

EFECTO DELAS FIBRAS PLASTICAS EN LA FLEXION DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS DRENANTES

EFFECT OF PLASTIC FIBERS ON FLEXION OF DRAINABLE PAVEMENT STRUCTURES

Por / By *Fredy Reyes, Andrés Torres, Grupo CECATA*

Resumen

El agua siempre ha convivido con el concreto, bien sea en su proceso de fabricación o en el desarrollo de sus funciones. Uno de los fenómenos que produce precisamente el agua, es el motivo de éste estudio. Al caer sobre el pavimento rígido y no ser drenada, produce una película de agua la cual genera un fenómeno de hidroplaneo que termina afectando la maniobrabilidad del vehículo. A lo largo del estudio se busca principalmente diseñar un pavimento rígido con una estructura permeable con adiciones de tiras de plástico, basándose en diferentes investigaciones relacionadas en el tema, las cuales se han desarrollado en varios países y apoyándose en las diferentes pruebas de laboratorio que se efectúan durante el estudio, tales como son la compresión simple, la flexión, la tracción indirecta y el modulo de elasticidad. Con el fin de encontrar el diseño deseado lo primero que se hizo fue adecuar cuatro diseños de mezcla a un posible diseño permeable, cuyas características deben asemejarse a las descritas en las experiencias obtenidas en investigaciones anteriores. Por lo tanto a cada uno de los diseños se les efectuó dos pruebas principalmente, la de compresión simple y la de permeabilidad, y a partir de los resultados obtenidos se seleccionó el de mejor comportamiento. Una vez determinado el diseño optimo se dio comienzo a las diferentes adiciones de tiras de plástico (de 2mm x 10mm y de 4mm x 20mm) en diferentes porcentajes (0.025%, 0.05%, 0.075%, 0.100%, 0.200%, 0.300%, 0.400% y 0.500%) y se efectuaron los ensayos de flexión, tracción indirecta y modulo de elasticidad, para que a partir de los resultados obtenidos se pueda determinar el tipo de tira mas adecuada y el porcentaje optimo para obtener un diseño para un pavimento rígido netamente permeable y que este a la par con los demás pavimentos en cuanto a su comportamiento ante los diferentes esfuerzos. De los diferentes resultados que se obtuvieron en los ensayos efectuados a los cuatro diseños preliminares se pudo determinar que para que un pavimento rígido se comporte como un pavimento permeable debe contar con una relación agua/cemento de 0.30 a 0.35, con unos agregados gruesos sin variaciones notorias en su tamaño, con un porcentaje de finos menor o igual al 15% del peso total de la mezcla. De los resultados obtenidos en los ensayos realizados sobre el diseño optimo con las diferentes adiciones de plástico se determino que la tira mas adecuado y el porcentaje optimo corresponde a la tira uno (4 mm x 20 mm) adicionada en 0.10 %, ya que se obtiene un incremento con respecto a los resultados obtenidos en el diseño optimo sin adición del 3.4% en la compresión, del 37.80 % en la flexión, del 1.00% en la tracción indirecta y del 13.70% en el módulo de elasticidad. De igual manera se observa tan solo una disminución del 15.00% en cuanto a la flexión obtenida en un concreto convencional de $f'c=420 \text{ kg/cm}^2$ con $K=2.65$, a pesar de que el concreto poroso tiene tan solo un $f'c=240 \text{ kg/cm}^2$. Por lo tanto la principal conclusión que se puede obtener del estudio es que la adición de tiras de desechos plásticos en un porcentaje de 0.10% con dimensiones de 4 mm x 20 mm permite que el concreto poroso mejore sus características en cuanto al comportamiento ante los esfuerzos, principalmente al de flexión.

Palabras clave: Desechos plásticos, concreto poroso, resistencia, diseño, módulos.

Abstract

Water has always coexisted with concrete, either during the manufacturing process or when in use. One of the phenomena that is produced by the water has prompted this study. Under wet weather conditions, water cannot be adequately drained on a rigid pavement and it produces a film that creates an aquaplaning effect, seriously affecting the maneuverability of vehicles. Throughout the study, attempts are made to design a permeable rigid pavement by adding plastic wastes, based on the different investigations related to the topic, conducted in several countries and relying on different laboratory tests performed during the study, such as, for instance, simple compression, flexion, indirect traction and modulus of elasticity. In order to come up with the desired design, it was first necessary to adapt four mixture designs to a possible permeable design whose characteristics should resemble each of those described in the experiences obtained in previous investigations. Therefore, two tests were performed mainly for each of the designs, namely, simple compression and permeability and, on the basis of the results obtained, the one with the best performance was selected. After determining the optimum design, plastic strips having different sizes (2 mm by 10 mm and 4 mm by 20 mm) in different percentages (0.025%, 0.05%, 0.075%, 0.100%, 0.200%, 0.300%, 0.400% and 0.500%) were added and flexion, indirect traction and modulus of elasticity tests were performed, in order to obtain both the most suitable type of strip and the best



percentage permitting a design for a fully permeable rigid pavement. Next, it was then compared to other pavements in what respects its behavior in the face of the different efforts. The different results obtained with the actual tests performed on the four preliminary designs, made it possible to determine that if a rigid pavement is to perform as a permeable pavement, it must contain water to cement in a ratio in the order of 0.30 to 0.35, and some coarse crushed stones having no noticeable variations in size, in addition to a percentage of finer material lower than or equal to 15% of the total weight of the mixture. The results obtained with the tests performed on the best design by adding plastic strips of different sizes, made it possible to determine that the most suitable strip and the best percentage corresponds to the first strip (4 mm by 20 mm) added in 0.10%, as an increase is obtained for the best design with no plastic strips added of 3.4% for compression, 37.80% for flexion, 1.00% for indirect traction and 13.70% for modulus of elasticity. In like manner, a decrease of only 15.00% in flexion is obtained with a conventional concrete of $f'c=420$ kg/cm² with $K=2.65$, even though porous concrete shows only $f'c=240$ kg/cm². Consequently, the main conclusion to be drawn from the study is that by adding waste plastic strips in a percentage of 0.10% with dimensions of 4 mm by 20 mm allows porous concrete to optimize its characteristics as to its behavior in the face of efforts, mainly flexion.

Keywords: Plastic wastes, porous concrete, resistance, design, modulus of elasticity.

1. INTRODUCCIÓN

El agua siempre ha convivido con el concreto, bien sea en su proceso de fabricación o en el desarrollo de sus funciones. Uno de los fenómenos que produce precisamente el agua, es el motivo de éste estudio. Al caer sobre el pavimento rígido y no ser drenada, produce una película de agua la cual genera un fenómeno de hidropneumático que termina afectando la maniobrabilidad del vehículo.

Al anterior problema se puede agregar el factor deteriorante que significa el agua en forma progresiva sobre la estructura del pavimento, lo cual implica el uso de costosos sistemas de drenajes para la disposición final del agua. Sin embargo, la sola inclusión de drenajes no constituye una solución definitiva al efecto del agua, porque si estos no funcionan, la problemática es más grave, ya que ante lluvias intensas el sistema puede fallar y las consecuencias sobre el deterioro de la vía serían peores.

Planteamos de esta manera como solución a la problemática, no la eliminación sistemática del agua, sino impedir la acumulación en la rodadura llevándolo al respectivo sistema de alcantarillado a través de una o más capas del pavimento.

Para tal efecto se propuso el diseño de pavimentos rígidos, donde el concreto es poroso y por tanto permeable, a través de la eliminación o el poco uso de los finos en su mezcla.

Esta solución contempla el riesgo que significa cambiar la mezcla del concreto y por ello ante la disminución de su resistencia, se propuso un refuerzo compensatorio con tiras plásticas provenientes de desechos domésticos.

Este artículo contiene el desarrollo de las diferentes investigaciones que se han realizado en temas relacionados con pavimentos rígidos drenantes. Se muestra el proceso experimental que se realizó exponiendo la evolución de los diseños, los ensayos efectuados sobre las mezclas y finalmente, un análisis comparativo de los resultados obtenidos.

2. PAVIMENTO EN CONCRETO DRENANTE

2.1 Definición

Este tipo de pavimento será el punto de análisis debido a ser una alternativa viable tanto técnica como económicamente dentro de los pavimentos rígidos usados en Colombia. Las losas de concreto hidráulico constituyen el elemento estructural más **importante en los** pavimentos rígidos y tiene como función proporcionar al tránsito una superficie estable, impermeable, así como recibir las cargas impuestas por los vehículos, absorber la mayor parte de los esfuerzos y transmitirlos a la sub-base o a la subrasante en magnitudes acordes con su resistencia (Badillo y Rodríguez)

En este tipo de pavimento se utiliza un concreto hidráulico común, fabricado sin arena (finos), la cual se puede sustituir por aditivos o adiciones de tiras de plástico, que aumentan su resistencia al fraguar; 100% permeable, desarrollado para usarlo en pavimentos donde se requiera que el agua lluvia no quede sobre la superficie, evitando fenómenos de Hidropneumático (Karawa y Suda, 1996).

La mezcla está constituida por cemento, agua y agregado grueso cuyo tamaño máximo está entre 1.0 y 2.0 centímetros (Sánchez, 2000). De esta manera, los vacíos que deberían ser llenados por la arena quedan uniformemente distribuidos aligerando el material. Las características finales de la mezcla corresponden a un producto muy maleable, fácil de usar y colocar, de muy alta resistencia a la compresión y muy buena resistencia a la flexión.

Su peso unitario es sensiblemente más bajo (2/3) que el de un concreto convencional hecho con el mismo agregado (Qvist y Kira, 1996). La pasta de cemento, no debe constituir un relleno, sino la liga entre los puntos de contacto de las partículas de agregado. Su resistencia es media y la contracción por secado es baja. Su aspecto es poroso, pero logra una superficie muy plana y muy cómoda para transitar en ella (American Concrete Pavement Association, 1998).



Para obtener tal material, se puede imaginar un concreto perfectamente compactado al cual se le quitaría una gran parte del mortero que asegura el recubrimiento de los agregados gruesos.

La construcción de estos pavimentos se puede hacer por medios manuales o mecánicos. Manualmente se usan trompos y se aplica el material como un pavimento de concreto.

También se puede usar concreto premezclado, el cual se puede aplicar en forma manual o por medio de una maquina Finisher para asfalto o una formaleta deslizante.

2.2 Diseño

Los objetivos de la dosificación son obtener un material que posea las siguientes características:

- Una granulometría apropiada que permita obtener una dimensión importante de los poros, facilitando la buena circulación de agua dentro del material. Esta granulometría se debe formar con la dimensión de los agregados más gruesos del concreto y la ausencia parcial de agregados medianos y finos (Karawa y Suda, 1996).
- Una gran porosidad que permita el paso de agua dentro del material aproximadamente 15 a 20% de porosidad, que se alcanza generalmente limitando el contenido de mortero (cemento + arena) del 20 al 30% en peso (Villemagne et al., 2000).
- Las características mecánicas deben ser del orden de aquellas de las gravas tratadas con ligantes hidráulicos, que generalmente permiten obtener resistencias a la compresión a los 28 días mínimo de 15 MPa, con la cual se resiste el desgaste por abrasión (Sánchez, 2000).
- Se debe tener una resistencia a los agentes agresivos contenidos en el agua, esto se obtiene asegurando la ligazón entre los agregados mediante un mortero compacto, contrariamente a los concretos porosos comunes donde esta ligazón esta constituida sólo por cemento. Este resultado se obtiene introduciendo en la mezcla una cantidad de arena entre 150 y 200 Kg/m³ dependiendo del tipo de diseño que se desee obtener (Villemagne et al., 2000).
- Estudios incluyen las medidas de la penetración del agua bajo una fuerte lluvia simulada y la evaluación de la capacidad estructural de la superficie del pavimento. El rango concluido de la penetración del agua es de 1×10^{-4} m/s mínimo para concretos drenantes (Shacket et al., 1996)

2.3 Resistencia

En mezclas continuas, cada partícula de agregado esta encerrada por un aglomerante de mortero de cemento que se contrae durante los periodos de curado y endurecimiento. Esto da lugar a unos esfuerzos generalizados de tensión a lo largo del aglomerante de mortero y de compresión en el agregado. En concretos permeables, estos esfuerzos son de menor intensidad, gracias a la intensa hidratación separada del mortero y a su discontinuidad. Por lo tanto no se nota la contracción volumétrica del concreto permeable (Sánchez, 2000).

Además, se pueden usar valores más bajos de relación agua cemento, lo cual produce resistencia de aglomerante más alta. Lo cual hace que los valores de resistencia obtenidos en la sección transversal de los concretos permeables son por lo menos iguales a los del concreto normal, y con frecuencia los superan (Hodson, 1983).

Sin embargo, se debe tener en cuenta que un incremento de la porosidad siempre representará una pérdida de resistencia a la desintegración en el concreto. Es debido a esto la razón de la utilización de desechos de plástico, buscando incrementar la resistencia a este tipo de desintegración y a la tracción.

Como resultado de lo anterior el diseño de mezcla de este tipo de concreto debe componerse entre la porosidad y la resistencia a la desintegración.

El cemento utilizado debe permitir una resistencia a la compresión, cercana a 9 MPa a los 90 días y resistir al ataque tanto de las aguas puras (lluvias), o de soluciones de cloro (sales de descongelamiento) (Villemagne et al., 2000)

2.4 Recomendaciones de Puesta en Obra

Es preferible utilizar agregados triturados que presentan una mejor resistencia al tráfico de los equipos de compactación utilizados para la colocación en obra. Teniendo en cuenta la gran porosidad obtenida, al menos 10%, este material está sujeto a la desecación en el momento de su colocación en obra; es pues necesario protegerlo con un producto de curado perfectamente eficiente. Por otra parte, el material está expuesto al congelamiento; y deberá tener pues una cantidad suficiente de aire incorporado (Villemagne et al., 2000).

El material así realizado se puede colocar con la ayuda de un equipo pequeño de formaletas deslizantes, la compactación se puede asegurar mediante vigas vibratorias de fuerte vibración o con la ayuda de distribuidor lateral, y la compactación se obtiene por cilindrado.

En el caso de implementar este tipo de pavimento permeable sobre superficies de pavimentos convencionales en uso, no adecuados para este sistema, el agua colectada se debe evacuar muy rápidamente hacia los colectores. Conviene



controlar la calidad de ejecución de las cajas colectoras y especialmente verificar el tiempo de respuesta del sistema de drenaje.

Si por el contrario se desea implementar este tipo de pavimento directamente sobre la subrasante, el suelo fácilmente puede ser pavimentado usando concreto drenante sobre una capa de base permeable al agua (gracias a la utilización de bases y subbases elaboradas con grava drenante). De esta forma, la superficie de rodadura tendría los más altos estándares para hacer efectivo el paso directo del agua, esto permitiría que ésta pueda ser filtrada desde el lugar hasta el subsuelo, siempre y cuando este cuente con un sistema de sub-drenajes que permitan captar estas aguas.

2.5 Recomendaciones Para el Mantenimiento

Es una realidad ineludible la necesidad de trabajar seriamente en la conservación de los pavimentos drenantes. Ya que estos pavimentos son capaces de drenar el agua, siempre y cuando esta capacidad drenante se mantenga, si es posible, durante todo el tiempo de la vida útil del pavimento.

Es evidente que un pavimento drenante actúa como tal mientras su contenido de vacíos es suficientemente elevado para permitir que a través de éste pase un flujo razonable de agua, igualmente es innegable que los poros de la mezcla tienden a colmatarse con el tiempo. (Siegfried.1998)

Por tanto, conservar un pavimento drenante implica tomar, además de las medidas convencionales, otras específicas.

Como en cualquier otro pavimento la conservación debe estar presente desde el mismo instante de su concepción. Por lo tanto se deben tomar ciertas medidas que garanticen este propósito, como son las siguientes:

- Es importante recordar que la colmatación final se presentará de una forma más rápida si el porcentaje inicial de vacíos es menor. Por lo mismo se recomienda diseñar mezclas con contenidos de vacíos entre un 15 - 20% (Pérez y Gordillo, 1990).
- Uno de los factores que inciden en la colmatación de los pavimentos drenantes, es la que producen los elementos extraños que se incorporan al pavimento al desprenderse de los neumáticos de los vehículos que los llevan adheridos.
- Limpiar de forma regular los pavimentos drenantes durante su tiempo de vida útil.

Con la aplicación de las medidas mencionadas anteriormente, se reduce sensiblemente la velocidad de colmatación; pero a pesar de esto, esta se producirá inexorablemente, si no se toman otras medidas para evitar que se alcance de forma total antes que se finalice la vida útil del pavimento. Estas medidas corresponden al adecuado mantenimiento que se le debe dar al pavimento durante su vida útil (Instituto de Concreto, 2000).

2.6 Ventajas del Pavimento en Concreto Permeable

Los pavimentos tradicionales en concreto presentan algunos inconvenientes; su deterioro es un problema costoso, la vida de la calzada a menudo es menor de la esperada; la adherencia en condiciones climatológicas adversas puede ser deficiente y son muchas las muertes relacionadas con el hidropneumático. Los problemas de drenaje y escurrimiento se añaden a los requisitos de mantenimiento y pueden afectar el ambiente. Se ven sometidos a problemas de fracturas, asentamientos, levantamientos y fallas de la losa, entre otros.

Los pavimentos en concreto permeable pueden superar estos inconvenientes, son de superior durabilidad, confieren un pavimento liso aunque tenaz, están libres de hidropneumático, se adhiere fácilmente a otras superficies de cemento y ayudan al drenaje y a la estabilización de condiciones de agua subterránea.

La ventaja que tiene el concreto sobre el asfalto es su vida mas larga y la resistencia a la deformación, con el resultado que la superficie en concreto requiere de un mantenimiento menos frecuente.

Las características superficiales de los tramos experimentales de los pavimentos en concreto permeable son muy superiores a la de los pavimentos rígidos convencionales. Esto se debe a la trabajabilidad del hormigón poroso, la terminación de la extendidora y la ausencia de post-compactación.

Debido a la estructura autoventilada, el gradiente térmico que se produce entre la capa superior e inferior es menos importante que en los pavimentos convencionales. Esto, acompañado de unas altas prestaciones del material, ha permitido eliminar la junta longitudinal de los pavimentos de hormigón.

Se ha podido comprobar en el laboratorio que la durabilidad de los pavimentos en concreto permeable frente a cargas de fatiga, agresivos medioambientales (sulfatos, carbonatación, aceites minerales, carburantes, etc.) es similar a la de un hormigón compactado.



2.7 Polietileno Componente del Pavimento en Concreto Permeable

Debido a que el concreto poroso tiene ausencia de finos, la resistencia a la flexión y compresión tienden a ser menores que las de un concreto convencional, por lo tanto, se utilizan adiciones de tiras de plástico de desechos de bolsa de leche para buscar aumentar la resistencia de este tipo de pavimento drenante.

El material con el cual se produce las bolsas de plástico es el polietileno (*desechos de tiras de plástico*), de baja densidad, o LDPE. Este tipo de polímero tienen buena resistencia a la tensión, aunque normalmente tienen mala resistencia a la compresión. Debido a esta combinación de resistencias y debilidades, es una buena idea usarlo con otro material, ya que sirven para reforzar y de esta manera compensar las debilidades de otros materiales, como las de nuestro concreto permeable.

Pero específicamente nosotros vamos a tratar con compuestos reforzados por tiras de desechos de bolsa de leche. Ellos actúan como una masa enredada y de esta manera al adicionarse al concreto, éste se vuelve más fuerte y aumenta la resistencia en más de una dirección, ya que la adición de las tiras forma una especie de tejido que refuerzan el compuesto en todas las direcciones.

Esta matriz que se forma de la unión de tiras permite que el compuesto sea aun más fuerte. También absorbe los esfuerzos de deformación, es decir, agrega dureza al compuesto y finalmente, mientras se adicione las tiras y se forme la matriz, las características del pavimento drenante en concreto adquieren un aumento en la resistencia a los esfuerzos de compresión y tensión (Bollati, 1997).

3 ENSAYOS DE LABORATORIO

Esta investigación se inició con la caracterización de los materiales a utilizar en la elaboración de los diseños de las mezclas, los cuales se hicieron bajo las especificaciones de las normas técnicas colombianas (NTC). Todos los ensayos y trabajos de laboratorio requeridos para la ejecución de esta investigación se adelantaron en los laboratorios de CEMEX y Asocreto.

La grava empleada en la investigación proviene del Tunjuelo, mina *La Fiscala*. A este material se le realizaron los siguientes ensayos de caracterización: Absorción, Densidad, Resistencia al Desgaste, Masa Unitaria y Granulometría. De los cuales se obtuvieron los siguientes resultados que se presentan en la Tablas 1 y 2 y Figura 1.

Tabla 1. Ensayos de caracterización del agregado grueso

ENSAYO	NTC	UNIDADES	RESULTADOS
Densidad Nominal	176	g/cm ³	2.65
Densidad Aparente Seca		g/cm ³	2.47
Densidad Aparente Saturada		g/cm ³	2.54
Masa Unitaria Suelta	92	Kg/m ³	1551.86
Masa Unitaria Compacta		Kg/m ³	1590.20
Absorción	176	%	2.52
Resistencia al Desgaste	93	%	27.47



Tabla 2. Resultado de la granulometría del agregado grueso

Abertura Tamiz		Peso Retenido	Porcentaje Retenido	% Retenido Acumulado	Porcentaje Pasa
mm	#				
38,1	1 1/2	0,00	0,00	0,00	100,00
25,4	1	0,00	0,00	0,00	100,00
19	3/4	273,90	9,13	9,13	90,87
12,7	1/2	1109,30	36,98	46,11	53,89
9,51	3/8	517,60	17,25	63,36	36,64
4,76	4	746,60	24,89	88,25	11,75
2,38	8	214,10	7,14	95,38	4,62
0,074	200	102,20	3,41	98,79	1,21
0	Fondo	36,30	1,21	100,00	0,00
TOTAL		3000,00	100,00		

Tamaño Maximo	1 pulgada
Tamaño Maximo Nominal	3/4 pulgada

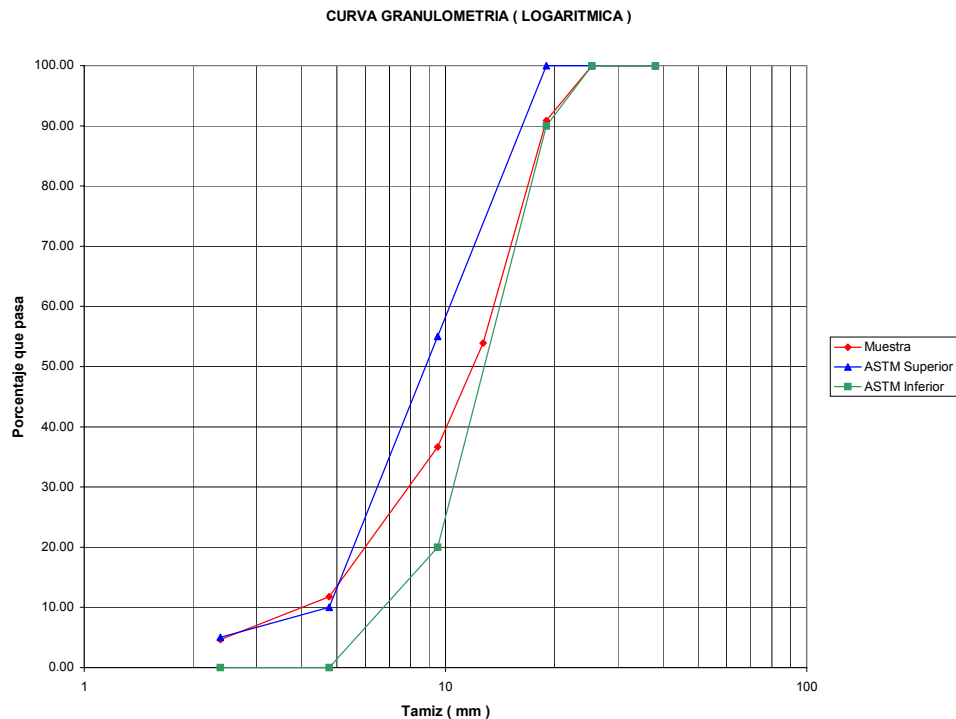


Figura 1. Curva granulométrica del agregado grueso



4. ENSAYOS SOBRE EL DISEÑO DE CONCRETO POROSO OPTIMO

4.1 Diseño de Mezcla con Adiciones de Tiras de Plástico

Una vez seleccionado el diseño de mezcla (ver Anexo A) se efectuó una corrección a la distribución granulométrica de la mezcla ajustándola con la granulometría de los agregados obtenida en la Tabla 2 y posteriormente se procedió a realizar los ensayos de compresión, flexión, tracción indirecta y módulo de elasticidad, con el fin de evaluar el comportamiento de la mezcla seleccionada a los 3, 7, 14 y 28 días. Los resultados se presentan en la Tabla 4.

Tabla 3. Diseño de mezcla óptimo

DISEÑO MEZCLA CON 0.1% DE TIRA TIPO 1				
Producto	Cantidad (Kg)	Densidad (g/cm ³)	Cantidad (m ³)	Porcentajes
Cemento	500.00	3.01	0.17	16.59
Agregado 1/2 " - 3/8 "	835.72	2.54	0.33	32.86
Agregado 3/8 " - # 4	568.17	2.54	0.22	22.34
Agregado # 4 - # 8	182.26	2.54	0.07	7.17
Agregado # 8 - Fondo	90.35	2.54	0.04	3.55
Agua	175.00	1.00	0.18	17.48
Plastico	2.35	-	-	-
Relación Agua / Cemento	0.35	-	-	-
TOTAL Kg	2351.50	TOTAL m³	1.00	100.00



Tabla 4. Resultados obtenidos de los ensayos de compresión, flexión, tracción y módulo de elasticidad de la mezcla seleccionada sin tiras

		#	Valor	Promedio	% Resistencia con respecto a la de 28 días
COMPRESION SIMPLE	R3D (Kg/cm ²)	1	109.50	106.00	44%
		2	102.50		
	R7D (Kg/cm ²)	1	192.00	186.00	
		2	180.00		
	R14D (Kg/cm ²)	1	219.00	207.50	
		2	196.00		
	R28D (Kg/cm ²)	1	257.00	242.00	
		2	227.00		
FLEXION	R3D (Kg/cm ²)	1	23.00	20.75	60%
		2	18.50		
	R7D (Kg/cm ²)	1	24.00	25.00	
		2	26.00		
	R14D (Kg/cm ²)	1	29.00	28.00	
		2	27.00		
	R28D (Kg/cm ²)	1	34.00	34.50	
		2	35.00		
TRACCION INDIRECTA	R3D (Kg/cm ²)	1	15.00	15.25	60%
		2	15.50		
	R7D (Kg/cm ²)	1	16.50	17.75	
		2	19.00		
	R14D (Kg/cm ²)	1	20.00	20.50	
		2	21.00		
	R28D (Kg/cm ²)	1	25.00	25.50	
		2	26.00		
MODULO DE ELASTICIDAD	R7D (Kg/cm ²)	1	85894.02	85894.02	60%
		2	85894.02		
	R28D (Kg/cm ²)	1	143649.69	143649.69	
		2	143649.69		

Después de ejecutar los anteriores ensayos, se procedió a realizar las adiciones con diferentes dosificaciones de tiras plásticas, de las siguientes dimensiones, 2 mm x 10 mm y 4 mm x 20 mm, utilizando diferentes porcentajes con respecto al peso de la mezcla 0.025%, 0.05%, 0.075%, 0.100%, 0.200%, 0.300%, 0.400% y 0.500%, efectuando ensayos de compresión y flexión a los 7 días a cada una de las probetas con los diferentes porcentajes, todo esto con el fin de obtener la tira de mejor comportamiento al igual que el porcentaje óptimo de adiciones de tiras de plástico y realizar los ensayos a la mezcla óptima para obtener las curvas de diseño y compararlas con la mezcla sin adiciones.

Los datos obtenidos de los ensayos preliminares se presentan en la Tabla 5.



Tabla 5. Resultados obtenidos de los ensayos de compresión y flexión para cada tipo de tira

TIRA TIPO 1 (4 mm x 20 mm)						
TIPO	COMPRESION SIMPLE			FLEXION		
	R7D (Kg/cm ²)			R7D (Kg/cm ²)		
	1	2	PROM	1	2	PROM
Mezcla 0.5 %	67.00	69.00	68.00	16.00	16.00	16.00
Mezcla 0.4 %	103.00	106.00	104.50	17.50	18.50	18.00
Mezcla 0.3 %	140.00	142.00	141.00	19.00	21.00	20.00
Mezcla 0.2 %	176.00	179.00	177.50	26.50	28.00	27.25
Mezcla 0.1 %	178.00	182.00	180.00	34.00	35.00	34.50
Mezcla 0.075 %	203.00	182.50	192.75	35.00	32.00	33.50
Mezcla 0.050 %	203.50	226.00	214.75	30.00	27.00	28.50
Mezcla 0.025 %	183.00	194.00	188.50	25.00	27.00	26.00
Mezcla 0 %	192.00	180.00	186.00	24.00	26.00	25.00

TIRA TIPO 2 (2 mm x 10 mm)						
TIPO	COMPRESION SIMPLE			FLEXION		
	R7D (Kg/cm ²)			R7D (Kg/cm ²)		
	1	2	PROM	1	2	PROM
Mezcla 0.5 %	54.00	50.00	52.00	12.00	10.00	11.00
Mezcla 0.4 %	72.00	63.00	67.50	15.50	11.00	13.25
Mezcla 0.3 %	90.00	76.00	83.00	19.00	12.00	15.50
Mezcla 0.2 %	105.00	101.00	103.00	16.00	17.00	16.50
Mezcla 0.1 %	121.00	123.00	122.00	19.50	20.50	20.00
Mezcla 0.075 %	132.00	138.00	135.00	23.00	24.00	23.50
Mezcla 0.050 %	139.50	153.50	146.50	27.00	30.00	28.50
Mezcla 0.025 %	147.00	169.00	158.00	27.00	27.00	27.00
Mezcla 0 %	192.00	180.00	186.00	24.00	26.00	25.00



5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Basados en los datos obtenidos de los ensayos en las diferentes probetas, se procedió a realizar las siguientes comparaciones y análisis.

5.1 Variación de la Resistencia a la Compresión Simple con los Tipos de Tiras y las Diferentes Dosificaciones de Plástico

A partir de la Figura 2 se puede observar claramente que en cuanto a la compresión la tira 1 adicionada en un 0.05% es la de mejor comportamiento, ya que nos produce un incremento de la resistencia en un 15.46% con respecto a la del concreto poroso sin adiciones.

5.2 Variación de la Resistencia a la Flexión con los Tipos de Tiras y las Diferentes Dosificaciones de Plástico

A partir de la Figura 3 se puede observar que en cuanto a la flexión la tira 1 adicionada en un 0.10% es la de mejor comportamiento, puesto que incrementa la resistencia en un 38.00%.

En cuanto a la tira 2, de igual manera se observa un incremento del 14.00% con una adición de 0.05% con respecto a la del concreto poroso sin adiciones.

Por lo tanto se puede observar que la tira 1 adicionada en un 0.10% es la de mejor comportamiento con respecto a los esfuerzos producidos por la flexión.

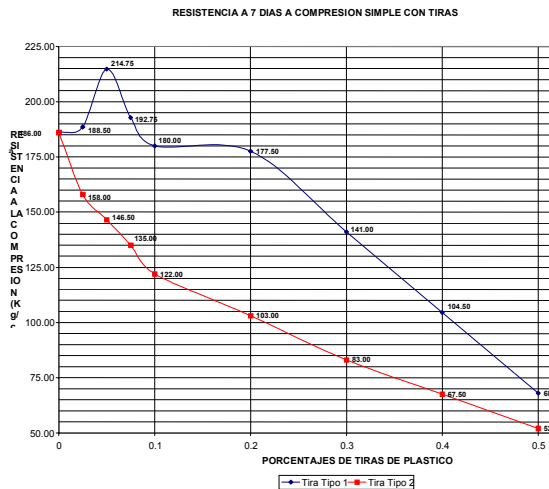


Figura 2. Variación de la resistencia a la compresión con los tipos de tiras

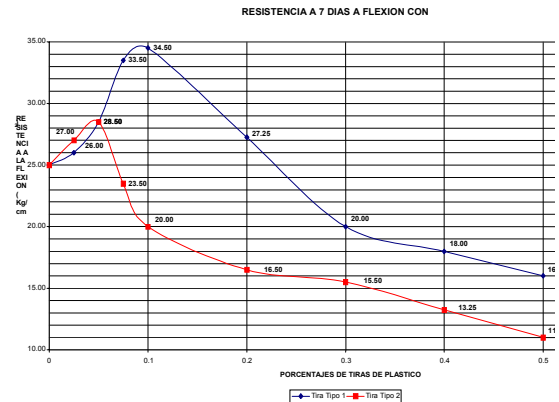


Figura 3. Variación de la resistencia a la flexión con los tipos de tiras

5.3 Resultados de los Diferentes Ensayos para el Porcentaje Óptimo (0.1%) y Tiras Tipo 1

La Tabla 6 muestra los resultados de los diferentes ensayos para la solución óptima.

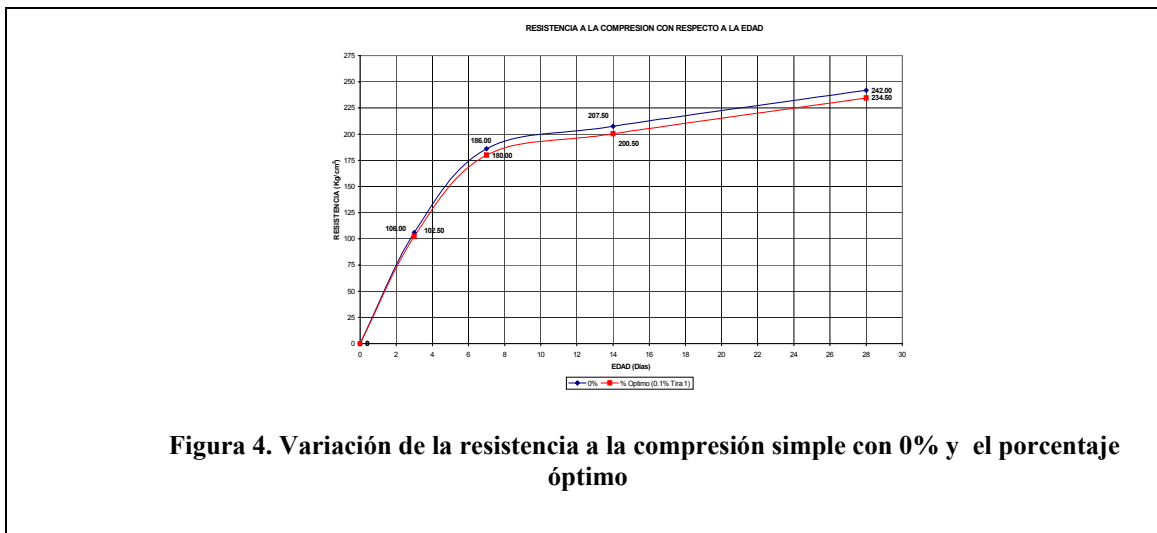


Tabla 6. Resultados obtenidos de los ensayos de compresión, flexión, tracción y módulo de elasticidad de la mezcla óptima (0.1%).

		#	Valor	Promedio	% Resistencia con respecto a la de 28 días
COMPRESION SIMPLE	R3D (Kg/cm ²)	1	106.50	102.50	44%
		2	98.50		
	R7D (Kg/cm ²)	1	178.00	180.00	
		2	182.00		
	R14D (Kg/cm ²)	1	218.00	200.50	
		2	183.00		
	R28D (Kg/cm ²)	1	240.50	234.50	
		2	228.50		
FLEXION	R3D (Kg/cm ²)	1	30.00	28.50	60%
		2	27.00		
	R7D (Kg/cm ²)	1	34.00	34.50	
		2	35.00		
	R14D (Kg/cm ²)	1	39.00	38.50	
		2	38.00		
	R28D (Kg/cm ²)	1	52.50	47.75	
		2	43.00		
TRACCION INDIRECTA	R3D (Kg/cm ²)	1	16.00	15.50	60%
		2	15.00		
	R7D (Kg/cm ²)	1	18.50	18.00	
		2	17.50		
	R14D (Kg/cm ²)	1	21.00	20.50	
		2	20.00		
	R28D (Kg/cm ²)	1	26.20	25.70	
		2	25.20		
MODULO DE ELASTICIDAD	R7D (Kg/cm ²)	1	97000.00	98000.00	60%
		2	99000.00		
	R28D (Kg/cm ²)	1	163333.33	163333.33	
		2	163333.33		

5.4 Variación de la Resistencia a la Compresión Simple

De la Figura 5 podemos observar que cuando se hace la adición del porcentaje óptimo se produce una disminución en promedio de un 3.40 % de la resistencia obtenida en la mezcla con adición 0.00% la cual prácticamente se mantiene constante durante los primeros 28 días.

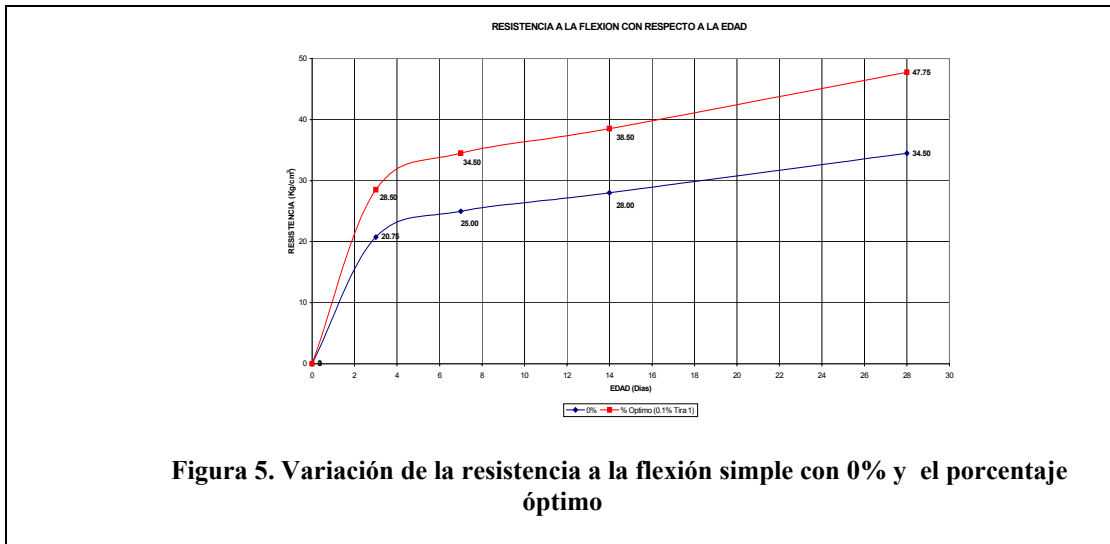


5.5 Variación de la Resistencia a la Flexión

De la Figura 5 podemos observar que cuando se hace la adición del porcentaje óptimo se produce un incremento en promedio de un 37.80% de la resistencia obtenida en la mezcla con adición 0.00% la cual prácticamente se mantiene constante durante los primeros 28 días.

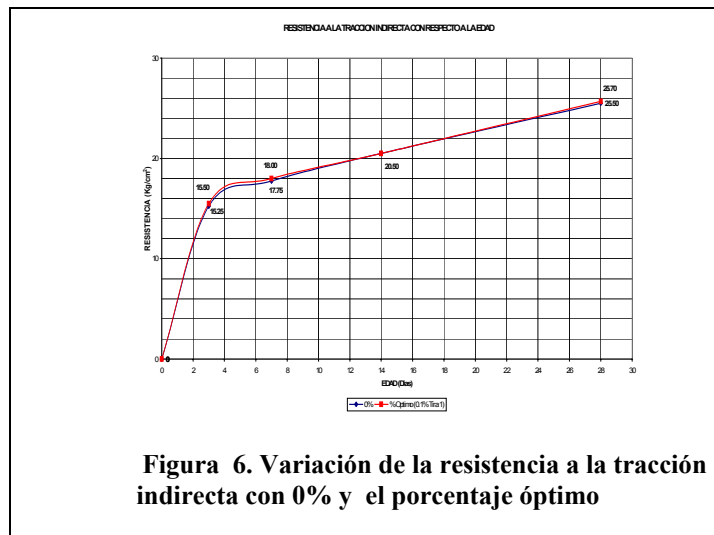
5.6 Variación de la Resistencia a la Tracción Indirecta

De la Figura 6 podemos observar que cuando se hace la adición del porcentaje óptimo se produce un incremento en promedio de un 1.00% de la resistencia obtenida en la mezcla con adición 0.00% la cual prácticamente se mantiene constante durante los primeros 28 días.



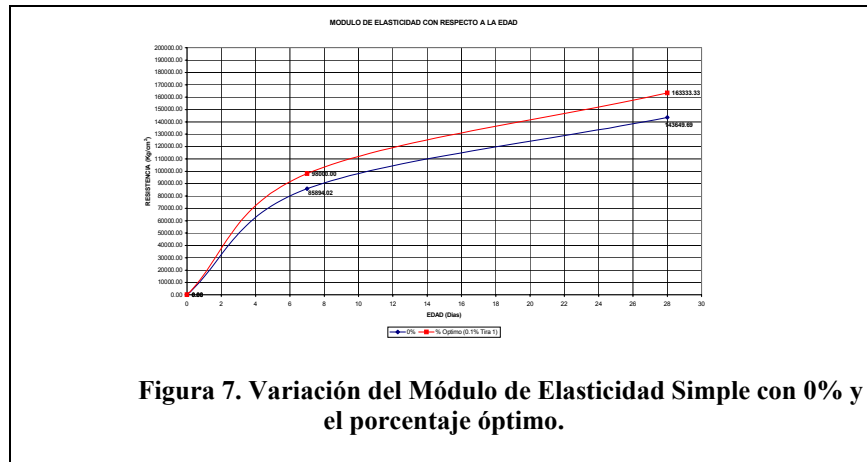
5.5 Variación de la Resistencia a la Tracción Indirecta

De la Figura 6 podemos observar que cuando se hace la adición del porcentaje óptimo se produce un incremento en promedio del 1.00% de la resistencia obtenida en la mezcla con adición 0.00% la cual prácticamente se mantiene constante durante los primeros 28 días.



5.7 Variación del Módulo de Elasticidad

De la Figura 7 se puede observar que cuando se hace la adición del porcentaje óptimo se produce un incremento en promedio del 13.70% de la resistencia obtenida en la mezcla con adición 0.00% la cual prácticamente se mantiene constante durante los primeros 28 días.



5.8 Variación de la Resistencia a la Flexión con un concreto Convencional

De la Figura 8 podemos observar que el concreto convencional aunque tenga una resistencia de mas de 180 Kg/cm² sobre el concreto poroso, solo tiene un incremento en promedio del 15.00% de la resistencia obtenida con el porcentaje óptimo.

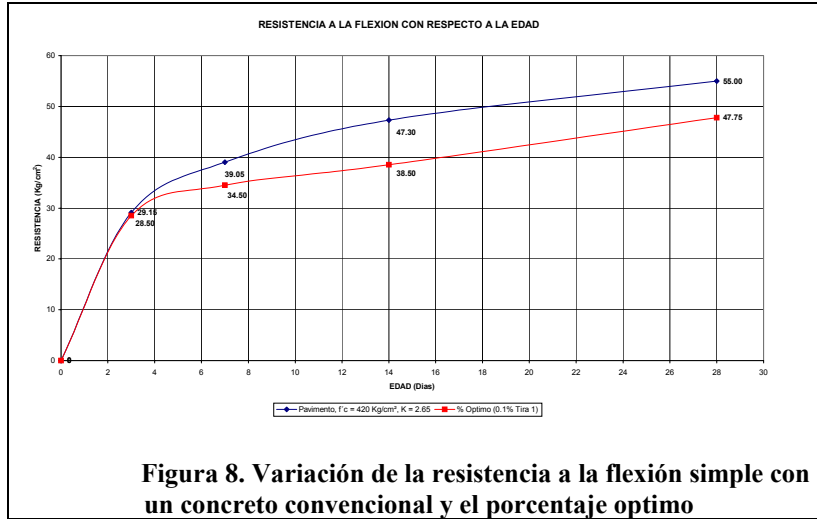


Figura 8. Variación de la resistencia a la flexión simple con un concreto convencional y el porcentaje óptimo

5.9 Variación del Módulo de Elasticidad con un Concreto Convencional

De la Figura 9 se puede observar que el concreto convencional tiene un incremento en promedio del 14.80% de la resistencia obtenida cuando se hace la adición del porcentaje óptimo, la cual prácticamente se mantiene constante durante los primeros 28 días.

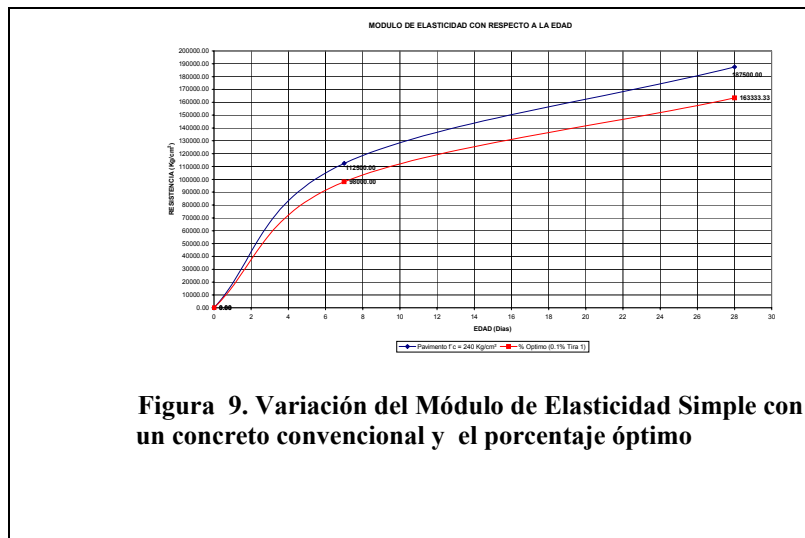


Figura 9. Variación del Módulo de Elasticidad Simple con un concreto convencional y el porcentaje óptimo



6. CONCLUSIONES

6.1 Conclusiones Generales

- La utilización de un pavimento con concreto poroso permite una superficie 100% permeable, permitiendo que el agua lluvia se infiltre al subsuelo, siempre y cuando este cuente con un sistema de sub-drenajes que permitan captar estas aguas, evitando a su vez fenómenos de *Hidroplaneo*. La textura final del concreto poroso se puede apreciar en las Figuras 10 y 11.
- Mediante la adición de tiras de plástico se logró aumentar la resistencia en todos los modos de carga (compresión, flexión y tracción indirecta) y disminuir la fragilidad de la matriz débil y quebradiza del concreto poroso, facilitando de igual manera la reutilización de un material no biodegradable.
- La tasa de infiltración medida en concreto para pavimentos convencionales es aproximadamente 1.11×10^{-6} m/s y la obtenida en el concreto poroso con el porcentaje optimo de adiciones de tiras de plástico es de 3.12×10^{-4} m/s.

Haciendo una simulación de espesores para pavimentos drenantes, con adiciones de plástico, podemos ver significativas reducciones en los espesores del mismo tal como se muestra en las tablas 7 y 8.



Figura 10. Cilindro del diseño preliminar 1 (Mezcla sin adiciones).



Figura 11. Asentamiento del diseño preliminar 1 (Mezcla sin adiciones).



Tabla 7. Propuesta de Diseño para Pavimentos drenantes con adición de tiras de plástico, según la metodología racional para un milló de ejes de 8.2 toneladas

Número de Capas [2..6]		6		
Radio de Carga [cm]		12.5		
Presión de Contacto [Kg/cm ²]		6.62		
Distancia Entre Ejes de Llantas [cm]		37.5		
Capas	E [Kg/cm ²]	μ []	H [cm]	L ó No L
1	163500	0.25	9	L
2	25000	0.35	5	L
3	35000	0.35	7	L
4	2450	0.35	15	L
5	1250	0.35	25	L
6	500	0.25	-	-

CP	9 cm
Rodadura	5 cm
Base Negra	7 cm
G Tipo I	15 cm
G Tipo I	25 cm
Subrasante	

Capa Nº	Z (cm)	$\epsilon_x \times 10^{-6}$	σ_x (MPa)	$\epsilon_z \times 10^{-6}$	σ_z (MPa)
1	0	105.00	2.38	43.10	0.66
	9	56.30	1.06	47.50	0.29
2					LIGADA
	9	56.30	0.07	126.00	0.29
	14	72.50	0.19	106.00	0.16
3					LIGADA
	14	72.50	0.29	94.70	0.16
	21	148.00	0.68	140.00	0.057
4					LIGADA
	21	148.00	0.0204	274.00	0.057
	36	148.00	0.0357	223.00	0.032
5					LIGADA
	36	148.00	0.0098	301.00	0.032
	61	132.00	0.0158	219.00	0.017
6					LIGADA
	61	132.00	0.0031	363.00	0.017

Deflexión	53.150 mm/100
Radio de Curvatura	618.130 m

Resultados de DEPAV de la alternativa del Concreto Poroso sobre una estructura existente (capa concreto y rodadura ligadas)

Número de Capas [2..6]		6		
Radio de Carga [cm]		12.5		
Presión de Contacto [Kg/cm ²]		6.62		
Distancia Entre Ejes de Llantas [cm]		37.5		
Capas	E [Kg/cm ²]	μ []	H [cm]	L ó No L
1	163500	0.25	24	NL
2	25000	0.35	5	L
3	35000	0.35	7	L
4	2450	0.35	15	L
5	1250	0.35	25	L
6	500	0.25	-	-

CP	24 cm
Rodadura	5 cm
Base Negra	7 cm
G Tipo I	15 cm
G Tipo I	25 cm
Subrasante	

Capa Nº	Z (cm)	$\epsilon_x \times 10^{-6}$	σ_x (MPa)	$\epsilon_z \times 10^{-6}$	σ_z (MPa)
1	0	57.80	1.43	28.40	0.66
	24	58.40	1.17	35.30	0.043
2					NO LIGADA
	24	40.90	0.16	30.30	0.043
	29	14.80	0.07	8.03	0.036
3					LIGADA
	29	14.80	0.093	10.00	0.036
	36	20.60	0.084	21.40	0.023
4					LIGADA
	36	20.60	0.00561	75.10	0.023
	51	46.00	0.00766	87.10	0.016
5					LIGADA
	51	46.00	0.00048	127.00	0.016
	76	60.60	0.00564	116.00	0.011
6					LIGADA
	76	60.60	0.00039	218.00	0.011

Deflexión	42.640 mm/100
Radio de Curvatura	1445.440 m

Resultados de DEPAV de la alternativa del Concreto Poroso sobre una estructura existente (capa concreto y rodadura no ligadas)



Tabla 8. Resultados de DEPAV de la alternativa del Concreto Poroso sobre una nueva estructura

Número de Capas [2.6]		4		
Radio de Carga [cm]		12.5		
Presión de Contacto [Kg/cm ²]		6.62		
Distancia Entre Ejes de Llantas [cm]		37.5		
Capas	E [Kg/cm ²]	μ []	H [cm]	L ó No L
1	163500	0.25	23	L
2	2450	0.35	15	L
3	1250	0.35	25	L
4	500	0.25	-	-

CP	23 cm
G Tipo I	15 cm
G Tipo I	25 cm
Subrasante	

Capa N°	Z (cm)	$\epsilon_T \times 10^{-6}$	σ_T (MPa)	$\epsilon_Z \times 10^{-6}$	σ_Z (MPa)
1	0	61.30	1.50	30.00	0.66
	23	59.00	1.17	34.70	0.027
2	23	59.00	0.0060	122.00	0.027
	38	69.40	0.0157	113.00	0.017
3	38	69.40	0.0034	155.00	0.017
	63	72.60	0.0079	129.00	0.011
4	63	72.60	0.0012	225.00	0.011

Deflexión	42.250 mm/100
Radio de Curvatura	1390.190 m

6.2 Conclusiones Específicas para la Determinación de la Tira Adecuada con el Porcentaje Optimo

De los diferentes resultados obtenidos a partir de los ensayos de compresión y flexión realizados a las probetas podemos concluir lo siguiente:

- Cuando se hace uso de la tira 1 en los diferentes porcentajes mencionados anteriormente, se produce una disminución de la resistencia a la compresión que se obtuvo en la probeta con adición 0.000%, a excepción de las probetas con adiciones de 0.025%, 0.050% y 0.075% en las cuales se produce un aumento de 1.34%, 15.46% y del 3.63% respectivamente.
- Cuando se hace uso de la tira 2, en los diferentes porcentajes mencionados anteriormente, se produce una disminución de la resistencia a la compresión obtenida en la probeta con adición 0.00%.
- En cuanto a la flexión, cuando se hace uso de la tira 1 en los porcentajes mencionados con anterioridad, hay un aumento del 4.00%, 14.00%, 34.00%, 38.00% y del 9% con respecto a la resistencia obtenida en la probeta con adición 0.000%, haciendo uso de adiciones del 0.025%, 0.050%, 0.075%, 0.100% y 0.200% respectivamente. En los demás porcentajes de adición se produce una disminución.
- De igual manera en cuanto a la flexión, cuando se hacen adiciones de la tira 2, en los diferentes porcentajes, se produce un incremento del 8.00% y del 14.00% sobre el valor obtenido en la probeta con adición de 0.000%, usando adiciones de 0.025% y de 0.050% respectivamente. Con el uso de los demás porcentajes se genera una disminución de la resistencia a la flexión obtenida en la adición de 0.000%.
- Por lo tanto, y dado que los pavimentos tienen su punto crítico en la flexión, es posible decir que la tira optima para adicionar es la tira 1 (4 mm x 20 mm) en 0.100%.

6.3 Conclusiones Especificas para la Mezcla con el Porcentaje Optimo de Tira 1

De los resultados obtenidos a partir de los diferentes ensayos de compresión, flexión, tracción indirecta y módulo de elasticidad realizados a las probetas de 0.000% y el porcentaje optimo seleccionado de 0.100% de tira tipo 1, se puede concluir lo siguiente:

- En cuanto a la compresión la resistencia obtenida mediante la adición de la tira 1 en el porcentaje optimo disminuye con respecto a la obtenida con la adición de 0.00% en un promedio de un 3.40 %, la cual prácticamente se mantiene constante durante los primeros 28 días.



- De acuerdo con el comportamiento a flexión en las viguetas con la adición en el porcentaje óptimo de la tira 1, se produce un incremento en promedio de un 37.80% de la resistencia obtenida en la mezcla con adición 0.00% la cual prácticamente se mantiene constante durante los primeros 28 días.
- Con respecto a la tracción indirecta se obtuvo con el porcentaje óptimo de la tira 1 un incremento en promedio del 1.00% de la resistencia obtenida en la mezcla con adición 0.00% la cual prácticamente se mantiene constante durante los primeros 28 días.
- Acorde con los resultados obtenidos de módulo de elasticidad se obtuvo un incremento en promedio del 13.70% con el porcentaje óptimo de la tira 1 respecto a la resistencia obtenida en la mezcla con adición 0.00% la cual prácticamente se mantiene constante durante los primeros 28 días.
- Comparando los resultados del concreto poroso con porcentaje óptimo de la tira 1 con un concreto convencional con un $f'c = 420 \text{ Kg/cm}^2$ podemos decir que a flexión solo se tiene un incremento del concreto convencional del 15.00% respecto al concreto permeable.
- Confrontando los datos obtenidos con el módulo de elasticidad, podemos decir que un concreto convencional con un $f'c$ aproximado de 240 Kg/cm^2 tiene un incremento en promedio del 14.80% respecto al concreto permeable.
- El concreto poroso óptimo obtenido genera alta resistencia a la flexión con un baja resistencia a la compresión, el valor de K encontrado para obtener el MR para este tipo de concreto fue de aproximadamente 3.12.

7. RECOMENDACIONES

7.1 Recomendaciones para la Correcta Obtención de la Mezcla

- De las mezclas preliminares se observó que la relación agua/cemento debe estar entre 0.30 a 0.35, debido a que si esta es mayor a 0.35 la pasta se va hacia el fondo y obstruye la porosidad que se requiere para obtener la permeabilidad deseada, por el contrario si esta es menor a 0.30 la cantidad de cemento necesario para la liga entre los puntos de contacto de las partículas de agregado es insuficiente.
- Igualmente de las mezclas preliminares se observó que es adecuado utilizar agregados gruesos sin variaciones notorias en sus tamaños con el fin de evitar tener una superficie demasiado heterogénea que obstruya la porosidad deseada.
- A partir de las mezclas preliminares se identifico que es adecuado utilizar agregados finos en cantidades menores al 15% del peso total de la mezcla, esto con el fin de tener la porosidad deseada.
- Durante la realización de los ensayos con las adiciones de tiras de plástico se presento una perdida de plástico aproximada del 30% del peso adicionado, esto como consecuencia del equipo de mezclado utilizado (trompo). Para solucionar este problema se vio la necesidad de adicionar el porcentaje perdido con el fin de no disminuir el porcentaje de plástico previsto, sin embargo se presenta un error de $\pm 10\%$ del peso de las tiras de plástico adicionadas.
- Con el fin de evitar la segregación que se presento en algunas de nuestras mezclas preliminares se aconseja evitar el uso excesivo de vibrado manual.
- De acuerdo a lo observado a lo largo de la investigación, es posible sugerir el uso de tiras con el mismo espesor pero con un largo mayor, ya que de esta manera se garantizaría una mayor resistencia debida al mayor involucramiento de la tira sobre el perímetro del agregado.



8. REFERENCIAS

- AMERICAN CONCRETE PAVEMENT ASSOCIATION. (1998), *CONCRETE PAVING, The concrete pavement restoration guides*. (1998); p. 1-23.
- ASOCIACIÓN TÉCNICA DE CARRETERAS Y FUNDACIÓN “AGUSTÍN DE BETHENCOURT”. (1990), *Seminario sobre Mezclas Bituminosas Drenantes*. (Madrid, España. 1990); p. 1–178.
- BADILLO, J., y RODRÍGUEZ, R. (1999), *Mecánica de Suelos*. Limusa Noriega Editores. (1999).
- BOLLATI, M. (1997), *Pavimentos de Hormigón Poroso de altas prestaciones como capa de rodadura para tráfico*. Conferencia en Cemento – Hormigón, Barcelona. Volumen 68, Número 774; p. 980-997.
- FELTRE, L., TOMAS, R. (1990), *Conservación de la capacidad de desagüe en pavimentos drenantes*. *Revista Ruta 1996 Volumen 2 Número 55, Madrid*; p. 13–20.
- HODSON, H. (1983), *Nuevas Tecnologías, Pavimentos de Concreto Permeable*. Bogotá, Colombia 1983; p. 9-10.
- INSTITUTO DEL CONCRETO, ICPC (2000), *Sena. Construcción de pavimentos*. Editado por Asocreto. (2000).
- KARAWA, A., SUDA, S. (1996), *Characterisitcs of New type Permeable Concrete Block Paving System*. International Conference PAVE ISRAEL 96, Número 5. (Tel – Aviv, 1996); p. 613-622.
- PEREZ., F. y GORDILLO, J. (1990), *Optimization of Porous Mixes through the use of Special Binders*. Transportation Research Record, Número 12, (Washington, 1990); p. 59–68.
- QVIST, P.S., Kirk, J. S. (1996), *Infiltration of Water Through Concrete Block Pavements*. International Conference PAVE ISRAEL 96, Número 5, (Tel – Aviv, 1996); p. 645-653.
- SÁNCHEZ, D. (1996), *Tecnología del concreto y del mortero*. Bhandar Editores. (1996).
- SÁNCHEZ, D. (2000), *CONCRETOS Y MORTEROS; Manejo y colocación en obra*. Editado por la Asociación de Productores de Concreto – Asocreto. (2000).
- SHACKEL, B., KALIGIS, J. O., MUKTIARTO, (1996), *. Infiltration and Structural Tests of Permeable Eco-Paving*. International Conference PAVE ISRAEL 96, Número 5. (Tel – Aviv, 1996); p. 623-632.
- SIEGFRIED, R. (1998), *Zeag Zementwerk Lauffen y Elektrizitätswerk, Heilbronn. Draining Concrete – the material for today's and tomorrow's roads*. International Symposium on Concrete Roads, Número 8. Associacao Tecnica da Industria di Ciment, World Road Association y Permanent International Association of Road Congresses (1998); p. 103–109.
- KARAWA, A., SUDA, S. (1996), *Characterisitcs of New type Permeable Concrete Block Paving System*. International Conference PAVE ISRAEL 96, Número 5. (Tel – Aviv, 1996); p. 613-622.
- Y. AZZOUT, S. BARRED, F. N. CRES y E. ALFAKIH. *Techniques alternatives en assainissement pluvial*. Editado por LCPC. Lavo.
- VILLEMAGNE, M., PALLIERE, A. M. y RETOUR, P. (2000), *Construcción de Pavimentos*. Editado por la Asociación de Productores de Concreto – Asocreto y el Instituto Colombiano de Productores de Cemento - ICPC. (2000).

Fredy A. Reyes Lizcano, PhD

Pontificia Universidad Javeriana

Profesor asociado departamento de Ingeniería Civil

Director Especialización en Geotecnia Vial y Pavimentos

Andrés Roberto Torres

Ingeniero Civil,

Pontificia Universidad Javeriana

