75 a 100 mm diámetro	Varillado	2
Cilindro 150 mm diámetro	Varillado	3
Cilindro 225 mm diámetro	Varillado	4
Cilindro de más de 225 mm diámetro	Vibrado	2
Vigas de 15x15x60 (revenimientos menores de 3 cm)	Vibrado	2
Vigas de 15x15x60 (revenimientos mayores de 8 cm)	Varillado	2

Métodos de compactación

La elaboración de especímenes adecuados requiere de métodos de compactación apropiados. Los más utilizados para el moldeo de especímenes de prueba son el varillado y el vibrado interno y externo. Para la selección del método más adecuado se debe poner atención en el revenimiento de la mezcla. El método del varillado se utiliza para mezclas con revenimiento mayor o igual a 25 mm. Las mezclas que posean revenimientos menores a 25 mm deberán ser vibrados, además no se debe usar vibración interna en cilindros que tengan un diámetro menor a 100mm ni para vigas con una altura menor a 100 mm.

A continuación se describe el método para realizar la compactación con varilla en especímenes de prueba.

Poner el concreto en el molde, con el número requerido de capas de aproximadamente igual volumen. Compactar cada capa con el extremo redondeado de la varilla, usando el número de golpes y tamaño de varilla especificado en la siguiente tabla. Los golpes se deben distribuir uniformemente sobre toda la sección del molde, y por cada capa la varilla deberá penetrar a través de ella aproximadamente 25 mm. Después compactada cada capa, se debe golpear ligeramente las paredes del molde con el martillo de hule para eliminar el aire atrapado y cerrar los orificios que queden en la mezcla.

Compactación con varilla

Diámetro del cilindro (mm)	Diámetro de varilla (mm)	Número de golpes por capa
50 a 150	10	25
150	16	25

200	16	50
250	16	75
Área de la superficie del molde (vigas) (cm ²)	Diámetro de varilla (mm)	Número de golpes por capa
160 o menos	10	25
165 a 310	10	1 por cada 7 cm ² de superficie
320 o más	16	1 por cada 14 cm ² de superficie

con el martillo de hule aproximadamente 10 veces para eliminar el aire atrapado y cerrar los orificios que no fueron vibrados.

Compactación con vibrado

La duración de la vibración depende de la trabajabilidad del concreto y la efectividad del vibrador. Usualmente se utiliza suficiente vibración cuando se quiere tener una superficie del concreto lisa y sin burbujas de aire.

Vibración interna

Para compactar el espécimen, se debe insertar el vibrador lentamente y se debe cuidar que éste no toque las paredes ni la base del molde. En el caso de los cilindros el número de inserciones del vibrador esta dado en la siguiente tabla. Cuando más de una inserción por capa es requerida, se deben distribuir uniformemente en cada capa. Además se debe permitir que el vibrador penetre en la capa de abajo aproximadamente 25 mm. Después de que cada capa es vibrada, se debe golpear el molde con el martillo de hule aproximadamente 10 veces para eliminar el aire atrapado.

Diámetro del cilindro (mm)	Número de inserciones por capa
200	1
150	2
225	4

En el caso del vibrado de las vigas, se debe insertar el vibrador en distancias que no excedan los 150 mm a lo largo de la línea central de la dimensión longitudinal del espécimen. Se debe dejar que el vibrador penetre en la capa anterior aproximadamente 25 mm, y después de que cada capa es vibrada se debe golpear el molde

Acabado

Después de haber compactado los especímenes, se retira el remanente de concreto con un enrasador metálico, con el menor número de pasadas para evitar depresiones en la superficie.

Método de moldeo utilizado

Con base en la investigación presentada anteriormente sobre los métodos de compactación utilizados para el moldeo de especímenes, se llegó a la conclusión que ninguno de los dos métodos se podía utilizar para la realización de las muestras requeridas en este trabajo.

Los métodos de envarillado y vibrado lo que persiguen además de acomodar la mezcla de concreto en el espécimen, es eliminar la cantidad de vacíos u orificios que se presentan en la mezcla. Dada la función del concreto permeable, la cual es permitir que fluya el agua a través de él, estos vacíos u orificios son de vital importancia, por lo tanto se debe escoger un método de compactación que permita acomodar la mezcla dentro del espécimen pero sin que se cierren o eliminen estos vacíos.

Por lo tanto se siguió el siguiente procedimiento, el cual resulto satisfactorio, ya que en todas las mezclas que se realizaron se obtuvieron permeabilidades que se encontraron dentro del rango admisible para este tipo de concreto.

Moldeo de cilindros

Para el moldeo de cilindros se procedió a colocar la mezcla de concreto en los especímenes por medio de una cuchara. Se colocó en tres capas de aproximadamente igual volumen y se compactó cada capa utilizando un martillo Hilti de sección circular como él que se muestra en la Fig. 13, con el cuidado de aplicar la adecuada energía de compactación entre cada capa con el fin de evitar disminuir la cantidad de vacíos en la mezcla de concreto. Para el acabado final se retiró el remanente con un enrasador metálico para tratar de nivelar la superficie.

Moldeo de vigas

Para moldear las vigas se procedió a colocar la mezcla de concreto en los moldes, en dos capas de aproximadamente igual volumen. Cada capa fue compactada con un martillo Hilti de sección cuadrada como él que se muestra en la Figura No.12, aplicándole diez golpes por cada 90 cm² de superficie. Además se quitó el remanente con un enrasador metálico para tratar de dejar uniforme la superficie.



Figura 12. Moldeo de vigas



Fig 13. Moldeo de cilindros

Posteriormente, se desmoldaron los especímenes y se colocaron en la pila de curado por catorce días identificando cada mezcla con un color y simbología distintos. Luego de transcurridos los catorce días, se procedió a realizar la prueba de flexión a cada una de las vigas moldeadas para así determinar su módulo de rotura. Con los datos obtenidos de flexión a los catorce días para cada diseño de mezcla, se escogió la óptima para determinar la resistencia a la flexión y a la tensión del concreto permeable. Seguidamente, se determinó el esfuerzo de flexión y tensión a los 7, 14 y 28 días de curado, este último se realizó mediante el ensayo de tensión indirecta (prueba brasileña) el cual se describió en la sección de Marco Teórico del presente informe.

Todos estos ensayos se realizaron en el laboratorio CETEC en Holcim, ubicado en San Rafael de Alajuela y en los laboratorios del CIVCO en el Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), ubicado en Cartago.

Con la obtención de estos valores se procedió a determinar el diseño estructural del pavimento. Para ello se siguió la metodología AASHTO y para el diseño hidrológico de este se utilizó el método racional, el cual se describe en la sección de Resultados del presente informe.

Resultados

Selección de la mezcla óptima

Para la determinación del diseño de mezcla por utilizar para realizar las pruebas se tomaron en cuenta tres diseños de mezcla distintos y se compararon entre ellos para conocer cuál de todos resultaba mejor.

Dos de los diseños presentados fueron escogidos del estudio realizado por el Ing. Roberto Fernández. Estos se seleccionaron debido a que han sido los diseños que mejores resultados han tenido en cuanto a compresión

uniaxial y permeabilidad (mezclas denominadas M7 y M8 mencionadas en el Marco Teórico, Figura 4).

El otro diseño fue proporcionado por Holcim Concretos. Este fue seleccionado porque según estudios realizados en este centro dio buenos resultados.

Antes de realizar la mezcla se procedió a determinar la humedad de los agregados según la norma ASTM C566-97 y así corregir el diseño de mezcla. Los agregados utilizados fueron quintilla de 16 mm y arena industrial de 6mm.

Los resultados de las humedades obtenidas se muestran en el cuadro 4.

Con la determinación de las humedades se procedió a corregir los diseños de mezcla presentados y a determinar la cantidad de los materiales. Estos se muestran en el cuadro 5 y 6 respectivamente

CUADRO 4. DETERMINACION DE LAS HUMEDADES DE LOS AGREGADOS				
Agregado	Peso bandeja (g)	Bandeja+muestra	Bandeja+muestra	Contenido de humedad (%)
		Húmedo (g)	seco (g)	
Quintilla 16 mm	555,20	4497,10	4413,10	1,90%
Arena 6 mm	554,30	2085,50	2012,80	3,61%

CUADRO 5. RELACIONES USADAS PARA CADA MEZCLA						
Identificación	Relación teórica a/c	AG/c	Reductor de agua/c (cc/kg)	Plastificante/c (cc/kg)	Modificador de viscosidad/c (cc/kg)	AF/AG (%)
M1	0,30	4,70	2,50	3,50	0,00	8%
M2	0,28	4,30	2,50	3,50	0,00	0,00
MC	0,30	5,75	2,50	7,00	3,50	0,00

M1: mezcla 1, M2: mezcla 2, MC: mezcla Holcim Concretos⁴

⁴ Diseños proporcionados por el Ing. Roberto Fernández y Holcim Concretos

CUADRO 6. CANTIDAD DE MATERIALES UTILIZADOS PARA CADA MEZCLA							
Identificación	Agua (kg)	Cemento (kg)	Agregado grueso (kg)	Agregado fino (kg)	Reductor de agua/c (cc/kg)	Plastificante/c (cc/kg)	Modificador de viscosidad/c (cc/kg)
M1	6,81	19,80	93,06	7,44	49,50	69,30	0,00
M2	6,82	19,80	85,14	0,00	49,50	69,30	0,00
MC	6,21	19,80	113,93	0,00	0,00	140,00	69,30

Luego de realizar cada mezcla se procedió a realizar en cada una de ellas una prueba de consistencia o trabajabilidad, la cual establece que tomando una pequeña porción de la muestra y haciéndola un puño, al soltarla

mantendrá una forma de bola y no se segregará.

Esta prueba se le aplicó a la muestra por un espacio de una hora y los resultados se muestran a continuación.

CUADRO 7. TRABAJABILIDAD DE CADA MEZCLA				
Nombre	Tiempo (min)	Trabajabilidad		
		Sí	No	
M1	0	√		
	15	√		
	30	√		
	45	√		
	60	√		
M2	0	√		
	15	√		
	30	√		
	45	√		
	60	√		
MC	0	√		
	15	√		
	30		√	
	45		√	
	60		√	

Después de transcurridos catorce días se procedió a realizar el ensayo de flexión sobre las

vigas, según la norma ASTM C-78. Los resultados se muestran a continuación:

CUADRO 8. MODULO DE ROTURA Y CARGA MAXIMA PARA CADA MUESTRA				
Mezcla	Viga	Módulo de rotura (kg/cm ²)	Carga máxima (kg)	Módulo de rotura promedio (kg/cm ²)
M1	1	38,29	2495,00	31,23
	2	24,16	1888,00	
M2	1	29,67	2317,00	28,32
	2	26,96	2106,00	
MC	1	10,79	843,00	8,01
	2	5,23	408,00	

Dados estos resultados se llegó a la conclusión de utilizar la mezcla denominada M1 para realizar las pruebas de flexión y tensión en el concreto permeable.

Determinación de la permeabilidad de las mezclas analizadas

Para determinar la permeabilidad de los tres diseños de mezcla se procedió a fabricar un permeámetro de carga constante, pues este tipo de aparato es utilizado según la mecánica de suelos para medir la permeabilidad de suelos gruesos (arenas y gravas), y el concreto poroso posee en su interior características similares a estos materiales. Las ecuaciones utilizadas se encuentran en el Anexo No.4. y los resultados de esta prueba se observan en los siguientes cuadros:

CUADRO 9. CONSTANTES UTILIZADAS PARA EL PERMEAMETRO DE CARGA CONSTANTE		
Constante	Medida	Unidad
Longitud (L)	20,00	cm
Diámetro del cilindro	10,00	cm
Área del cilindro	78,50	cm ²
Tiempo	30,00	s

CUADRO 10. DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD					
Identificación	Altura h1 (cm)	Altura h2 (cm)	Diferencia de alturas Δh (cm)	Volumen (cm ³)	Constante k (cm/s)
M1	26,000	8,500	17,000	1746,667	0,873
M2	25,500	6,000	19,500	3330,000	1,406
MC	26,000	10,000	16,000	2513,333	1,334

Resultados de la mezcla óptima

Para obtener estos resultados se moldearon cuatro cilindros para cada edad y dos vigas también para cada edad.

El procedimiento que se siguió fue el mismo que se utilizó para determinar la mezcla óptima que se utilizaría para las pruebas de resistencia.

Se determinó la humedad de los agregados acatando la norma correspondiente. Esto permitió obtener los siguientes resultados:

CUADRO 11. DETERMINACION DE LAS HUMEDADES DE LOS AGREGADOS				
Agregado	Peso bandeja (g)	Bandeja+muestra	Bandeja+muestra	Contenido de humedad (%)
		Húmedo (g)	seco (g)	
Quintilla 16 mm	538,60	4911,00	4781,40	2,70%
Arena 6 mm	550,70	3704,00	3593,40	3,07%

La determinación de las cantidades o diseño de mezcla utilizadas se realizó tomando las relaciones expuestas en el estudio del Ing.

Roberto Fernández. Estas cantidades y relaciones se muestran en los siguientes cuadros

CUADRO 12. RELACIONES USADAS PARA LA MEZCLA ÓPTIMA						
Identificación	Relación teórica a/c	AG/c (kg/kg)	Reductor de agua/c (cc/kg)	Plastificante/c (cc/kg)	Modificador de viscosidad/c (cc/kg)	AF/AG (%)
M1	0,30	4,70	2,50	3,50	0,00	8%

CUADRO 13. CANTIDAD DE MATERIALES UTILIZADOS PARA LA MEZCLA ÓPTIMA							
Identificación	Agua (kg)	Cemento (kg)	Agregado grueso (kg)	Agregado fino (kg)	Reductor de agua/c (cc/kg)	Plastificante/c (cc/kg)	Modificador de viscosidad/c (cc/kg)
M1	33,00	99,00	421,68	35,02	247,50	346,00	0,00

Se moldearon 12 cilindros: 4 cilindros para cada edad (7, 14 y 28 días) los cuales se utilizaron para realizar la prueba de tensión indirecta (prueba brasileña) y 6 vigas: 3 para cada edad (7, 14 y 28 días) para realizar la prueba de flexión.

Así pues se realizó el ensayo de peso unitario en la mezcla de concreto fresco y el

porcentaje de contenido de aire siguiendo las normas ASTM C-29.

En los siguientes cuadros se muestra el peso unitario de la mezcla de concreto realizada así como su contenido de aire.

CUADRO 14. DENSIDAD DE LA MEZCLA ÓPTIMA					
Peso Unitario					
Identificación de la mezcla	Masa del recipiente (kg)	Volumen del recipiente (m ³)	Masa del recipiente+concreto (kg)	Masa neta del concreto (kg)	Peso unitario del concreto (kg/m ³)
M1.1	2,62	0,007	13,20	10,58	1511,43
M1.2	2,62	0,007	13,19	10,57	1510,00
M1(promedio)	2,62	0,007	13,20	10,58	1510,71

CUADRO 15. CONTENIDO DE AIRE DE LA MEZCLA ÓPTIMA			
Contenido de aire			
Masa total de materiales mezclados (kg)	Volumen de los materiales en la mezcla (m ³)	Densidad teórica del concreto, libre de aire (kg/m ³)	Contenido de aire en el concreto (%)
294,35	0,165	1783,94	15,28
294,35	0,165	1783,94	15,36
588,69	0,33	1783,91	15,31

Las muestras se colocaron en la cámara húmeda y se determinaron los esfuerzos de tensión indirecta (prueba brasileña) y de flexión a los 7,

14 y 28 días de curado. Los resultados de los esfuerzos se muestran a continuación en los siguientes cuadros:

CUADRO 16. ESFUERZOS DE FLEXIÓN EN LAS VIGAS A LOS SIETE DIAS DE CURADO					
Viga	Esfuerzo (kg/cm ²)	Carga máxima (kg)	Desviación estándar	Coefficiente de Variación	Error estándar
1	34,80	2716,00	0,650	1,845	0,071
2	35,72	2791,00			
Promedio	35,26	2753,50			

CUADRO 17. ESFUERZO DE TENSIÓN EN LOS CILINDROS A LOS SIETE DÍAS DE CURADO			
Identificación	Carga máxima (kN)	Carga máxima (kg)	Esfuerzo (kg/cm²)
1	127,60	13011,58	9,21
2	136,80	13949,72	9,87
3	98,30	10023,81	7,09
4	79,30	8086,35	5,72
Promedio	110,50	11267,87	7,97

CUADRO 18. ESFUERZOS DE FLEXIÓN EN LAS VIGAS A LOS CATORCE DÍAS DE CURADO					
Viga	Esfuerzo (kg/cm²)	Carga máxima (kg)	Desviación estándar	Coefficiente De Variación	Error estándar
1	37,83	2955,00	3,620	10,265	2,207
2	32,71	2555,00			
Promedio	35,27	2755,00			

CUADRO 19. ESFUERZO DE TENSIÓN EN LOS CILINDROS A LOS CATORCE DÍAS DE CURADO			
Identificación	Carga máxima (kN)	Carga máxima (kg)	Esfuerzo (kg/cm²)
1	116,90	11920,48	8,44
2	113,60	11583,98	8,20
3	109,50	11165,89	7,90
4	102,50	10452,09	7,40
Promedio	110,63	11280,61	7,98

CUADRO 20. ESFUERZOS DE FLEXIÓN EN LAS VIGAS A LOS VEINTIOCHO DÍAS DE CURADO					
Viga	Esfuerzo (kg/cm²)	Carga máxima (kg)	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Error estándar
1	37,90	2959,00	1,909	4,864	0,582
2	40,60	3173,00			
Promedio	39,25	3066,00			

CUADRO 21. ESFUERZO DE TENSIÓN EN LOS CILINDROS A LOS VEINTIOCHO DÍAS DE CURADO			
Identificación	Carga máxima (kN)	Carga máxima (kg)	Esfuerzo (kg/cm²)
1	108,30	11043,53	7,82
2	153,20	15622,05	11,06
3	89,90	9167,25	6,49
4	109,10	11125,10	7,87
Promedio	115,13	11739,48	8,31

Diseño estructural del pavimento en concreto permeable

El diseño del pavimento se realizó para un proyecto de bien social ubicado en la provincia de Cartago, específicamente en Cachí de Paraíso. Este proyecto consta de 89 casas de habitación con áreas entre 140 Y 224 m². Se escogió este tipo de pavimento ya que el proyecto que se pretende desarrollar tiene como principal objetivo ser un proyecto habitacional que presentara opciones de construcción amigables con el medio ambiente, por lo tanto no pretendía con la obra a realizar contaminar los acuíferos del lugar, al contrario, se quería proveer de un sistema de pavimento que de modo natural llevara las aguas de escorrentía producidas en el lugar hacia los acuíferos eliminando los contaminantes de las aguas municipales, así como encauzar estas aguas hacia el Lago de Cachí, el cual queda a pocos metros del proyecto. Por tal motivo se decidió utilizar este tipo de pavimento por las múltiples ventajas que posee.

Determinación de los ejes equivalentes

Para la determinación de los ejes equivalentes se supuso que sobre el pavimento transitarían 40 vehículos livianos y dos vehículos semi-pesados.

Seguidamente para establecer la cantidad de ejes equivalentes que corresponden a esta cantidad de vehículos, se hizo uso de los cuadros presentados en el Apéndice No.2, suponiendo un índice de serviciabilidad final de 2.0 por ser una carretera de limitada importancia y un espesor de losa de 6 pulgadas.

El valor de la correspondiente conversión de toneladas a kips de los vehículos así como su correspondiente factor equivalente de carga (los factores de carga se realizaron por interpolación de valores) se muestra en el siguiente cuadro:

CUADRO 22. CONVERSIONES PARA CADA EJE Y SU CORRESPONDIENTE FACTOR EQUIVALENTE DE CARGA				
Tipo de vehículo	Tipo de eje	Carga (ton)	Carga (kips)	Factor equivalente de carga
C2	Eje simple direccional	5	11,025	0,138
	Eje simple tracción	10	22,050	2,346
T2-S1	Eje simple direccional	5	11,025	0,138
	Eje simple tracción	9	19,845	1,507
	Eje simple de arrastre	9	19,845	1,507
T2-S2	Eje simple direccional	5	11,025	0,138
	Eje simple	9	19,845	1,507
	Eje de arrastre (doble rueda)	16	35,280	2,233

Se estableció posteriormente una tasa de crecimiento del 4% y una vida útil del pavimento de 20 años. Por lo tanto, se estableció un factor de crecimiento de 29.78 con la ayuda del cuadro

presentado en el Apéndice No.2. Por lo tanto, se obtuvieron los ESAL`S de diseño los cuales se muestran en el siguiente cuadro:

CUADRO 23. ESAL`S DE DISEÑO					
Tipo de vehículo	Cantidad de vehículos diarios	Factor de crecimiento	Tránsito de diseño	ESAL`S factor	ESAL`S de diseño
C2	40	29,78	434788	2,484	1080007,957
T2-C1	2	29,78	21739,4	3,152	68533,18676
T1-S2	2	29,78	21739,4	3,878	84303,491
			ESAL`S de diseño		1232844,635

Se estableció una confiabilidad del 50% para un tránsito menor de 5 millones de ejes equivalentes

y un error estándar combinado de 0.35, según la siguiente Figura:

Tránsito esperado en el carril de diseño en millones de ejes equivalentes	Confiabilidad R	Z _r	S _o	Factor de Seguridad F.S.
<5	50	0.000	0.35	1.00
5 – 15	50 – 60	0.000-0.253	0.35	1.00 – 1.23
15 – 30	60 – 70	0.253 – 0.524	0.35	1.23 – 1.83
30 – 50	70 – 75	0.524 – 0.674	0.34	1.51 – 1.70
50 – 70	75 – 80	0.674 – 0.841	0.32	1.64 – 1.86
70 – 90	80 – 85	0.841 – 1.037	0.30	1.79 – 2.05

Fuente: Diseño, Construcción y Mantenimiento de pavimentos de concreto, Londoño, Cipriano, 2,001.

Fig 14. Confiabilidad y error estándar combinado

Para la determinación de la pérdida de serviciabilidad (Δ PSI), se supuso un índice de serviciabilidad inicial de 4.5 y un índice de serviciabilidad final (Pt) de 2, resultando un Δ PSI de 2.5.

El valor de coeficiente de drenaje se supuso de 1.15, puesto que al ser un pavimento

en concreto permeable se establece que la calidad del drenaje es bueno y el porcentaje del tiempo en que la estructura del pavimento va a estar expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación va a ser del 5%. Estos valores se obtuvieron de las siguientes figuras:

Calidad del drenaje	Tiempo en que tarda el agua en ser evacuada
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Mediano	1 semana
Malo	1 mes
Muy malo	el agua no evacua

Fuente: Guía Para Diseño de Estructuras de Pavimentos, AASHTO, 1,993

Fig 15. Calidad del drenaje

Calidad del Drenaje	Porcentaje del tiempo en que la estructura del pavimento esta expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación			
	Menos del 1%	1% - 5%	5% - 25%	más del 25%
Excelente	1.25 – 1.20	1.20 – 1.15	1.15 – 1.10	1.10
Bueno	1.20 – 1.15	1.15 – 1.10	1.10 – 1.00	1.00
Mediano	1.15 – 1.10	1.10 – 1.00	1.00 – 0.90	0.90
Malo	1.10 – 1.00	1.00 – 0.90	0.90 – 0.80	0.80
Muy malo	1.00 – 0.90	0.90 – 0.80	0.80 – 0.70	0.70

Fuente: Guía Para Diseño de Estructuras de Pavimentos, AASHTO, 1,993

Fig 16. Valores de coeficiente de drenaje Cd

El coeficiente de transmisión de carga se obtuvo del siguiente cuadro, donde se supuso un pavimento de concreto hidráulico sin juntas:

hombro				
Elemento de transmisión de carga				
Tipo de pavimento	Concreto asfáltico		Concreto hidráulico	
	si	no	si	no
No reforzado o reforzado con juntas	3.2	3.8 – 4.4	2.5 – 3.1	3.6 – 4.2
Reforzado continuo	2.9 – 3.2	-----	2.3 – 2.9	-----

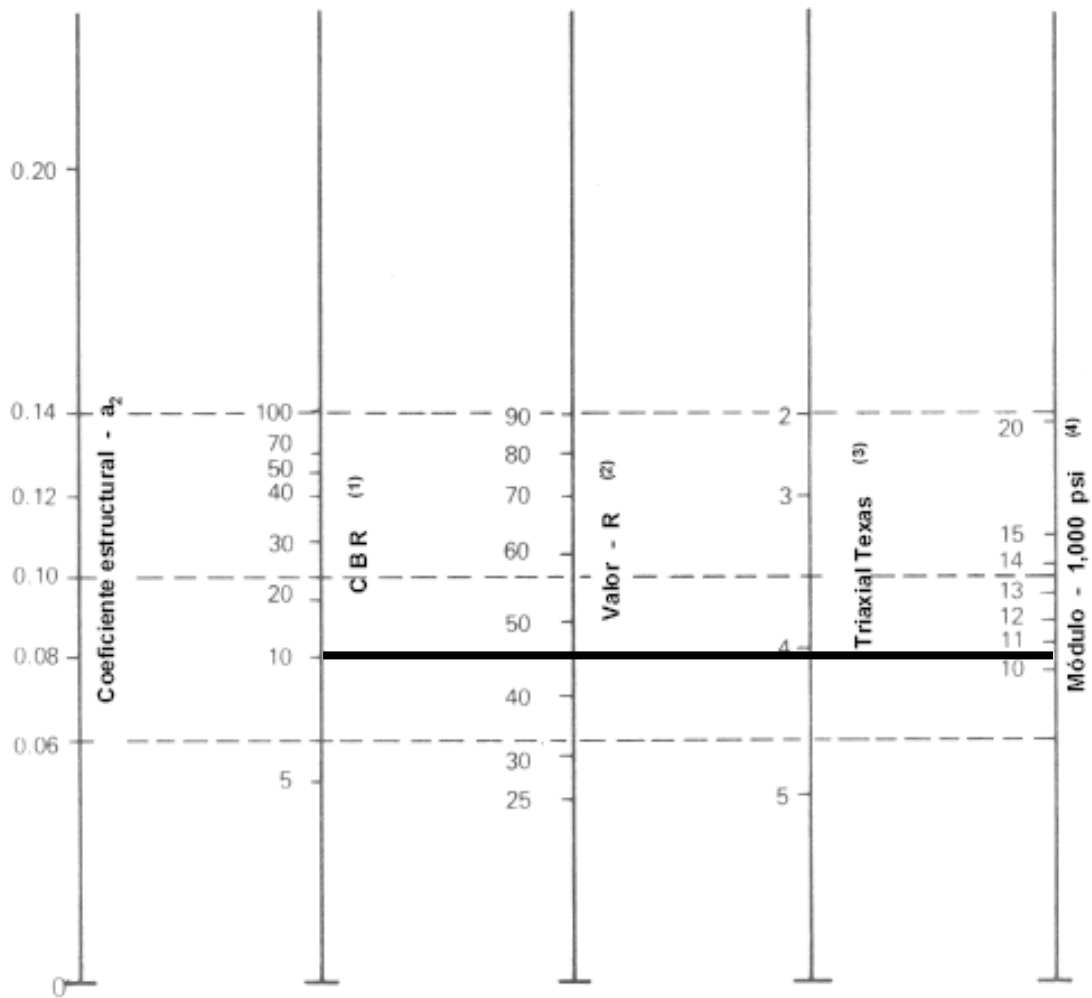
Fuente: Guía Para Diseño de Estructuras de Pavimentos, AASHTO, 1,993

Fig 17. Valores de coeficiente de transmisión de carga

El módulo de elasticidad del concreto se obtuvo tomando como referencia el Cuadro No.2 expuesto en el Marco Teórico y la resistencia a la compresión a los 28 días que se obtuvo para el concreto permeable descrita en la Figura No.4.

Este valor dio como resultado 16384,64 MPa para el módulo de elasticidad del concreto.

El módulo de estabilidad de la sub-base se obtuvo con el valor de CBR el cual es de 10, Utilizando la siguiente figura, este módulo dio como resultado un valor de 10 000 psi para el módulo de estabilidad de la sub-base



- (1) Escala derivada de las correlaciones de Illinois
- (2) Escala derivada de las correlaciones obtenidas del Instituto del Asfalto, California, New México y Wyoming
- (3) Escala derivada de las correlaciones de Texas
- (4) Escala derivada del proyecto NCHRP (3)

Fuente: Guía para diseño de estructuras de pavimentos, AASHTO, 1,993

Fig 18. Variación del coeficiente estructural de la capa de sub base

El valor del módulo de resiliencia de la sub-rasante se obtuvo mediante la siguiente fórmula, ya que el valor de CBR es menor a 10%

$$Mr = 10.3 \times CBR$$

Por lo tanto, se obtuvo un módulo de resiliencia de la sub-rasante de 103 MPa.

Con base en estos valores se obtuvo el valor módulo de reacción compuesto por medio de la siguiente figura:

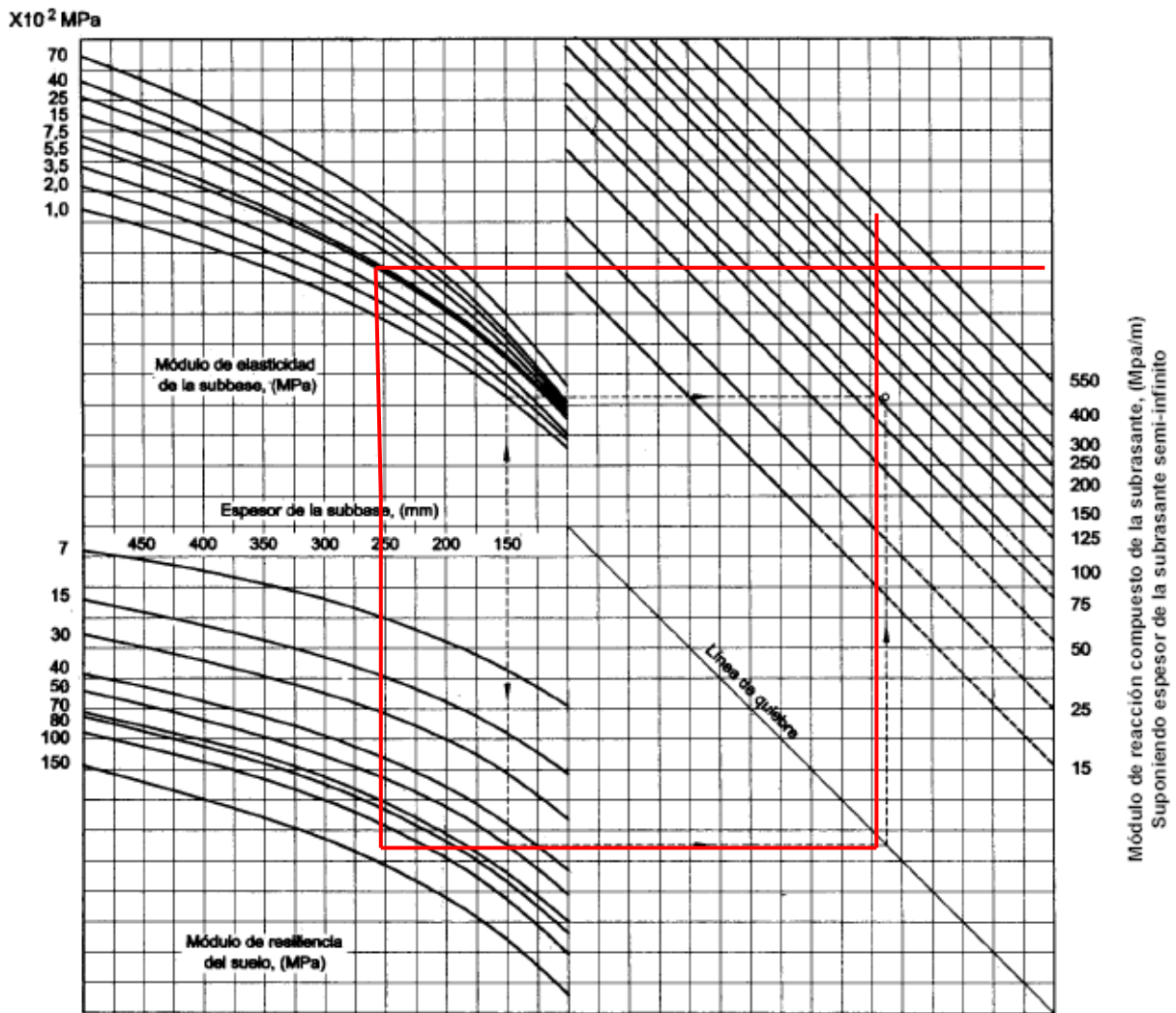


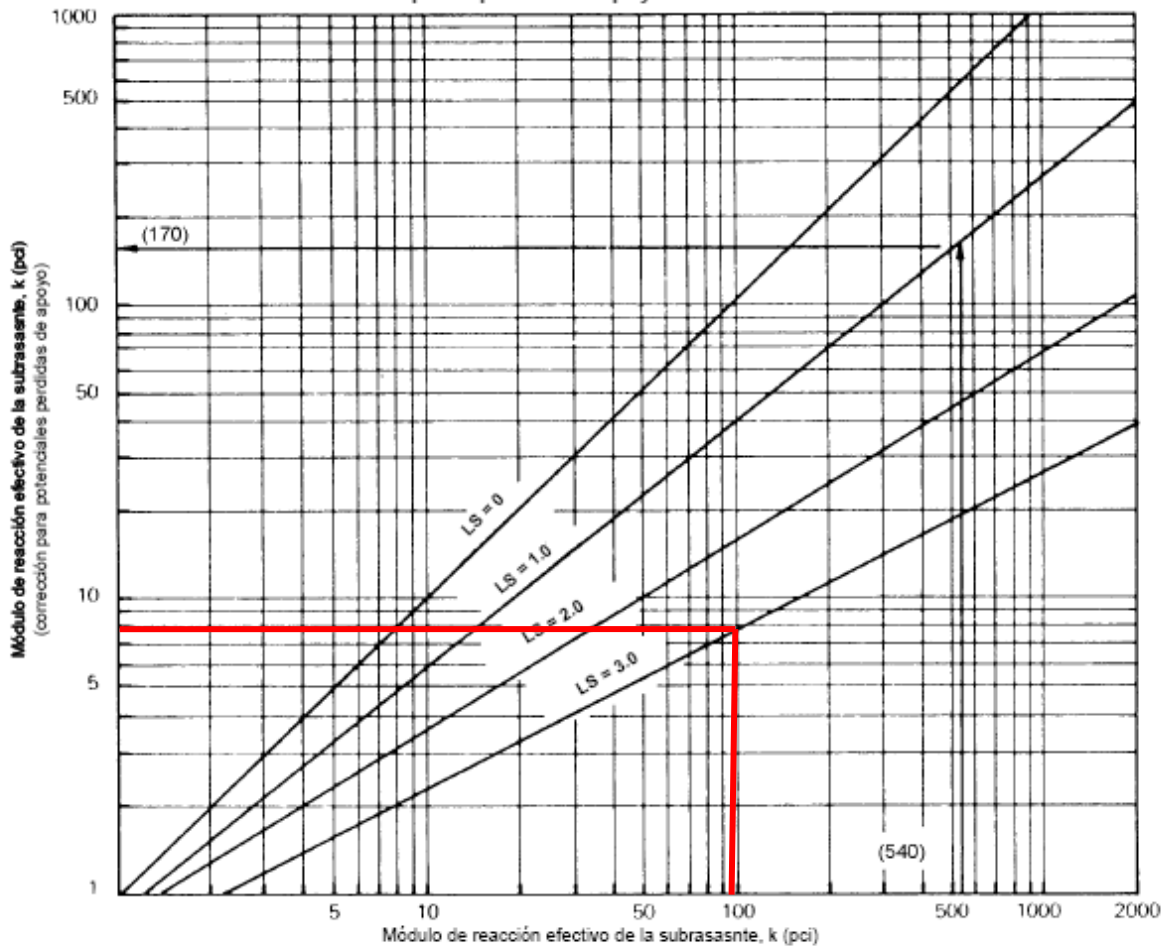
Fig 19. Nomograma para obtener el módulo de reacción compuesto k

Como se muestra en la figura el módulo de reacción compuesto dio como resultado 300MPa/m. Este módulo se corrigió por la pérdida de soporte. Esta pérdida de soporte se determinó mediante el Cuadro No. 3 presente en el Marco Teórico, y se supuso un material de

sub base granular sin tratar por tratarse de un diseño de pavimento en concreto permeable, dando como resultado un factor de 3.

Por lo tanto el módulo efectivo de reacción de la sub rasante k es de 8 según la figura:

Figura 4-7
Corrección del Módulo efectivo de reacción de la subrasante
por la pérdida de apoyo de subbase



Fuente: Guía para diseño de estructuras de pavimentos, AASHTO, 1,993

Fig 20. Nomograma para corregir el módulo de reacción efectivo por pérdida potencial de soporte de la sub base

Finalmente, el espesor de la capa de concreto permeable se obtuvo de la siguiente figura No. 31 de la sección de Apéndices, tomando como referencia el valor del módulo de rotura de este tipo de concreto obtenido de los resultados a los 28 días de la mezcla realizada. Este valor es de 3.85 MPa (39.25 kg/cm²).

CUADRO 24. RESUMEN DE LAS VARIABLES OBTENIDAS PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO		
Variable	Dato	Unidades
ESAL´S de diseño	1232844,635	millones
Confiabilidad	0,500	
Error estándar combinado	0,350	
Índice de serviciabilidad inicial (Po)	4,500	
Índice de serviciabilidad final (Pt)	2,000	
Pérdida de serviciabilidad (Δ PSI)	2,500	
Coefficiente de drenaje	1,150	
Coefficiente de transmisión de carga (J)	4,200	
Módulo de elasticidad del concreto (Ec)	16384,640	Mpa
Módulo de estabilidad de la sub base	70,307	kg/cm ²
Módulo de resiliencia de la sub rasante	103,000	Mpa
Módulo de reacción compuesto	300,000	Mpa/m
Pérdida de soporte (Ls)	3,000	
Módulo efectivo de reacción de la sub rasante	8,000	
Módulo de rotura del concreto permeable	39,250	kg/cm ²
Espesor de la losa de concreto permeable	15,000	cm

Diseño hidrológico del pavimento en concreto permeable

Para el diseño hidrológico del pavimento se hizo uso del método racional para determinar el volumen de agua de escorrentía que el pavimento iba a absorber, el cual establece la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{CIA}{360}$$

Donde:

Q= caudal en m³/s

I= intensidad de lluvia en mm/hr

A=área tributaria en ha

Primeramente se determinó la intensidad de lluvia suponiendo un período de retorno de cinco años y un tiempo de concentración de 30 minutos. Con estos datos se hizo uso de la siguiente figura la cual determina la intensidad de lluvia para cada región del país, en este caso Cartago:

Curvas de tiempo - intensidad - frecuencia de lluvia

Alajuela:	$I = 209.844 - (38.7305 * \ln(\text{dur})) + (42.614 - (24.6041 * \ln(\ln(\text{dur})))) * \ln(\text{tn})$
Liberia:	$I = 200.56 - 35.92 * \ln(\text{dur}) + (44.13 - 7.5 * \ln(\text{dur})) * \ln(\text{tn})$
Limón:	$I = 155.05 - (25.89 * \ln(\text{dur})) + (21.79 - (3.14 * \ln(\text{dur}))) * \ln(\text{tn})$
San José:	$I = 166.1 - (29.6 * \ln(\text{dur})) + (20.3 - (2.279 * \ln(\text{dur}))) * \ln(\text{tn})$
Cartago:	$I = 156.89 - (28.46 * \ln(\text{dur})) + (42.2 - (8.07 * \ln(\text{dur}))) * \ln(\text{tn})$
Puntarenas:	$I = 175.65 - (29.58 * \ln(\text{dur})) + (34.05 - (5.32 * \ln(\text{dur}))) * \ln(\text{tn})$

Derivada por el Dr. Wilhelm-Günther Varson, Lic. Marvin Alfaro Sánchez y Lic. Ileana Araúz Beita.
Programa Morfoclimatología Aplicada y Dinámica Exógena (MADE)
Escuela de Ciencias Geográficas, Universidad Nacional.
Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos Año 1992

Fig 21. Curvas de intensidad –frecuencia de lluvia
Fuente: Manual del Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo (INVU)

Los resultados obtenidos se muestran en el siguiente cuadro:

CUADRO 25. INTENSIDAD DE LLUVIA Y CAUDAL DE DISEÑO				
Período de retorno (años)	Tiempo de concentración (minutos)	Intensidad de lluvia (mm/hr)	Área tributaria (ha)	Caudal (m³/s)
5	30	83,834	2,50	0,216

Posteriormente se calculó el volumen de escorrentía que la sub-base iba a almacenar en una hora, multiplicando el caudal obtenido anteriormente por una hora. También se determinó el espesor de esta, dividiendo este volumen entre el área mayor del pavimento. Los resultados se muestran en el siguiente cuadro:

CUADRO 26. VOLUMEN ALMACENADO Y ESPESOR DE LA SUB BASE		
Volumen (m³)	Área calle (m²)	Espesor base
777,568	1576,000	0,493

Por lo tanto, el espesor de la sub-base será de 50 cm. La sub-base debe tener un material de granulometría abierta y se recomienda que sea un material en el que predomine la piedra o la grava.

Según el estudio de suelos del proyecto, predomina en su mayoría la presencia de limos,

por lo tanto, como este tipo de material no conduce de forma eficiente el agua de escorrentía que será almacenada en la sub-base se instalará debajo de esta una tubería de 12 pulgadas, calculada a partir de la ecuación de continuidad, la cual relaciona caudal con velocidad. Se supuso una velocidad de 3 m/s y los resultados se presentan a continuación:

CUADRO 27. DIÁMETRO DE TUBERÍA POR UTILIZAR				
Caudal (m³/s)	Velocidad (m/s)	Área (m²)	Diámetro de tubería(m)	Diámetro de tubería (pulgadas)
0,216	3,000	0,072	0,303	12,000

Análisis de los resultados

Análisis de las mezclas estudiadas

Trabajabilidad de los diseños de mezcla realizados

Como se puede observar en el Cuadro No.7 de la sección de Resultados Obtenidos, la trabajabilidad de cada una de las muestras varió de manera considerable al analizar principalmente las mezclas 1 y 2, con respecto a la trabajabilidad del diseño de mezcla presentado por Concretos Holcim. En este cuadro se puede observar que al realizar la prueba de trabajabilidad (la cual consiste en tomar una porción de la muestra, hacer con ella un puño y luego soltarla sin que se segregue), en las primeras dos mezclas durante la hora en la que transcurrió esta prueba no hubo signos de segregación, en cambio en la muestra MC solo se presentó este comportamiento en la primera media hora, ya que para la segunda media hora el material se segregó por completo en la mano. Este comportamiento ocurrió por la cantidad de aditivo plastificante que se le incorporó a la mezcla, que si bien era necesario, pues este diseño incluía una mayor relación AG/c, influyó en gran medida para que la mezcla no tuviera la trabajabilidad que se requería.

Influencia de los agregados en las mezclas realizadas

Como se estableció en el capítulo de Resultados Obtenidos, para la producción de la mezcla óptima se estudiaron tres diseños de mezclas con diferentes cantidades de materiales, para así lograr, haciendo pruebas de flexión y

permeabilidad a cada una, la mezcla óptima que se utilizaría para el análisis del presente trabajo. Como se explicó en esa misma sección, dos de los diseños fueron escogidos del estudio realizado por el Ing. Roberto Fernández denominado *Concreto Permeable: diseño de mezclas para evaluar su resistencia a la compresión uniaxial y su permeabilidad*. Su selección se debe a que estos fueron los diseños que mejores resultados tuvieron en cuanto a compresión uniaxial y permeabilidad (mezclas denominadas M7 y M8 indicadas en el Marco Teórico, Figura No.4)

El otro diseño fue proporcionado por la Holcim Concretos. Este fue seleccionado porque según estudios realizados en este centro dio buenos resultados.

Al analizar la relación agregado grueso/cemento (AG/c) se notó que a mayor cantidad de AG/c, menor resultaba ser la resistencia a la flexión. Esto da a entender que a menor cantidad de AG/c existe un mayor porcentaje de pasta capaz de brindarle más resistencia al material. Además, con este resultado se cumple lo que dice la teoría que la resistencia de este tipo de material depende en gran medida de las propiedades de la pasta y de la interface pasta agregado, es decir, no interesa que exista en el diseño de mezcla mayor cantidad de agregado grueso, sino que debe existir una adecuada conexión entre el agregado y la pasta para así obtener la resistencia que se requiere. Por otra parte, cabe destacar que este tipo de concreto al no tener finos o si lo tiene existe en cantidades muy limitadas, transmite las cargas en forma heterogénea a diferencia de los concretos normales que los hacen en forma homogénea. Esta transmisión de cargas se realiza en puntos de contacto, haciendo que estas se repartan en forma aleatoria. Este comportamiento se puede observar en la Figura No.22, la cual muestra la relación AG/c y la resistencia a la flexión

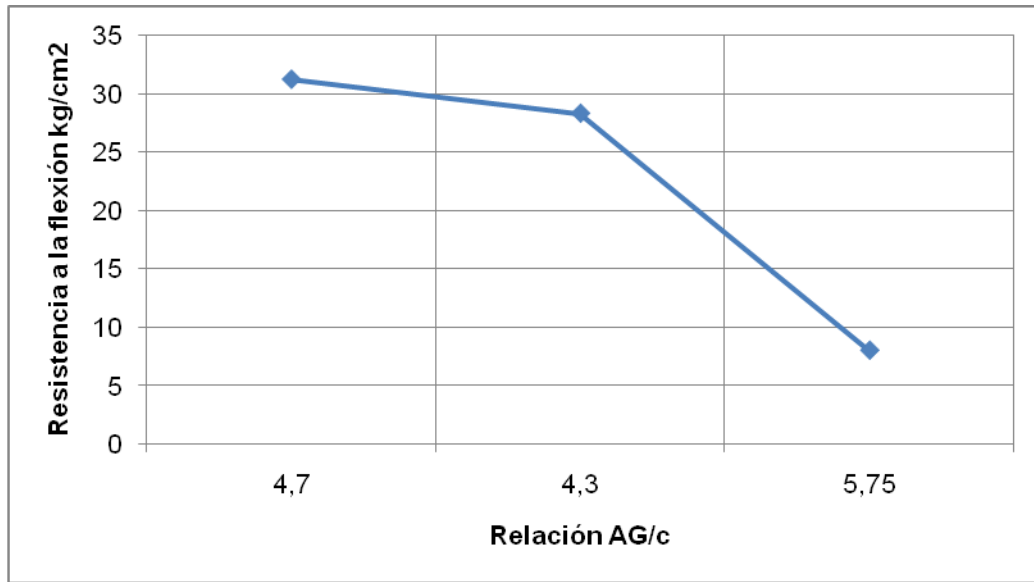


Fig 22. Variación de la resistencia a la flexión según la relación AG/c

Además, como se puede observar en la Figura No. 23, la inclusión de agregado fino en el diseño de mezcla del concreto permeable, también causa una variación importante en la medida de la resistencia a la flexión, ya que la mezcla a la cual se le incluyó agregado fino obtuvo mayores

resistencias a la flexión que las que no lo tenían. Este comportamiento deja manifiesto que el agregado fino permite llenar más espacios interparticulares y con esto hace que el diseño posea una densidad y resistencia.

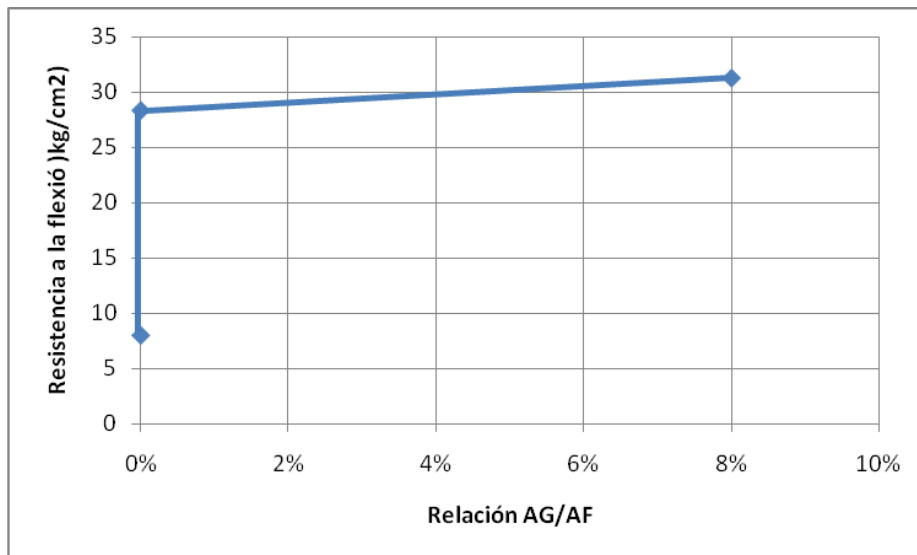


Fig 23. Variación de la resistencia a la flexión con respecto a la relación AG/AF

En cuanto a la permeabilidad se puede observar en la Figura No.24 que a medida que aumenta la relación AG/c, también aumenta la permeabilidad del concreto. Este comportamiento es de esperarse, ya que existe una menor cantidad de pasta en la mezcla, haciendo que exista en este material la permeabilidad necesaria, la cual es su principal característica, no obstante; no se debe permitir que estas relaciones (AG/c), se

aumenten en gran medida, puesto que le restarán permeabilidad al material, tal como se puede observar en la Figura No. 24 ya que al aumentar un poco esta relación, decayó la permeabilidad pues se ocupa mayor cantidad de vacíos.

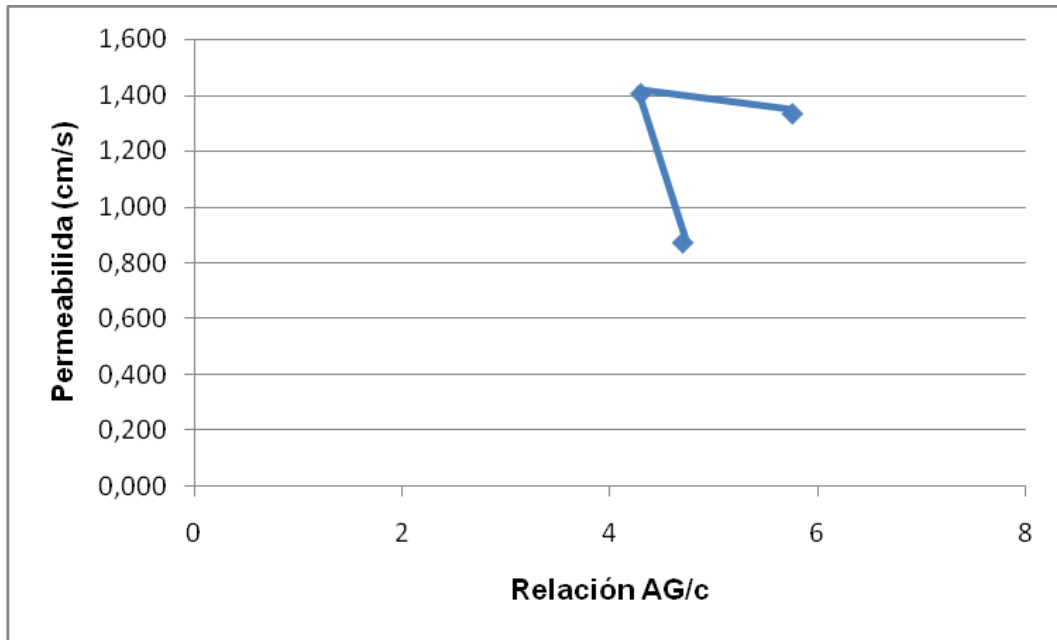


Fig 24. Analogía entre la relación AG/c y la permeabilidad

Por otra parte, adicionar agregado fino a la mezcla permite observar el resultado esperado, ya que al aumentar la relación AF/AG decae la permeabilidad, pues, el agregado fino tiende a llenar los espacios vacíos presentes en la mezcla, restándole permeabilidad, ya que no puede escurrir el agua con facilidad por el material. Cabe destacar que aunque la adición de agregado fino tiende a aumentar la resistencia del material, se debe tener cuidado al sumarla al diseño de mezcla para no tener problemas en cuanto a la permeabilidad deseada.

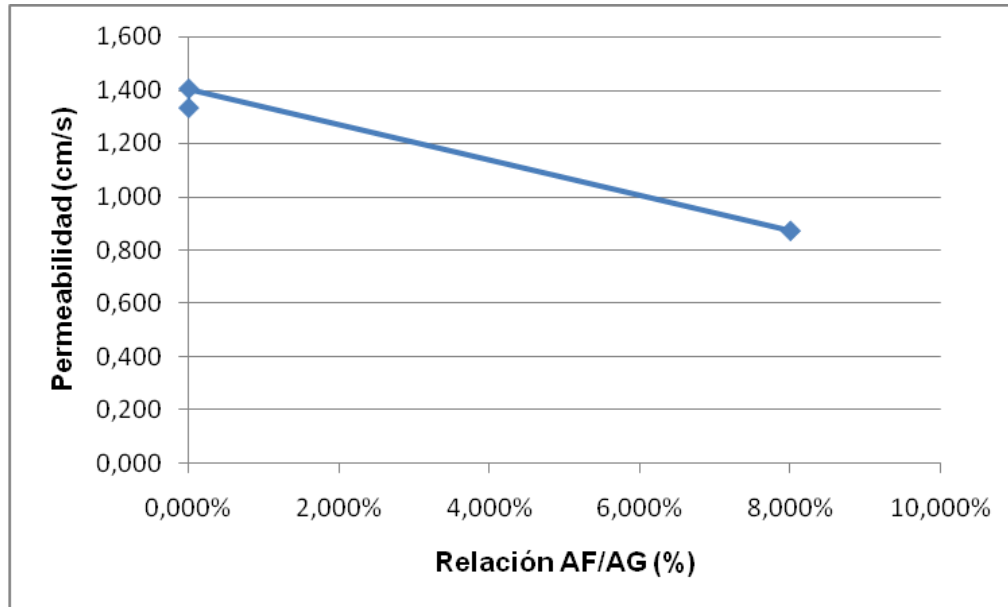


Fig 25. Influencia de la relación AF/AG sobre la permeabilidad del material

Peso unitario y cantidad de vacíos presentes en la mezcla óptima

Por otra parte, al realizar el ensayo de peso unitario al concreto fresco se comprobó que el diseño óptimo escogido cumplió satisfactoriamente con los valores de densidad y relación de vacíos mostrados en la teoría, pues se obtuvieron, según lo muestra el Cuadro No. 14 de la sección de Resultados Obtenidos, valores de $1510,71 \text{ kg/m}^3$ y 15.31% respectivamente. Por su parte, la literatura consultada muestra que las densidades obtenidas en estudios previos han sido de 1600 kg/m^3 a 2000 kg/m^3 , y las relaciones de vacíos están en el orden de un 15 a un 35%.

Esfuerzo de flexión del concreto permeable

La Figura No.26 muestra la curva de la resistencia a la flexión para la mezcla óptima para diferentes edades (7, 14 y 28 días). En ella se espera el comportamiento esperado, ya que a

mayor edad se presenta mayor resistencia en la mezcla. Además, la práctica cumple con la teoría expuesta, ya que esta dicta que en estudios previos se han encontrado esfuerzos a flexión a los 28 días de 11 a 25 kg/cm^2 , y se obtuvo experimentalmente en este caso un valor de $39,25 \text{ kg/cm}^2$.

Este incremento con respecto a la teoría se pudo haber dado porque, según lo establecen las referencias, a menor tamaño de agregado se producen mayores resistencias a la flexión por el incremento que existe entre el área de contacto y las partículas del agregado. Además, también se ha comprobado que cuando las relaciones de vacíos rondan los 15 a 29 % (como en este caso), las resistencias a la flexión suben a valores de 28 a 35 kg/cm^2 . Por otra parte, la inclusión de un pequeño porcentaje de agregado fino en la mezcla, hace que el valor de la resistencia a la flexión aumente ya que este tiende a llenar algunos espacios interparticulares y a brindar mayor firmeza a la mezcla.

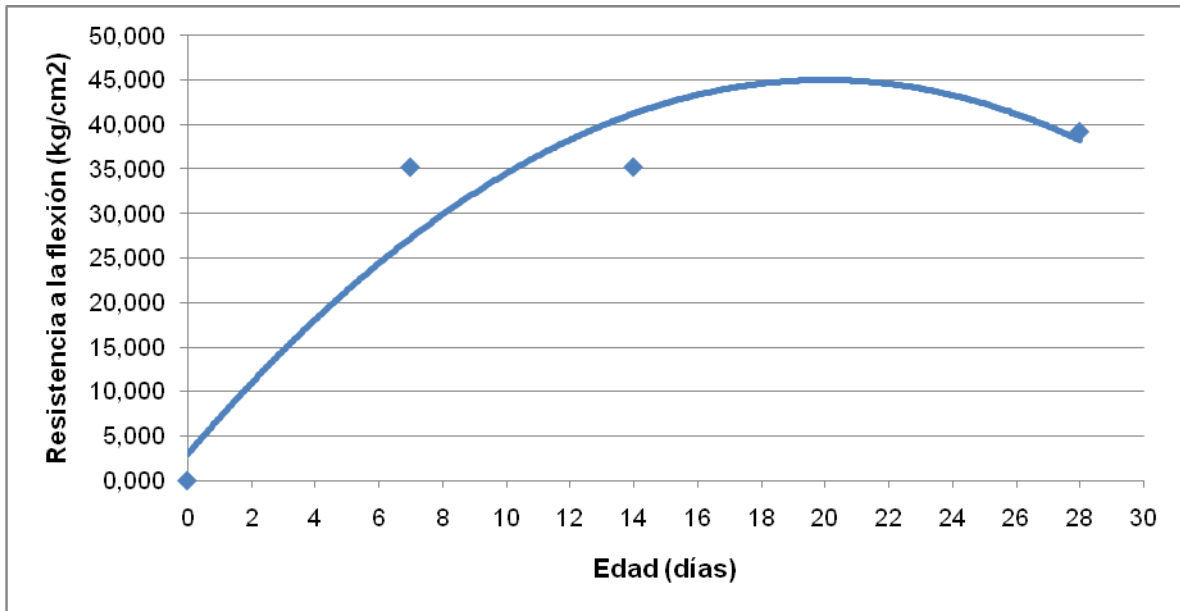


Fig 26. Curva de desarrollo de la resistencia a la flexión

Esfuerzo de tensión indirecta del concreto permeable

Este esfuerzo se determinó con el ensayo de tensión indirecta o prueba brasileña como es llamada popularmente, y cuyo método se explica en detalle en la sección del Marco Teórico.

La Figura No. 27 muestra la curva de desarrollo de este fuerza a diferentes edades de curado (7, 14 y 28 días). Los valores obtenidos según lo muestra esta figura y los cuadros 16,18 y 20 divergen de los obtenidos en la literatura citada en las referencias, ya que esta presenta valores de esfuerzo de tensión alrededor de 35 kg/cm² y los obtenidos están en el orden de 8,31 kg/cm² a los 28 días. Cabe destacar que este deceso en la resistencia se pudo haber dado porque los cilindros se tuvieron que trasladar de las instalaciones del Centro Tecnológico (CETEC) en Holcim, ubicados en San Antonio de Belén, a los laboratorios del Centro de Investigación en Vivienda y Construcción (CIVCO) del Instituto Tecnológico de Costa Rica cuya sede se encuentra en Cartago. Este cambio en el clima, además de que hubo sistemas de curado diferentes en los dos lugares, pudo ser un

factor para que esta resistencia cayera. Además, se subraya que se encontró solo una fuente de información en la cual se hacía referencia a los valores teóricos en los esfuerzos a tensión, por lo tanto estos tampoco son parámetros fijos para este rubro, puesto que existe muy poca información en el tema.

Al aplicar el factor de vacíos, explicado con anterioridad en el Marco Teórico, se obtuvo que para efectos de diseño se aplica un esfuerzo de tensión de 11.18 kg/cm², valor derivado de la división entre el peso unitario del concreto convencional (2400 kg/m³) y el peso unitario obtenido mediante la realización de la prueba de peso unitario elaborada en laboratorio (1783,31 kg/m³) y multiplicando el resultado por el esfuerzo a tensión indirecta a los 28 días obtenida en laboratorio (8,31 kg/m³).

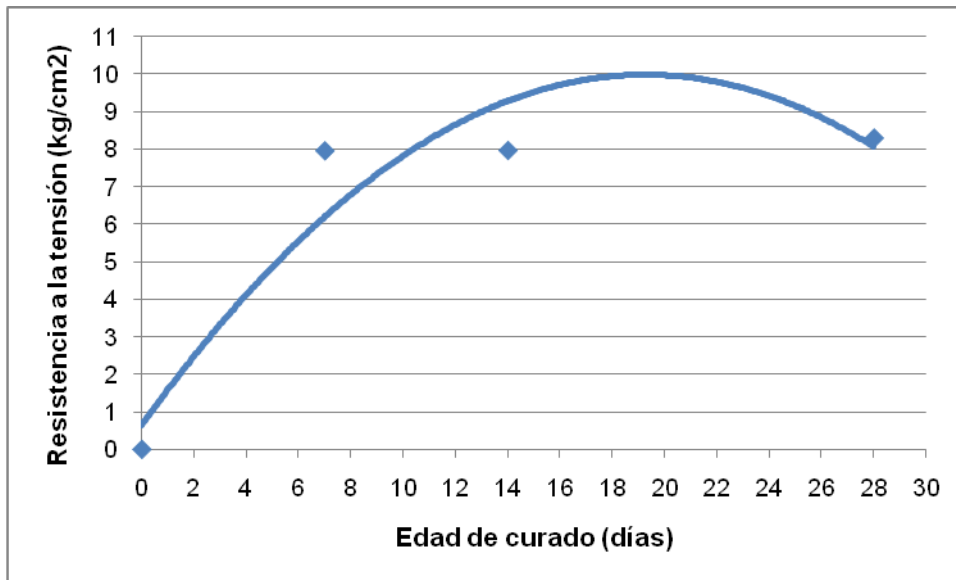


Fig 27. Curva de desarrollo para el esfuerzo a tensión indirecta

Correlación entre el esfuerzo a compresión y el esfuerzo a flexo tracción

Como lo muestra el cuadro No. 28, a medida que la resistencia a la compresión aumenta también lo hace la resistencia a la flexión, pero no lo hace en forma lineal, ya que a medida que la

resistencia a la compresión aumente la resistencia a la flexión también lo hace pero en menor proporción. También se puede observar que la resistencia a la flexión representa aproximadamente un 21% de la resistencia a la compresión a los 28 días, estando un poco encima del rango recomendado en la teoría el cual está entre un 10 a un 20%.

CUADRO 28. CORRELACION ENTRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION Y EL MÓDULO DE ROTURA A DIFERENTES EDADES			
Edad (días)	Resistencia a la compresión (kg/cm²)	Módulo de rotura (kg/cm²)	% de la Resistencia
7	128,000	35,260	27,547
14	155,000	35,270	22,755
28	182,000	39,250	21,566

Correlación entre el esfuerzo a la compresión y el esfuerzo a tensión

En el Cuadro No. 29 se puede observar la correlación existente entre la resistencia a la compresión y el esfuerzo a tensión.

Como se mencionó anteriormente, existen muy pocos datos sobre la obtención de este esfuerzo, por lo tanto, se tomará como base el obtenido en el presente estudio para poder hacer un análisis de resultados sobre este valor.

En el Cuadro No.29, se puede observar que a medida que la resistencia a la compresión aumenta, también aumenta la resistencia a la

tensión, representando en este caso que el esfuerzo a tensión representa un 4,5% aproximadamente de la resistencia a la compresión a los 28 días. Además, presenta un comportamiento muy similar al presentado al correlacionar la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión, pues como se puede ver

en el Cuadro No.29 la resistencia a la tensión aumenta al aumentar la resistencia a la compresión pero en menor proporción, haciéndolo al igual que el módulo de rotura.

CUADRO 29. CORRELACION ENTRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION Y LA RESISTENCIA A LA TENSION			
Edad (días)	Resistencia a la compresión (kg/cm²)	Resistencia a la tensión (kg/cm²)	% de la Resistencia a la compresión
7	128,000	7,970	6,226
14	155,000	7,980	5,148
28	182,000	8,310	4,566

Correlación entre el módulo de rotura y la resistencia a la tensión

Existe una buena correlación entre el módulo de rotura y la resistencia a la tensión, como se puede observar en el Cuadro No.30, pues a

medida que el módulo de rotura aumenta, también lo hace la resistencia a la tensión de forma lineal. Además, se denota que esta resistencia a la tensión representa un 21% aproximadamente del módulo de rotura a los 28 días.

CUADRO 30. CORRELACION ENTRE EL MÓDULO DE ROTURA Y LA RESISTENCIA A LA TENSION			
Edad (días)	Módulo de rotura (kg/cm²)	Resistencia a la tensión (kg/cm²)	% del Módulo de Rotura
7	35,260	7,970	22,603
14	35,270	7,980	22,625
28	39,250	8,310	21,172

Análisis estadístico de los resultados encontrados

Como se puede observar en la sección de resultados, la obtención del módulo de rotura se realizó utilizando solamente dos vigas para cada edad, dado que existía una falta de recursos en el laboratorio donde se efectuaron las pruebas, lo que limitó el estudio.

Por lo tanto, dada esta situación se procedió a realizar un estudio estadístico que mostrara la desviación de los datos encontrados con respecto al promedio, así como su coeficiente de variación y el error estándar del promedio, para así poder tener una idea clara de

que tan confiables son los resultados obtenidos en esta investigación y si es necesario ejecutar más pruebas para obtener deducciones más verídicas.

Primeramente se analizaron los resultados obtenidos en las pruebas a flexión que se le hicieron a las tres mezclas descritas en el inicio de la sección de resultados. El análisis se encuentra en el Cuadro No. 31 y No 32 presentados seguidamente.

CUADRO 31. MÓDULO DE ROTURA Y VALOR PROMEDIO PARA CADA UNA DE LAS MEZCLAS

Mezcla	Módulo de rotura (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
M1	38,290	31,225
	24,160	
	62,450	
M2	29,670	28,315
	26,960	
	56,630	
MC	10,790	8,010
	5,230	
	16,020	

CUADRO 32. MEDIDAS DE VARIABILIDAD PARA CADA UNA DE LAS MEZCLAS

Cálculo de la Varianza						
$\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2 / n$	x^2	$x^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2 / n$	Varianza s^2	Desviación estándar	Coefficiente de Variación (%)	Error estándar del promedio
1950,001	1466,124	99,828	99,828	9,991	31,998	17,865
	583,706					
	2049,830					
1603,478	880,309	3,672	3,672	1,916	6,768	0,690
	726,842					
	1607,151					
128,320	116,424	15,457	15,457	3,932	49,083	5,461
	27,353					
	143,777					

Como se puede observar en los cuadros anteriores, la desviación estándar de la mezcla M1 resulta la más alta de las tres, puesto que se aleja aproximadamente 10 kg/cm² del promedio. Si suponemos que la incertidumbre para analizar

estos datos es de ±5 kg/cm², este valor sería muy poco útil para la investigación realizada, aunque fue él que se tomó en cuenta para el selección de la mezcla óptima, dado que la mezcla M1 obtuvo los mejores valores en cuanto

a módulo de rotura y permeabilidad, no así en el análisis estadístico. Además se puede observar que el coeficiente de variación de esta mezcla es de un 32% aproximadamente, o sea que la desviación estándar representa un 32% de la media aritmética, considerándose un resultado muy alto para el efecto de este estudio, ya que se requiere de máximas precisiones para la

obtención de valores tan importantes como lo son los objetivos de esta investigación.

Al observar el cuadro No.32, se puede predecir que el resultado más óptimo desde el punto de vista estadístico para la realización de la mezcla óptima son los presentados por la mezcla M2, ya que presente menor desviación estándar, menor coeficiente de variación y un menor error estándar del promedio.

Estudio comparativo económico

Para comparar este tipo de pavimento con otras opciones, en relación con el ámbito económico, se realizó un comparativo económico, el cual se presenta a continuación, y confronta a este pavimento con diferentes opciones como adoquines, pavimentos de concreto y pavimentos

asfálticos en urbanizaciones, para una cantidad de ejes equivalentes a 2 000 000 de unidades y un ancho de calzada de 7 metros. En la sección de Anexos se encuentra el detalle de cada uno de los rubros encontrados.

Pavimento Flexible						
Carpeta asfáltica (BG) Materiales de Cerro Minas					Precio \$/m2	Variación %
	Espesor	Unidades	Precio (\$/m3)	Precio m2	\$ 43,97	0,00%
Carpeta	0,15	m	198,41	29,76		
Imprimación	1	lt		1,00		
Riego de liga	1	lt		1,00		
Base granular mat granular Guápiles	0,20	m	35,62	7,12		
Sub base granular C. Minas	0,30	m	10,29	3,09		
Cordón y caño				2,00		
Total m2						

Carpeta asfáltica (BE)					Precio \$/m2	Variación %
	Espesor	Unidades	Precio (\$/m3)	Precio m2	\$ 47,44	7,88%
Carpeta	0,15	m	198,41	29,76		
Imprimación	1	lt		1,00		
Riego de liga	1	lt		1,00		
Base estabilizada	0,20	m	52,94	10,59		
Sub base granular	0,30	m	10,29	3,09		
Cordón y caño				2,00		
Total m2						

Pavimentos rígidos

Pavimento Rígido						
Concreto convencional (base granular)					Precio \$/m2	Variación %
	Espesor	Unidades	Precio (\$/m3)	Precio m2	\$ 33,30	-24,27%
Losa de concreto (con pasadores)	0,15	m	185,23	27,78		
Base granular	0,20	m	27,58	5,52		
Total m2						

Pavimento Rígido						
Concreto convencional (base estabilizada)					Precio \$/m2	Variación %
	Espesor	Unidades	Precio (\$/m3)	Precio m2	\$ 32,82	-25,37%
Losa de concreto (con pasadores)	0,12	m	185,23	22,23		
Base estabilizada	0,20	m	52,94	10,59		
Total m2						

Pavimento Rígido						
Concreto PERMEABLE					Precio \$/m2	Variación %
	Espesor	Unidades	Precio (\$/m3)	Precio m2	\$ 38,49	-12,47%
Losa de concreto permeable	0,15	m	222,28	33,34		
Base granular	0,50	m	10,29	5,15		
Total m2						

Adoquines con bordillo prefabricado					Precio \$/m2	Variación %
	Espesor	Unidades	Precio (\$/m3)	Precio m2	\$ 22,49	-48,86%
Adoquines(precio lista)	0,08	m	11,46	11,46		
Arena	0,04		7,50	0,30		
Mano de obra inst				3,40		
Bordillos prefabricados(ambos lados)				1,50		
Instalación bordillo				1,00		
Base granular	0,15		17,38	2,61		
Subbase	0,20		11,08	2,22		
Total m2					\$ 22,49	

Adoquines 8cm (confinamiento con cordón)					Precio \$/m2	Variación %
	Espesor	Unidades	Precio (\$/m3)	Precio m2	\$ 22,86	-48,02%
Adoquines	0,08	m	11,46	11,46		
Arena	0,04	m	7,50	0,30		
Mano de obra inst				3,40		
Cordon o bordillo de concreto				2,00		
Base granular	0,20	m	17,38	3,48		
Subbase	0,20	m	11,08	2,22		
Total m2					\$ 22,86	

Adoquines 6 cm (confinamiento con cordón)					Precio \$/m2	Variación %
	Espesor	Unidades	Precio (\$/m3)	Precio m2	\$ 19,79	-54,99%
Adoquines	0,06	m	8,40	8,40		
Arena	0,04	m	7,50	0,30		
Mano de obra inst				3,40		
Cordon o bordillo de concreto				2,00		
Base granular	0,20	m	17,38	3,48		
Subbase	0,20	m	11,08	2,22		
Total m2					\$ 19,79	

CUADRO 33. ANALISIS COMPARATIVO DE COSTOS		
Tipo de pavimento	Precio (\$/m²)	Diferencias Porcentuales con respecto a la carpeta asfáltica
Carpeta asfáltica	43,97	0,00%
Carpeta asfáltica (BE)	47,44	7,88%
Pavimento rígido (concreto convencional base granular)	33,30	-24,27%
Pavimento rígido (concreto convencional base estabilizada)	32,82	-25,37%
Pavimento rígido (concreto permeable)	38,49	-12,47%
Adoquines con bordillo prefabricado	22,49	-48,86%
Adoquines 8 cm	22,86	-48,02%
Adoquines 6 cm	19,79	-54,99%

Como se puede observar en el Cuadro No. 33, así como en el estudio económico que se le realizó a cada uno de los pavimentos en estudio, el uso de adoquines representa la mejor opción para la construcción de pavimentos en áreas urbanísticas en cuanto a costos y la carpeta asfáltica es la alternativa menos rentable para este fin.

Si se analiza el uso de concreto permeable como pavimento rígido en comparación con las otras alternativas de pavimentos rígidos, se puede observar que este resulta el menos económico, pero al necesitar éste menor mantenimiento durante su vida útil, resulta más factible desde el punto de vista financiero.

Además tomando la información del Cuadro No. 33 como referencia y analizando las

diferencias porcentuales que existen entre cada pavimento con respecto a la carpeta asfáltica, se puede notar que el uso de pavimentos flexibles en urbanizaciones relativamente pequeñas donde circulan menos de dos millones de ESAL'S, resulta muy poco económico, puesto que existen marcadas diferencias entre las alternativas propuestas, ya que en algunas, como es el caso de los pavimentos rígidos, se notan diferencias de hasta un 25% y en el caso de adoquines de hasta un 55% aproximadamente, lo que hace ver que se pueden manejar alternativas más económicas

Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos con el presente estudio se concluye lo siguiente:

1. El uso de aditivos en la elaboración de concreto permeable es de gran importancia para poder obtener una buena trabajabilidad en la mezcla, pero debe ser usada en proporciones que no la afecten.
2. A mayor cantidad de agregado grueso/cemento (AG/c) presente en la mezcla, menor es su resistencia a la flexión, ya que en el concreto permeable lo que interesa es la adecuada conexión entre el agregado y la pasta, y no la cantidad de agregado grueso que el diseño contenga.
3. Al agregar pequeñas cantidades de agregado fino a la mezcla se produce un incremento en la resistencia a la flexión, ya que este agregado permite llenar espacios interparticulares brindando mayor resistencia.
4. La permeabilidad del concreto poroso aumenta a medida que aumenta la relación AG/c, ya que existe una menor cantidad de pasta en la mezcla.
5. Al aumentar la relación AG/AF, decrece la permeabilidad del concreto poroso, pues el agregado fino tiende a llenar los espacios vacíos presentes en la mezcla.
6. Un diseño de mezcla óptimo de concreto permeable contiene un porcentaje de vacíos entre un 15 a un 30% y un peso unitario entre 1600 a 2000 kg/m³.
7. Para la elaboración de pavimentos en concreto permeable se recomienda el siguiente diseño de mezcla:

Relación a/c	AG/c (kg/kg)	Reductor agua/c cc/kg	Plastificante/c cc/kg	AF/AG
0.30	4.70	2.50	3.50	8%

8. Para la mezcla recomendada el módulo de ruptura es de 39,25 kg/cm³.

9. A mayor tamaño de agregado se producen mayores resistencias a la flexión por el incremento existente entre el área de contacto y las partículas del agregado.
10. Cuando las relaciones de vacíos rondan los 15 a 29% las resistencias a la flexión tienden a subir a valores de 28 a 35 kg/cm².
11. El esfuerzo a tensión indirecta del diseño de mezcla recomendado es de 8,31 kg/cm² a los 28 días.
12. La pérdida de esfuerzo de tensión indirecta puede darse por problemas en el transporte de un lugar a otro de los cilindros de muestra, además de diferentes condiciones de curado.
13. El valor de referencia aplicando el factor de vacíos para el diseño de mezcla recomendado es de 11,18 kg/cm².
14. A medida que la resistencia a la compresión del concreto permeable aumenta, aumenta también su resistencia a la flexión, pero en menor medida.
15. La resistencia a la flexión representa aproximadamente un 21% de la resistencia a la compresión.
16. A medida que la resistencia a la compresión aumenta, también lo hace la resistencia a la tensión indirecta, presentando un comportamiento similar al que resulta de correlacionar la resistencia a la compresión con la resistencia a la flexión.
17. El esfuerzo a tensión indirecta representa un 4,5% de la resistencia a la compresión del concreto permeable.
18. Al aumentar el módulo de rotura también lo hace la resistencia a la tensión del concreto permeable, en iguales proporciones (linealmente).
19. Para un proyecto ubicado en Cartago, se establece un espesor de pavimento en concreto poroso de 15 cm y una sub base de 50 cm.
20. Un pavimento en concreto permeable resulta menos económico en comparación al pavimento en concreto convencional, pero éste tiende a tener menos mantenimiento y más vida útil.

Además el uso de otras alternativas de pavimentos como rígidos o adoquines resulta más económico que utilizar

pavimentos flexibles en urbanizaciones de bajo nivel de tránsito.

Recomendaciones

1. Realizar estudios más detallados para así caracterizar el tipo de material y determinar qué otras variables lo afectan.
2. Para la elaboración de pruebas en este tipo de material se recomienda que no se trasladen del lugar donde se fabrican, y si se debe hacer que se realice siguiendo las mejores condiciones en cuanto a transporte y que las condiciones de curado sean lo más similares posibles.
3. Mejorar el permeámetro de carga constante, ya que se demostró que arroja resultados confiables en cuanto a permeabilidad.
4. Utilizar diferentes diseños de mezclas que contengan diversos tamaños y cantidades de agregado para así obtener mayores criterios para seleccionar una mezcla óptima.
5. Establecer mediante estudios qué variables afectan la resistencia a la tensión indirecta del concreto permeable.
6. Al establecer la relación AG/c en una mezcla de concreto permeable se debe tener cuidado, ya que un fuerte incremento en ésta tiende a restarle permeabilidad al material.
7. Realizar un mayor número de especímenes de prueba principalmente para la determinación del módulo de rotura, para así tener datos estadísticos más confiables.
8. Realizar estudios que muestren la utilización de diferentes energías de compactación para los especímenes de prueba, para determinar de forma más eficiente el procedimiento de moldeo que se debe utilizar.

Apéndices

Se cuenta en este capítulo con cinco apéndices, los cuales aparecen de la siguiente forma:

En el número uno se encuentra el estudio de suelos del proyecto en Cachí, Paraíso de Cartago, lugar donde fue diseñado el pavimento.

En el número dos aparecen los cuadros correspondientes a el límite de peso por eje, los factores equivalentes de carga para pavimentos rígidos y la tasa de crecimiento de tránsito, para obtener el número de ejes equivalentes (ESAL'S) de los vehículos que transitaran por el pavimento diseñado, y el tercero corresponde al nomograma de la AASHTO para determinar el espesor de la losa del pavimento en concreto permeable.

APÉNDICE 1



CASTRO & De la Torre, S. A.
ingenieros consultores

TELS.: 232-2273
FAX: 296-0076 E-mail: castorre@castroydelatorre.com

APARTADO: 5462-1000
SAN JOSE - COSTA RICA

INF. # 07-0533

INDICE

PREPARADO PARA

**INGENIERA
MAGALLY PRADO
URBANIZADORA TRIANGULO DEL NORTE**

**ESTUDIO GEOTECNICO Y DE
MECANICA DE SUELOS**

**PROYECTO
URBANIZACION**

PUEBLO NUEVO, PARAISO, CARTAGO.

SAN JOSE, COSTA RICA

JUNIO, 2007

CARTA DE PRESENTACION

1.- ASPECTOS GENERALES

2.- TRABAJO REALIZADO

3.- RESULTADOS OBTENIDOS

3.1.- Nivel freático

3.2.- Clasificación unificada de suelos

4.- ANALISIS Y CONCLUSIONES

4.1.- Generales

4.2.- Capacidad de soporte admisible del terreno

4.2.1.- Tabla capacidad soporte admisible

5.- RECOMENDACIONES

5.1.- Cimentaciones

5.2.- Asentamientos

5.3.- Liquefacción bajo sismos

5.4.- Estabilidad local de las obras

5.4.1.- Estabilidad de taludes en corte

5.5.- Pisos de las obras

5.6.- Fuerzas Laterales (Muros de retención)

5.7.- Rellenos

5.8.- Conflicto sísmico

5.9.- Alcance profesional

5.10.- Aspectos futuros

6.- PRUEBAS DE PERCOLACION DE CAMPO

PLANO DE UBICACION DE PERFORACIONES

PERFIL DEL TERRENO

HOJAS DE PERFILES DE PERFORACIONES

10000

Escala de long.
Escala de anch.
Inclinación

Directorio de Laboratorio
Perforaciones SPT
Inclinómetro



INF. # 07-0533. Pág. # 4/14

El trabajo de campo fue realizado por el Técnico Daniel Castañeda, bajo la dirección del Supervisor General de Perforación, Rafael Rojas. El programa de laboratorio fue ejecutado por los Técnicos Luis Segura y Carlos Murillo, bajo la dirección del Supervisor General de Laboratorio, Ing. Jonathan Barboza. La preparación de este informe fue supervisada por el Ing. Eugenio Araya, Jefe del Depto. de Ingeniería, y el gerente general de la Empresa.

3.- RESULTADOS OBTENIDOS:

Los que se refieren a las pruebas de laboratorio, se muestran en las hojas de perfil de perforación que se adjuntan a este informe, y que se resumen en la sección 3.2. En general el perfil de suelo detectado por las cinco perforaciones realizadas y su clasificación por consistencia de acuerdo con Terzaghi y Peck es el siguiente:

CAPA A: (De 0.00 a 0.40 m en P-1) (De 0.00 a 0.30 m en P-2) (De 0.00 a 0.50 m en P-3)
(De 0.00 a 0.65 m en P-4) (De 0.00 a 0.45 m en P-5)

Suelo orgánico de color negro.

CAPA B: (De 0.65 a 0.90 m en P-4)

Limo plástico de color café oscuro con pintas grises, de consistencia media.

CAPA C: (De 0.90 a 2.25 m en P-4)

Limo plástico de color café gris, de consistencia muy blanda, media y rígida, y ligeramente plástico.

CAPA D: (De 0.40 a 2.00 m en P-1) (De 0.30 a 4.05 m en P-2)

Limos plásticos de color café, con piedras, de consistencia media, semidura, dura y rígida, y ligeramente plásticos.

CAPA E: (De 0.50 a 2.25 m en P-3) (De 2.25 a 4.05 m en P-4) (De 0.45 a 3.15 m en P-5)

Limos plásticos de color café claro con pintas rojizas, de consistencia media, semidura y dura, y medianamente plásticos.



CASTRO & De la Torre, S. A.

ingenieros consultores

TELS.: 232-2273
FAX: 296-0076 E-mail: castorre@castroydelatorre.com

APARTADO: 5462-1000
SAN JOSE - COSTA RICA

INF. # 07-0533. Pág. # 5/14

CAPA F: (De 2.25 a 4.05 m en P-3)

Limo de alta plasticidad de color café rojizo, de consistencia dura y rígida, y muy plástico.

CAPA G: (De 3.15 a 4.05 m en P-5)

Limo plástico arenoso de color café claro con pintas rojizas, de consistencia media y dura, y ligeramente plástico.

3.1.- Nivel freático:

Durante el proceso de perforación no se detectó presencia del nivel freático, a la profundidad estudiada, y a partir de los niveles actuales de terreno, en esta época del año.

3.2.- Clasificación unificada de suelos (ASTM D-2487):

Basado en las pruebas de laboratorio y en la observación visual de las muestras extraídas y ensayadas, se clasifican los suelos encontrados de la siguiente forma:

Capa	C	D	E	F	G
Límite de Atterberg: ASTM D-4318					
Límite líquido	57	54	74	88	68
Índice plástico	15	14	26	35	12
Límite contracción, %	11	8	14	19	7
Granulometría: ASTM D-1140					
% pasando Malla					
# 4	97	98	100	100	100
# 40	87	94	99	99	99
#200	74	81	97	97	97
Contenido de arena %	26	19	3	3	3
Clasificación unificada: ASTM D-2487	MH-SM	MH	MH	MH	MH
Clasificación unificada: ASTM D-3282	A-7-5	A-7-5	A-7-5	A-7-5	A-7-5

Estudios Geotécnicos
Ensayo de Materiales
Diseño de Pavimento
Perforaciones Rotación con Diamante

Fundaciones
Especificaciones
Inspección

Investigaciones de Laboratorio
Perforaciones SPT
Diseños Mezclas Concreto



INF. # 07-0533. Pág. # 6/14

4.- ANALISIS Y CONCLUSIONES:

4.1.- Generales:

De acuerdo a los resultados obtenidos con las cinco perforaciones realizadas, se concluye que existen 0.4, 0.3, 0.5, 0.65 y 0.45 metros de espesor de P-1 a P-5 respectivamente, de suelo orgánico de color negro (capa A), de baja calidad. Debajo de este, continúa un perfil estratigráfico de suelos cohesivos naturales de sitio (capas B, C, D, E, F y G), de consistencia muy blanda, media, semidura, dura y rígida.

4.2.- Capacidad de soporte admisible del subsuelo:

Se realizó un análisis de capacidad de soporte "puntual" de los estratos del subsuelo de las cinco perforaciones realizadas, para lo cual usamos una fórmula para suelos cohesivos por el método de Meyerhof, correlacionándola con el valor de N del SPT, utilizando un factor de seguridad de tres.

4.2.1.- Tabla capacidad soporte admisible: (F.S.= 3.0)

Perforación #	Profundidad del estrato Metros	Capacidad Soporte Admisible Ton/m ²
P-1	0.50 a 0.90	15
	0.90 a 2.00	20
P-2	0.50 a 0.90	7
	0.90 a 1.80	20 *
	1.80 a 2.70	15 *
	2.70 a 4.05	10
P-3	0.50 a 0.90	8
	0.90 a 2.25	20
	2.25 a 4.05	20 **
P-4	0.65 a 1.80	5
	1.80 a 2.25	10
	2.25 a 2.70	15
	2.70 a 4.05	20
P-5	0.50 a 2.70	15 *
	2.70 a 3.60	10
	3.60 a 4.05	15

* Debido que debajo de estos estratos existen suelos de inferior resistencia, se recomienda efectuar análisis de distribución de bulbos de presión de la posición y área de las placas, a los estratos más suaves. De dicho análisis se obtendrá la capacidad de soporte admisible a utilizar en el diseño estructural de las obras por construir.

** Dado que estos suelos son el resultado de limos de alta plasticidad naturales de sitio, no se recomienda apoyar cimentaciones convencionales directamente sobre ellos, debido al riesgo de altos movimientos de contracción y expansión que pueden sufrir estos suelos con los cambios de humedad.

Estudios Geotécnicos
Ensayo de Materiales
Diseño de Pavimento
Perforaciones Rotación con Diamante

Fundaciones
Especificaciones
Inspección

Investigaciones de Laboratorio
Perforaciones SPT
Diseños Mezclas Concreto



5.- RECOMENDACIONES:

5.1.- Cimentaciones:

Opción #1:

Para cargas unitarias moderadas de las obras por construir, se recomienda apoyarse en los estratos naturales de la capa C, D y E, que aparecen a partir de 0.5, 0.9, 0.9, 1.8 y 0.5 metros de profundidad en las áreas de P-1 a P-5, respectivamente de los niveles actuales del terreno, pudiendo generalizar 10 Ton/m² de capacidad de soporte admisible (30 Ton/m² a la falla), para cimientos corridos o aislados. Para elevar el nivel de desplante de los cimientos, se puede excavar en el área de éstos hasta encontrar los suelos propuestos, para luego rellenar con un buen material granular (lastres o gravas), con CBR mínimo de 30, compactado en capas al 95% del proctor estándar, elevando dicho buen relleno hasta la profundidad deseada de desplante de placas, para sobre este buen relleno apoyarlas.

Opción #2:

Para cargas unitarias livianas de las obras por construir, se recomienda apoyarse en los estratos naturales de las capas B, D y E, que aparecen a partir de 0.5, 0.5, 0.5, 0.65 y 0.5 metros de profundidad en las áreas de P-1 a P-5, respectivamente de los niveles actuales del terreno, pudiendo usar 5 Ton/m² de capacidad de soporte admisible (15 Ton/m² a la falla), para cimientos corridos con vigas de amarre.

5.2.- Asentamientos:

De transmitirse los esfuerzos de las obras por construir a los estratos naturales de sitio recomendados, y de no cargar el subsuelo más de lo propuesto en este informe, no será de esperar problemas por asentamientos mayores a 2.5 cm.

5.3.- Licuefacción bajo sismos:

Basados en la teoría de IDRISSE Y SEED, para que se produzca el estado de licuefacción bajo fuertes sismos (aceleración máxima mayor a 0.15 g), es necesario que los suelos sean arenosos, con menos de un 20% de fino arcilloso, que estén bajo el nivel freático, que el Nspt' sea menor a 25 golpes/pie, y que su espesor sea mayor a un metro.

En general, los suelos de sitio clasifican como cohesivos, y sin la presencia de un nivel freático, por lo que se puede considerar que no se dan las condiciones como para que se produzca un estado de licuefacción bajo fuertes sismos.



5.7.- Rellenos:

Para conformar rellenos de buena calidad para pisos, se recomienda eliminar la totalidad del estrato de suelo orgánico (capa A), el cual oscila de 0.4 a 0.65 metros de espesor de P-1 a P-5, luego banquear el suelo natural de sitio, para evitar conformar rellenos sobre planos inclinados de falla. Así, conformar rellenos de buena calidad, usando materiales granulares (lastres o gravas) ya que con éstos se logran humedades adecuadas de compactación con mayor facilidad que con los suelos cohesivos de sitio, compactándolos en capas al 95% del proctor estándar.

Si requieren apoyar cimentaciones sobre rellenos artificiales, se recomienda efectuar un estudio de suelos con perforaciones complementarias una vez conformado dicho relleno, para de esa forma cuantificar la capacidad de soporte admisible del mismo.

5.8.- Coeficiente sísmico:

Para determinar el coeficiente sísmico a utilizar en el diseño de las estructuras por construir y de acuerdo al capítulo 2 (secciones 2.1 y 2.2) y al capítulo 5, del Código Sísmico de Costa Rica 2002, el proyecto se ubica en la zona sísmica III y los suelos de sitio clasifican como Tipo S₃, por lo que se deberá de utilizar para el factor espectral dinámico (FED) la Figura 5.7.

5.9.- Alcance profesional:

Estas recomendaciones se encuentran gobernadas por las propiedades físico-mecánicas de los estratos encontrados en los sondeos exploratorios, así como por las condiciones proyectadas del manto freático, y por las características del proyecto.

5.10.- Aspectos futuros:

Dado que el proyecto está representado por cinco perforaciones, existe la posibilidad que las condiciones encontradas varíen en otros puntos, por lo que se recomienda en el proceso de construcción solicitar los servicios de un técnico en mecánica de suelos, para que pueda revisar todos los fondos de las excavaciones para las placas, para de esa forma verificar que se están apoyando en los estratos propuestos en este informe. De encontrarse suelos distintos en algún sector, se deberán efectuar algunas perforaciones adicionales, y la revisión profesional correspondiente.

Si hubiera diferencias, éstas deberán tomarse en consideración en el diseño de construcción. Asimismo, si durante la ejecución de la etapa constructiva se encuentra alguna variación de las condiciones esquematizadas en este reporte, o si se implementan cambios en el diseño del proyecto, se deberá dar información para que pueda revisarse y de ser necesario modificarlo.

Estudios Geotécnicos
Análisis de Materiales
Diseño de Pavimento
Perforaciones Rotación con Diamante

Fundaciones
Especificaciones
Inspección

Investigaciones de Laboratorio
Perforaciones SPT
Diseños Mezclas Concreto

APÉNDICE 2

Tipo de Vehículo	Tipo de eje del tractor			Tipo de eje del semiremolque			Total Toneladas	
	Eje simple direccional	Eje de tracción			Eje de arrastre			
		Eje Simple	Doble rueda	Triple rueda	Eje Simple	Doble rueda		Triple rueda
C2	5.00	10.00					15.00	
C3	5.00		16.50				21.50	
C4	5.00			20.00			25.00	
T2-S1	5.00	9.00			9.00		23.00	
T2-S2	5.00	9.00				16.00	30.00	
T2-S3	5.00	9.00				20.00	34.00	
T3-S1	5.00		16.00		9.00		30.00	
T3-S2	5.00		16.00			16.00	37.00	
T3-S3	5.00		16.00			20.00	41.00	
Otros	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Variable	

Fuente: Acuerdo Centroamericano sobre Circulación por Carreteras, SIECA, 2000.
Resolución 02-01 COMITRAN XXIII.

Factores equivalentes de carga para pavimentos rígidos, ejes simples, $P_t = 2,0$

Carga p/eje (kips)	Espesor de losa D (en pulgadas)								
	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
4	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
6	0.011	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
8	0.035	0.033	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032
10	0.087	0.084	0.082	0.081	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080
12	0.186	0.180	0.178	0.175	0.174	0.174	0.173	0.173	0.173
14	0.353	0.346	0.341	0.338	0.337	0.336	0.336	0.336	0.336
16	0.614	0.609	0.604	0.601	0.599	0.599	0.598	0.598	0.598
18	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.55	1.56	1.57	1.58	1.58	1.59	1.59	1.59	1.59
22	2.32	2.32	2.35	2.38	2.40	2.41	2.41	2.41	2.42
24	3.37	3.34	3.40	3.47	3.51	3.53	3.54	3.55	3.55
26	4.76	4.69	4.77	4.88	4.97	5.02	5.04	5.06	5.06
28	6.48	6.44	6.52	6.70	6.85	6.94	7.00	7.02	7.04
30	8.92	8.88	8.74	8.98	9.23	9.39	9.48	9.54	9.56
32	11.9	11.5	11.5	11.8	12.2	12.4	12.6	12.7	12.7
34	15.5	15.0	14.9	15.3	15.8	16.2	16.4	16.8	16.7
36	20.1	19.3	19.2	19.5	20.1	20.7	21.1	21.4	21.5
38	25.6	24.5	24.3	24.6	25.4	26.1	26.7	27.1	27.4
40	32.2	30.8	30.4	30.7	31.6	32.6	33.4	34.0	34.4
42	40.1	38.4	37.7	38.0	38.9	40.1	41.3	42.1	42.7
44	49.4	47.3	46.4	46.6	47.6	49.0	50.4	51.8	52.7
46	60.4	57.7	56.6	56.7	57.7	59.3	61.1	62.6	63.7
48	73.2	69.9	68.4	68.4	69.4	71.2	73.3	75.3	76.8
50	88.0	84.1	82.2	82.0	83.0	84.9	87.4	89.8	91.7

Factores equivalentes de carga para pavimentos rígidos, ejes tándem, Pt = 2,0

Carga p/eje (kips)	Espesor de losa D (en pulgadas)								
	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
4	0.0006	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
6	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
8	0.006	0.006	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
10	0.014	0.013	0.013	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
12	0.028	0.026	0.026	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
14	0.051	0.049	0.048	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
16	0.087	0.084	0.082	0.081	0.081	0.080	0.080	0.080	0.080
18	0.141	0.136	0.133	0.132	0.131	0.131	0.131	0.131	0.131
20	0.216	0.210	0.208	0.204	0.203	0.203	0.203	0.203	0.203
22	0.319	0.313	0.307	0.305	0.304	0.303	0.303	0.303	0.303
24	0.454	0.449	0.444	0.441	0.440	0.439	0.439	0.439	0.439
26	0.629	0.626	0.622	0.620	0.618	0.618	0.618	0.618	0.618
28	0.852	0.851	0.850	0.850	0.850	0.849	0.849	0.849	0.849
30	1.13	1.13	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
32	1.48	1.48	1.49	1.50	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51
34	1.90	1.90	1.93	1.95	1.96	1.97	1.97	1.97	1.97
36	2.42	2.41	2.45	2.49	2.51	2.52	2.53	2.53	2.53
38	3.04	3.02	3.07	3.13	3.17	3.19	3.20	3.20	3.21
40	3.79	3.74	3.80	3.89	3.95	3.98	4.00	4.01	4.01
42	4.67	4.59	4.66	4.78	4.87	4.93	4.95	4.97	4.97
44	5.72	5.59	5.67	5.82	5.95	6.03	6.07	6.09	6.10
46	6.94	6.78	6.83	7.02	7.20	7.31	7.37	7.41	7.43
48	8.36	8.12	8.17	8.40	8.63	8.79	8.88	8.93	8.96
50	10.00	9.69	9.72	9.98	10.27	10.49	10.62	10.69	10.73
52	11.9	11.5	11.5	11.8	12.1	12.4	12.6	12.7	12.8
54	14.0	13.5	13.5	13.8	14.2	14.6	14.9	15.0	15.1
56	16.5	15.9	15.8	16.1	16.6	17.1	17.4	17.6	17.7
58	19.3	18.5	18.4	18.7	19.3	19.8	20.3	20.5	20.7
60	22.4	21.5	21.3	21.6	22.3	22.9	23.5	23.8	24.0
62	25.9	24.9	24.6	24.9	25.6	26.4	27.0	27.5	27.7
64	29.9	28.8	28.2	28.5	29.3	30.2	31.0	31.6	31.9
66	34.3	32.8	32.3	32.6	33.4	34.4	35.4	36.1	36.5
68	39.2	37.5	36.8	37.1	37.9	39.1	40.2	41.1	41.6
70	44.6	42.7	41.9	42.1	42.9	44.2	45.5	46.6	47.3
72	50.6	48.4	47.5	47.6	48.5	49.9	51.4	52.6	53.5
74	57.3	54.7	53.6	53.6	54.6	56.1	57.7	59.2	60.3
76	64.6	61.7	60.4	60.3	61.2	62.8	64.7	66.4	67.7
78	72.5	69.3	67.8	67.7	68.6	70.2	72.3	74.3	75.8
80	81.3	77.6	75.9	75.7	76.6	78.3	80.6	82.8	84.7
82	90.9	86.7	84.7	84.4	85.3	87.1	89.6	92.1	94.2
84	101.	97.	94.	94.	95.	97.	99.	102.	105.
86	113.	107.	105.	104.	105.	107.	110.	113.	116.
88	125.	119.	116.	116.	116.	118.	121.	125.	128.
90	138.	132.	129.	128.	129.	131	134.	137.	141.

Factores equivalentes de carga para pavimentos rígidos, ejes tridem, Pt = 2,0

Carga p/eje (kips)	Espesor de losa D (en pulgadas)								
	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
4	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
6	0.0010	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009
8	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
10	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
12	0.010	0.010	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
14	0.018	0.017	0.017	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018
16	0.030	0.029	0.028	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027
18	0.047	0.045	0.044	0.044	0.043	0.043	0.043	0.043	0.043
20	0.072	0.069	0.067	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066
22	0.105	0.101	0.099	0.098	0.097	0.097	0.097	0.097	0.097
24	0.149	0.144	0.141	0.139	0.139	0.138	0.138	0.138	0.138
26	0.205	0.199	0.195	0.194	0.193	0.192	0.192	0.192	0.192
28	0.276	0.270	0.265	0.263	0.262	0.262	0.262	0.262	0.261
30	0.364	0.359	0.354	0.351	0.350	0.349	0.349	0.349	0.349
32	0.472	0.468	0.463	0.460	0.459	0.458	0.458	0.458	0.458
34	0.603	0.600	0.596	0.594	0.593	0.592	0.592	0.592	0.592
36	0.759	0.758	0.757	0.756	0.755	0.755	0.755	0.755	0.755
38	0.946	0.947	0.949	0.950	0.951	0.951	0.951	0.951	0.951
40	1.17	1.17	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.19
42	1.42	1.43	1.44	1.45	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46
44	1.73	1.73	1.75	1.77	1.78	1.78	1.79	1.79	1.79
46	2.08	2.07	2.10	2.13	2.15	2.16	2.16	2.16	2.17
48	2.48	2.47	2.51	2.55	2.58	2.59	2.80	2.80	2.61
50	2.95	2.92	2.97	3.03	3.07	3.09	3.10	3.11	3.11
52	3.48	3.44	3.50	3.58	3.63	3.66	3.68	3.69	3.69
54	4.09	4.03	4.09	4.20	4.27	4.31	4.33	4.35	4.35
56	4.78	4.69	4.76	4.89	4.99	5.05	5.08	5.09	5.10
58	5.57	5.44	5.51	5.66	5.79	5.87	5.91	5.94	5.95
60	6.45	6.29	6.35	6.53	6.69	6.79	6.85	6.89	6.90
62	7.43	7.23	7.28	7.49	7.69	7.82	7.90	7.94	7.97
64	8.54	8.28	8.32	8.55	8.80	8.97	9.07	9.13	9.16
66	9.76	9.46	9.48	9.73	10.02	10.24	10.37	10.44	10.48
68	11.1	10.8	10.8	11.0	11.4	11.6	11.8	11.9	12.0
70	12.6	12.2	12.2	12.5	12.8	13.2	13.4	13.5	13.6
72	14.3	13.8	13.7	14.0	14.5	14.9	15.1	15.3	15.4
74	16.1	15.5	15.4	15.7	16.2	16.7	17.0	17.2	17.3
76	18.2	17.5	17.3	17.6	18.2	18.7	19.1	19.3	19.5
78	20.4	19.6	19.4	19.7	20.3	20.9	21.4	21.7	21.8
80	22.8	21.9	21.6	21.9	22.6	23.3	23.8	24.2	24.4
82	25.4	24.4	24.1	24.4	25.0	25.8	26.5	26.9	27.2
84	28.3	27.1	26.7	27.0	27.7	28.6	29.4	29.9	30.2
86	31.4	30.1	29.6	29.9	30.7	31.6	32.5	33.1	33.5
88	34.8	33.3	32.8	33.0	33.8	34.8	35.8	36.6	37.1
90	38.5	36.8	36.2	36.4	37.2	38.3	39.4	40.3	40.9

Factores equivalentes de carga para pavimentos rígidos, ejes simples, $P_t = 2,5$

Carga p/eje (kips)	Espesor de losa D (en pulgadas)								
	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
4	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
6	0.012	0.011	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
8	0.039	0.035	0.033	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032
10	0.097	0.089	0.084	0.082	0.081	0.080	0.080	0.080	0.080
12	0.203	0.189	0.181	0.178	0.175	0.174	0.174	0.173	0.173
14	0.376	0.360	0.347	0.341	0.338	0.337	0.336	0.336	0.336
16	0.634	0.623	0.610	0.604	0.601	0.599	0.599	0.599	0.598
18	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.51	1.52	1.55	1.57	1.58	1.58	1.59	1.59	1.59
22	2.21	2.20	2.28	2.34	2.38	2.40	2.41	2.41	2.41
24	3.16	3.10	3.22	3.36	3.45	3.50	3.53	3.54	3.55
26	4.41	4.28	4.42	4.67	4.85	4.95	5.01	5.04	5.05
28	6.05	5.78	5.92	6.29	6.61	6.81	6.92	6.98	7.01
30	8.16	7.67	7.79	8.28	8.79	9.14	9.35	9.46	9.52
32	10.8	10.1	10.1	10.7	11.4	12.0	12.3	12.6	12.7
34	14.1	13.0	12.9	13.6	14.6	15.4	16.0	16.4	16.5
36	18.2	16.7	16.4	17.1	18.3	19.5	20.4	21.0	21.3
38	23.1	21.1	20.8	21.3	22.7	24.3	25.6	26.4	27.0
40	29.1	26.5	25.7	26.3	27.9	29.9	31.6	32.9	33.7
42	36.2	32.9	31.7	32.2	34.0	36.3	38.7	40.4	41.6
44	44.6	40.4	38.8	39.2	41.0	43.8	46.7	49.1	50.8
46	54.5	49.3	47.1	47.3	49.2	52.3	55.9	59.0	61.4
48	66.1	59.7	56.9	56.8	58.7	62.1	66.3	70.3	73.4
50	79.4	71.7	68.2	67.8	69.6	73.3	78.1	83.0	87.1

Factores equivalentes de carga para pavimentos rígidos, ejes tándem, Pt = 2,5

Carga p/eje (kips)	Espesor de losa D (en pulgadas)								
	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
4	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
6	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
8	0.007	0.006	0.006	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
10	0.015	0.014	0.013	0.013	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
12	0.031	0.028	0.026	0.026	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
14	0.057	0.052	0.049	0.048	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
16	0.097	0.089	0.084	0.082	0.081	0.081	0.080	0.080	0.080
18	0.155	0.143	0.136	0.133	0.132	0.131	0.131	0.131	0.131
20	0.234	0.220	0.211	0.206	0.204	0.203	0.203	0.203	0.203
22	0.340	0.325	0.313	0.308	0.305	0.304	0.303	0.303	0.303
24	0.475	0.462	0.450	0.444	0.441	0.440	0.439	0.439	0.439
26	0.644	0.637	0.627	0.622	0.620	0.619	0.618	0.618	0.618
28	0.855	0.854	0.852	0.850	0.850	0.850	0.849	0.849	0.849
30	1.11	1.12	1.13	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
32	1.43	1.44	1.47	1.49	1.50	1.51	1.51	1.51	1.51
34	1.82	1.82	1.87	1.92	1.95	1.96	1.97	1.97	1.97
36	2.29	2.27	2.35	2.43	2.48	2.51	2.52	2.52	2.53
38	2.95	2.80	2.91	3.03	3.12	3.16	3.18	3.20	3.20
40	3.52	3.42	3.55	3.74	3.87	3.94	3.98	4.00	4.01
42	4.32	4.16	4.30	4.55	4.74	4.86	4.91	4.95	4.96
44	5.26	5.01	5.16	5.48	5.75	5.92	6.01	6.06	6.09
46	6.36	6.01	6.14	6.53	6.90	7.14	7.28	7.36	7.40
48	7.64	7.16	7.27	7.73	8.21	8.55	8.75	8.86	8.92
50	9.11	8.50	8.55	9.07	9.68	10.14	10.42	10.58	10.66
52	10.8	10.0	10.0	10.6	11.3	11.9	12.3	12.5	12.7
54	12.8	11.8	11.7	12.3	13.2	13.9	14.5	14.8	14.9
56	15.0	13.8	13.6	14.2	15.2	16.2	16.8	17.3	17.5
58	17.5	16.0	15.7	16.3	17.5	18.6	19.5	20.1	20.4
60	20.3	18.5	18.1	18.7	20.0	21.4	22.5	23.2	23.6
62	23.5	21.4	20.8	21.4	22.8	24.4	25.7	26.7	27.3
64	27.0	24.6	23.8	24.4	25.8	27.7	29.3	30.5	31.3
66	31.0	28.1	27.1	27.6	29.2	31.3	33.2	34.7	35.7
68	35.4	32.1	30.9	31.3	32.9	35.2	37.5	39.3	40.5
70	40.3	36.5	35.0	35.3	37.0	39.5	42.1	44.3	45.9
72	45.7	41.4	39.6	39.8	41.5	44.2	47.2	49.8	51.7
74	51.7	46.7	44.6	44.7	46.4	49.3	52.7	55.7	58.0
76	58.3	52.6	50.2	50.1	51.8	54.9	58.6	62.1	64.8
78	65.5	59.1	56.3	56.1	57.7	60.9	65.0	69.0	72.3
80	73.4	66.2	62.9	62.5	64.2	67.5	71.9	76.4	80.2
82	82.0	73.9	70.2	69.6	71.2	74.7	79.4	84.4	88.8
84	91.4	82.4	78.1	77.3	78.9	82.4	87.4	93.0	98.1
86	102.	92.	87.	86.	87.	91.	96.	102.	108.
88	113.	102.	96.	95.	96.	100.	105.	112.	119.
90	125.	112.	106.	105.	106.	110.	115.	123.	130.

Factores equivalentes de carga para pavimentos rígidos, ejes tridem, Pt = 2,5

Carga p/eje (kips)	Espesor de losa D (en pulgadas)								
	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
4	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
6	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
8	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
10	0.006	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
12	0.011	0.010	0.010	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
14	0.020	0.018	0.017	0.017	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016
16	0.033	0.030	0.029	0.028	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027
18	0.053	0.048	0.045	0.044	0.044	0.043	0.043	0.043	0.043
20	0.080	0.073	0.069	0.067	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066
22	0.116	0.107	0.101	0.099	0.098	0.097	0.097	0.097	0.097
24	0.163	0.151	0.144	0.141	0.139	0.139	0.138	0.138	0.138
26	0.222	0.209	0.200	0.195	0.194	0.193	0.192	0.192	0.192
28	0.295	0.281	0.271	0.265	0.263	0.262	0.262	0.262	0.262
30	0.384	0.371	0.359	0.354	0.351	0.350	0.349	0.349	0.349
32	0.490	0.480	0.468	0.463	0.460	0.459	0.458	0.458	0.458
34	0.616	0.609	0.601	0.596	0.594	0.593	0.592	0.592	0.592
36	0.765	0.762	0.759	0.757	0.756	0.755	0.755	0.755	0.755
38	0.939	0.941	0.948	0.948	0.950	0.951	0.951	0.951	0.951
40	1.14	1.15	1.16	1.17	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18
42	1.38	1.38	1.41	1.44	1.45	1.46	1.46	1.46	1.46
44	1.65	1.65	1.70	1.74	1.77	1.78	1.78	1.78	1.79
46	1.97	1.96	2.03	2.09	2.13	2.15	2.16	2.16	2.16
48	2.34	2.31	2.40	2.49	2.55	2.58	2.59	2.60	2.60
50	2.76	2.71	2.81	2.94	3.02	3.07	3.09	3.10	3.11
52	3.24	3.15	3.27	3.44	3.56	3.62	3.66	3.68	3.68
54	3.79	3.66	3.79	4.00	4.16	4.26	4.30	4.33	4.34
56	4.41	4.23	4.37	4.63	4.84	4.97	5.03	5.07	5.09
58	5.12	4.87	5.00	5.32	5.59	5.76	5.85	5.90	5.93
60	5.91	5.59	5.71	6.08	6.42	6.64	6.77	6.84	6.87
62	6.80	6.39	6.50	6.91	7.33	7.62	7.79	7.88	7.93
64	7.79	7.29	7.37	7.82	8.33	8.70	8.92	9.04	9.11
66	8.90	8.28	8.33	8.83	9.42	9.88	10.17	10.33	10.42
68	10.1	9.4	9.4	9.9	10.6	11.2	11.5	11.7	11.9
70	11.5	10.6	10.6	11.1	11.9	12.6	13.0	13.3	13.5
72	13.0	12.0	11.8	12.4	13.3	14.1	14.7	15.0	15.2
74	14.6	13.5	13.2	13.8	14.8	15.8	16.5	16.9	17.1
76	16.5	15.1	14.8	15.4	16.5	17.6	18.4	18.9	19.2
78	18.5	16.9	16.5	17.1	18.2	19.5	20.5	21.1	21.5
80	20.6	18.8	18.3	18.9	20.2	21.6	22.7	23.5	24.0
82	23.0	21.0	20.3	20.9	22.2	23.8	25.2	26.1	26.7
84	25.6	23.3	22.5	23.1	24.5	26.2	27.8	28.9	29.6
86	28.4	25.8	24.9	25.4	26.9	28.8	30.5	31.9	32.8
88	31.5	28.6	27.5	27.9	29.4	31.5	33.5	35.1	36.1
90	34.8	31.5	30.7	30.7	32.2	34.4	36.7	38.5	39.8

Factores equivalentes de carga para pavimentos rígidos, ejes simples, $P_t = 3,0$

Carga p/eje (kips)	Espesor de losa D (en pulgadas)								
	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
4	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
6	0.014	0.012	0.011	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
8	0.045	0.038	0.034	0.033	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032
10	0.111	0.095	0.087	0.083	0.081	0.081	0.080	0.080	0.080
12	0.228	0.202	0.186	0.179	0.176	0.174	0.174	0.174	0.173
14	0.408	0.378	0.355	0.344	0.340	0.337	0.337	0.337	0.337
16	0.660	0.640	0.619	0.608	0.603	0.600	0.599	0.599	0.599
18	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.46	1.47	1.52	1.55	1.57	1.58	1.58	1.59	1.59
22	2.07	2.06	2.18	2.29	2.35	2.38	2.40	2.41	2.41
24	2.90	2.81	3.00	3.23	3.38	3.47	3.51	2.53	3.54
26	4.00	3.77	4.01	4.40	4.70	4.87	4.96	5.01	5.04
28	5.43	4.99	5.23	5.80	6.31	6.65	6.83	6.93	6.98
30	7.27	6.53	6.72	7.46	8.25	8.83	9.17	9.36	9.46
32	9.59	8.47	8.53	9.42	10.54	11.44	12.03	12.37	12.56
34	12.5	10.9	10.7	11.7	13.2	14.5	15.5	16.0	16.4
36	16.0	13.8	13.4	14.4	16.2	18.1	19.5	20.4	21.0
38	20.4	17.4	16.7	17.7	19.8	22.2	24.2	25.6	26.4
40	25.6	21.8	20.6	21.5	23.8	26.8	29.5	31.5	32.9
42	31.8	26.9	25.3	26.0	28.5	32.0	35.5	38.4	40.3
44	39.2	33.1	30.8	31.3	33.9	37.9	42.3	46.1	48.8
46	47.8	40.3	37.2	37.5	40.1	44.5	49.8	54.7	58.5
48	57.9	48.6	44.8	44.7	47.3	52.1	48.2	64.3	69.4
50	69.6	58.4	53.6	53.1	55.6	60.6	67.6	75.0	81.4

Factores equivalentes de carga para pavimentos rígidos, ejes tándem, Pt = 3,0

Carga p/eje (kips)	Espesor de losa D (en pulgadas)								
	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
4	0.0007	0.0006	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
6	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
8	0.008	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
10	0.018	0.015	0.013	0.013	0.013	0.012	0.012	0.012	0.012
12	0.036	0.030	0.027	0.028	0.028	0.025	0.025	0.025	0.025
14	0.066	0.056	0.050	0.048	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
16	0.111	0.095	0.087	0.083	0.081	0.081	0.081	0.081	0.080
18	0.174	0.153	0.140	0.135	0.132	0.131	0.131	0.131	0.131
20	0.260	0.234	0.217	0.209	0.205	0.204	0.203	0.203	0.203
22	0.368	0.341	0.321	0.311	0.307	0.305	0.304	0.303	0.303
24	0.502	0.479	0.458	0.447	0.443	0.440	0.440	0.439	0.439
26	0.664	0.651	0.634	0.625	0.621	0.619	0.618	0.618	0.618
28	0.859	0.857	0.853	0.851	0.850	0.850	0.850	0.849	0.849
30	1.09	1.10	1.12	1.13	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
32	1.38	1.38	1.44	1.47	1.49	1.50	1.51	1.51	1.51
34	1.72	1.71	1.80	1.88	1.93	1.95	1.96	1.97	1.97
36	2.13	2.10	2.23	2.36	2.45	2.49	2.51	2.52	2.52
38	2.62	2.54	2.71	2.92	3.06	3.13	3.17	3.19	3.20
40	3.21	3.05	3.26	3.55	3.76	3.89	3.95	3.98	4.00
42	3.90	3.65	3.87	4.26	4.58	4.77	4.87	4.92	4.95
44	4.72	4.35	4.57	5.06	5.50	5.78	5.94	6.02	6.06
46	5.68	5.18	5.36	5.95	6.54	6.94	7.17	7.29	7.36
48	6.80	6.10	6.25	6.93	7.69	8.24	8.57	8.76	8.86
50	8.09	7.17	7.26	8.03	8.96	9.70	10.17	10.43	10.58
52	9.57	8.41	8.40	9.24	10.36	11.32	11.96	12.33	12.54
54	11.3	9.8	9.7	10.6	11.9	13.1	14.0	14.5	14.8
56	13.2	11.4	11.2	12.1	13.6	15.1	16.2	16.9	17.3
58	15.4	13.2	12.8	13.7	15.4	17.2	18.6	19.5	20.1
60	17.9	15.3	14.7	15.6	17.4	19.5	21.3	22.5	23.2
62	20.6	17.6	16.8	17.6	19.6	22.0	24.1	25.7	26.6
64	23.7	20.2	19.1	19.9	22.0	24.7	27.3	29.2	30.4
66	27.2	23.1	21.7	22.4	24.6	27.6	30.6	33.0	34.6
68	31.1	26.3	24.6	25.2	27.4	30.8	34.3	37.1	39.2
70	35.4	29.8	27.8	28.2	30.6	34.2	38.2	41.6	44.1
72	40.1	33.8	31.3	31.6	34.0	37.9	42.3	46.4	49.4
74	45.3	38.1	35.2	35.4	37.7	41.8	46.8	51.5	55.2
76	51.1	42.9	39.5	39.5	41.8	46.1	51.5	56.9	61.3
78	57.4	48.2	44.3	44.0	46.3	50.7	56.5	62.7	67.9
80	64.3	53.9	49.4	48.9	51.1	55.8	62.1	68.9	74.9
82	71.8	60.2	55.1	54.3	56.5	61.2	67.9	75.5	82.4
84	80.0	67.0	61.2	60.2	62.2	67.0	74.2	82.4	90.3
86	89.0	74.5	67.9	66.5	68.5	73.4	80.8	89.8	98.7
88	98.7	82.5	75.2	73.5	75.3	80.2	88.0	97.7	107.5
90	109.	91.	83.	81.	83.	88.	96.	106.	117.

Factores equivalentes de carga para pavimentos rígidos, ejes tridem, Pt = 3,0

Carga p/eje (kips)	Espesor de losa D (en pulgadas)								
	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
4	0.0004	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
6	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
8	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
10	0.007	0.006	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
12	0.013	0.011	0.010	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
14	0.023	0.02	0.018	0.017	0.017	0.016	0.016	0.016	0.016
16	0.039	0.033	0.030	0.028	0.028	0.027	0.027	0.027	0.027
18	0.061	0.052	0.047	0.045	0.044	0.044	0.043	0.043	0.043
20	0.091	0.078	0.071	0.068	0.067	0.066	0.066	0.066	0.066
22	0.132	0.114	0.104	0.100	0.098	0.097	0.097	0.097	0.097
24	0.183	0.161	0.148	0.143	0.140	0.139	0.139	0.138	0.138
26	0.246	0.221	0.205	0.198	0.195	0.193	0.193	0.192	0.192
28	0.322	0.296	0.277	0.268	0.265	0.263	0.262	0.262	0.262
30	0.411	0.387	0.367	0.357	0.353	0.351	0.350	0.349	0.349
32	0.515	0.495	0.476	0.466	0.462	0.460	0.459	0.458	0.458
34	0.634	0.622	0.607	0.599	0.595	0.594	0.593	0.592	0.592
36	0.772	0.768	0.762	0.759	0.758	0.756	0.755	0.755	0.755
38	0.930	0.934	0.942	0.947	0.949	0.950	0.951	0.951	0.951
40	1.11	1.12	1.15	1.17	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18
42	1.32	1.33	1.38	1.42	1.44	1.45	1.46	1.46	1.46
44	1.56	1.56	1.64	1.71	1.75	1.77	1.78	1.78	1.78
46	1.84	1.83	1.94	2.04	2.10	2.14	2.15	2.16	2.16
48	2.16	2.12	2.26	2.41	2.51	2.56	2.58	2.59	2.60
50	2.53	2.45	2.61	2.82	2.96	3.03	3.07	3.09	3.10
52	2.95	2.82	3.01	3.27	3.47	3.58	3.63	3.66	3.68
54	3.43	3.23	3.43	3.77	4.03	4.18	4.27	4.31	4.33
56	3.98	3.70	3.90	4.31	4.65	4.86	4.98	5.04	5.07
58	4.59	4.22	4.42	4.90	5.34	5.62	5.78	5.88	5.90
60	5.28	4.80	4.99	5.54	6.08	6.45	6.66	6.78	6.84
62	6.06	5.45	5.61	6.23	6.89	7.36	7.64	7.80	7.88
64	6.92	6.18	6.29	6.98	7.76	8.36	8.72	8.93	9.04
66	7.89	6.98	7.05	7.78	8.70	9.44	9.91	10.18	10.33
68	8.96	7.88	7.87	8.66	9.71	10.61	11.20	11.55	11.75
70	10.2	8.9	8.8	9.6	10.8	11.9	12.6	13.1	13.3
72	11.5	10.0	9.8	10.6	12.0	13.2	14.1	14.7	15.0
74	12.9	11.2	10.9	11.7	13.2	14.7	15.8	16.5	16.9
76	14.5	12.5	12.1	12.9	14.5	16.2	17.5	18.4	18.9
78	16.2	13.9	13.4	14.2	15.9	17.8	19.4	20.5	21.1
80	18.2	15.5	14.8	15.6	17.4	19.6	21.4	22.7	23.5
82	20.2	17.2	16.4	17.2	19.1	21.4	23.5	25.1	26.1
84	22.5	19.1	18.1	18.8	20.8	23.4	25.8	27.6	28.8
86	25.0	21.2	19.9	20.6	22.6	25.5	28.2	30.4	31.8
88	27.6	23.4	21.9	22.5	24.6	27.7	30.7	33.2	35.0
90	30.5	25.8	24.1	24.6	26.8	30.0	33.4	36.3	38.3

Período de análisis (años)	Factor sin Crecimiento	Tasa de crecimiento anual (g) (en %)						
		2	4	5	6	7	8	10
1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2	2.0	2.02	2.04	2.05	2.06	2.07	2.08	2.10
3	3.0	3.06	3.12	3.15	3.18	3.21	3.25	3.31
4	4.0	4.12	4.25	4.31	4.37	4.44	4.51	4.64
5	5.0	5.20	5.42	5.53	5.64	5.75	5.87	6.11
6	6.0	6.31	6.63	6.80	6.98	7.15	7.34	7.72
7	7.0	7.43	7.90	8.14	8.39	8.65	8.92	9.49
8	8.0	8.58	9.21	9.55	9.90	10.26	10.64	11.44
9	9.0	9.75	10.58	11.03	11.49	11.98	12.49	13.58
10	10.0	10.95	12.01	12.58	13.18	13.82	14.49	15.94
11	11.0	12.17	13.49	14.21	14.97	15.78	16.65	18.53
12	12.0	13.41	15.03	15.92	16.87	17.89	18.98	21.38
13	13.0	14.68	16.63	17.71	18.88	20.14	21.50	24.52
14	14.0	15.97	18.29	19.16	21.01	22.55	24.21	27.97
15	15.0	17.29	20.02	21.58	23.28	25.13	27.15	31.77
16	16.0	18.64	21.82	23.66	25.67	27.89	30.32	35.95
17	17.0	20.01	23.70	25.84	28.21	30.84	33.75	40.55
18	18.0	21.41	25.65	28.13	30.91	34.00	37.45	45.60
19	19.0	22.84	27.67	30.54	33.76	37.38	41.45	51.16
20	20.0	24.30	29.78	33.06	36.79	41.00	45.76	57.28
25	25.0	32.03	41.65	47.73	54.86	63.25	73.11	98.35
30	30.0	40.57	56.08	66.44	79.06	94.46	113.28	164.49
35	35.0	49.99	73.65	90.32	111.43	138.24	172.32	271.02

Tabla D-20 AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimento, 1,993

APÉNDICE 3

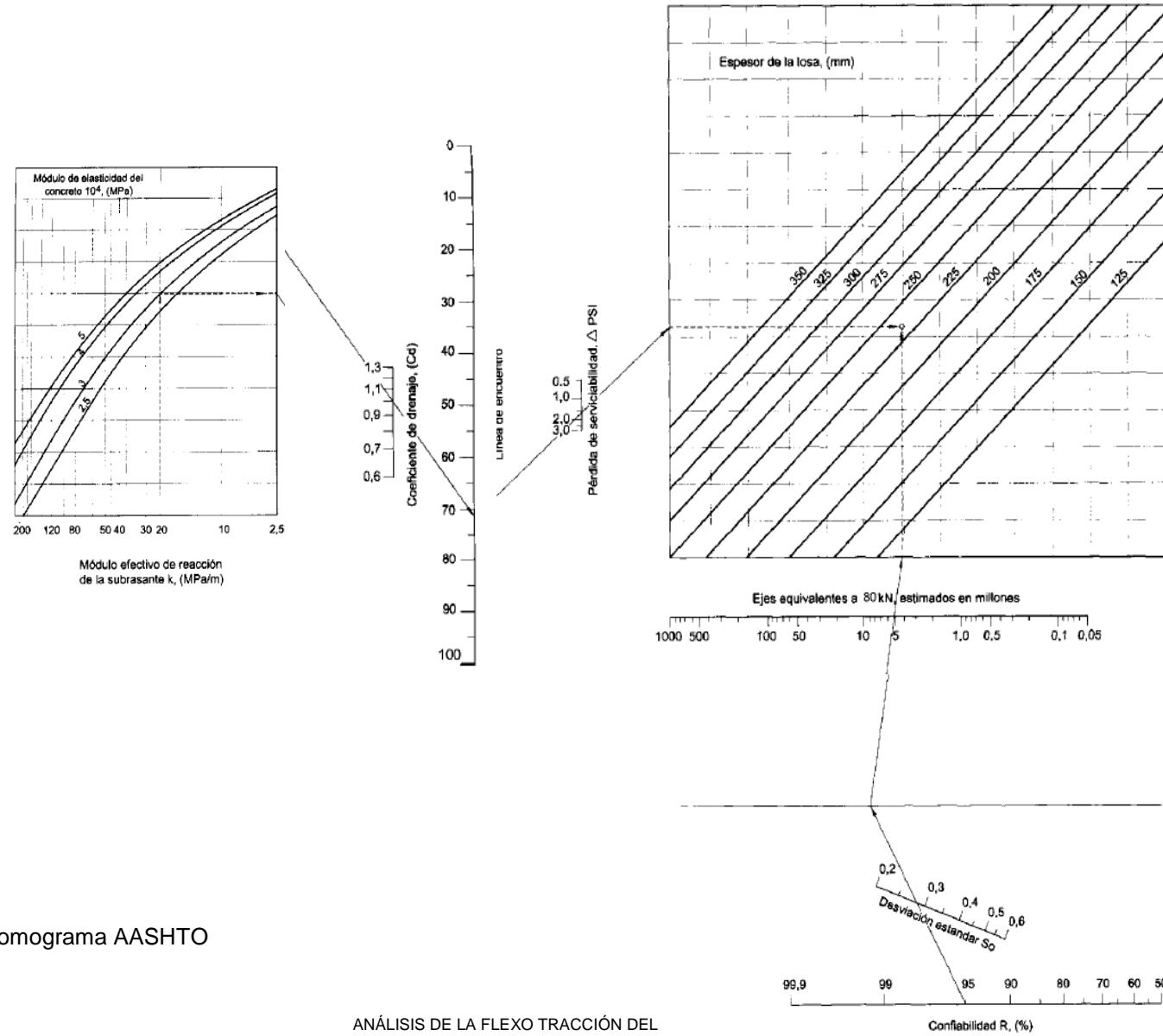


Fig 31. Nomograma AASHTO

Anexos

En este capítulo se cuenta con cinco anexos los cuales incluyen: en el primero se presentan en forma cronológica las fotografías correspondientes a la investigación realizada, el segundo muestra las especificaciones técnicas de los aditivos utilizados en cada una de las mezclas, el tercero se refiere a las características de los agregados utilizados en el concreto, el cuarto muestra una breve explicación del permeámetro fabricado para determinar la permeabilidad de los diseños de mezcla analizados y el quinto hace referencia a los rubros utilizados para realizar el análisis económico de cada alternativa de pavimento.

ANEXO 1



Fig 32. Cilindros utilizados para medir la permeabilidad del concreto



Fig 33. Trabajabilidad mezcla 1 (M1)



Fig 34. Revenimiento mezcla 1 (M1)



Fig 35. Acabado de vigas mezcla 1 (M1)



Fig 36. Falla de vigas por flexión a los catorce días de la mezcla 1 (M1)



Fig 37. Trabajabilidad mezcla 2 (M2)



Fig 38. Revenimiento mezcla 2 (M2)



Fig 39. Acabado de vigas mezcla 2 (M2)



Fig 40. Falla de vigas por flexión a los catorce días de la mezcla 2 (M2)



Fig 41. Trabajabilidad mezcla concretera (Mc)



Fig 42. Acabado de vigas mezcla concretera (Mc)



Fig 43. Falla de vigas a flexión a los catorce días de la mezcla concretera (MC)



Fig 44. Trabajabilidad de la mezcla óptima



Fig 45. Moldeo de vigas mezcla óptima



Fig 46. Moldeo de cilindros mezcla óptima



Fig 47. Determinación del peso unitario mezcla óptima



Fig 48. Acabado del cilindro mezcla óptima



Fig 49. Acabado de vigas mezcla óptima



Fig 50. Máquina utilizada para medir la resistencia a la flexión



Fig. 51. Falla de vigas por flexión de la mezcla óptima a los siete días



Fig 52. Máquina utilizada para medir la tensión indirecta



Fig 53. Falla de cilindros a los siete días (falla a tensión indirecta) de la mezcla óptima



Fig 54. Falla de vigas a los catorce días (falla a flexión) de la mezcla óptima



Fig 55. Falla de cilindros a los catorce días (falla a tensión indirecta) de la mezcla óptima



Fig 56. Falla de cilindros a los veintiocho (falla a tensión indirecta) de la mezcla óptima

ANEXO 2

Eucon MR-450

Reductor de agua, plastificante con leve retardo

DESCRIPCIÓN.

EUCON MR-450 es un aditivo líquido plastificante, con leve retardo para concretos y morteros. EUCON MR-450 es ideal para mantener una adecuada plasticidad de la mezcla y transportar el concreto en mixer por un tiempo prolongado. EUCON MR-450 está libre de Cloruros. EUCON MR-450 cumple con la norma ASTM C- 494 Tipo A y D. Densidad: 1.17 kg/cc. Color: Café (Los datos de resistencia a compresión pueden variar y dependen de las características, diseño y materiales del concreto).

USOS.

- EUCON MR-450 se usa para hacer entregas de concreto a sitios distantes de la planta.
- Concretos que requieran un tiempo de manejabilidad prolongado.
- Es indicado para colocación de concreto por sistema Tremie.
- Para colocación en elementos altamente armados.

BENEFICIOS.

En concreto fresco.

- Mejora la manejabilidad.
- Mejora el terminado.
- Reduce los requerimientos de agua y la segregación.
- Mejora los tiempos de fraguado.

En concreto endurecido.

- Incrementa todas las resistencias.
- Reduce la permeabilidad.
- Mejora el terminado y apariencia del concreto.
- Reduce el agrietamiento.
- Incrementa la durabilidad.

APLICACIÓN.

EUCON MR-450 debe ser adicionado preferiblemente en el agua de amasado o directamente al concreto con un grado de humedad (reventamiento de 3 cm.) que permita su adecuado desempeño. No se debe adicionar directamente al cemento o al mismo tiempo con otros aditivos.

EUCON MR-450 puede ser dosificado con equipo automático para garantizar uniformidad en el trabajo.

DOSIFICACION.

EUCON MR-450 se recomienda en dosis de 5 a 10 cc/kg. de cemento del diseño. Se recomienda realizar ensayos previos para definir la dosis adecuada.

TIEMPO DE FRAGUADO (A 20°C)

- Fraguado Inicial +/- 1 hora 45 minutos
- Fraguado Final +/- 2 horas 45 minutos
- El tiempo de fraguado puede variar de acuerdo con la dosis, diseño de mezcla, tipo de cemento y temperatura ambiente.

PRECAUCION.

- La dosis óptima se debe establecer haciendo ensayos previos en el sitio de trabajo.

- Adicione separado de otros aditivos.

EUCON R-450 debe almacenarse en su envase original herméticamente cerrado y bajo techo. Vida útil de almacenamiento: 8 meses.

EMPAQUE.

Barril de 200 litros

GARANTÍA.

Los resultados que se obtengan con este producto pueden variar a causa de las diferencias en la composición de los sustratos sobre los que se aplica o por efectos de variación en la temperatura y otros factores. Por ello se recomienda hacer pruebas representativas previas a su empleo a gran escala.

Toxement se esfuerza por mantener la alta calidad de los productos pero no asume responsabilidad alguna por los resultados que se obtengan como consecuencia de uso incorrecto o en condiciones que no estén bajo su control directo.



DESCRIPCIÓN.

PLASTOL 5000 es un aditivo reductor de agua de alto rango. Es un aditivo de la última generación a base de policarboxilatos, formulado específicamente para aumentar el tiempo de trabajabilidad en mezclas de concreto y obtener altas resistencias iniciales para concretos en sistemas prefabricados. Cumple con la norma ASTM C-494 Tipo A, como reductor de agua y Tipo F como reductor de agua de alto rango y la AASHTO M-194.

Apariencia: Líquido de densidad normal. Color: Café.
Contenido de cloruros: Ninguno.

USOS.

PLASTOL 5000 es especialmente recomendado cuando se requiere:

- Concreto de alta fluidez.
- Concretos prefabricados.
- Concretos de altas resistencias iniciales.
- Concretos con mayor tiempo de manejabilidad.
- Concretos pre esforzados.
- Concretos bombeados.
- Concretos autonivelantes.
- Colocación de concretos en clima cálido.
- Como reductor de agua, para incremento considerable de resistencias.
- Para disminuir la segregación y aumentar la cohesividad del concreto fluido.

BENEFICIOS.

- Permite colocar fácilmente concretos de alta resistencia y baja relación agua/cemento.
- Permite un desencofrado rápido y reduce el tiempo de curado.
- Incrementa las resistencias últimas a compresión.
- Incrementa la durabilidad.
- Mantiene o excede las resistencias originales aplicado en consistencia fluida.
- Reduce los tiempos de producción por una rápida colocación.
- Diseños de mezcla más económicos.
- Permite reducción de agua de amasado entre el 20% y el 40%.
- No tiene cloruros ni agentes corrosivos.

APLICACION.

PLASTOL 5000 puede ser adicionado con el agua inicial de diseño o cuando la mezcla de concreto se encuentra completamente húmeda. No adicionar el aditivo directamente al cemento seco.

Como fluidificante.

PLASTOL 5000 adicionado a una mezcla de consistencia normal, fluidifica el concreto haciéndolo óptimo para el bombeo.

Como reductor de agua.

PLASTOL 5000 permite obtener reducciones en el agua de amasado entre 20% y 40%, incrementando las resistencias mecánicas iniciales y finales. Reduce la permeabilidad del concreto y acelera las resistencias del diseño.

PLASTOL 5000 es compatible con todos los incorporadores de aire y la mayoría de aditivos. Se recomienda hacer pruebas previas para determinar el comportamiento de los aditivos cuando se usan juntos. Cuando se dosifica mas de un aditivo a la mezcla, éstos deben adicionarse separados.

DOSIFICACIÓN.

Cuando se usa como reductor de agua o agente de flujo la dosis recomendada de PLASTOL 5000 es de 2 ml. - 6 ml. por cada kg. de cemento. PLASTOL 5000 puede ser adicionado en la planta o en el sitio de trabajo. Cuando se adiciona en la planta, éste debe ser colocado con el agua de amasado. Cuando se adiciona en obra se debe permitir al concreto una mezcla durante 5 minutos a 30 r.p.m. antes de descargar. Las dosis de PLASTOL 5000 se ven afectadas por los materiales utilizados, condiciones de trabajo, temperatura, etc., se pueden requerir dosificaciones diferentes a las especificadas en esta ficha.

PRECAUCION.

- Determine la dosis adecuada mediante ensayos previos
- En concretos fluidos se debe ajustar el diseño para mantener la homogeneidad de la mezcla.
- La granulometría de los agregados debe ser continua.
- No debe adicionarse a la mezcla, ni al cemento puro.
- No usar aire comprimido para su agitación.
- Mezclas con PLASTOL 5000 pueden incluir aire hasta en un 5%.

PLASTOL 5000 debe almacenarse a temperaturas por encima de 0°C. PLASTOL 5000 no es un material peligroso pero se recomienda emplear elementos de seguridad para su manipulación.



Plastol 5000

Aditivo reductor de agua de alto poder

Vida útil de almacenamiento: 2 años

EMPAQUE.

Cubeta de 18.9 litros y Barril de 200 litros.

GARANTÍA.

Los resultados que se obtengan con este producto pueden variar a causa de las diferencias en la composición de los sustratos sobre los que se aplica o por efectos de variación en la temperatura y otros factores. Por ello se recomienda hacer pruebas representativas previas a su empleo a gran escala. Toxement se esfuerza por mantener la alta calidad de los productos pero no asume responsabilidad alguna por los resultados que se obtengan como consecuencia de uso incorrecto o en condiciones que no estén bajo su control directo.



VISCTROL

ADITIVO MODIFICADOR DE LA VISCOSIDAD

DESCRIPCIÓN

Es un aditivo líquido listo para usar, diseñado para modificar la viscosidad de concreto auto compactado. Al emplear **VISCTROL** en unión con aditivos superplastificantes se obtienen diámetros de extensibilidad de 18"-28" (460-710 mm) sin segregación o disminución de la resistencia a la compresión.

APLICACIONES PRINCIPALES

- Modificador de viscosidad en concreto auto consolidable.

BENEFICIOS

- Reduce de manera importante la segregación y sangrado
- Dispersa uniformemente los agregados dentro de la mezcla.
- Elimina la necesidad de vibración.
- Mejora el revenimiento.
- Elimina segregación durante el bombeo.
- De fácil dosificación empleando los equipos convencionales de medición de flujo en aditivos.

APARIENCIA

Es un aditivo de viscosidad media, líquido de color café oscuro, no cambia el color del concreto.

Densidad: 1.22 Kg/L

ENVASE

- Cubetas de 19 L.
- Tambores de 200 L.

INFORMACIÓN TÉCNICA

Proporciones de Mezcla

Contacte a su representante de Euclid México para una mejor asesoría.

Secuencia de adición

La secuencia de adición en un concreto auto consolidable es crítica para optimizar el desempeño de cada aditivo empleado. Datos de laboratorio han mostrado que el siguiente orden de adición permite obtener un mejor resultado:

- Agente incorporador de aire (opcional).
- Reductores de agua (alto rango).
- Acelerante o retardante (opcional).
- **VISCTROL.**

DOSIFICACIÓN

La dosificación de **VISCTROL** puede variar ampliamente dependiendo de la relación agua/cemento y de la granulometría de los materiales usados. Consulte su representante de Euclid México para fijar una apropiada dosificación.

La dosis típica es de (39 -230 mL/m³) para control de la segregación y del sangrado. Variables tales como la relación agua/cemento, granulometría de arenas y diseño de mezcla juegan un papel muy importante. Se requieren mezclas de ensayo para optimizar la dosis requerida. Altas relaciones agua/cemento y altas cantidades de finos en un concreto auto compactado requieren altas dosis de **VISCTROL**, alrededor de 775 mL/m³.

PRECAUCIONES/RESTRICCIONES

- Agite el **VISCTROL** antes de usar.
- No permita que el material se congele.
- Agentes incorporadores de aire se deben adicionar primero.
- El superplastificante se debe usar para incrementar el revenimiento antes de la adición del **VISCTROL**.
- Leves retardos en el fraguado pueden ocurrir con el uso de este producto cuando la dosis es superior a 576 mL/m³
- Los cambios en los tipos de cemento, agregados y la temperatura modifican el desempeño de los aditivos en la mezcla de concreto variando resultados en el concreto fresco o endurecido. En coordinación con el Asesor Técnico Comercial Euclid-México de la región, es fundamental efectuar pruebas de desempeño de los aditivos bajo las condiciones propias de cada obra. De ésta manera, se podrá definir la solución que ofrezca un mejor costo-beneficio a nuestros clientes.
- Agite el producto antes de usar.
- El producto debe almacenarse en su envase original, bien cerrado, bajo techo, en un lugar fresco y seco.

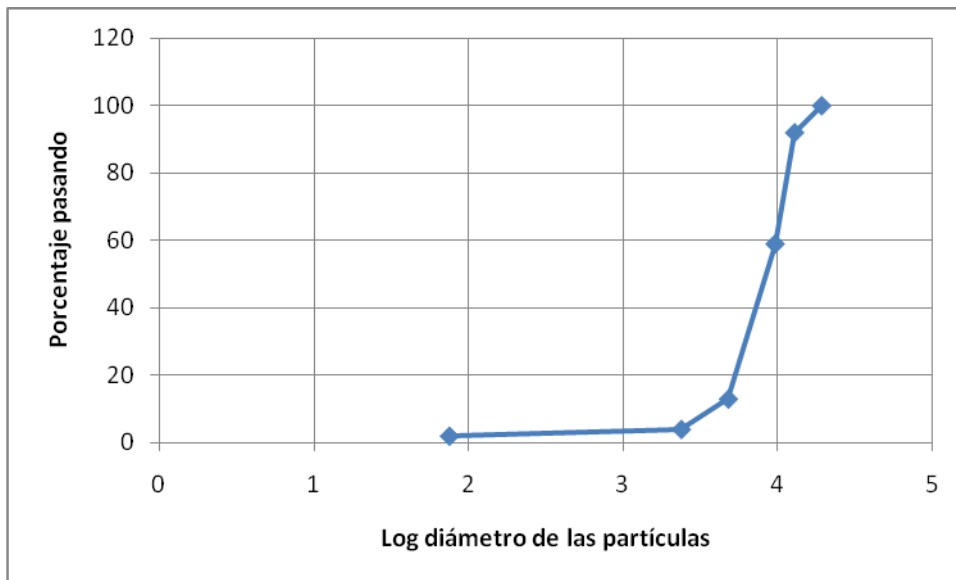
Vida útil: 12 meses en el envase original no abierto.

ANEXO 3

Características de los materiales utilizados

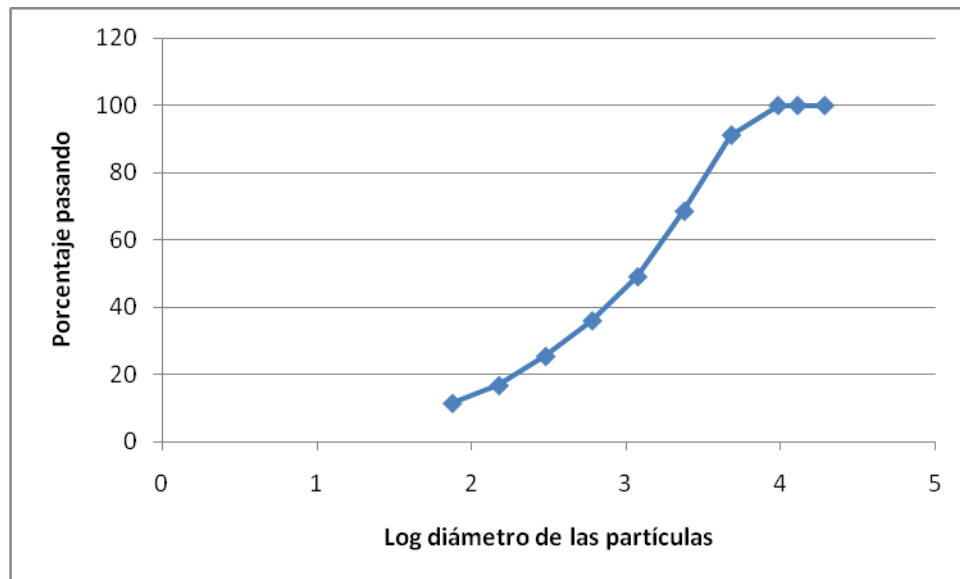
Grava de río		
Propiedades físicas		
Tamaño máximo de agregado	16	mm
Gravedad específica	2,65	
Porcentaje de absorción	1,9	
Módulo de finura	6,14	
Porcentaje de humedad	3,2	
Peso volumétrico	1490	kg/cm ³

Malla (mm)	Malla (pulg)	Peso retenido (g)	Retenido individual (%)	Retenido acumulado (%)	Total pasando (%)	Especificación	
						Límite inferior (%)	Límite superior (%)
19	3/4"	0	0	0	100	100	100
12,7	1/2"	125	8,0	8,0	92	90	100
9,5	3/8"	514	33,0	41,0	59,0	40	70
4,75	4	717	46,0	87,0	13,0	0	15
2,36	8	140	9,0	96,0	4,0	0	5
0,075	200	32	2,0	98,0	2,0	0	3
Charola		31	2,0	100,0	0,0	0	0
Total		1559		MF	5,2		



Arena industrial		
Propiedades físicas		
Tamaño máximo de agregado	6	mm
Gravedad específica	2,57	
Porcentaje de absorción	4,1	
Módulo de finura	3,25	
Porcentaje de humedad	6,4	
Peso volumétrico	1490	kg/cm ³

Malla (mm)	Malla (pulg)	Peso retenido (g)	Retenido individual (%)	Retenido acumulado (%)	Total pasando (%)	Especificación	
						Límite inferior (%)	Límite superior (%)
19	3/4"	0	0	0	100	100	100
12,7	1/2"	0	0	0	100	100	100
9,5	3/8"	0	0	0	100	100	100
4,75	4	109	8,8	8,8	91,2	80	100
2,36	8	282	22,7	31,5	68,5	60	100
1,18	16	243	19,5	51,0	49,0	40	85
0,60	30	163	13,1	64,1	35,9	20	60
0,30	50	132	10,6	74,7	25,3	10	45
0,15	100	108	8,7	83,4	16,6	0	30
0,075	200	65	5,2	88,7	11,3	0	18
Charola	Charola	141	11,3	100,0	0,0	0	0
Total		1243		MF	3,14		



ANEXO 4

Permeámetro de carga constante

Para la fabricación de este permeámetro se tomó como referencia el mismo estudio realizado por el Ing. Roberto Fernández. Además, de algunas sugerencias y citas bibliográficas que el investigador sugiere en este documento.

Para medir la permeabilidad que pasa a través de un medio poroso con el modelo de carga constante, se hace uso de la siguiente fórmula:

$$k = bV$$

Donde:

V=volumen que pasa por el material en un tiempo determinado; y b corresponde a la siguiente fórmula:

$$b = \frac{L}{\Delta h t A_M}$$

Donde:

L= longitud del cilindro

Δh = diferencia de cargas al inicio y final de la prueba (h_1-h_2)

T= tiempo que tarda el agua para pasar por el material

A_M = área del material

Las variables anteriores se muestran en la Figura No.57.

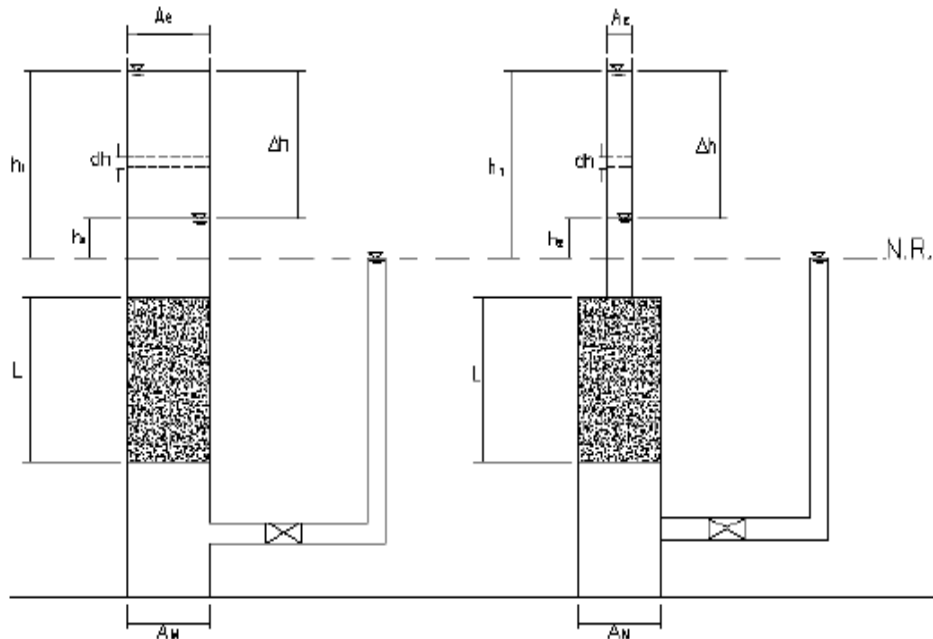


Fig. 57 Esquema del permeámetro utilizado

Fuente: Proyecto de graduación del Ing. Roberto Fernández "Concreto Permeable: diseño de mezclas para evaluar su resistencia a la compresión uniaxial y su permeabilidad"

La constante b se utiliza para facilitar el cálculo, ésta indica que todo el permeámetro permanece constante para todas las pruebas realizadas menos para el volumen recuperado de la misma, el cual se debe medir para cada prueba realizada.

El permeámetro utilizado en esta investigación tomó como base el utilizado en el estudio hecho por el Ing. Roberto Fernández, de la misma manera como este investigador lo determinó en su informe, este modelo no presenta dimensiones estándar, pues lo que interesa es el modelo matemático que se utilice, por tanto es posible utilizar cualquier permeámetro que cumpla con la función que se requiere en esta investigación no importando sus dimensiones.

El aparato fabricado es el que se ve en la Figura No. 58 y posee las siguientes partes:

1. Hule protector: este hule tiene como función introducir el cilindro de concreto, además es donde se carga la columna de agua que pasara a través del material. Mide 500 mm de altura.
2. Reducción de PVC de cuatro pulgadas: une el hule con el resto del equipo. Tiene como diámetro interior 105 mm.
3. Tee de PVC: permite pasar de un diámetro de 4 pulgadas a un diámetro de 1 pulgada.
4. Tapón de PVC: impide el paso de agua
5. Válvula de mariposa de PVC de una pulgada: controla el paso del agua
6. Tubería y codo de 90° de PVC de una pulgada
7. Base para estabilizar el equipo.



Fig 58 Permeámetro de carga constante

Como se dijo anteriormente estas dimensiones no son estándar, pero las dimensiones que se deben medir con precisión para poder utilizar el modelo matemático propuesto son las siguientes:

- ✓ Diferencia de elevación entre la parte superior del hule protector y la parte de arriba de la tubería de una pulgada por donde sale el agua (Δh de la fórmula).
- ✓ Dimensión de entrada y de salida del material A_E y A_M a través del cual se hace pasar el agua.
- ✓ Longitud L de la muestra.

Además, se debe medir el volumen que sale por el tubo de una pulgada y el tiempo que tarda en hacerlo. En este caso se utilizó un valor constante de 30 segundos.

ANEXO 5

TRANSPORTE Y COLOCACIÓN DE MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE					
					RESUMEN
Mezcla				¢	\$
Tonelada de mezcla asfáltica				30.510,01	54,48
Acarreo de mezcla				¢	\$
Kilometraje (km al centroide)	20	Costo ton/km	90,00	1.800,00	3,21
Colocación de mezcla asfáltica					
Gasto de emulsion					
Espesor promedio a intervenir	10 cm				
Promedio a colocar diario	300 ton				
Punto de riego a emplear	0,6	lt/m2			
Cantidad de litros a emplear por tonelada			2,727		
Costo de emulsion calent,trasieg, manip.			150	¢ 409,09	\$ 0,73
Maquinaria	Costo horario	Monto			
1 Finisher	40.000,00	¢ 40.000,00			
1 Compactadora	20.000,00	¢ 20.000,00			
1 Llanta de hule	20.000,00	¢ 20.000,00			
0,5 Distribuidor de asfalto	10.000,00	¢ 5.000,00			
1 Pick Up	1.000,00	¢ 1.000,00			
0,5 Barredora	8.000,00	¢ 4.000,00			
	Sub total	¢ 90.000,00			
Personal					
2 Rastrilleros	2.000,00	¢ 4.000,00			
2 Paleros	1.500,00	¢ 3.000,00			
1 Encargado	4.000,00	¢ 4.000,00			
2 Banderilleros	1.500,00	¢ 3.000,00			
	Sub total	¢ 14.000,00			
Costo colocación por tonelada		¢ 3.466,67		¢ 3.466,67	\$ 6,19
Costo por colocación y transporte				¢ 5.675,76	\$ 10,14
				¢	\$
		SUB TOTAL		36.185,77	64,62
A, U, I sobre colocación y transporte				¢	\$
	ADMINISTRACION	10,00%		¢ 3.618,58	\$ 6,46
	UTILIDAD	10,00%		¢ 3.618,58	\$ 6,46

		IMPREVISTOS	3,00%	¢ 1.085,57	\$ 1,94	
			TOTAL	¢ 43.422,92	\$ 79,48	\$ 79,48
	Participación porcentual del asfalto				26%	
					44.508,50	
				13%		
	Mezcla asfáltica colocada con impuesto de ventas				\$ 89,81	

Base Granular							
			Precio de referencia (\$/m3)				
Materiales		Unidad	C. Minas	Guápiles			
	Piedra base	m3	11,61	8,93			
	Lastre	m3	9,91	6,25			
	Costo acarreo	m3/km	0,45				
	Distancia promedio al proyecto	km	20	50			
Acarreo	Costo acarreo		8,93	22,32			
	Costo total de la base		\$ 20,54	\$ 31,25			
	Costo total del lastre		\$ 18,84	\$ 28,57			
Equipo							
	Descripcion	Cantidad	Rendimiento total	Unid. Medida rendimiento	Cantidad de Horas	Costo por hora	Monto
	Cargador Cat 950	1	300	M3	10,00	¢25.000,00	¢250.000,00
	Motoniveladora Cat 140	1			10,00	¢30.000,00	¢300.000,00
	Compactador vibratorio	1			10,00	¢20.000,00	¢200.000,00
	Compactador llanta de hule	1			10,00	¢20.000,00	¢200.000,00
	Tanque de agua	1			10,00	¢10.000,00	¢100.000,00
						Subtotal	¢1.050.000,00

							00
Personal	Descripcion		Rendimiento total	Unid. medida rendimiento	Cantidad de Horas	Costo por hora	Monto
	Ayudantes motoniveladora	2	300		10,00	¢1.140,00	¢22.800,00
	Ayudante de tanque de agua	1			10,00	¢1.140,00	¢11.400,00
	Cuadrilla de topografia	1			10,00	¢10.000,0 0	¢100.000,00
						Subtotal	¢134.200,00
	Costo total de la actividad						¢1.184.200, 00
	Costo por m3		¢3.947,33				
	Costo por m3		\$ 7,05				
Total	Materiales		C. Minas	Guápiles			
	Proyecto		GAM				
	Proyecto (distancia desde)		13	50			
	Base		\$ 20,54	\$ 31,25			
	Lastre		\$ 18,84	\$ 28,57			
	Equipo y personal		\$ 7,05	\$ 7,05			
	Base granular		\$ 27,58	\$ 38,30			
	Base lastre		\$ 25,89	\$ 35,62			

	Sub base						
			Precio de referencia (\$/m3)				
Materiales		Unidad	C. Minas	Guápiles			
	Material subbase	m3	6,16	2,68			
	Costo acarreo	m3/km	0,18				
	Distancia promedio al proyecto	km	13	50			
Acarreo	Costo acarreo		2,32	8,93			
	Costo total de la sub base		\$ 8,48	\$ 11,61			
Equipo							
	Descripcion	Cantidad	Rendimiento	Unid. Medida	Cantidad de	Costo por	Monto
			total	rendimiento	Horas	hora	
	Cargador Cat 950	1	750	M3	10,00	¢18.000,00	¢180.000,00
	Motoniveladora Cat 140	1			10,00	¢16.000,00	¢160.000,00
	Compactador vibratorio	1			10,00	¢15.000,00	¢150.000,00
	Compactador llanta de hule	1			10,00	¢12.000,00	¢120.000,00
	Tanque de agua	1			10,00	¢8.000,00	¢80.000,00
						Subtotal	¢690.000,00
Personal	Descripcion		Rendimiento	Unid. medida	Cantidad de	Costo por	Monto
			total	rendimiento	Horas	hora	
	Ayudantes motoniveladora	2	750		10,00	¢684,00	¢13.680,00
	Ayudante de tanque de agua	1			10,00	¢684,00	¢6.840,00
	Cuadrilla de topografia	1			10,00	¢5.000,00	¢50.000,00
						Subtotal	¢70.520,00

	Costo total de la actividad						€760.520,00
	Costo por m3		€1.014,03				
	Costo por m3		\$ 1,81				
Total	Materiales		C. Minas	Guápiles			
	Proyecto (distancia desde)		13	50			
	Sub base		\$ 8,48	\$ 11,61			
	Equipo y personal		\$ 1,81	\$ 1,81			
	Sub base de lastre		\$ 10,29	\$ 13,42			

Base Estabilizada							
			Precio de referencia (\$/m3)				
Materiales		Unidad	C. Minas	Guápiles			
	Piedra base	m3	11,61	8,93			
	Lastre	m3	9,91	6,25			
	Costo acarreo	m3/km	0,45				
	Distancia promedio al proyecto	km	13	50			
	Cemento		\$/saco	\$/ton			
	GAM		8,73	174,60			
	Caldera		9,03	180,60			
	Quepos		9,33	186,60			
	Dosificación	kg/m3	125,00	100,00			
Acarreo	Costo acarreo		5,80	22,32			
	Costo total de la base	GAM	\$ 39,24	\$ 48,71			
	Costo total del lastre	GAM	\$ 37,54	\$ 46,03			
	Costo de la base	Caldera	39,99				
		Quepos	40,74				
Equipo							
	Descripcion	Cantidad	Rendimiento total	Unid. Medida rendimiento	Cantidad de Horas	Costo por hora	Monto
	Cargador Cat 950	1	500	M3	10,00	¢25.000,00	¢250.000,00
	Motoniveladora Cat 140	1			10,00	¢30.000,00	¢300.000,00
	Compactador vibratorio	1			10,00	¢20.000,00	¢200.000,00

	Compactador llanta de hule	1			10,00	¢20.000,00	¢200.000,00
	Tanque de agua	1			10,00	¢10.000,00	¢100.000,00
						Subtotal	¢1.050.000,00
Personal	Descripcion		Rendimiento	Unid. medida	Cantidad de	Costo por	Monto
			total	rendimiento	Horas	hora	
	Ayudantes motoniveladora	2	500		10,00	¢1.140,00	¢22.800,00
	Ayudante de tanque de agua	1			10,00	¢1.140,00	¢11.400,00
	Cuadrilla de topografia	1			10,00	¢10.000,00	¢100.000,00
						Subtotal	¢134.200,00
	Costo total de la actividad						¢1.184.200,00
	Costo por m3		¢2.368,40				
	Costo por m3		\$ 4,23				
Total	Materiales		C. Minas	Guápiles			
	Proyecto		GAM				
	Proyecto (distancia desde)		13	50			
	Base		\$ 39,24	\$ 48,71			
	Lastre		\$ 37,54	\$ 46,03			
	Equipo y personal		\$ 4,23	\$ 4,23			
	Base estabilizada con mat.granular		\$ 43,47	\$ 52,94			

Pavimento rígido

Item	Cantidad	Unidad	Descripción	Precio unit	Total	\$/m3
501(2)	2.250,00	m3	Pavimento de hormigón sin refuerzo incluyendo sello de juntas y canastas para dovelas	181,77	408.986,79	181,77
602C(1) A	13.162,50	kg	Varilla para refuerzo corrugada para pasadores de 12mm de diámetro	1,00	13.162,50	\$ 1,06
602C(1)B		kg	varilla para refuerzo lisa para dovelas de 25.4mm de diámetro	1,00	-	\$ -
					costo boca planta por m3	\$ 182,83
					costo boca planta por m2	\$ 36,57
Acarreo del concreto	12	km			costo por m3 acarreo	\$ 2,40
			Costo total por m3			\$ 185,23
			Costo total por m2			\$ 37,05

Referencias

- American Standards for Testing and Materials. Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete C-143
- American Standards for Testing and Materials. Método para determinar la humedad de los agregados. C566-97.
- American Standards for Testing and Materials. Método para determinar la flexión en elementos de concreto C-78.
- American Standards for Testing and Materials. Standard Test Method for Bulk Density (unit Weight) and Voids C-29
- American Standards for Testing and Materials. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens C-496
- An Engineer's Guide to: Building Green with Concrete <http://www.cement.com>
- Bentz, D. 2007. Virtual Pervious Concrete: Microstructure, Percolation and Permeability. **ACI MATERIALS JOURNAL**, Estados Unidos.1:11 p.
- Broviak, P. 2005. Pervious Pavement naturally absorbent. **PublicWorks**. USA. No 34:39.
- Concreto Permeable <http://www.nrmca.org>
<http://www.astm.org>
- Coronado, J. 2002. **MANUAL CENTROAMERICANO PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS**. Guatemala: Secretaría de Integración Económica Centroamericana. 288 p
- Crouch, L. et al. 2003. Measuring the effective air void content of Portland Cement Pervious Pavements. **CEMENT, CONCRETE AND AGREGATES**. 25(1). USA. No. 1:5p.
- Farny, J. 2004. Pervious Concrete Mixtures and Properites. **Concrete Technology Today**, 25(3): 3-5. Estados Unidos. No 2:8 p.
- Fernández R. 2008. **CONCRETO PERMEABLE: DISEÑO DE MEZCLAS PARA EVALUAR SU RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL Y SU PERMEABILIDAD**. Informe proyecto final de graduación, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica. 100p.
- Gomezjurado, J. et al. 2000. **TECNOLOGÍA Y PROPIEDADES**. Colombia: Asociación Colombiana De Productores de Concreto, 215p.
- Higgins, S. et al. Pervious Concrete as a Flooring Material for Horse Handling Areas. **Universidad de Kentucky. Escuela de Agricultura**.
- <http://www.renteco.com>
- <http://www.gcpa.org>
- <http://www.epa.gov>
- <http://www.rempelbros.com>
- <http://www.secpa.com>
- <http://www.rinker.com>
- <http://www4.nationalacademies.org>

- <http://www.vinnabagoinc.com>
- <http://www.utea.on.ca>
- <http://www.concrete.org>
- <http://www.ehs.berkeley.edu>
- <http://www.azcentral.com>
- <http://concreteresources.net>
- <http://www.irma.com>
- <http://www.concretoparking.org>
- <http://euclidchemical.com>
- <http://www.fcpa.org>
- <http://www.palacioscastillo.com/docs/UTTESTRE.PDF>
- Huffman, D. 2005. Understanding Pervious Concrete. **THE CONSTRUCTION SPECIFIER**. No. 42:49
- Lamb, C. 2003 marzo 31. Pervious Concrete slowly making eco-friendly inroads. **SACRAMENTO BUSINESS JOURNAL**, Sacramento, Estados Unidos.6p
- Lemming, M. et al. 2007. **HIDROLOGIC DESIGN OF PERVIOUS CONCRETE**. USA: Portland Cement Association, 72 p.
- Mulligan, A. 2003. **ATTAINABLE COMPRESSIVE STRENGTH OF PERVIOUS CONCRETE PAVING SYSTEMS**. Tesis Final de graduación. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Florida. 145p.
- Muñoz, F. 1998. **COMPONENTES PRINCIPALES DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO**. Costa Rica: Editorial de la Universidad de Costa Rica, 144p.
- Neithalath, N. et al. 2003. Pervious Concrete Pavements to Reduce Tire-Pavement Interaction Noise. **UNIVERSIDAD PURDUE, INDIANA**. Escuela de Ingeniería Civil. 33p.
- NRMCA.Cip-38 Concreto Permeable <http://www.nrmca.org>
- Pervious Concrete <http://chargerconcrete.com>
- Pervious Pavements for a more Livable Environment <http://www.CoolCommunities.org>
- Pervious Concrete <http://www.georgiaplanning.com>
- Pervious Concrete: Pavement that drinks <http://www.msconcrete.com>
- Pervious Paving <http://www.pca.com>
- Pervious Concrete: When it rains...it drains <http://www.nrmca.org>
- Pervious Concrete: no pond needed http://www.zwire.com/site/news.cfm?newsid=17069938&BRD=2081&PAG=461&dept_i
- Sánchez De Guzmán, D. 2001. **TECNOLOGÍA DEL CONCRETO Y EL MORTERO**. Colombia: Cargraphics S.A, 349p.
- Stormwater Strategies <http://nrdc.org/water/pollution/storm/execsum.asp>
- Tennis, Paul. Et al. 2004. **PERVIOUS CONCRETE PAVEMENTS**. USA: Portland Cement Association, 36p.
- Videla, C. et al. 2007. Desarrollo de mezclas de hormigón poroso para pavimentos urbanos permeables. **MATERIALES DE CONSTRUCCION** 57 (287).Madrid, España. 23:36p.
- Wanielista, M. et al. Performance of Pervious Concrete Pavements. **Universidad de Florida. Stormwater Management Academy**.

