



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Pavimento permeable, usos y procedimiento  
constructivo**

**T E S I S**

Como requisito para obtener el título de

**Ingeniero Civil**

**P r e s e n t a**

**María del Socorro Alonso Ramírez**

DIRECTOR DE TESIS

**Dr. Rigoberto Rivera Constantino**



México, D. F. a

de 2004



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*A*gradecimientos:

A la *Universidad Nacional Autónoma de México* por permitirme sentir los colores azul y oro.

A la *Facultad de Ingeniería* que me dio las armas para enfrentar la vida con sentido ético y profesional.

Al *Dr. Rigoberto Rivera Constantino* y a mis sinodales *Ing. Héctor A. Legorreta Cuevas, Ing. Luis Candelas, Ing. Miguel Ángel Rodríguez Vega e Ing. Marcos Trejo* por su asesoría y tiempo para la realización de esta tesis.

A mi *Mamá* y a mi *Familia* por que siempre me han apoyado, ante todo gracias por su amor y comprensión.

A mis grandiosos *Amigos* por su cariño, paciencia, apoyo y comprensión.

A los *Profesores* de la Facultad de Ingeniería por los conocimientos que me transmitieron durante estos años.

A *Dios* que me dio vida y salud para lograr mis metas.

A todas aquellas personas que por olvido no menciono, gracias por su apoyo.

*María del Socorro Alonso Ramírez*  
"Coco"

# INDICE

<b>ANTECEDENTES .....</b>	<b>3</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>7</b>
<b>I. PAVIMENTOS .....</b>	<b>9</b>
<b>I.1. QUÉ ES UN PAVIMENTO .....</b>	<b>9</b>
<b>I.2. CLASIFICACIÓN DE PAVIMENTOS .....</b>	<b>9</b>
<i>I.2.1. Pavimento rígido .....</i>	<i>9</i>
<i>I.2.2. Pavimento flexible .....</i>	<i>10</i>
<b>I.3. DIFICULTADES DE LOS PAVIMENTOS .....</b>	<b>11</b>
<b>I.4. DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS .....</b>	<b>11</b>
<i>I.4.1. Método PCA (Portland Cement Association) .....</i>	<i>11</i>
<i>I.4.2. Método AASHTO .....</i>	<i>28</i>
<b>II. PAVIMENTO PERMEABLE .....</b>	<b>42</b>
<b>II.1. ¿QUÉ ES EL PAVIMENTO PERMEABLE? .....</b>	<b>42</b>
<b>II.2. COMPONENTES DEL PAVIMENTO PERMEABLE .....</b>	<b>42</b>
<b>II.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PAVIMENTO PERMEABLE .....</b>	<b>42</b>
<i>II.3.1. Ventajas del pavimento permeable .....</i>	<i>42</i>
<i>II.3.2. Desventajas del pavimento permeable .....</i>	<i>43</i>
<b>II.4. TIPOS DE PAVIMENTO PERMEABLE .....</b>	<b>43</b>
<i>II.4.1. Pavimento permeable de asfalto (PAP) .....</i>	<i>43</i>
<i>II.4.2. Concrete Grid and Modular Pavement .....</i>	<i>45</i>
<b>II.5. CONDICIONES DONDE SE DEBE APLICAR EL PAVIMENTO PERMEABLE .....</b>	<b>47</b>
<b>II.6. USOS PARA EL PAVIMENTO PERMEABLE .....</b>	<b>47</b>
<b>III. PAVIMENTO PERMEABLE DE CONCRETO .....</b>	<b>48</b>
<b>III.1. ¿QUÉ ES EL PAVIMENTO DE CONCRETO? .....</b>	<b>48</b>
<b>III.2. DESCRIPCIÓN DEL PAVIMENTO PERMEABLE DE CONCRETO .....</b>	<b>48</b>
<b>III.3. USOS DEL PAVIMENTO PERMEABLE DE CONCRETO .....</b>	<b>49</b>
<b>III.4. ÁREAS DONDE SE HA APLICADO EL PAVIMENTO PERMEABLE DE CONCRETO .....</b>	<b>49</b>
<b>III.5. DISEÑO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO PERMEABLE DE CONCRETO .....</b>	<b>50</b>
<i>III.5.1. Diseño estructural .....</i>	<i>50</i>
<b>III.6. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO GEOMÉTRICO DEL PAVIMENTO PERMEABLE DE CONCRETO DE CEMENTO PÓRTLAND .....</b>	<b>54</b>
<b>III.7. DISEÑO DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL .....</b>	<b>54</b>
<i>III.7.1. Regulaciones y aplicaciones .....</i>	<i>55</i>
<i>III.7.2. Diseño .....</i>	<i>55</i>
<i>III.7.3. Procedimiento de diseño .....</i>	<i>55</i>
<i>III.7.4. Ejemplo de diseño .....</i>	<i>57</i>
<i>III.7.5. Opciones de diseño .....</i>	<i>59</i>
<b>IV. ESPECIFICACIONES Y PRUEBAS DE LABORATORIO DEL PAVIMENTO PERMEABLE DE CONCRETO .....</b>	<b>61</b>
<b>IV.1. SOBRE EL CONTRATISTA: .....</b>	<b>61</b>
<b>IV.2. PANELES DE PRUEBA: .....</b>	<b>61</b>
<b>IV.3. DISEÑO DE LA MEZCLA DE CONCRETO: .....</b>	<b>62</b>
<i>IV.3.1. Materiales y proporciones para el concreto permeable .....</i>	<i>62</i>

<b>IV.4. PROPIEDADES DEL CONCRETO PERMEABLE</b> .....	<b>65</b>
<i>IV.4.1. Desarrollo de la resistencia</i> .....	65
<i>IV.4.2. Coeficiente de expansión térmica</i> .....	66
<i>IV.4.3. Coeficiente de conductividad térmica</i> .....	66
<i>IV.4.4. Permeabilidad</i> .....	66
<i>IV.4.5. Refuerzo</i> .....	67
<i>IV.4.6. Contenido de vacíos</i> .....	67
<i>IV.4.7. Capilaridad</i> .....	67
<b>IV.5. PREPARACIÓN DE LA SUBRASANTE</b> .....	<b>67</b>
<i>IV.5.1. Material de la subrasante</i> .....	69
<b>IV.5.2. PERMEABILIDAD DE LA SUBRASANTE</b> .....	<b>69</b>
<i>IV.5.3. Soporte de la subrasante</i> .....	69
<i>IV.5.4. Humedad de la subrasante</i> .....	70
<b>IV.6. GEO-TEXTIL</b> .....	<b>70</b>
<b>V. MANEJO Y COLOCACIÓN DEL PAVIMENTO PERMEABLE DE CONCRETO</b> .....	<b>72</b>
<b>V.1. CONSTRUCCIÓN DEL PAVIMENTO PERMEABLE DE CONCRETO</b> .....	<b>72</b>
<b>V.2. MEZCLADO Y TRANSPORTACIÓN</b> .....	<b>72</b>
<i>V.2.1. Colocación y consolidación</i> .....	73
<i>V. 2.2. Velocidad de mezclado</i> .....	80
<i>V.2.3. Transporte y tiempo de mezclado</i> .....	80
<i>V.2.4. Descarga</i> .....	80
<b>V.3. EQUIPO DE COLOCACIÓN Y ACABADO</b> .....	<b>81</b>
<b>V.4. CIMBRAS</b> .....	<b>82</b>
<b>V.5. JUNTAS</b> .....	<b>83</b>
<b>V.6. CURADO</b> .....	<b>86</b>
<b>V.6.1. TIEMPO DE CURADO</b> .....	<b>89</b>
<b>V.7. RECOMENDACIONES DE COLOCACIÓN</b> .....	<b>89</b>
<b>VI. SITUACIÓN ECONÓMICA DEL PAVIMENTO PERMEABLE DE CONCRETO</b> .....	<b>90</b>
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>92</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>93</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>95</b>

## ANTECEDENTES

Los más primitivos habitáculos construidos o usados por el hombre fueron chozas o cuevas. El pavimento era sólo la superficie del terreno encerrado por las paredes. Sin embargo, pronto se descubrió que amontonando la tierra y elevando el nivel por encima del terreno de alrededor, el piso resultante era más seco y por tanto más caliente, mejorando el confort del hogar.

Golpeando con un palo la tierra depositada o apisonándola con los pies, observó que podía consolidarla y obtener así una superficie firme con una duración razonable.

Tales casas se encuentran hoy en las cabañas de las razas primitivas y no es extraño verlos en un gran número de casas rurales. Sin embargo, tienen muchas desventajas, porque si el clima es seco, la superficie se agrieta y despidе mucho polvo y en un clima húmedo, el suelo se humedece provocando hierbas, insectos, roedores, etc.

Una mejora del suelo batido fue la de cubrir la superficie con piezas planas de piedra llamadas losas y este tipo de pavimento, lo podemos encontrar en construcciones medievales. Estos pavimentos presentan una superficie rígida y muy duradera que puede mantenerse razonablemente limpia, sin polvo, y no impide la humedad; son fríos y húmedos para los pies. Debido a éstos inconvenientes se hicieron tentativas de construir pavimentos de madera, aún siendo menos frío se pudre rápidamente si está en contacto con la tierra húmeda. Esto dio lugar a que se colocara la madera un poco elevada sobre la superficie de terreno, apoyando el pavimento en pequeños muretes, sin embargo no se resolvió el problema en su totalidad.

Durante los siglos XVII y XVIII se emplearon pavimentos de madera suspendida, pero en dicha época, el diseño de edificaciones, fue tal que el pavimento se elevaba varios pies encima del nivel de terreno, cubriendo así un semisótano, asegurando que la madera quedara protegida de la humedad, resultando completamente satisfactorios.

En muchas comarcas, la piedra, sobre todo en lajas grandes delgadas, resultaba muy costosa. Se ensayaron varios substitutos, tales como ladrillos y losetas, cerámicas que resultaban tan húmedas y frías como las losas de piedra. Además se gastaban más fácilmente, se estropeaban con el uso y sus numerosas juntas ofrecían dificultades para el rejuntado y el limpiado. Con todo esto, llegaron a ser muy satisfactorios, sobre todo su aspecto ya que eran de color rojo intenso.

Durante el siglo XIX la Revolución Industrial provocó la necesidad de alojamiento a cientos de trabajadores industriales en viviendas rústicas construidas cerca de las fábricas, con alquileres bajos, por lo que los propietarios reducían al mínimo sus inversiones de capital, lo cual, daba como resultado calidades muy bajas en la construcción de pavimentos.

Los constructores colocaban frecuentemente la madera de los pavimentos directamente sobre el suelo exponiéndolas a la humedad y al rápido deterioro, provocando problemas de salud pública en Gran Bretaña, todo esto condujo a legislar la salud pública de 1848 y 1875 y a su vez promulgar reglas para la construcción de viviendas comprobando su ejecución con inspecciones.

Los nuevos reglamentos afectaron al diseño de los edificios, como por ejemplo, si la superficie del terreno delimitado por las paredes del contorno del edificio tenía que estar cubierta con una capa de hormigón y el espacio hueco comprendido entre esa capa de hormigón y el pavimento de encima tenía que estar adecuadamente ventilado y la madera protegida de la humedad ascendente.

La insistencia de la colocación de una capa de hormigón lógicamente terminó siendo considerada como un auténtico pavimento siempre que le recubriera con un forro. Este forro estaba limitado a baldosillas de arcilla llamadas *quarries*; las cuales eran muy duras, frías, de larga vida y a veces resultaban húmedas, con el tiempo se requirió poner una barrera contra la humedad.

Desde los primeros tiempos, tanto el primer piso como los subsiguientes eran de madera. Ordinariamente están hechos de anchas y gruesas tablas, colocados sobre viguetas o cambios, con un espacio bastante estrecho. Las viguetas en muchos casos estaban escuadradas porque se suponía que proporcionaban un apoyo más resistente, y en todo caso resultaba más fácil el apoyar la vigueta y daba mayor superficie al apoyo de las tablas. Cuando empezó a escasear la buena madera de construcción, se adoptó una sección rectangular, más estrecha y más alta, pues pronto se vio, que esto proporcionaba mayor resistencia necesaria y se economizaba más el material.

Tales pisos tenían una limitada luz entre apoyos y eran satisfactorios para ese entonces. Hasta fines del siglo XVIII y principios del XIX, comenzaron la construcción de los primeros grandes edificios industriales con lo que se dejaron sentir las limitaciones de los pisos de madera.

Tales pisos no tenían la capacidad suficiente para las cargas que se utilizaban y tenían poca resistencia al fuego. A mediados del siglo XIX hubo una gran cantidad de desastres que provocó un cambio en los pisos. Los nuevos pavimentos constaban de losas de piedra colocadas con mortero de cal y soportadas por una bovedilla aplanada de ladrillo. Ésta a su vez estaba sostenida por vigas de hierro fundido apoyadas en losas de piedra colocadas con mortero de cal y soportadas por una bovedilla aplanada de ladrillo. Ésta bovedilla estaba sostenida por vigas de hierro fundido apoyadas en columnas también de fundición. Como se muestra en la Figura A.1.

Este tipo de pisos proporcionaba mayor resistencia al fuego, además de ser adecuado en muchos casos. Aunque presentaba graves limitaciones porque el hierro fundido tenía una resistencia a la tracción bastante escasa.

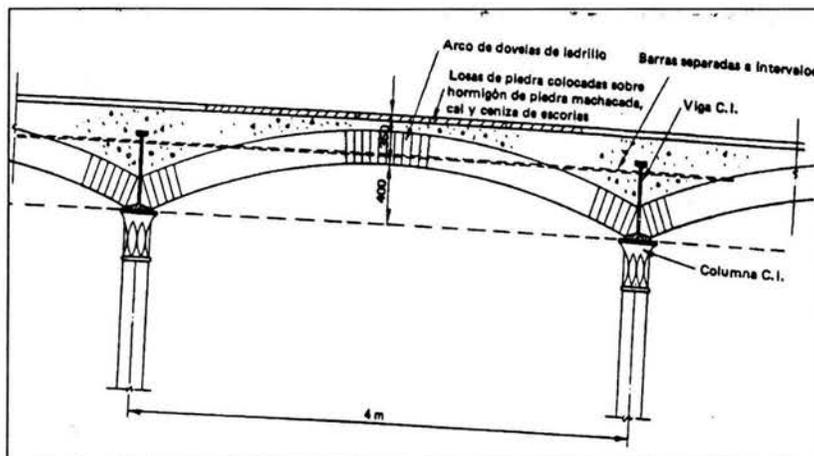


Figura. A.1. Tipo primitivo de piso industrial resistente al fuego. Escala 1:20  
FUENTE: Hale, Gordon. *Pavimentos*. Edit. Blume. España. 1976

Hacia a fines de este siglo se comienza con el acero dulce, el cual tenía una mayor resistencia a la tracción y soportaba mayor carga en los apoyos. Para disponer de pisos con gran resistencia al fuego fue necesario el emparrillado de vigas principales (o jaceneas) y secundarias soportadas por columnas de acero. A su vez las vigas secundarias soportaban viguetas de relleno de pequeña

sección con separaciones estrechas y soportando un relleno de hormigón, como se muestra en la Figura A.2.

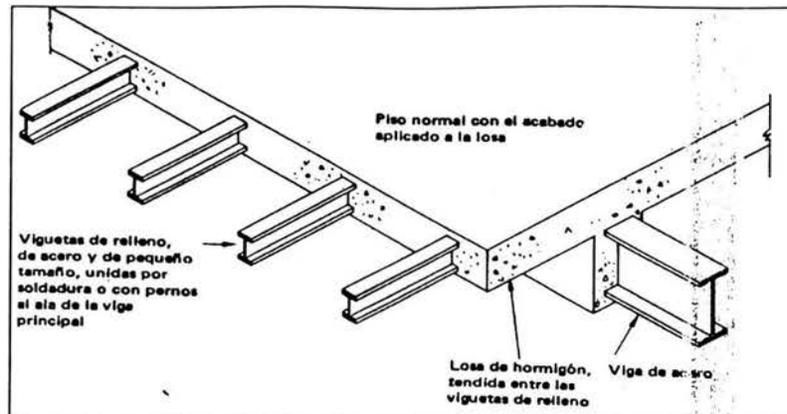


Figura. A.2. Piso resistente al fuego con viguetas rellenas  
FUENTE: Hale, Gordon. *Pavimentos*. Edit. Blume. España. 1976

El piso resultante era capaz de soportar cargas muy pesadas y los efectos del fuego durante varias horas según el espesor del hormigón que cubría el acero. Este tipo de pisos fueron utilizados por mucho tiempo y soportan cargas muy pesadas, aunque es más común emplear un piso de concreto armado con varillas de acero de diámetro relativamente pequeño y más económico.

Los pisos de madera se emplean mucho en la actualidad en edificios o zonas en donde la carga y el riesgo contra el fuego para los ocupantes, son pequeñas<sup>1</sup>.

En la actualidad generalmente hablando existen dos tipos de pavimentos, los rígidos y los flexibles. Los primeros, constan de una estructura que mantiene un contacto íntimo con las cargas y las distribuye a la subrasante, su estabilidad depende del entrelazamiento de los agregados, de la fricción de las partículas y de la cohesión. Sin embargo, ciertos pavimentos con superficie de asfalto pueden comportarse como rígidos, como los que tienen un espesor de asfalto, muy grueso, o bien aquellos donde la base está compuesta de agregados tratados de asfalto, cemento o cenizas ligeras de óxido de calcio.

En lugares donde se presentan heladas, el suelo de la subrasante es en extremo frágil, o en donde es necesaria la construcción de una plantilla de trabajo, puede usarse una sub-base de material granular o de material estabilizado.

Muchos organismos gubernamentales desarrollaron amplias investigaciones que condujeron al establecimiento de diferentes métodos de diseño.

El inicio de la construcción del sistema de carreteras en el año de 1956 aceleró grandemente los esfuerzos para mejorar los métodos de diseño de pavimentos. Las pruebas en carreteras de la AASHTO, para el diseño de pavimentos flexibles es uno de los programas experimentales más extenso en la historia de la construcción de carreteras. Una de las principales etapas de las pruebas en carreteras, la cual concluyó en 1961, se orientó a los pavimentos flexibles.

<sup>1</sup> Hale, Gordon. *Pavimentos*. Edit. Blume. España. 1976

La Interin Guide de la AASHTO, para el diseño de pavimentos flexibles se publicó por primera vez, en octubre de 1961. Con base en la revisión de esta guía, análisis y experiencias logradas a partir de esa fecha, en 1972 se publicó una nueva Interin Guide y en 1977 se reportó que 32 organismos estatales de carreteras utilizaron la guía directamente para el diseño de carreteras.

Los pavimentos rígidos son superficies resistentes de rodamiento construidas con concreto de cemento Pórtland, los cuales poseen una considerable resistencia a la flexión que les permitirá trabajar como viga y tender un puente sobre las irregularidades que se presentan en la base y las terracerías sobre la cual descansa, de ahí el término "rígido" aplicado a una base de concreto que soporta una capa de ladrillos o bloques<sup>2</sup>.

Cuando se diseñan y construyen de manera adecuada las calles y carreteras de concreto, éstas tienen capacidad para soportar cantidades casi ilimitadas de cualquier tipo de tránsito con comodidad, facilidad y seguridad. La superficie de éste tipo de pavimento es lisa, libres de polvo y resistentes al patinamiento, tiene un alto grado de visibilidad para vehículos tanto de día como de noche y sus costos de mantenimiento son bajos.

Una superficie de rodamiento de concreto con cemento Pórtland consta de una capa única de sección transversal uniforme que tiene un espesor de 15.25 a 28 cm. (6 a 11 in). Se puede construir una capa base nueva de concreto que sirva como un soporte para algunos de los diferentes tipos de carpetas asfálticas. En muchas áreas se han utilizado ampliamente los viejos pavimentos de concreto como base para nuevas carpetas asfálticas.

En años recientes, se ha progresado mucho en la creación de métodos más confiables de diseño estructural de pavimentos. Anteriormente, los procedimientos de diseño dependían mucho de juicios subjetivos de ingeniería basados en evaluaciones de comportamiento del pavimento en condiciones de servicio. A medida que se aprende más acerca de las propiedades mecánicas de la carpeta y la subrasante y la mecánica de fallas del pavimento, los ingenieros aplican procedimientos más racionales del diseño de pavimentos. Como es el Pavimento Permeable de Concreto (PPC), el cual es un pavimento en el que el componente principal de este pavimento es el concreto permeable, que es el responsable de permitir el transporte del agua y del aire a través de la estructura del pavimento.

En el proceso de comprobación de las características de resistencia y permeabilidad se han hecho múltiples pruebas de laboratorio y de campo en México y Estados Unidos, comprobándose las características técnicas del producto y sus ventajas de uso contra otros pavimentos normalmente usados, como los de asfalto, concreto o piezas prefabricadas, como los adocretos y adopastos.<sup>3</sup>

En la República Mexicana, la Secretaría de Obras Públicas del Departamento del Distrito Federal, a través de la Dirección de Pavimentos lo ha aprobado y lo recomienda para ser usado en obras nuevas como pavimento 100% permeable y así se ordena ya en algunas Delegaciones Políticas de la Ciudad, en donde se solicita pavimento de concreto permeable o concreto ecológico como especificación.

Finalmente se puede mencionar que los esfuerzos de los investigadores para depurar y mejorar la metodología de diseño de pavimentos conducirán a pavimentos más económicos y duraderos<sup>4</sup>.

---

<sup>2</sup> Olivera Bustamante, Fernando. Estructuración de Vías Terrestres. CECSA .México.1996.

<sup>3</sup> ECOCRETO. Garantía de agua para el futuro. <http://www.ecocreto.com.mx>. Obtenido el 14 de febrero de 2002 a las 10 horas.

<sup>4</sup> Rico, Alfonso. Del Castillo, Hermilo. "Ingeniería de suelos en las vías terrestres". Vol. 2. Edit. Limusa. México.1982

# INTRODUCCIÓN

Los seres humanos tienden a vivir en ciudades grandes con altas densidades demográficas. Para apoyar a estas poblaciones, las ciudades requieren infraestructuras extensas. Los bosques, los campos, los pantanos, etc., se han substituido por los edificios, los caminos, estacionamientos, etc. Tal urbanización cambia la hidrología natural del suelo. Con menos agua filtrada en el suelo, las corrientes y los ríos tienen volúmenes más altos de agua a incorporar a sus sistemas durante las tormentas.

Un método para solucionar problemas asociados al agua de lluvia, consiste en reducir el volumen de salida de lluvia substituyendo superficies y sistemas pavimentados impermeables, por el pavimento permeable. El pavimento anterior deja que el agua de la lluvia pase a través de la superficie pavimentada y llegue al suelo natural. El suelo como sistema natural de filtración es considerado uno de los agentes usados para que se alcancen fuentes de agua importantes. Este proceso reduce o elimina grandemente la necesidad y el costo de alcantarillas para agua de lluvia y de áreas de retención costosas. Además de que cumpla con el compromiso de fuerza, durabilidad e integridad de la estructura. Otra ventaja es en acuíferos, ya que el pavimento permeable recarga la fuente de agua y ayuda al ciclo natural del agua<sup>5</sup>.

Este tipo de pavimento ha estado en uso en Europa por cerca de 50 años. En los años 70's Gato Paine un ingeniero civil y varios otros miembros de la asociación del concreto y de Florida crearon un producto doméstico llamado "*pavimento permeable de concreto*". Este producto fue altamente adoptado en los Estados Unidos, particularmente en Florida.

El pavimento permeable se puede hacer de los materiales típicos para pavimentar, tales como asfalto y concreto. Estos sistemas requieren clasificar correctamente el sistema y algunos requieren un riguroso método de mantenimiento para conservar su porosidad.

El concreto permeable es una mezcla especial el cual está constituido de cemento, roca como agregado grueso, y agua. Una vez que esté seco, el pavimento obtiene una textura porosa que permite que el agua drene a través de él. El cual inspiró a acuñar la frase "*el pavimento que bebe el agua*."

La durabilidad del pavimento permeable se ha probado experimentalmente, resultando mejor que el resto de los materiales comunes a pavimentar. Siendo el agua el factor principal de deterioro y destrucción de caminos y estacionamientos. Las pruebas muestran que el pavimento permeable llega a ser más resistente y más estable cuando está mojado. Este es un factor significativo porque no se deteriora tan rápidamente como otros materiales a pavimentar.

Este pavimento tiene una mayor durabilidad y requiere substancialmente menos mantenimiento y reparación a largo plazo que el pavimento hecho de asfalto; el cual es normalmente más costoso, sobretodo por las reparaciones a realizar, siendo una ventaja significativa.

Los ahorros económicos realizados son el resultado del abatimiento en los costos tanto en la construcción de alcantarillas de agua de lluvia como de las áreas requeridas. El uso del pavimento

---

<sup>5</sup> Proactive Architecture PLLC. Design for the next generation. Obtenido el 19 de marzo de 2002 en <http://proactivearchitecture.com/water.htm>

permeable reduce o elimina la necesidad de estos sistemas y la administración del agua de lluvia es más confiable y constante, provocando que sea una alternativa económica y ambientalmente viable.

Las ventajas ambientales son significativas cuando se puede eliminar el escurrimiento de la lluvia, mediante su absorción. Ésta es la diferencia sustancial del pavimento permeable. *¡Absorbe el agua!* Como se muestra en la Figura I.1



Figura I.1. Pavimento permeable de concreto

FUENTE: *Cool Communities. Pervious pavements for a more livable environment.*  
Obtenido el 11 marzo de 2002 en [www.coolcommunities.org/cool\\_pavements](http://www.coolcommunities.org/cool_pavements)

Las investigaciones revelan que la mejor manera de sacar los agentes contaminantes del agua de lluvia es filtrarla a través de la tierra mientras se llena el acuífero. La capa de pavimento permeable absorbe y permite que esto ocurra libre y naturalmente sin tener que incorporar sistemas costosos de absorción de agua.

La erosión es otro problema común que se resuelve fácilmente como resultado de usar el pavimento permeable. El agua de lluvia se absorbe antes que ella pueda fluir y erosione la tierra.

El pavimento permeable es un producto natural y no contiene ningún producto químico dañino que podría lanzarse en el ambiente.

Su aceptación es cada vez mayor, además de que el pavimento permeable constituye una alternativa comercialmente potencial desde el punto de vista económico y ambiental.

Por eso la finalidad de este trabajo es la de dar a conocer el uso de los pavimentos permeables en nuestro medio, así como su diseño y su procedimiento constructivo. Además de analizar tanto sus ventajas como sus desventajas en relación con el uso de pavimentos convencionales.

# I. PAVIMENTOS

## **I.1. QUÉ ES UN PAVIMENTO**

El pavimento puede definirse como la capa o el conjunto de capas de materiales apropiados, comprendida(s) entre el nivel superior de la terracería y la superficie de rodamiento, cuyas principales funciones son proporcionar una superficie de rodamiento uniforme, de color y textura apropiados, resistente a la acción del tránsito, a la del intemperismo y otros agentes perjudiciales, así como transmitir adecuadamente a las terracerías los esfuerzos producidos por las cargas impuestas por el tránsito.

La estructura o la disposición de las capas que lo constituyen, así como las características de los materiales empleados en su construcción, ofrecen una gran variedad de posibilidades, de tal suerte que puede estar formado por una sola capa o, más comúnmente, por varias, y a su vez, dichas capas pueden ser de materiales naturales seleccionados, sometidos a muy diversos tratamientos. Su superficie de rodamiento propiamente dicha puede ser una carpeta asfáltica, una losa de concreto hidráulico o estar formada por acumulaciones de materiales pétreos compactados. De hecho, la actual tecnología contempla una gama muy diversa de secciones estructurales diferentes a elegir.

## **I.2. CLASIFICACIÓN DE PAVIMENTOS**

Con fines fundamentalmente prácticos, los pavimentos se dividen en rígidos y flexibles. Sin embargo la rigidez o flexibilidad que un pavimento exhibe no es fácil de definir tan adecuadamente como para permitir una diferenciación precisa entre uno y otro tipo de pavimento y es hasta cierto punto materia de juicio, el precisar que tan rígido puede ser un pavimento flexible o que tan flexible puede llegar a ser un pavimento rígido.

Los pavimentos se diferencian y definen en términos de los materiales de que están constituidos y de como se estructuran esos materiales y no por la forma en como distribuyen los esfuerzos y las deformaciones producidas por los vehículos a las capas inferiores, lo que constituirá un criterio de clasificación más acertada<sup>6</sup>.

### **I.2.1. Pavimento rígido**

Un pavimento rígido es aquel cuyo elemento fundamental es una losa de concreto hidráulico en la que se distribuyen las cargas de los vehículos hacia las capas inferiores por medio de toda la superficie de la losa y de las adyacentes que trabajan en conjunto con la que recibe directamente las cargas. Este tipo de pavimento no puede plegarse a las deformaciones de las capas inferiores sin que se presente la falla estructural. Aunque en teoría las losas de concreto hidráulico pueden colocarse en forma directa sobre la sub-rasante, es necesario construir una capa de sub-base para evitar que los finos sean bombeados hacia la superficie de rodamiento al pasar los vehículos, lo cual puede provocar fallas de esquina o de orilla de la losa. La sección transversal de un pavimento rígido está constituida por:

- losa de concreto
- sub-base

---

<sup>6</sup> Idem 4

Ambas apoyadas sobre la subrasante, como se puede apreciar en la Figura 1.1.

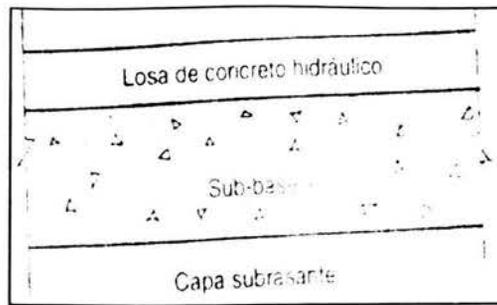


Figura 1.1. Estructura de un pavimento rígido  
 FUENTE: Olivera Bustamante, Fernando.  
 Estructuración de Vías Terrestres. CECSA .México.1996

### I.2.2. Pavimento flexible

Un pavimento flexible es una carpeta asfáltica, la cual proporciona la superficie de rodamiento. Las cargas de los vehículos hacia las capas inferiores se distribuyen por medio de las características de fricción y de cohesión de las partículas de los materiales y la carpeta asfáltica se pliega a pequeñas deformaciones de las capas inferiores sin que su estructura se rompa. Las capas que forman un pavimento flexible son:

- ✓ Carpeta asfáltica
- ✓ Base
- ✓ Sub-base

Estas capas se construyen sobre la capa subrasante<sup>7</sup>. Ver Figura 1.2.

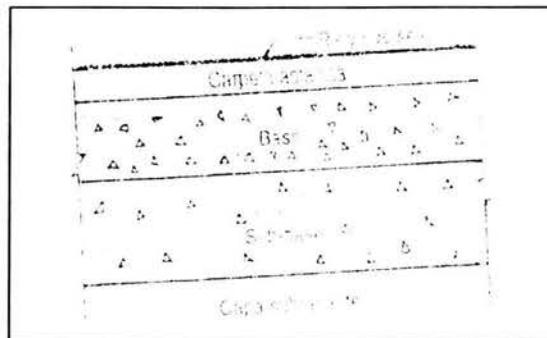


Figura 1.2. Estructura de un pavimento flexible  
 FUENTE: Estructuración de Vías Terrestres. Olivera Bustamante,  
 Fernando. CECSA .México.1996

<sup>7</sup> Idem 2

### I.3. DIFICULTADES DE LOS PAVIMENTOS

Las dificultades de orden específico son de varias clases.

1. No existe una solución teórica rigurosa al problema de los pavimentos. La distribución de esfuerzos y deformaciones no puede calcularse en un sistema multi-capas constituido de materiales térreos y sujeto a la acción dinámica de las cargas impuestas por el tránsito.
2. Están las insuperables desigualdades que actualmente presenta el valor de un modo razonable la acción de los agentes naturales del clima a los que todos los pavimentos quedan invariable e indefinidamente expuestos.
3. Las complicaciones que se introducen en el proyecto, por el gran número de variantes posibles en los criterios a adoptar. El tránsito es la carga que ha de soportar el pavimento y cuyos efectos, junto con los climáticos, deben quedar en niveles no destructivos. El tránsito varía en intensidad y número de vehículos, en calidad y peso de los mismos y es una carga móvil, repetida, causante de esfuerzos transitorios, deformaciones transitorias y permanentes, de efectos especiales relativamente poco conocidos, como la fatiga, el rebote elástico, etc. Todo lo cual complica, al grado de ser ilusorio, todo intento de definir en un pavimento una "condición de cargas exteriores", en el sentido en que puede llegarse a tal definición en otros campos de las estructuras.
4. Las propiedades de los materiales, que se traducen en ventajas e inconvenientes concretos. A ellos se agrega la extensa posibilidad de jugar con los espesores de las diferentes capas; un mayor espesor de un material barato de peor calidad puede sustituir, incluso con ventaja, a uno de menor espesor de mejor calidad pero más caro. Los límites de calidad de materiales van de la mano con el espesor utilizado, el cual varía de una capa a otra, de un clima a otro y de una topografía a otra.
5. La enorme variedad de circunstancias en que tal proyecto ha de efectuarse. Los factores económicos de costos, vida útil a considerar, definición de condiciones aceptables de servicio o de condiciones que ameriten compostura o reconstrucción, constituyen un complejo sistema en todo el panorama de decisión conectado con el proyecto y la construcción de los pavimentos.

Todos los criterios y variantes posibles han de examinarse, a fin de cuentas, dentro de un panorama económico que trascienda la consideración simplista de lo que es más barato o caro, debiéndose analizar toda la gama de factores sociales posibles conectados con la inversión pública y todas las consideraciones relativas al grado y calidad de servicio<sup>8</sup> que se espera de la estructura de pavimento.

### I.4. DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS

Las metodologías de diseño de pavimentos existentes son las más utilizadas a nivel internacional y son aplicables a los pavimentos convencionales y a las sobrecarpas de concreto<sup>9</sup>.

#### I.4.1. Método PCA (Portland Cement Association)

A continuación se describen los lineamientos generales del método del Portland Cement Association (PCA).

---

<sup>8</sup> Ibidem 4

<sup>9</sup> Cemex Concretos. *Pavimentos de concreto*. México. 2000

## a) FACTORES DE DISEÑO.

### 1.- Resistencia a la Flexión del Concreto.

La consideración de la resistencia a la flexión del concreto es aplicable en el procedimiento de diseño para el criterio de fatiga, que controla el agrietamiento del pavimento bajo la repetición de cargas.

El alabeo del pavimento de concreto bajo las cargas del tráfico provoca esfuerzos tanto de compresión como de flexión. Sin embargo la relación de los esfuerzos a compresión contra la resistencia a la compresión del concreto es mínima como para influir en el diseño de espesor de la losa. En cambio la relación de los esfuerzos a flexión contra la resistencia a la flexión del concreto es mucho más alta y frecuentemente excede valores de 0.5. Por este motivo los esfuerzos y la resistencia a la flexión son los empleados para el diseño de espesores. La resistencia a la flexión del concreto esta determinada por la prueba del modulo de ruptura, realizada en vigas de 6x6x30 pulgadas.

El modulo de ruptura puede encontrarse aplicando la carga en cantiliver, punto medio o en 3 puntos. Una diferencia importante en estos métodos de prueba es que al aplicar la carga en 3 puntos se obtiene la mínima resistencia del tercio medio de la viga de prueba, mientras que los otros 2 métodos dan la resistencia en un solo punto. El valor determinado por el método de aplicación de carga de 3 puntos (American Society for Testing and Materials, ASTM C78) es el empleado en este método de diseño<sup>10</sup>.

La prueba del modulo de ruptura es comúnmente realizada a los 7, 14, 28 y 90 días. Los resultados a los 7 y 14 días son comparados contra especificaciones de control de calidad y para determinar cuando puede ser abierto al tránsito un pavimento.

Los resultados a los 28 días se han usado generalmente para el diseño de espesores de autopistas y calles; mientras que los resultados a los 90 días son usados para el diseño de aeropistas, esto es debido a que se presentan muy pocas repeticiones de esfuerzos durante los primeros 28 o 90 días del pavimento comparado contra los millones de repeticiones de esfuerzos que ocurrirán posteriormente.

Sabemos que el concreto, continúa ganando resistencia con el paso del tiempo, como lo muestra la Figura 1.3. Esta ganancia de resistencia es mostrada en la curva que representa valores de modulo de ruptura (MR) promedios para varias series de pruebas de laboratorio, pruebas de vigas curadas en campo y secciones de concreto tomadas de pavimentos en servicio.

En este procedimiento de diseño los efectos de las variaciones en la resistencia del concreto de punto a punto del pavimento y el incremento de resistencia con el paso del tiempo están incorporados en las gráficas y tablas de diseño. El diseñador no aplica directamente estos efectos, sino que simplemente ingresa el valor de la resistencia promedio a los 28 días, que en nuestro país se recomienda como mínimo 41 kg/cm<sup>2</sup> (583 psi) y como máximo 50 kg/cm<sup>2</sup> (711 psi).

---

<sup>10</sup> Para una viga estándar de 30", los valores de la prueba aplicando a la carga en el punto central serán de aproximadamente 75 psi más altos, y si se aplica la carga en cantiliver los valores serán de aproximadamente 160 psi más altos que aplicando la carga en 3 puntos. No se recomienda usar estos valores altos para propósitos de diseño. Si se usan otros métodos de prueba se deberá hacer un ajuste de reducción estableciendo una correlación a los resultados de la prueba aplicando la carga en 3 puntos.

## 2.- Terreno de Apoyo o Base.

El soporte dado a los pavimentos de concreto por la base y la sub-base, es el segundo factor en el diseño de espesores. El terreno de apoyo esta definido en términos del modulo de reacción de la subrasante de Westergaard (k). Es igual a la carga en libras por pulgada cuadrada de un área cargada (un plato de 30" de diámetro) dividido entre la deformación en pulgadas que provoca dicha carga. Los valores de k son expresados como libras por pulgada cuadrada por pulgada (psi / in) o más comúnmente, por libras por pulgada cúbica (pci).

La Figura 1.4 muestra un esquema de la prueba de placa regulada por la norma ASTM D1195 y D1196.

Dado que la prueba de placa lleva tiempo y dinero, los valores de k son usualmente estimados mediante correlación con pruebas más simples como la del VRS (Valor Relativo de Soporte). Esta estimación es suficiente ya que no se requiere una exacta determinación del valor k; variaciones normales del valor k no afectan significativamente los requerimientos del espesor del pavimento. La relación mostrada en la Figura 1.5., es correcta para estos propósitos.

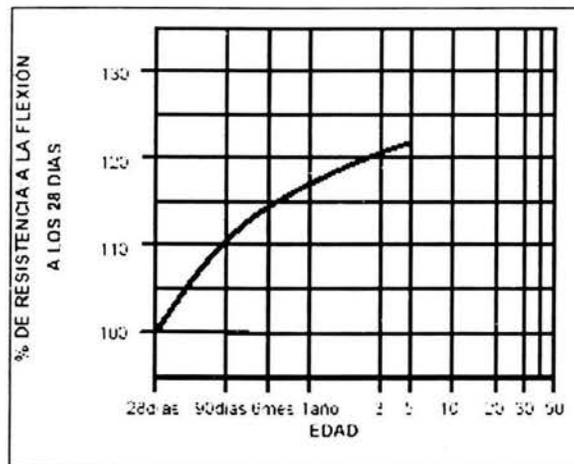


Figura 1.3. Curva de desarrollo de resistencia a la flexión a través del tiempo.  
FUENTE: Pavimentos de concreto. CEMEX Concretos

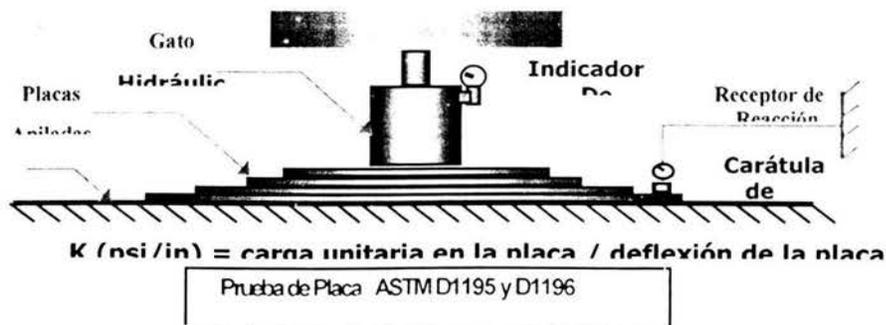


Figura 1.4. Prueba de Placa (ASTM D1195 y D1196).  
FUENTE: Pavimentos de concreto. CEMEX Concretos

La prueba de caminos AASHTO comprobó convincentemente que la reducción de la capacidad de soporte del suelo durante los períodos de descongelamiento no tiene ningún o muy poco efecto en el espesor requerido de los pavimentos de concreto. Esto es cierto por que los pocos períodos en que los valores de  $k$  son bajos durante el descongelamiento de la primavera se compensan con los largos períodos en que se congelan y los valores de  $k$  son mucho mayores que los asumidos para el diseño.

Para evitar métodos tediosos que requieren de diseño para las variaciones de  $k$  en las épocas del año, los valores recomendables como valores promedio son los de verano u otoño.

El contar con una sub-base permite incrementar en parte el valor de  $k$  del suelo que deberá usarse en el diseño de espesor. Si la base es de material granular no tratada o mejorada el incremento puede no ser muy significativo como se aprecia en los valores presentados en la Tabla 1.1.

Los valores mostrados en la Tabla 1.1 están basados en el análisis de Burmister de un sistema de dos capas y cargado en pruebas de placa hechas para determinar los valores  $k$  del conjunto suelo-subbase en losas de prueba completas.

Las bases mejoradas o tratadas con cemento aportan mayor capacidad de carga y su comportamiento a largo plazo es mucho mejor y son ampliamente empleadas para pavimentos de concreto con tráfico pesado. Se construyen con materiales granulares como los tipos de suelos AASHTO A-1, A-2-4, A-2-5 y A-3, el contenido de cemento es determinado mediante las pruebas de Congelación-Descongelación y Mojado-Secado y el criterio de pérdidas admisibles de la PCA.

Los valores de diseño de modulo de sub-reacción ( $k$ ) para bases cementadas que cumplen con éste criterio se muestran en la Tabla 1.2.

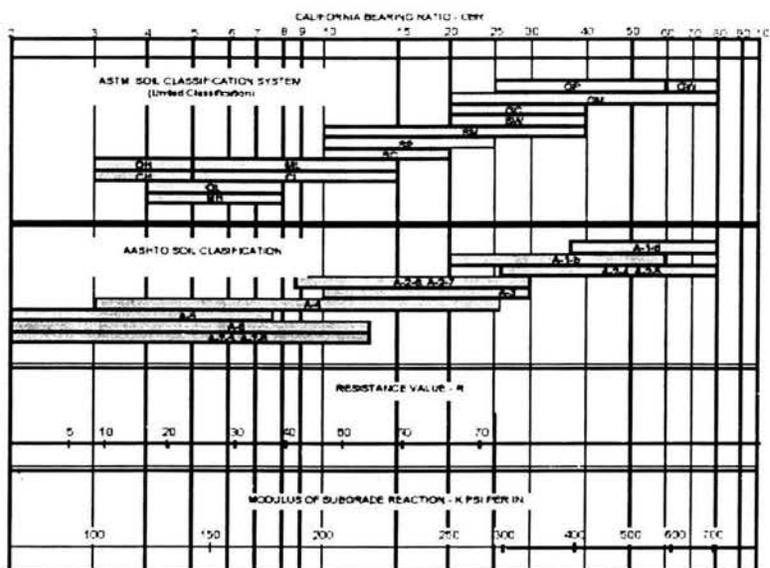


Figura 2.5-3 Relación aproximada entre las clasificaciones del suelo y sus valores de resistencia.

Figura 1.5. Relación aproximada entre las clasificaciones del suelo y sus valores de resistencia

FUENTE: Pavimentos de concreto. CEMEX Concretos

k Suelo - Sub-base (pci)				
k del Suelo (pci)	Espesor de la sub-base			
	4"	6"	8"	12"
50	65	75	85	110
100	130	140	160	190
200	220	230	270	320
300	320	330	370	430

Tabla 1.1. Incremento en el valor de k del suelo, según el espesor de una base granular  
FUENTE: Pavimentos de concreto. CEMEX Concretos

k Suelo - Subbase (pci)				
k del Suelo (pci)	Espesor Subbase			
	4"	6"	8"	10"
50	170	230	310	390
100	280	400	520	640
200	470	640	830	

Tabla 1.2. Incremento en el valor de k del suelo, según el espesor de una base granular cementada.  
FUENTE: Pavimentos de concreto. CEMEX Concretos

### 3- Período de Diseño.

El término de período de diseño es algunas veces considerado sinónimo del término período de análisis de tráfico. Dado que el tráfico muy probablemente no puede ser supuesto con precisión por un período muy largo, el período de diseño de 20 años es el comúnmente empleado en el procedimiento de diseño de pavimentos.

El período de diseño seleccionado afecta el espesor de diseño ya que determina por cuantos años y por ende cuantos camiones deberá servir el pavimento.

### 4- Número de repeticiones esperadas para cada eje.

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

#### Repeticiones Esperadas.

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

Donde:

TPDA = Tránsito Promedio Diario Anual.  
 % Te = % del TPDA para cada tipo de eje.  
 FS = Factor de Sentido.  
 FC = Factor de Carril.  
 Pd = Período de Diseño.

FCA = Factor de Crecimiento Anual.  
365 = días de un año.

### Tránsito promedio diario anual (TPDA)

El TPDA puede obtenerse de aforos especializados o de algún organismo relacionado con el transporte, ya sea municipal, estatal o federal. Lo importante es que se especifique la composición de este tráfico, es decir que se detalle el tráfico por tipo de vehículo, para que de esta manera se pueda identificar los tipos y pesos de los ejes que van a circular sobre el pavimento.

El método de diseño de la PCA recomienda que se considere únicamente el tráfico pesado, es decir que se desprece todo el tráfico ligero como automóviles y pick-ups de 4 llantas. Sin embargo, no es tan importante el hacer caso a esta recomendación debido a que el tráfico ligero no influye demasiado en el diseño de espesores.

### Factor de Crecimiento Anual (FCA)

Para conocer el factor de crecimiento anual se requiere únicamente del período de diseño en años y de la tasa de crecimiento anual. Con estos datos podemos saber el factor de crecimiento de manera rápida con la ayuda de la Tabla 1.3 que presenta relaciones entre tasas de crecimiento anual y factores de crecimiento anual para períodos de diseño de 20 y 40 años.

Si se desea obtener el factor de crecimiento anual del tráfico (FCA) de manera más exacta, se puede obtener a partir de la siguiente fórmula:

$$FC = \frac{(1 + g)^n - 1}{(g)(n)}$$

Donde:

FC = Factor de Crecimiento Anual.  
n = Vida útil en años.  
g = Tasa de crecimiento anual, en %

En un problema de diseño el factor de proyección se multiplica por el TPDA presente para obtener el TPDA de diseño representando el valor promedio para el período de diseño.

Los siguientes factores influyen en las tasas de crecimiento anual y proyecciones de tráfico:

1. *El tráfico atraído o desviado.* El incremento del tráfico existente debido a la rehabilitación de algún camino existente.
2. *Crecimiento normal de tráfico.* El crecimiento normal provocado por el incremento del número de vehículos.
3. *Tráfico generado.* El incremento provocado por los vehículos que no circularían por la vía si la nueva obra no se hubiese construido.
4. *Tráfico por desarrollo.* El incremento provocado por cambios en el uso del suelo debido a la construcción de la nueva obra.

TASAS DE CRECIMIENTO ANUAL DE TRAFICO Y SUS CORRESPONDIENTES FACTORES DE CRECIMIENTO		
TASA DE CRECIMIENTO ANUAL DEL TRAFICO, %	FACTOR DE CRECIMIENTO ANUAL PARA 20 AÑOS	FACTOR DE PROYECCIÓN ANUAL PARA 40 AÑOS
1	1.1	1.2
1 ½	1.2	1.3
2	1.2	1.5
2 ½	1.3	1.6
3	1.3	1.6
3 ½	1.4	2.0
4	1.5	2.2
4 ½	1.6	2.4
5	1.6	2.7
5 ½	1.7	2.9
6	1.8	3.2

Tabla 1.3. Factores de Crecimiento Anual, según la tasa de crecimiento anual.

FUENTE: Pavimentos de concreto. CEMEX Concretos

Los efectos combinados provocan tasas de crecimiento anual de 2 al 6%. Estas tasas corresponden como se muestra en la Tabla 1.3 a factores de crecimiento del tráfico de 1.2 a 1.8, diseñando a 20 años.

#### Factor de Sentido.

El factor de sentido se emplea para diferenciar las vialidades de un sentido de las de doble sentido, de manera que para vialidades en doble sentido se utiliza un factor de sentido de 0.5 y para vialidades en un solo sentido un factor de 1.0

En el caso de vialidades de doble sentido generalmente se asume que el tránsito (en sus diferentes tipos y pesos) viaja en igual cantidad para cada dirección (FS=0.5). Sin embargo, esto puede no aplicar en algunos casos especiales en que muchos de los camiones viajan cargados en una dirección y regresan vacíos, si éste es el caso, se deberá hacer el ajuste apropiado y tomar en cuenta el sentido con mayor tráfico.

#### Factor de Carril.

Después de verse afectado el tráfico por el factor de sentido, también debemos de analizar el número de carriles por sentido mediante el factor de carril. El factor de carril nos va a dar el porcentaje de vehículos que circulan por el carril de la derecha, que es el carril con más tráfico. Para esto, la PCA recomienda emplear la Figura 1.6. en donde este factor depende del número de carriles por sentido o dirección del tráfico y del tránsito promedio diario anual en un solo sentido.

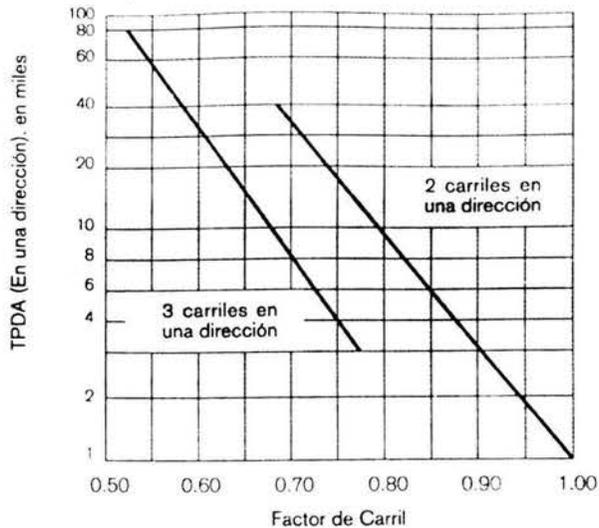


Figura 1.6. Proporción de Vehículos circulando por el carril de baja velocidad en una vialidad de 2 o 3 carriles.  
 FUENTE: Pavimentos de concreto. CEMEX Concretos

### 5- Factor de Seguridad de Carga.

Una vez que se conoce la distribución de carga por eje, es decir ya que se conoce cuantas repeticiones se tendrán para cada tipo y peso de eje, se utiliza el factor de seguridad de carga para multiplicarse por las cargas por eje.

Los factores de seguridad de carga recomendados son:

- 1.3 Casos especiales con muy altos volúmenes de tráfico pesado y cero, mantenimiento.
- 1.2 Para Autopistas o vialidades de varios carriles en donde se presentará un flujo ininterrumpido de tráfico y altos volúmenes de tráfico pesado.
- 1.1 Autopistas y vialidades urbanas con volúmenes moderados de tráfico pesado.
- 1.0 Caminos y calles secundarias con muy poco tráfico pesado.

### b) PROCEDIMIENTO DE DISEÑO.

El método descrito en esta sección es empleado una vez que ya tenemos los datos del tráfico esperado, como lo es el tránsito diario promedio anual, la composición vehicular del tráfico y de esta información obtenemos el número de repeticiones esperadas para cada tipo de eje durante el período de diseño.

En la Figura 1.7 se presenta una gráfica empleada para el diseño de pavimentos, el cuál requiere de conocer algunos factores de diseño, como:

- ☞ Tipo de junta y acotamiento.
- ☞ Resistencia a la flexión del concreto (MR) a 28 días.
- ☞ El valor del modulo de reacción K del terreno de apoyo.
- ☞ Factor de seguridad de la carga (LSF)
- ☞ Número de repeticiones esperadas durante el período de diseño, para cada tipo y peso de eje.

El método considera dos criterios de diseño:

Fatiga  
Erosión

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

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

Para pavimentos que tienen una mezcla normal de pesos de ejes, las cargas en los ejes sencillos son usualmente más severas en el análisis por fatiga y las cargas en ejes tandem son más severas en el análisis por erosión.

El diseño del espesor se calcula por tanteos con ayuda del formato de diseño de espesores por el método de la PCA que se presenta en la Tabla 1.4. Los pasos en el procedimiento de diseño son como siguen: primero cargamos los datos de entrada que se presentan en la Tabla 1.4 (Columna 1 a la 3), los datos de la columna 2 son las cargas por eje multiplicadas por el factor de seguridad de carga.

#### Análisis por Fatiga.

Se emplean las mismas tablas y figuras para pavimentos con o sin pasajuntas, mientras que la única variable es si se cuenta o no con apoyo lateral, de manera que:

Sin apoyo lateral.

Use la tabla 1.5. y la Figura 1.7.

Con apoyo lateral.

Use la tabla 1.6. y la Figura 1.7.

Procedimiento:

1. Introducir como datos los valores de esfuerzo equivalente en las celdas 8, 11, 14 del formato de diseño de espesores. Estos valores se obtienen de las tablas apropiadas de factores de esfuerzos equivalentes (Tablas 1.5 y 1.6), dependiendo del espesor inicial y el valor de  $k$ .
2. Dividir los valores de esfuerzo equivalente entre el módulo de ruptura del concreto, al resultado le llamamos relación de esfuerzos y vamos a obtener una para cada tipo de eje (sencillo, tandem y tridem). Estos valores los anotamos en el formato de diseño de espesores (Tabla 1.4) en las celdas 9, 12 y 15.
3. Llenar la columna 4 de "repeticiones permisibles" obtenidas en la Figura 1.7.
4. Obtener el % de fatiga de cada eje. El % de fatiga se anota en la columna 5 y se obtiene dividiendo las repeticiones esperadas (columna 3) entre las repeticiones permisibles (columna 4) por 100; esto se hace para cada eje y posteriormente se suman todos los porcentajes de daño por fatiga para obtener el porcentaje total de daño por fatiga.

### Análisis por Erosión.

Sin apoyo lateral.

- ✓ Para pavimentos con pasajuntas, emplear la Tabla 1.7. y la Figura 1.8.
- ✓ En los pavimentos en que la transferencia de carga se realiza exclusivamente mediante la trabazón de los agregados, use la Tabla 1.8 y la Figura 1.8.

Con apoyo lateral.

- ✓ Para pavimentos con pasajuntas o con refuerzo continuo, emplear la Tabla 1.9 y la Figura 1.9.
- ✓ En los pavimentos en que la transferencia de carga se realiza exclusivamente mediante la trabazón de los agregados, use la Tabla 1.10. y la Figura 1.9.

Procedimiento:

- ✓ Anote en las celdas 10,13 y 16 del formato de diseño de espesores, los correspondientes factores de erosión obtenidos de las tablas adecuadas (Tablas 1.7 a 1.10.)
- ✓ Calcule las “repeticiones permisibles” con ayuda de la Figura 1.8 y la Figura 1.9, y anótelos en la columna 6 del formato de diseño de espesores.
- ✓ Calcule el porcentaje de daño por erosión (columna 7) para cada eje dividiendo las repeticiones esperadas (columna 3) entre las repeticiones permitidas (columna 6) y multiplicando el resultado por 100, para posteriormente totalizar el daño por erosión. Al emplear las gráficas, no es necesaria una exacta interpolación de las repeticiones permisibles. Si la línea de intersección corre por encima de la parte superior de la gráfica, se considera que las repeticiones de carga permisibles son ilimitadas.

## CÁLCULO DE ESPESOR DEL PAVIMENTO

PROYECTO: Diseño inter-estatal de 4 carriles.  
 ESPESOR INICIAL:  
 MÓDULO DE REACCIÓN K, DE LA SUBRASANTE:  
 MÓDULO DE RUPTURA, MR:  
 FACTOR DE SEGURIDAD DE CARGA, LSF:

9.5 in.  
130 pci  
650 psi  
1.2

PASAJUNTAS: SI  NO   
 APOYO LATERAL: SI  NO   
 PERIODO DE DISEÑO (AÑOS): 20  
 COMENTARIOS: 4" de base cementada

Carga del eje, en kips	Multiplicada por LSF	Repeticiones Esperadas	Análisis de Fatiga		Análisis de Erosión	
			Repeticiones Permisibles (FIG. 2.5.5)	% de Fatiga	Repeticiones Permisibles (FIG. 2.5.6 ó 2.5.7)	% de Daño
1	2	3	4	5	6	7

8. Esfuerzo equivalente

206

10. Factor de Erosión

2.59

9. Factor de relación de esfuerzo

0.317

## Ejes Sencillos

30	36.0	6,310	27,000	23.4	1,500,000	0.4
28	33.6	14,690	77,000	19.1	2,200,000	0.7
26	31.2	30,140	230,000	13.1	3,500,000	0.9
24	28.8	64,410	1,200,000	5.4	5,900,000	1.1
22	26.4	106,900	ilimitado	0	11,000,000	1.0
20	24.0	235,800	ilimitado	0	23,000,000	1.0
18	21.6	301,200	ilimitado	0	64,000,000	0.5
16	19.2	422,500	ilimitado	0	ilimitado	0
14	16.8	586,900	ilimitado	0	ilimitado	0
12	14.4	1,837,000	ilimitado	0	ilimitado	0

11. Esfuerzo equivalente

192

13. Factor de Erosión

2.79

12. Factor de relación de esfuerzo

0.295

## Ejes Tandem

52	62.4	21,320	1,100,000	1.9	920,000	0.4
48	57.6	42,870	ilimitado	0	1,500,000	0.7
44	52.8	124,900	ilimitado	0	2,500,000	0.9
40	48.0	372,900	ilimitado	0	4,600,000	1.1
36	43.2	885,800	ilimitado	0	9,500,000	1.0
32	38.4	930,100	ilimitado	0	24,000,000	1.0
28	33.6	1,656,000	ilimitado	0	92,000,000	0.5
24	28.8	984,900	ilimitado	0	ilimitado	0
20	24.0	1,227,000	ilimitado	0	ilimitado	0
16	19.2	1,356,000	ilimitado	0	ilimitado	0

14. Esfuerzo equivalente

147

16. Factor de Erosión

2.95

15. Factor de relación de esfuerzo

0.226

## Ejes Tridem

54/3=18	21.6	250,000	ilimitado	0	2,600,000	9.6
---------	------	---------	-----------	---	-----------	-----

**TOTAL 62.9****TOTAL 48.3**

Tabla 1.4. Formato para el diseño de espesores por el método PCA  
 FUENTE: Pavimentos de concreto. CEMEX Concretos

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																				
	50			100			150			200			300			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	825	679	510	726	585	456	671	542	437	634	516	428	584	486	419	523	457	414	484	443	412
4.5	699	566	439	616	500	380	571	460	359	540	435	349	498	406	339	488	378	331	417	363	328
5.0	602	516	387	531	436	328	493	399	305	467	376	293	432	349	282	390	321	272	363	307	269
5.5	526	461	347	464	387	290	431	353	266	409	331	253	379	305	240	343	278	230	320	264	226
6.0	465	416	315	411	348	261	382	316	237	362	296	223	336	271	209	304	246	198	285	232	193
6.5	417	380	289	367	317	238	341	286	214	314	267	201	300	244	186	273	220	173	256	207	168
7.0	375	349	267	331	290	219	307	262	196	292	244	183	272	222	167	246	199	154	231	186	148
7.5	340	323	247	300	268	203	279	241	181	265	224	168	246	203	153	224	181	139	210	169	132
8.0	311	300	230	274	249	189	255	223	168	242	208	156	225	188	141	205	167	126	192	155	120
8.5	285	281	215	252	232	117	234	208	158	222	193	145	206	174	131	188	154	116	177	143	109
9.0	264	264	200	232	218	166	216	195	148	205	181	136	190	163	122	174	144	108	163	133	101
9.5	245	248	187	215	205	157	200	183	140	190	170	129	176	153	115	161	134	101	151	124	93
10.0	228	235	174	200	193	148	186	173	132	177	160	122	164	144	108	150	126	95	141	117	87
10.5	213	222	163	187	183	140	174	164	125	165	151	115	153	136	103	140	119	89	132	110	82
11.0	200	211	153	175	174	132	163	155	119	154	143	110	144	129	98	131	113	85	123	104	78
11.5	188	201	142	165	165	125	153	148	113	145	136	104	135	122	93	123	107	80	116	98	74
12.0	177	192	133	155	158	119	144	141	108	137	130	100	127	116	89	116	102	77	109	93	70
12.5	168	183	123	147	151	113	136	135	103	129	124	95	120	111	85	109	97	73	103	89	67
13.0	159	176	114	139	144	107	129	129	98	122	119	91	113	106	81	103	93	70	97	85	64
13.5	152	168	105	132	138	101	122	123	93	116	114	87	107	102	78	98	89	67	92	81	64
14.0	144	162	97	125	133	96	116	118	89	110	109	83	102	98	75	93	85	65	88	78	59

Tabla 1.5. Esfuerzo equivalente para pavimentos sin apoyo lateral.

FUENTE: Pavimentos de concreto. CEMEX Concretos

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																				
	50			100			150			200			300			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	640	534	431	559	468	392	517	439	377	489	422	369	452	403	362	409	388	360	383	384	359
4.5	547	461	365	479	400	328	444	371	313	421	356	305	390	338	297	355	322	292	333	316	291
5.0	475	404	317	417	349	281	387	323	266	367	308	258	341	290	250	311	274	244	294	267	242
5.5	418	360	279	366	309	246	342	285	231	324	271	223	302	254	214	275	238	208	261	231	206
6.0	372	325	249	327	277	218	304	255	204	289	241	196	270	225	187	247	210	180	234	203	178
6.5	334	295	225	294	251	196	274	230	183	260	218	175	243	203	166	223	180	159	212	180	156
7.0	302	270	204	266	230	178	248	210	165	236	198	158	220	184	149	203	170	142	192	162	138
7.5	275	250	187	243	211	162	226	193	151	215	182	143	201	168	135	185	155	127	176	148	124
8.0	252	232	172	222	196	149	207	179	138	197	168	131	185	155	123	170	142	116	162	135	112
8.5	232	216	159	205	182	138	191	166	128	182	156	121	170	144	113	157	131	106	150	125	102
9.0	215	202	147	190	171	128	177	155	119	169	146	112	158	134	105	146	122	98	139	116	94
9.5	200	190	134	176	160	120	164	146	111	157	137	105	147	126	98	136	114	91	129	108	87
10.0	186	179	127	164	151	112	153	137	104	146	129	98	137	118	91	127	107	84	121	101	81
10.5	174	170	119	154	143	105	144	130	97	137	121	92	128	111	86	119	101	79	113	95	76
11.0	164	161	111	144	135	99	135	123	92	129	115	87	120	105	81	112	95	74	106	90	71
11.5	154	153	104	136	128	93	127	117	86	121	109	82	113	100	76	105	90	70	100	85	67
12.0	145	146	97	128	122	88	120	111	82	114	104	78	107	95	72	99	86	66	95	81	63
12.5	137	139	91	121	117	83	113	106	78	108	99	74	101	91	68	94	82	63	90	77	60
13.0	130	133	85	115	112	79	107	101	74	102	95	70	96	86	65	89	78	60	85	73	57
13.5	124	124	80	109	107	75	102	97	70	97	91	67	91	83	62	85	74	57	81	70	54
14.0	118	122	75	104	103	71	97	93	67	93	87	63	87	79	59	81	71	54	77	67	51

Tabla 1.6. Esfuerzo equivalente para pavimentos con apoyo lateral.

FUENTE: Pavimentos de concreto. CEMEX Concretos

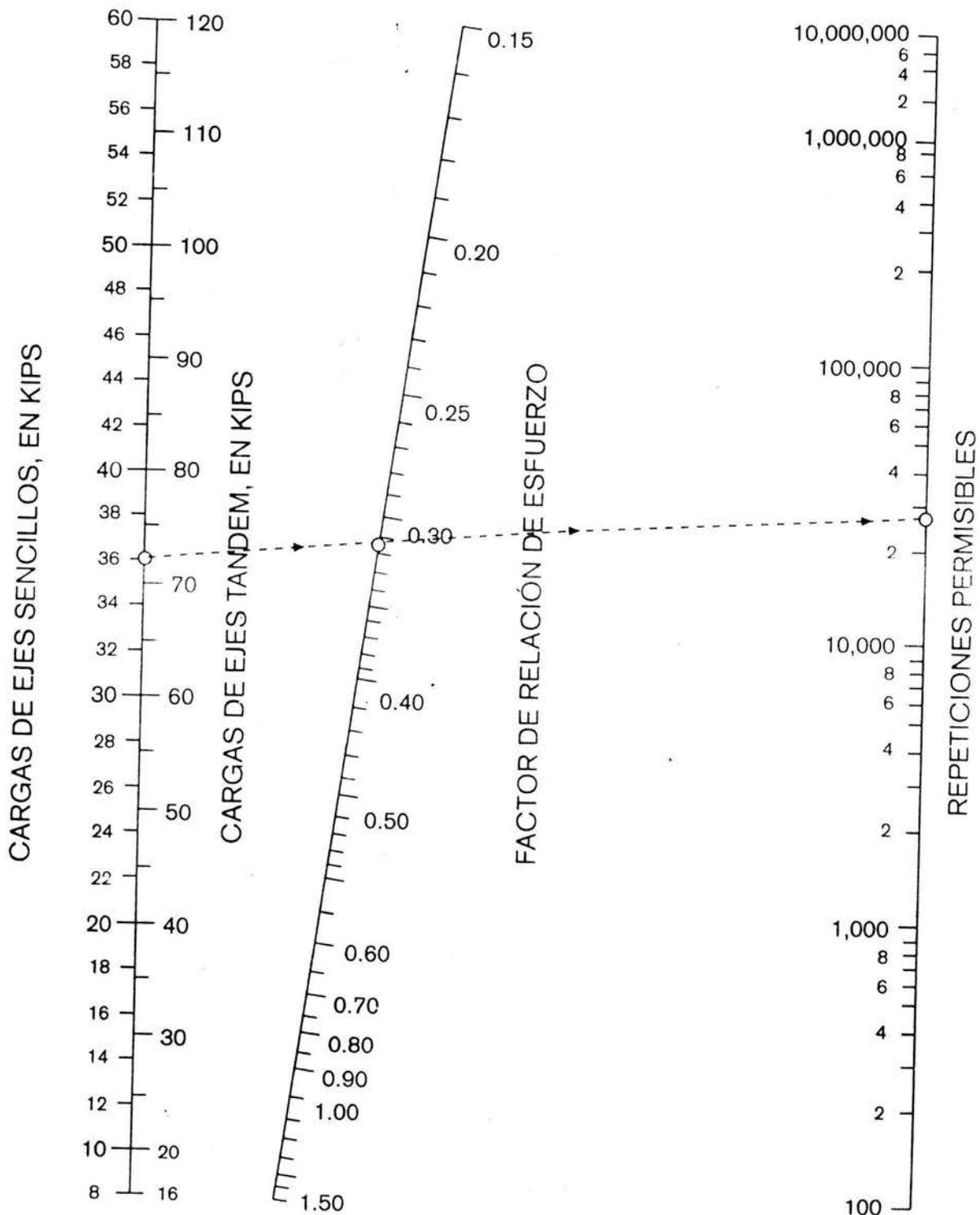


Figura 1.7. Análisis de fatiga (repeticiones permisibles basadas en el factor de relación de esfuerzo, con o sin apoyo lateral)

FUENTE: Pavimentos de concreto. CEMEX Concretos

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																	
	50			100			200			300			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	3.74	3.83	3.89	3.73	3.79	3.82	3.72	3.75	3.75	3.71	3.73	3.70	3.70	3.70	3.61	3.68	3.67	3.53
4.5	3.59	3.70	3.78	3.57	3.65	3.69	3.56	3.61	3.62	3.55	3.58	3.57	3.54	3.55	3.50	3.52	3.53	3.44
5.0	3.45	3.58	3.68	3.43	3.52	3.58	3.42	3.48	3.50	3.41	3.45	3.46	3.40	3.42	3.40	3.38	3.40	3.34
5.5	3.33	3.47	3.59	3.31	3.41	3.49	3.29	3.36	3.40	3.28	3.33	3.36	3.27	3.30	3.30	3.26	3.28	3.25
6.0	3.22	3.38	3.51	3.19	3.31	3.40	3.18	3.26	3.31	3.17	3.23	3.26	3.15	3.20	3.21	3.14	3.17	3.16
6.5	3.11	3.29	3.44	3.09	3.22	3.33	3.07	3.16	3.23	3.06	3.13	3.18	3.05	3.10	3.12	3.03	3.07	3.08
7.0	3.02	3.21	3.37	2.99	3.14	3.26	2.97	3.08	3.16	2.96	3.05	3.10	2.95	3.01	3.04	2.94	2.98	3.00
7.5	2.93	3.14	3.31	2.71	3.06	3.20	2.88	3.00	3.09	2.87	2.97	3.03	2.86	2.93	2.97	2.84	2.90	2.93
8.0	2.85	3.07	3.26	2.82	2.99	3.14	2.80	2.93	3.03	2.79	2.89	2.97	2.77	2.85	2.90	2.76	2.82	2.86
8.5	2.77	3.01	3.20	2.74	2.93	3.09	2.72	2.86	2.97	2.71	2.82	2.91	2.69	2.78	2.84	2.68	2.75	2.79
9.0	2.70	2.96	3.15	2.67	2.87	3.04	2.65	2.80	2.92	2.63	2.76	2.86	2.62	2.71	2.78	2.61	2.68	2.73
9.5	2.63	2.90	3.11	2.60	2.81	2.99	2.58	2.74	2.87	2.56	2.70	2.81	2.55	2.65	2.73	2.54	2.62	2.68
10.0	2.56	2.85	3.06	2.54	2.76	2.94	2.51	2.68	2.83	2.50	2.64	2.76	2.48	2.59	2.68	2.47	2.56	2.63
10.5	2.50	2.81	3.02	2.47	2.71	2.90	2.45	2.63	2.78	2.44	2.59	2.72	2.42	2.54	2.64	2.41	2.51	2.58
11.0	2.44	2.76	2.98	2.42	2.67	2.86	2.39	2.58	2.74	2.38	2.54	2.68	2.36	2.49	2.59	2.35	2.45	2.54
11.5	2.38	2.72	2.94	2.36	2.62	2.82	2.33	2.54	2.70	2.32	2.49	2.64	2.30	2.44	2.55	2.29	2.40	2.50
12.0	2.33	2.68	2.91	2.30	2.58	2.79	2.28	2.49	2.67	2.26	2.44	2.60	2.25	2.39	2.51	2.23	2.36	2.46
12.5	2.28	2.64	2.87	2.25	2.54	2.75	2.23	2.45	2.63	2.21	2.40	2.56	2.19	2.35	2.48	2.18	2.31	2.42
13.0	2.23	2.61	2.84	2.20	2.50	2.72	2.18	2.41	2.60	2.16	2.36	2.53	2.14	2.30	2.44	2.13	2.27	2.39
13.5	2.18	2.57	2.81	2.15	2.47	2.68	2.13	2.37	2.56	2.11	2.32	2.49	2.09	2.26	2.41	2.08	2.23	2.35
14.0	2.13	2.54	2.78	2.11	2.43	2.65	2.08	2.34	2.53	2.07	2.29	2.46	2.05	2.23	2.38	2.03	2.19	2.32

Tabla 1.7. Factores de erosión, para pavimentos con pasajuntas y sin apoyo lateral.

FUENTE: Pavimentos de concreto. CEMEX Concretos

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																	
	50			100			200			300			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	3.94	4.03	4.06	3.91	3.95	3.97	3.88	3.89	3.88	3.86	3.86	3.82	3.82	3.83	3.74	3.77	3.80	3.67
4.5	3.79	3.91	3.95	3.76	3.82	3.85	3.73	3.75	3.76	3.71	3.72	3.70	3.68	3.68	3.63	3.64	3.65	3.56
5.0	3.66	3.91	3.85	3.63	3.72	3.75	3.60	3.64	3.66	3.58	3.60	3.60	3.55	3.55	3.52	3.52	3.52	3.46
5.5	3.54	3.72	3.76	3.51	3.62	3.66	3.48	3.53	3.56	3.46	3.49	3.51	3.43	3.44	3.43	3.41	3.40	3.37
6.0	3.44	3.64	3.68	3.40	3.53	3.58	3.37	3.44	3.48	3.35	3.40	3.42	3.32	3.34	3.35	3.30	3.30	3.29
6.5	3.34	3.56	3.61	3.30	3.46	3.50	3.26	3.36	3.40	3.25	3.31	3.34	3.22	3.25	3.27	3.20	3.21	3.21
7.0	3.26	3.49	3.54	3.21	3.39	3.43	3.17	3.29	3.33	3.15	3.24	3.27	3.13	3.17	3.20	3.11	3.13	3.14
7.5	3.18	3.43	3.48	3.13	3.32	3.37	3.09	3.22	3.26	3.07	3.17	3.20	3.04	3.10	3.13	3.02	3.06	3.08
8.0	3.11	3.37	3.42	3.05	3.26	3.31	3.01	3.16	3.20	2.99	3.10	3.14	2.96	3.03	3.07	2.94	2.99	3.01
8.5	3.04	3.32	3.37	2.98	3.21	3.25	2.93	3.10	3.15	2.91	3.04	3.09	2.88	2.97	3.01	2.87	2.93	2.96
9.0	2.98	3.27	3.32	2.91	3.16	3.20	2.86	3.05	3.09	2.84	2.99	3.03	2.81	2.92	2.95	2.79	2.87	2.90
9.5	2.92	3.22	3.27	2.85	3.11	3.15	2.80	3.00	3.04	2.77	2.94	2.98	2.75	2.86	2.90	2.73	2.81	2.85
10.0	2.86	3.18	3.22	2.79	3.06	3.11	2.74	2.95	3.00	2.71	2.89	2.93	2.68	2.81	2.85	2.66	2.76	2.80
10.5	2.81	3.14	3.18	2.74	3.02	3.06	2.68	2.91	2.95	2.65	2.84	2.89	2.62	2.76	2.81	2.60	2.72	2.76
11.0	2.77	3.10	3.14	2.69	2.98	3.02	2.63	2.86	2.91	2.60	2.80	2.84	2.57	2.72	2.77	2.54	2.67	2.71
11.5	2.72	3.06	3.10	2.64	2.94	2.98	2.58	2.82	2.87	2.55	2.76	2.80	2.51	2.68	2.72	2.49	2.63	2.67
12.0	2.68	3.03	3.07	2.60	2.90	2.95	2.53	2.78	2.83	2.50	2.72	2.76	2.46	2.64	2.68	2.44	2.59	2.63
12.5	2.64	2.99	3.03	2.55	2.87	2.91	2.48	2.75	2.79	2.45	2.68	2.73	2.41	2.60	2.65	2.39	2.55	2.59
13.0	2.60	2.96	3.00	2.51	2.83	2.88	2.44	2.71	2.76	2.40	2.65	2.69	2.36	2.56	2.61	2.34	2.51	2.56
13.5	2.56	2.93	2.97	2.47	2.80	2.84	2.40	2.68	2.73	2.36	2.61	2.66	2.32	2.53	2.58	2.30	2.48	2.52
14.0	2.53	2.90	2.94	2.44	2.77	2.81	2.36	2.65	2.69	2.32	2.58	2.63	2.28	2.50	2.54	2.25	2.44	2.49

Tabla 1.8. Factores de erosión, para pavimentos sin pasajuntas y sin apoyo lateral.

FUENTE: Pavimentos de concreto. CEMEX Concretos.

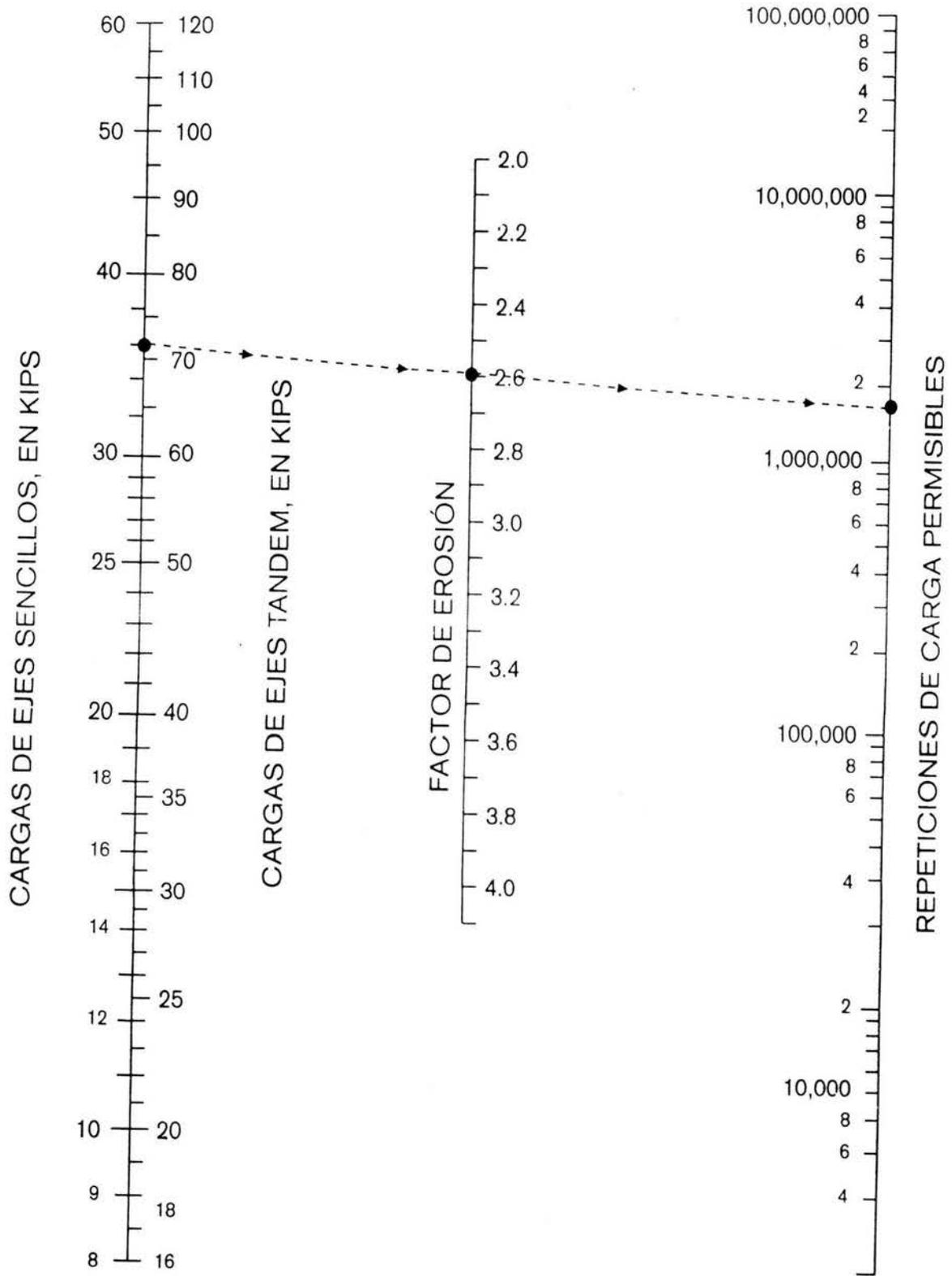


Figura 1.8. Análisis de Erosión. (Repeticiones permisibles basadas en el factor de erosión, sin apoyo lateral).

FUENTE: Pavimentos de concreto. CEMEX Concretos

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																	
	50			100			200			300			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	3.28	3.30	3.33	3.24	3.20	3.20	3.21	3.13	3.13	3.19	3.10	3.10	3.15	3.09	3.05	3.12	3.08	3.00
4.5	3.13	3.19	3.24	3.09	3.08	3.10	3.06	3.00	2.99	3.04	2.96	2.95	3.01	2.93	2.91	2.98	2.91	2.87
5.0	3.01	3.09	3.16	2.97	2.98	3.01	2.93	2.89	2.89	2.90	2.84	2.83	2.87	2.79	2.79	2.85	2.77	2.75
5.5	2.90	3.01	3.09	2.85	2.89	2.94	2.81	2.79	2.80	2.79	2.74	2.74	2.76	2.68	2.67	2.73	2.65	2.64
6.0	2.79	2.93	3.03	2.75	2.82	2.87	2.70	2.71	2.73	2.68	2.65	2.66	2.65	2.58	2.58	2.62	2.54	2.54
6.5	2.70	2.86	2.97	2.65	2.75	2.82	2.61	2.63	2.67	2.58	2.57	2.59	2.55	2.50	2.50	2.52	2.45	2.45
7.0	2.61	2.79	2.82	2.56	2.68	2.76	2.52	2.56	2.61	2.49	2.50	2.53	2.46	2.42	2.43	2.43	2.38	2.37
7.5	2.53	2.73	2.87	2.48	2.62	2.72	2.44	2.50	2.56	2.41	2.44	2.47	2.38	2.36	2.37	2.35	2.31	2.31
8.0	2.46	2.68	2.83	2.41	2.56	2.67	2.36	2.44	2.51	2.33	2.38	2.42	2.30	2.30	2.32	2.27	2.24	2.25
8.5	2.39	2.62	2.79	2.34	2.51	2.63	2.29	2.39	2.47	2.26	2.32	2.38	2.22	2.24	2.27	2.20	2.18	2.20
9.0	2.32	2.57	2.75	2.27	2.46	2.59	2.22	2.34	2.43	2.19	2.27	2.34	2.16	2.19	2.23	2.13	2.13	2.15
9.5	2.26	2.52	2.71	2.21	2.41	2.55	2.16	2.29	2.39	2.13	2.22	2.30	2.09	2.14	2.18	2.07	2.08	2.11
10.0	2.20	2.47	2.67	2.15	2.36	2.51	2.10	2.25	2.35	2.07	2.18	2.26	2.03	2.09	2.15	2.01	2.03	2.07
10.5	2.15	2.43	2.64	2.09	2.32	2.48	2.04	2.20	2.32	2.01	2.14	2.23	1.97	2.05	2.11	1.95	1.99	2.04
11.0	2.10	2.39	2.60	2.04	2.28	2.45	1.99	2.16	2.29	1.95	2.09	2.20	1.92	2.01	2.08	1.89	1.95	2.00
11.5	2.05	2.35	2.57	1.99	2.24	2.42	1.93	2.12	2.26	1.90	2.05	2.16	1.87	1.97	2.05	1.84	1.91	1.97
12.0	2.00	2.31	2.54	1.94	2.20	2.39	1.88	2.09	2.23	1.85	2.02	2.13	1.82	1.93	2.02	1.79	1.87	1.94
12.5	1.95	2.27	2.51	1.89	2.16	2.36	1.84	2.05	2.20	1.81	1.98	2.11	1.77	1.89	1.99	1.74	1.84	1.91
13.0	1.91	2.23	2.48	1.85	2.13	2.33	1.79	2.04	2.17	1.76	1.95	2.08	1.72	1.86	1.96	1.70	1.80	1.88
13.5	1.86	2.20	2.46	1.81	2.09	2.30	1.75	1.98	2.14	1.72	1.91	2.05	1.68	1.83	1.93	1.65	1.77	1.86
14.0	1.82	2.17	2.43	1.76	2.06	2.28	1.71	1.95	2.12	1.67	1.88	2.03	1.64	1.80	1.91	1.61	1.74	1.83

Tabla 1.9. Factores de erosión para pavimentos con pasajuntas y con apoyo lateral.

FUENTE: Pavimentos de concreto. CEMEX Concretos

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																	
	50			100			200			300			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	3.46	3.49	3.50	3.42	3.39	3.38	3.38	3.32	3.30	3.36	3.29	3.25	3.32	3.26	3.21	3.28	3.24	3.16
4.5	3.32	3.39	3.40	3.28	3.28	3.28	3.24	3.19	3.18	3.22	3.16	3.13	3.19	3.12	3.08	3.15	3.09	3.04
5.0	3.20	3.30	3.32	3.16	3.18	3.19	3.12	3.09	3.08	3.10	3.05	3.03	3.07	3.00	2.97	3.04	2.97	2.93
5.5	3.10	3.22	3.26	3.05	3.10	3.11	3.01	3.00	3.00	2.99	2.95	2.94	2.96	2.90	2.87	2.93	2.86	2.83
6.0	3.00	3.15	3.20	2.95	3.02	3.05	2.90	2.92	2.92	2.88	2.87	2.86	2.86	2.81	2.79	2.83	2.77	2.74
6.5	2.91	3.08	3.41	2.86	2.96	2.99	2.81	2.85	2.86	2.79	2.79	2.79	2.76	2.73	2.72	2.74	2.68	2.67
7.0	2.83	3.02	3.09	2.77	2.90	2.94	2.73	2.78	2.80	2.70	2.72	2.73	2.68	2.66	2.65	2.65	2.61	2.0
7.5	2.78	2.97	3.05	2.70	2.84	2.89	2.65	2.72	2.75	2.62	2.66	2.67	2.60	2.59	2.59	2.57	2.54	2.54
8.0	2.69	2.92	3.01	2.60	2.79	2.84	2.57	2.67	2.70	2.55	2.61	2.62	2.52	2.53	2.54	2.50	2.48	2.48
8.5	2.63	2.88	2.97	2.56	2.74	2.80	2.51	2.62	2.65	2.48	2.55	2.58	2.45	2.48	2.49	2.43	2.43	2.43
9.0	2.57	2.83	2.94	2.50	2.70	2.77	2.44	2.57	2.61	2.42	2.51	2.53	2.39	2.43	2.44	2.36	2.38	2.38
9.5	2.51	2.79	2.91	2.44	2.65	2.73	2.38	2.53	2.58	2.36	2.46	2.49	2.33	2.38	2.40	2.30	2.33	2.34
10.0	2.46	2.75	2.88	2.39	2.61	2.70	2.33	2.49	2.54	2.30	2.51	2.46	2.27	2.34	2.36	2.24	2.28	2.29
10.5	2.41	2.72	2.85	2.33	2.58	2.67	2.27	2.45	2.51	2.24	2.38	2.42	2.21	2.30	2.32	2.19	2.24	2.26
11.0	2.36	2.68	2.83	2.28	2.54	2.65	2.22	2.41	2.48	2.19	2.34	2.39	2.16	2.26	2.29	2.14	2.20	2.22
11.5	2.32	2.65	2.80	2.24	2.51	2.62	2.17	2.37	2.45	2.14	2.31	2.36	2.11	2.22	2.26	2.09	2.16	2.19
12.0	2.28	2.62	2.78	2.19	2.48	2.59	2.13	2.34	2.54	2.10	2.27	2.33	2.06	2.19	2.23	2.01	2.13	2.16
12.5	2.24	2.59	2.76	2.15	2.45	2.57	2.09	2.31	2.40	2.05	2.24	2.31	2.02	2.15	2.20	1.99	2.10	2.13
13.0	2.20	2.56	2.74	2.11	2.42	2.55	2.04	2.28	2.38	2.01	2.21	2.28	1.98	2.15	2.17	1.95	2.06	2.10
13.5	2.16	2.53	2.72	2.08	2.39	2.53	2.00	2.25	2.35	1.97	2.18	2.26	1.93	2.09	2.15	1.91	2.03	2.07
14.0	2.13	2.51	2.70	2.04	2.36	2.51	1.97	2.23	2.33	1.93	2.15	2.24	1.89	2.06	2.12	1.87	2.00	2.05

Tabla 1.10. Factores de erosión para pavimentos sin pasajuntas y con apoyo lateral.

FUENTE: Pavimentos de concreto. CEMEX Concretos

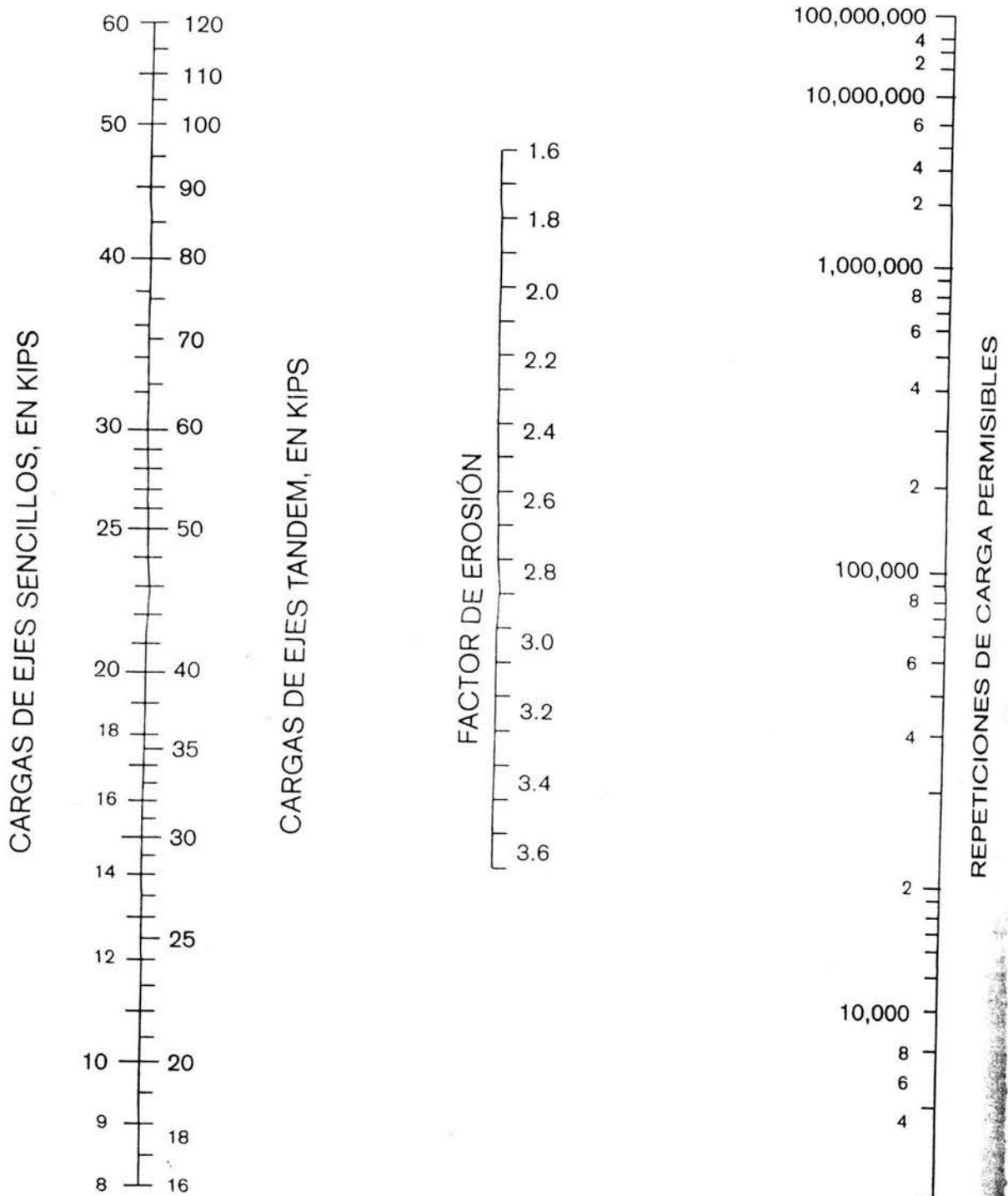


Figura 1.9. Análisis de Erosión. (Repeticiones permisibles basadas en el factor de erosión, con apoyo lateral).

FUENTE: Pavimentos de concreto. CEMEX Concretos

“Mientras más se acerquen los valores de Fatiga y Erosión al 100%, sin rebasarlo, el diseño del pavimento es más óptimo”

## I.4.2. Método AASHTO

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

La prueba de pavimentación AASHTO fue concebida y promovida gracias a la AASHTO para estudiar el comportamiento de estructuras de pavimento de espesores conocidos, bajo cargas móviles de magnitudes y frecuencias conocidas.

### a) EVOLUCIÓN DE LA GUIA AASHTO

Aproximadamente después de un año de terminar la prueba AASHTO para 1961 salió publicada la primer “Guía AASHTO para Diseño de Pavimentos Rígidos y Flexibles”. Posteriormente para 1972 se realizó una revisión y se publicó como la “Guía AASHTO para Diseño de Estructuras de Pavimento – 1972”; Para 1981 se hizo una Revisión al Capítulo III, correspondiente al Diseño de Pavimentos de Concreto con Cemento Pórtland; Para 1986 se publicó una revisión de la “Guía para el Diseño de Estructuras de Pavimento”. En 1993 se realizó una Revisión del Diseño de Sobrecarpetas de pavimento; Para 1998 se publicó un método alternativo para diseño de pavimentos, que corresponde a un “Suplemento a la guía de diseño de estructuras de pavimento”.

### b) FORMULACIÓN

La fórmula general a la que llegó el AASHTO para el diseño de pavimentos rígidos, basada en los resultados obtenidos de la prueba AASHTO es la siguiente:

*1986-93 Ecuación de Diseño de Pavimentos Rígidos*

$$\log_{10}(E18) = \left[ Z_r \times S_o + 7.35 \times \log_{10}(D+1) - 0.06 + \frac{\log_{10} \left[ \frac{\Delta \text{PSI}}{4.5-1.5} \right]}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D+1)^{8.46}}} \right] + (4.22 - 0.32 \times pt) \times \log_{10} \left[ \frac{S'_c \times C_d \times (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 \times J \left[ D^{0.75} - \frac{18.42}{(E_c/k)^{0.25}} \right]} \right]$$

Diagrama de la ecuación de diseño de pavimentos rígidos AASHTO (1986-93) con sus variables:

- $Z_r$ : Desviación Estándar Normal
- $S_o$ : Error Estándar Combinado
- $D$ : Espesor
- $\Delta \text{PSI}$ : Diferencia de Serviciabilidad
- $pt$ : Serviciabilidad Final
- $S'_c$ : Módulo de Ruptura
- $C_d$ : Coeficiente de Drenaje
- $J$ : Coeficiente de Transferencia de Carga
- $E_c$ : Módulo de Elasticidad
- $k$ : Módulo de Reacción
- $E18$ : Tráfico

Las variables que intervienen en el diseño de los pavimentos constituyen en realidad la base del diseño del pavimento. Se deben conocer las consideraciones más importantes que tienen que ver con cada una de ellas para así poder realizar diseños confiables y óptimos.

El procedimiento de diseño normal, es suponer un espesor de pavimento y realizar tanteos. Con el espesor supuesto calcular los Ejes Equivalentes y evaluar todos los factores adicionales de diseño. Si se cumple el equilibrio en la ecuación, el espesor supuesto es el resultado del problema; en caso

de no haber equilibrio en la ecuación se deberán seguir haciendo tanteos tomando como valor pivote el resultado del tanteo anterior. La convergencia del diseño es muy rápida.

**Nota importante:**

*El acero de refuerzo en los pavimentos de concreto, prácticamente no incrementa su capacidad portante, debido a que el pavimento se apoya en toda la superficie de la sub-base y no existen las deformaciones que harían trabajar el acero de refuerzo para dar una contribución significativa.*

**Variables de diseño de Pavimentos Rígidos**

1. Espesor
2. Serviciabilidad
3. Tráfico
4. Transferencia de Carga
5. Propiedades del Concreto
6. Resistencia de la Subrasante
7. Drenaje
8. Confiabilidad

**1. Espesor**

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

Es importante especificar lo que se diseña, ya que a partir de espesores regulares una pequeña variación en el espesor puede significar una variación importante en la vida útil.

**2. Serviciabilidad**

Se define como la habilidad del pavimento de servir al tipo de tráfico (autos y camiones) que circulan en la vía. Se mide en una escala del 0 al 5 en donde 0 (cero) significa una calificación para pavimento intransitable y 5 (cinco) para un pavimento excelente. Como se muestra en la Figura 1.10.

La serviciabilidad es una medida subjetiva de la calificación del pavimento, sin embargo la tendencia es poder definirla con parámetros medibles como los son: el índice de perfil, índice de rugosidad internacional, coeficiente de fricción, distancias de frenado, visibilidad, etc.

Indice de Servicio	Calificación
5	Excelente
4	Muy Bueno
3	Bueno
2	Regular
1	Malo
0	Intransitable

Figura 1.10. Escala de calificación para la serviciabilidad  
FUENTE: Pavimentos de concreto. CEMEX Concretos

El procedimiento de Diseño AASHTO predice el porcentaje de pérdida de serviciabilidad ( $\Delta$ PSI) para varios niveles de tráfico y cargas de ejes. Entre mayor sea el  $\Delta$ PSI, mayor será la capacidad de carga del pavimento antes de fallar. Ver Figura 1.11.

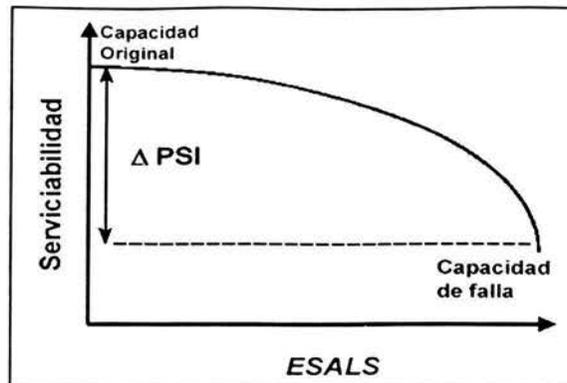


Figura 1.11. Grafica de serviciabilidad  
FUENTE: Pavimentos de concreto. CEMEX Concretos

**Serviciabilidad Inicial ( $P_0$ ).** – Es la condición que tiene un pavimento inmediatamente después de la construcción del mismo.

Los valores recomendados por AASHTO para este parámetro son:

- Para pavimento de Concreto = 4.5
- Para pavimento de Asfalto = 4.2

Usando buenas técnicas de construcción, el pavimento de concreto puede tener una Serviciabilidad  $P_0 = 4.7$  o 4.8

Mientras mejor se construya inicialmente un pavimento, o bien, mientras mejor índice de serviciabilidad inicial tenga, mayor será su vida útil, esto es debido a que las curvas de deterioro se comportan de manera paralela o con el mismo gradiente para unas condiciones determinadas, como se muestra en la Figura 1.11.

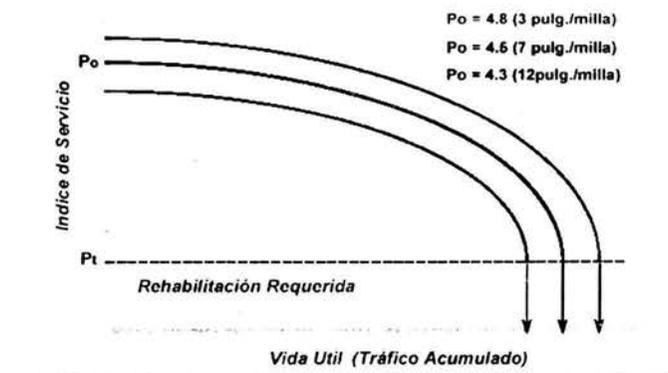


Figura 1.11. Índice de servicio  
FUENTE: Pavimentos de concreto. CEMEX Concretos

*Serviciabilidad Final* (Pt). - La *serviciabilidad final* tiene que ver con la calificación que esperamos tenga el pavimento al final de su vida útil.

Los valores recomendados de *Serviciabilidad Final* Pt para el caso de México, son:

Para Autopistas	2.5
Para Carreteras	2.0
Para Zonas Industriales	1.8
Pavimentos Urbanos Principales	1.8
Pavimentos Urbanos Secundarios	1.5

### 3. Tráfico

El Tráfico es una de las variables más significativas del diseño de pavimentos y sin embargo es una de las que más incertidumbre presenta al momento de estimarse. Es importante hacer notar que debemos contar con la información más precisa posible del tráfico para el diseño, ya que de no ser así podríamos tener diseños inseguros o con un grado importante de sobre diseño.

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

Lo conducente es realizar los cálculos para el carril de diseño, seleccionado para estos fines por ser el que mejor representa las condiciones críticas de servicio de la calle o camino. Existen algunos factores que nos ayudan a determinar con precisión el tráfico que circulará por el carril de diseño.

Los pavimentos de concreto el AASHTO los diseña por fatiga. La fatiga la podemos entender como el número de repeticiones o ciclos de carga y descarga que actúan sobre un elemento. En realidad al establecer una vida útil de diseño, en realidad lo que estamos haciendo es tratar de estimar, en un período de tiempo, el número de repeticiones de carga a las que estará sometido el pavimento.

La vida útil mínima con la que se debe diseñar un pavimento rígido es de 20 años, es común realizar diseños para 30, 40 o más de 50 años. Adicionalmente se deberá contemplar el crecimiento del tráfico durante su vida útil, que depende en gran medida del desarrollo económico-social de la zona en cuestión, del mejoramiento de las características del pavimento se puede generar tráfico atraído e igualmente se debe considerar la capacidad de tráfico de la vía.

$$T_{vu} = T_{pa} \times FCT$$

Donde:

$T_{vu}$  = Tráfico en la vida útil

$T_{pa}$  = Tráfico durante el primer año

FCT= Factor de crecimiento del tráfico, que depende de la tasa de crecimiento anual y de la vida útil.

### Tasa de Crecimiento Anual

Dependiendo de muchos factores, tales como el desarrollo económico-social, la capacidad de la vía, etc. Es normal que el tráfico vehicular vaya aumentando con el paso del tiempo, hasta que llega a un punto tal de saturación en el que el tráfico se mantiene prácticamente sin crecer.

Es conveniente prever este crecimiento del tráfico, tomando en consideración una tasa de crecimiento anual con la que se calcula un factor de crecimiento del tráfico. La tasa de crecimiento pudiera variar de acuerdo a los tipos de vehículos, pueden crecer más unos tipos que otros.

A medida que un camino se va congestionando de tráfico su crecimiento se va haciendo mas lento, este efecto debemos considerarlo pudiendo estimar una Tasa de Crecimiento Equivalente, para considerar las variaciones en el crecimiento durante la vida útil.

Es importante investigar adecuadamente la tasa de crecimiento apropiada para el caso en particular que se este considerando. En la Tabla 1.11. se muestran algunos valores típicos de tasas de crecimiento, sin embargo estos pueden variar según el caso.

CASO	TASA DE CRECIMIENTO (%)
Crecimiento normal	1 a 3
Vias completamente saturadas	0 a 1
Con trafico inducido*	4 a 5
Alto crecimiento	mayor de 5

\* *Solamente durante 3 a 5 años*

Tabla 1.11. Valores comunes de tasas de crecimiento  
FUENTE: Pavimentos de concreto. CEMEX Concretos

Factor de Crecimiento del Tráfico.- El factor de crecimiento del tráfico considera los años de vida útil más un número de años adicionales debidos al crecimiento propio de la vía.

$$FCT = \frac{(1 + g)^n - 1}{g}$$

Donde:

g = Tasa de crecimiento

n = Años de vida útil

Factor de Sentido.- Del total del tráfico que se estima para el diseño del pavimento deberá determinarse el correspondiente a cada sentido de circulación, esto se realiza mediante la introducción del Factor de Sentido, cuyos valores recomendados son:

☞ Un sentido de Circulación	1.0
☞ Doble sentido de Circulación	2.0

Factor de Carril. - El factor de Carril es un coeficiente que nos permite estimar que tanto del tráfico en el sentido de diseño circula por el carril de diseño. En una vía de un solo carril en el sentido de circulación de diseño, obviamente el 100% del tráfico circulará por ese carril que al mismo tiempo será nuestro carril de diseño. Una vía con dos carriles en el sentido de diseño, dependiendo del tipo de camino: carretero o urbano, y de que tan saturada esté la vía, pueda ser que sobre el carril de diseño circule entre un 50% a un 80% del tráfico en ese sentido. Ver Tabla 1.12.

El AASHTO recomienda algunos valores, sin embargo no necesariamente deben utilizarse.

NUMERO DE CARRILES	FACTOR DE CARRIL
1	1
2	0.8 a 1.00
3	0.60 a 0.80
4	0.50 a 0.75

Tabla 1.12. Factor carril

FUENTE: Pavimentos de concreto. CEMEX Concretos

Factor de Equivalencia del Tráfico. - Las formulas que permiten convertir el número de ejes de pesos normales a ejes equivalentes dependen del espesor del pavimento, de la carga del eje, del tipo de eje y de la serviciabilidad final que pretendemos para el pavimento. A continuación se muestran dichas formulas:

$$Fec = - \frac{W_{118}}{W_{tx}}$$

$$\text{Log} \frac{W_{tx}}{W_{118}} = 4.62 \text{ Log} (18+1) - 4.62 \text{ Log} (L_x + L_2) + 3.28 \text{ Log} (L_2) + \frac{G_t}{I_x} - \frac{G_t}{I_{18}}$$

$$G_t = \text{Log} \frac{4.5 - Pt}{4.5 - 1.5}$$

$$I_x = 1 + \frac{3.63 (L_x + L_2)^{5.20}}{(D + 1)^{8.46} (L_2)^{3.52}}$$

En Donde:

$W_{tx}$  = Numero de aplicaciones de carga definida al final del tiempo  $t$

$W_{t18}$  = Numero de aplicaciones de carga equivalente al final del tiempo  $t$

$L_x$  = Carga del eje en kips

$L_2$  = Código de eje cargado:

$L_2 = 1$  Para eje Sencillo

$L_2 = 2$  Para eje Tandem

$L_2 = 3$  Para eje Tridem

$G_t = f(Pt)$

$B_{18}$  = Valor de  $B_x$  cuando  $L_x = 18$  y  $L_2 = 1$

Es importante hacer notar que los ejes equivalentes se calculan de manera diferente para un pavimento rígido que para un flexible. Cuando se multiplica el tráfico por las diferentes factores de equivalencias, se obtienen los ESAL's (Ejes Sencillos Equivalentes).

El tráfico pesado es el que mayor daño produce a los pavimentos por lo que deberá estimarse con la mayor precisión posible. Como ejemplo podemos mencionar que el daño que produce una sola aplicación de carga de un camión semi-remolque de 36 ton, equivale al daño que producen 9,523 repeticiones de carga de un vehículo tipo automóvil.

Otro factor importante a considerar es la sobrecarga, debemos conocer con la mayor certeza posible los pesos de los ejes de los vehículos que estarán circulando sobre el pavimento que estamos diseñando, ya que las sobrecargas generan un daño muy importante al pavimento y su crecimiento es de orden exponencial.

#### **4. Transferencia de Cargas**

La transferencia de carga es la capacidad que tiene una losa del pavimento de transmitir fuerzas cortantes con sus losas adyacentes, con el objeto de minimizar las deformaciones y los esfuerzos en la estructura del pavimento, mientras mejor sea la transferencia de cargas mejor será el comportamiento de las losas del pavimento.

El método AASHTO considera la transferencia de cargas mediante el factor de transferencia de cargas J.

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

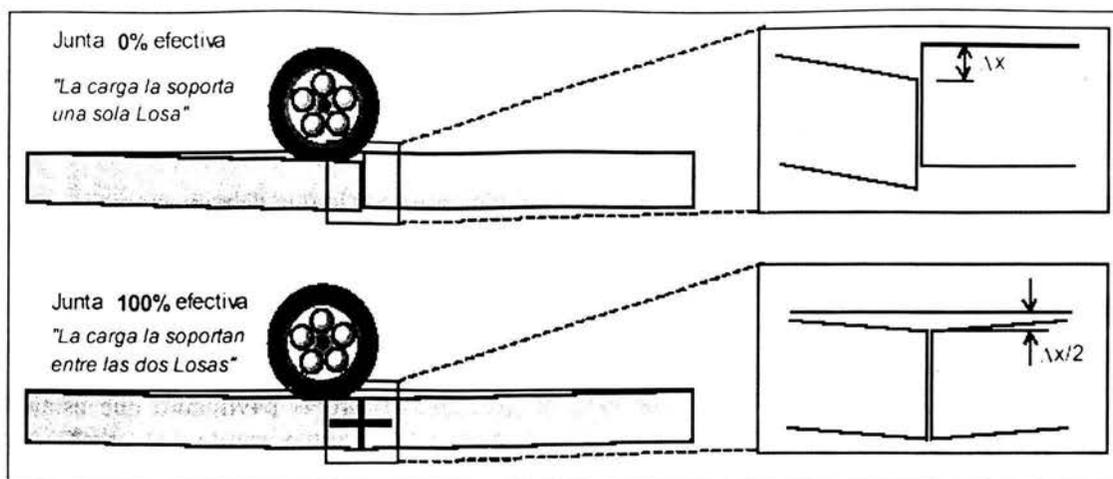
- Cantidad de Tráfico
- Utilización de Pasajuntas
- Soporte Lateral de las Losas

Una manera de transferir la carga de una losa a otra es mediante la trabazón de agregados que se genera en la grieta debajo del corte de la junta, sin embargo esta forma de transferir carga solamente se recomienda para vías con tráfico ligero.

La utilización de pasajuntas es la manera más conveniente de lograr la efectividad en la transferencia de cargas, los investigadores recomiendan evaluar dos criterios para determinar la conveniencia de utilizar pasajuntas. Utilizar pasajuntas cuando:

- a) El tráfico pesado sea mayor al 25% del tráfico total.
- b) El número de Ejes Equivalentes de diseño sea mayor de 5.0 millones de Esal's.

El Coeficiente de Transferencia de Carga considera el esfuerzo de transferencia a través de la junta o grieta.

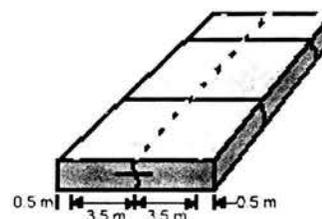


**Soporte Lateral.** - El confinamiento que produce el soporte lateral contribuye a reducir los esfuerzos máximos que se generan en el concreto por efecto de las cargas. Un pavimento de concreto puede considerarse lateralmente soportado cuando tenga algunas de las siguientes características en su sección:

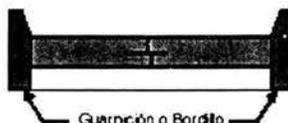
- Carril Ancho  $\geq 4.0$  m



- Con acotamientos laterales



- Confinamiento con guarniciones o banquetas



**Pasajuntas.** - Barra de acero redonda lisa  $f_y = 4,200 \text{ kg/cm}^2$  la cual no se debe de adherir al concreto permitiendo el libre movimiento de losas longitudinalmente, pero si debe de transferir verticalmente parte de la carga aplicada en una losa a la adyacente. Se colocan perfectamente alineadas a la mitad del espesor de la losa.

El diámetro, longitud y separación de las pasajuntas esta en función de el espesor de las losas principalmente. Algunas recomendaciones prácticas para la selección de la Barra se presentan en la Tabla 1.13.

ESPESOR DE LA LOSA		BARRAS PASAJUNTAS					
		DIAMETRO		LONGITUD		SEPARACION	
cm	in	cm	in	cm	in	cm	in
13 a 15	5 a 6	19	03-Abr	41	16	30	12
15 a 20	6 a 8	25	1	46	18	30	12
20 a 30	8 a 12	32	1 ¼	46	18	30	12
30 a 43	12 a 17	38	1 ½	51	20	38	15
43 a 50	17 a 20	45	1 ¾	56	22	46	18

Tabla 1.13. Selección de la barra pasajuntas  
FUENTE: Pavimentos de concreto. CEMEX Concretos

### 5. Propiedades del Concreto

Son dos las propiedades del concreto que influyen en el diseño de un pavimento de concreto y en su comportamiento a lo largo de su vida útil:

- Resistencia a la tensión por flexión ( $S'c$ ) o Modulo de Ruptura (MR)
- Modulo de Elasticidad del Concreto ( $E_c$ )

**Modulo de Ruptura (MR).**- Debido a que los pavimentos de concreto trabajan principalmente a flexión es recomendable que su especificación de resistencia sea acorde con ello, por eso el diseño considera la resistencia del concreto trabajando a flexión, que se le conoce como resistencia a la flexión por tensión ( $S'c$ ) o Modulo de Ruptura (MR) normalmente especificada a los 28 días.

El modulo de ruptura se mide mediante ensayos de vigas de concreto aplicándoles cargas en los tercios de su claro de apoyo. Esta prueba está normalizada por la ASTM C78. Figura 1.12. Existe una prueba similar con la aplicación de la carga al centro del claro que genera resultados diferentes de resistencia a la flexión (aproximadamente 15% a 20% mayores) pero que no son los que considera AASHTO para el diseño.

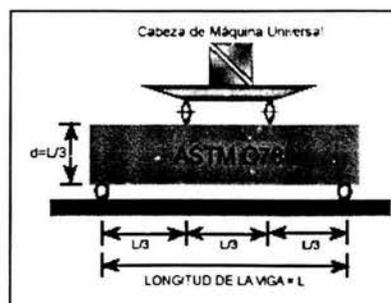


Figura 1.12. Prueba ASTM C78 para la determinación del MR  
FUENTE: Pavimentos de concreto. CEMEX Concretos

Los valores recomendados para el Modulo de Ruptura varían desde los 41 kg/cm<sup>2</sup> (583 psi) hasta los 50 kg/cm<sup>2</sup> (711 psi) a 28 días dependiendo del uso que vayan a tener. En la Tabla 1.14. se muestran valores recomendados, sin embargo el diseñador deberá elegir de acuerdo a un buen criterio.

TIPO DE PAVIMENTO	MR RECOMENDADO	
	kg/cm2	Psi
Autopistas	48	682.7
Carreteras	48	682.7
Zonas industriales	45	640.1
Urbanas principales	45	640.1
Urbanas secundarias	42	597.4

Tabla 1.14. Modulo de Ruptura recomendado  
FUENTE: Pavimentos de concreto. CEMEX Concretos

### Modulo de Ruptura Promedio

La metodología de diseño de AASHTO permite utilizar la resistencia a la flexión promedio, que se haya obtenido del resultado de ensayos a flexión de las mezclas diseñadas para cumplir la resistencia especificada del proyecto. Estos resultados dependen de las condiciones de control y calidad que tenga el fabricante del concreto en sus procesos. En todos los casos se recomienda que sea Concreto Premezclado Profesionalmente.

$$\text{MR promedio} = \text{MR especificado} + Z_r \times (\text{Desviación Estándar}^* \text{ del MR})$$

*Valores típicos de la desviación estándar	PROMEDIO	
Concreto premezclado	6% a 12%	9.00%
Mezclado central	5% a 10%	7.50%

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

$$E_c = 6,750 * \text{MR}$$

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

Estas formulas aplican con unidades inglesas.

### **6. Resistencia de la Subrasante**

La resistencia de la subrasante es considerada dentro del método por medio *del Modulo de Reacción del Suelo K* que se puede obtener directamente mediante la prueba de placa.

El modulo de reacción de suelo corresponde a la capacidad portante que tiene el terreno natural en donde se soportará el cuerpo del pavimento. El valor del modulo de reacción (K) se puede obtener directamente del terreno mediante la prueba de placa ASTM D1195 y D1196. Ver Figura 1.13. El valor de K representa el soporte (terreno natural y terraplén si lo hay) y se puede incrementar al tomar la contribución de la sub-base.

Cuando se diseña un pavimento es probable que se tengan diferentes valores de K a lo largo del tramo por diseñar, el método AASHTO recomienda utilizar el valor promedio de los módulos K para el diseño estructural.

Esquema de la prueba de placa



Figura 1.13. Prueba de placa ASTM D 1195 y 1196  
 FUENTE: Pavimentos de concreto. CEMEX Concretos

Estimaciones y Correlaciones de K

En base a un gran número de muestras y estudios se han podido desarrollar algunos valores estimativos del modulo de reaccion del suelo en función a diferentes propiedades. Diferentes autores han publicado sus resultados y en general no difieren notablemente.

Correlación 1 con SUCS y VRS. Ver Figura 1.14.

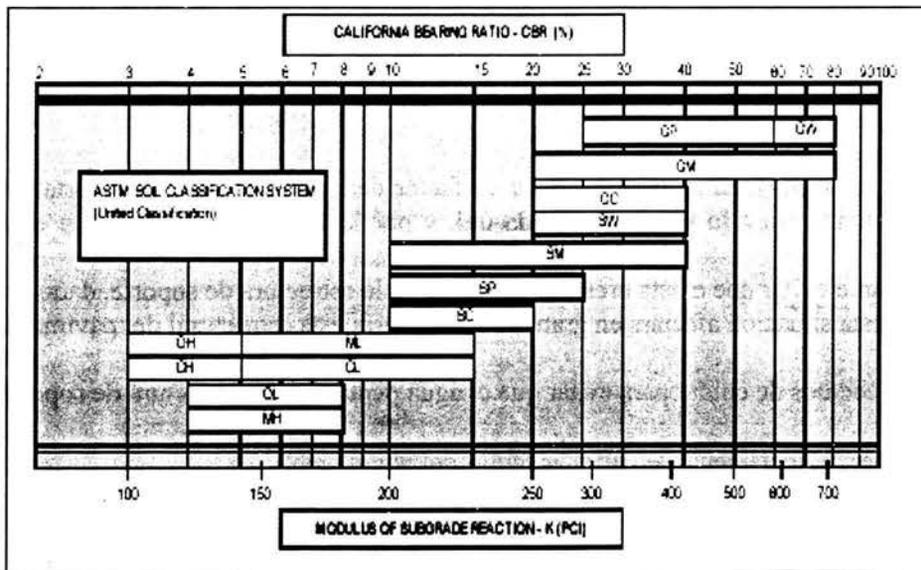


Figura 1.14. Correlación 1 con SUCS y VRS  
 FUENTE: Pavimentos de concreto. CEMEX Concretos

Correlación 2 con SUCS y VRS. Ver Figura 1.15.

Tipo de Suelo	SUCS	Densidad Seca lb/ft <sup>3</sup>	CRB %	K* pci
<b>Suelos Granulares</b>				
Grava	GW, GP	125 a 140	60 a 80	300 a 450
		120 a 130	35 a 60	300 a 400
Arena Gruesa	SW	110 a 130	20 a 40	200 a 400
Arena Fina	SP	105 a 120	15 a 25	150 a 300
<b>Suelos de Material Granular con Alto Contenido de Finos</b>				
Grava - Limosa	GM	130 a 145	40 a 80	300 a 500
Grava - Arena - Limosa				
Arena - Limosa	SM	120 a 135	20 a 40	300 a 400
Arena - Limo - Gravosa				
Grava - Arcillosa	GC	120 a 140	20 a 40	200 a 450
Grava - Arena - Arcillosa				
Arena - Arcillosa	SC	105 a 130	10 a 20	150 a 350
<b>Suelos de Material Fino**</b>				
Limo	ML, OL	90 a 105	4 a 8	25 a 165
Limo - Arenoso				
Limo - Gravoso	MH	80 a 100	4 a 8	25 a 190
Limo Mal Graduado				
Arcilla Plástica	CL, OL	100 a 125	5 a 15	25 a 255
Arcilla Medianamente Plástica				
Arcilla Altamente Plástica	CH, OH	80 a 110	3 a 5	40 a 220

\* estos rangos de K aplican para estratos homogéneos de suelo de por lo menos 3 metros de espesor. Si un estrato de suelo de menos de 3 metros existe sobre un suelo más blando el valor de K deberá corresponder al del suelo blando inferior y se podrá considerar el incremento de K debido al estrato superior. Si por el contrario existiera un estrato de roca el valor de K deberá ser ajustado.

\*\* el valor de K de los suelos finos depende en gran medida del grado de saturación por lo que se recomienda realizar una corrección de por este efecto.

Figura 1.15. Correlación 2 con SUCS y VRS  
FUENTE: Pavimentos de concreto. CEMEX Concretos

## 7. Drenaje

En cualquier tipo de pavimento, el drenaje, es un factor determinante en el comportamiento de la estructura del pavimento a lo largo de su vida útil, y por lo tanto lo es también en el diseño del mismo.

Es muy importante evitar que exista presencia de agua en la estructura de soporte, dado que en caso de presentarse esta situación afectará en gran medida la respuesta estructural del pavimento.

Aspectos que debemos de cuidar para evitar que el agua penetre en la estructura de soporte:

- ✓ Mantener perfectamente selladas las juntas del pavimento.
- ✓ Sellar las juntas entre pavimento y acotamiento o cuneta.
- ✓ Colocar barreras rompedoras de capilaridad (en donde se requiera)
- ✓ Utilizar cunetas, bordillos, lavaderos, contracunetas, subdrenajes, etc.
- ✓ Construir o aprovechar los drenajes pluviales en las ciudades.

Tener agua atrapada en la estructura del Pavimento produce efectos nocivos en el mismo, como pueden ser:

- ✓ Reducción de la resistencia de materiales granulares no ligados.

- Reducción de la resistencia de la subrasante.
- Expulsión de finos
- Levantamientos diferenciales de suelos expansivos
- Expansión por congelamiento del suelo

Algunos de estos fenómenos se pueden minimizar cuando se utilizan bases estabilizadas con cemento o bases de relleno fluido.

Los valores recomendados para el coeficiente de drenaje deberán estar entre **1.0 y 1.10**

### 8. Confiabilidad

Los factores estadísticos que influyen el comportamiento de los pavimentos son:

- Confiabilidad R
- Desviación Estándar

*Confiabilidad.*- La confiabilidad esta definida como "la probabilidad de que un pavimento desarrolle su función durante su vida útil en condiciones adecuadas para su operación"

Otra manera de entender la confiabilidad, por ejemplo es: si se considera una confiabilidad "R" del 80% estaríamos permitiendo que el 20% de las losas del pavimento alcancen al final de su vida útil una serviciabilidad igual a la serviciabilidad final seleccionada en el diseño. Ver Tabla 1.15.

CLASIFICACION FUNCIONAL	URBANO	RURAL
	Autopistas	85%-99%
Arterias principales	80%-99%	75%-99%
Colectoras	80%-95%	75%-95%
Locales	50%-80%	50%-80%

Figura 1.15. Confiabilidad recomendada por AASHTO\*

FUENTE: *Pavimentos de concreto. CEMEX Concretos*

\*Valida para Estados Unidos

También podemos entender a la confiabilidad como un Factor de Seguridad y ante esa situación debemos reflexionar en los valores de confiabilidad que debemos utilizar en México, con el mejor de los criterios, al hacer un diseño para un pavimento. Ver Tabla 1.16.

TIPO DE PAVIMENTO	CONFIABILIDAD R
Autopistas	95%
Carreteras	80%
Rurales	70%
Zonas industriales	65%
Urbanas principales	60%
Urbanas secundarias	50%

Tabla 1.16. Confiabilidad Recomendada para México

FUENTE: *Pavimentos de concreto. CEMEX Concretos*

Como se menciona anteriormente la confiabilidad puede relacionarse con un Factor de Seguridad, a continuación se presentan los factores de seguridad aproximados a los que corresponde la confiabilidad. Estos factores de seguridad van asociados con la Desviación Estándar "So". Ver Tabla 1.17.<sup>11</sup>

$$FS_{AASHTO} = 10^{\{-Z_r \times S_o\}}$$

Donde:

$Z_r$  = desviación normal estándar para "R"

$S_o$  = desviación estándar

Desviación Estandar ( $S_o$ )	CONFIABILIDAD R					
	50%	60%	70%	80%	90%	95%
0.3	1	1.19	1.44	1.79	2.42	3.12
0.35	1	1.23	1.53	1.97	2.81	3.76
0.39	1	1.26	1.6	2.13	3.16	4.38
3.4	1	1.26	1.62	2.17	3.26	4.55

Figura 1.17. Factor de seguridad AASHTO  
FUENTE: Pavimentos de concreto. CEMEX Concretos

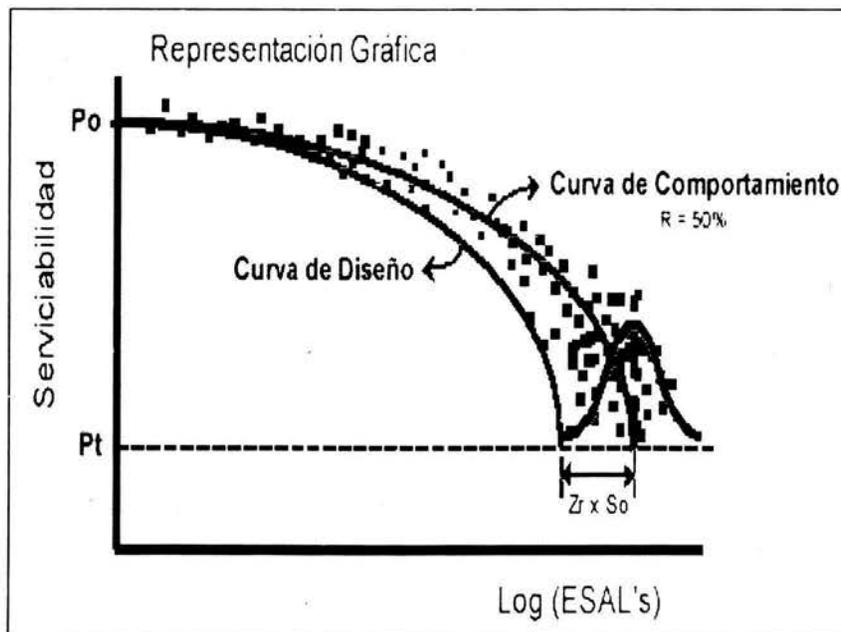


Figura 1.18. Representación gráfica  
FUENTE: Pavimentos de concreto. CEMEX Concretos

<sup>11</sup> Idem 9

## II. PAVIMENTO PERMEABLE

### II.1. ¿QUÉ ES EL PAVIMENTO PERMEABLE?

El pavimento permeable es una estructura que permite el filtrado del agua a través de ella, por medio de una capa porosa la cual llega hasta el subsuelo. Siendo una estructura compuesta de un pavimento poroso, una base, una estructura de almacenamiento o sub-rasante, y posiblemente una membrana filtrante (geotextil). Como se puede apreciar en la Figura 2.1.

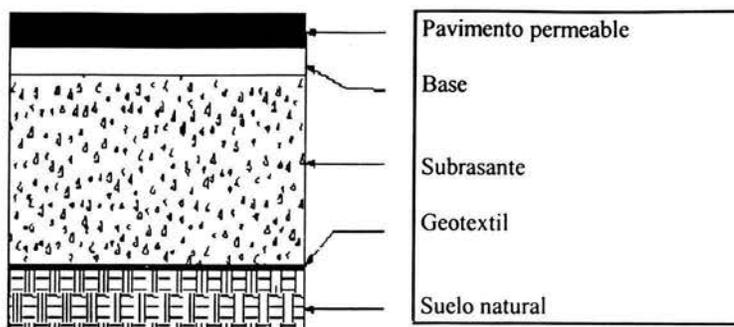


Figura 2.1 Estructura típica del pavimento permeable

Fuente: Kresin, 1996

### II.2. COMPONENTES DEL PAVIMENTO PERMEABLE

Como ya se mencionó la estructura del pavimento permeable está compuesta de un pavimento poroso, una base, una sub-rasante, y una membrana filtrante (geotextil), mostrada en la Figura.2.1

La capa superficial es un pavimento poroso que puede ser de asfalto (PAP), de concreto (PCP), o bien Bloque de Concreto Modular Entrelazado de Celdas Internas, (Concrete Grid o MICBIC) y Bloque de Concreto Modular Entrelazado con Celdas Externas (Modular Pavement o MICBEC). Bajo esta capa está la base, compuesta de 2-5 mm de agregado para MICBEC y 10-12.5 mm de agregado para PAP y PCP.

En la estructura de depósito o depósito de almacenamiento, la profundidad está basada en la capacidad de la instalación. Una membrana filtrante o geotextil colocada entre la estructura de depósito y el suelo natural para prevenir la ascensión en la entrada del depósito de las pequeñas partículas del suelo natural. Aunque también el filtro puede estar entre la base y la subrasante para prevenir la mezcla de las dos capas.<sup>12</sup>

### II.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PAVIMENTO PERMEABLE

#### II.3.1. Ventajas del pavimento permeable

- ✓ Reduce el riesgo de inundaciones.
- ✓ Evita el acuaplaneo de los autos ocasionado por la acumulación de agua en la superficie de los pavimentos.

<sup>12</sup> Pervious Pavement. Universidad de Guelph, Canada

- Evita el arrastre de basura por el agua reduciendo el riesgo del tapado de alcantarillas.
- Proporciona una superficie rugosa la cual favorece el frenado eficiente de los vehículos sobre el pavimento.
- Permite un mejor aprovechamiento del agua de lluvia, la cual generalmente se contamina al mezclarse con el agua del drenaje sanitario.
- Disminuye los costos asociados con la instalación de drenaje pluvial.
- Permite que los suelos retengan la humedad por más tiempo favoreciendo las áreas verdes.
- Permite la recarga de mantos freáticos.
- Permite un ahorro de energía durante la colocación y a lo largo de la vida útil de este material.
- El pavimento permeable por su color claro refleja la luz solar y artificial absorbiendo menor cantidad de calor a diferencia de los pavimentos de asfalto. Esto permite un ahorro de energía al disminuir el uso de aires acondicionados y luz eléctrica para iluminar las calles hasta en un tercio con respecto al asfalto.
- Es de rápida y fácil colocación.
- Para su colocación sólo es necesario extender el material y compactarlo evitando así el vibrado.
- Se puede evitar el uso de cortadoras de disco diamante.
- Se evita el sellado de juntas.
- Para el curado es suficiente cubrir el pavimento permeable con una cubierta de polietileno.
- Se evitan las operaciones de texturizado.

### II.3.2. Desventajas del pavimento permeable

- El pavimento permeable puede perder permeabilidad a lo largo del tiempo al taparse los espacios vacíos con material fino, por lo que requiere de un mantenimiento que consiste en un lavado con agua a presión aproximadamente cada dos años.
- Tiene una menor resistencia al desgaste que el concreto normal por lo que sólo debe colocarse en zonas de tránsito ligero.
- Requiere de mano de obra especializada.

### II.4. TIPOS DE PAVIMENTO PERMEABLE

Existen varios tipos de pavimento permeable y cada uno de ellos con características propias, los cuales son:

- Pavimento Permeable de Asfalto (PAP)
- Bloque de Concreto Modular Entrelazado de Celdas Internas (MICBIC), "*concrete grid*"
- Bloque de Concreto Modular Entrelazado con Celdas Externas (MICBEC), "*modular pavement*"
- Pavimento Permeable de Concreto (PCP)

#### II.4.1. Pavimento permeable de asfalto (PAP)

El asfalto permeable se ha utilizado como material emergente en los caminos desde los años 50. El Laboratorio del Transporte y de Investigación sobre los Caminos investigó el material para su uso en caminos durante los años 70 pero los resultados no eran buenos. Los nuevos materiales han sido

desde entonces desarrollados y renovados y un gran número de ensayos se han emprendido en años recientes.

El pavimento permeable de asfalto (PAP) es como un pavimento de asfalto convencional, con agregado grueso, con asfalto como aglutinante, pero con muy poco agregado fino (polvo o arena) permitiendo la filtración del agua de lluvia en la estructura.

Algunas de las funciones del asfalto permeable son en la seguridad de tráfico y la reducción del nivel de ruido, dada su alta porosidad. Tal funcionamiento es altamente atractivo no sólo a los usuarios sino también a los residentes de obra referidos a caminos. Sin embargo, estas ventajas no duran indefinidamente dado que los poros se reducen gradualmente por el tráfico. Ver Figura 2.2

#### II.4.1.1. Ventajas del PAP

La presencia de los vacíos del aire en el asfalto, permite que el agua superficial drene rápidamente debajo de la superficie de la carretera, ofreciendo una visibilidad mejorada.

El asfalto permeable por lo tanto ofrece igual seguridad en camino de asfaltos convencionales reduciendo el aquaplaneo.

El asfalto permeable reduce el ruido del neumático, particularmente en las carreteras.

Puede haber una mejora leve en el consumo de combustible de vehículos.



Figura 2.2. El carril del lado izquierdo drena el agua de la lluvia en la superficie del pavimento.

FUENTE: AMENI-PHALT SERIES

#### II.4.1.2. Desventajas del PAP

Los vacíos del aire pueden llenarse rápidamente de detritus. Si el lavado a presión no limpia los vacíos la única alternativa es quitar la superficie contaminada y retransmitir el nuevo material. La vida útil para el asfalto permeable es aproximadamente de 8 años, contra 20 años para el material convencional.

En condiciones de invierno, debido a la presencia de los vacíos del aire, las temperaturas de la superficie de la carretera pueden ser de 1-2 °C debajo del de los caminos adyacentes. La superficie por lo tanto se congela más rápido y deshiela después. La experiencia ha demostrado que 2-3 veces la cantidad de sal en el camino es requerida para mantener las condiciones sin hielo, aumentando grandemente costos de mantenimiento en el invierno.

- Una situación peligrosa que puede ocurrir y es conocido como 'proliferando rápidamente' cuando la lluvia se congela. El agua en los vacíos se amplía cuando se congela, empujando hacia arriba sobre la superficie de la carretera adyacente. El salar es ineficaz en tales circunstancias y el camino puede llegar a ser altamente peligroso. Puente de A31 Bentley ha tenido que ser cerrado ocasionalmente durante ambos inviernos desde su construcción en 1995. Por esta razón el topógrafo del condado está considerando actualmente, alternativas en cuanto a cómo las secciones de la nueva superficie de la carretera pueden ser cubiertas. Volver a allanar por completo con materiales más convencionales es una fuerte posibilidad.
- El asfalto permeable no tiene ninguna fuerza estructural, significando que las capas más bajas se deben espesarse para compensar. Este es un requisito para una construcción más profunda en caminos.
- Donde los canales de asfalto abiertos se utilizan para drenar, debe tenerse un gran cuidado en mantener los canales limpios. Si la basura se acumula, puede obstruir rápidamente las rejillas del drenaje causando una inundación en los puntos bajos del camino.<sup>13</sup>

## II.4.2. Concrete Grid and Modular Pavement

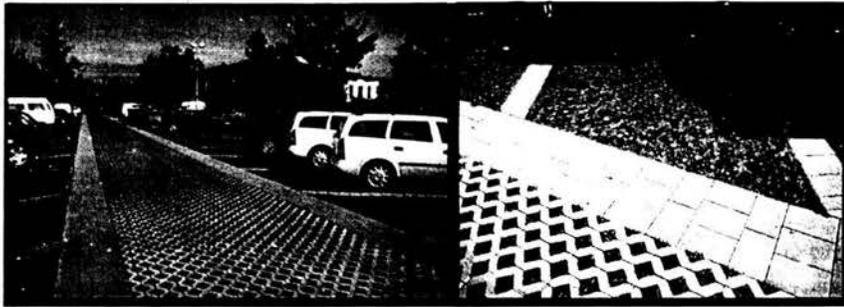


Figura 2.3. Concrete Grid and Modular Pavement  
 FUENTE: [www.lrc.usace.army.mil/co-r/best\\_management\\_practices](http://www.lrc.usace.army.mil/co-r/best_management_practices).

Concrete Grid and Modular Pavement es un pavimento que consiste en su estructura de materiales (bloques o celdas para pavimentar, o bloques para pasto) con huecos los cuales están regularmente inspeccionados. Los huecos se llenan de material permeable como grava o arena o bien de pasto, como se muestra en la Figura 2.3.

### II.4.2.1. Otros términos usados para describir el Concrete Grid and Modular Pavement

- Lattice concrete bolcks
- Monoslab concrete blocks
- Modular brick or concrete pavers
- Pre-cast concrete
- Perforated pavers laid over pre-cast concrete

La finalidad de este tipo de pavimento es la de reducir el escurrimiento y los contaminantes asociados en áreas de bajo flujo vehicular, proporcionando a una superficie sustentadora de carga que tiene fuerza adecuada para acomodar los vehículos mientras que permite la infiltración del agua superficial y la filtración de contaminantes. Esto es logrado, atrapando una porción de precipitación en los vacíos del pavimento e infiltrándola en el suelo subyacente.

<sup>13</sup> Porous Asphalt Pavement. Diciembre 1992.

## II.4.2.2. Tipos de pavimento Concrete Grid and Modular Pavement

Los diferentes tipos de pavimentos modulares se presentan en la Figura.2.4.

- ✓ *Poured-in-Place Concrete Slabs.* Son trozos de concreto reforzado los cuales cubren grandes áreas sin embargo los huecos que quedan entre los trozos se cubren de arena o pasto. Como es concreto reforzado, éste pavimento es conveniente para cargas pesadas.
- ✓ *Pre-Cast Concrete Grids.* Son áreas vacías prefabricadas generalmente de concreto y ya colocadas se rellenan de tierra. Dado que los trabajos grandes de estas unidades se pueden formar y moldear en el sitio; existen dos tipos:
  - 1) *Lattice Pavers.* Generalmente, planos y formando una rejilla con superficie configurada.
  - 2) *Castellated Pavers.* Distinguido por una configuración superficial más compleja.
 Estas unidades se rellenan de pasto o arena.
- *Pavers Modulars Units.* Son pequeños y pueden ser ladrillos de arcilla, conjuntos del granito, o concreto colado monolíticamente los cuales no tienen áreas vacías incorporadas en su configuración. Sin embargo se colocan con una separación en donde se agrega arena o pasto para que se permita el filtrado del agua.<sup>14</sup>

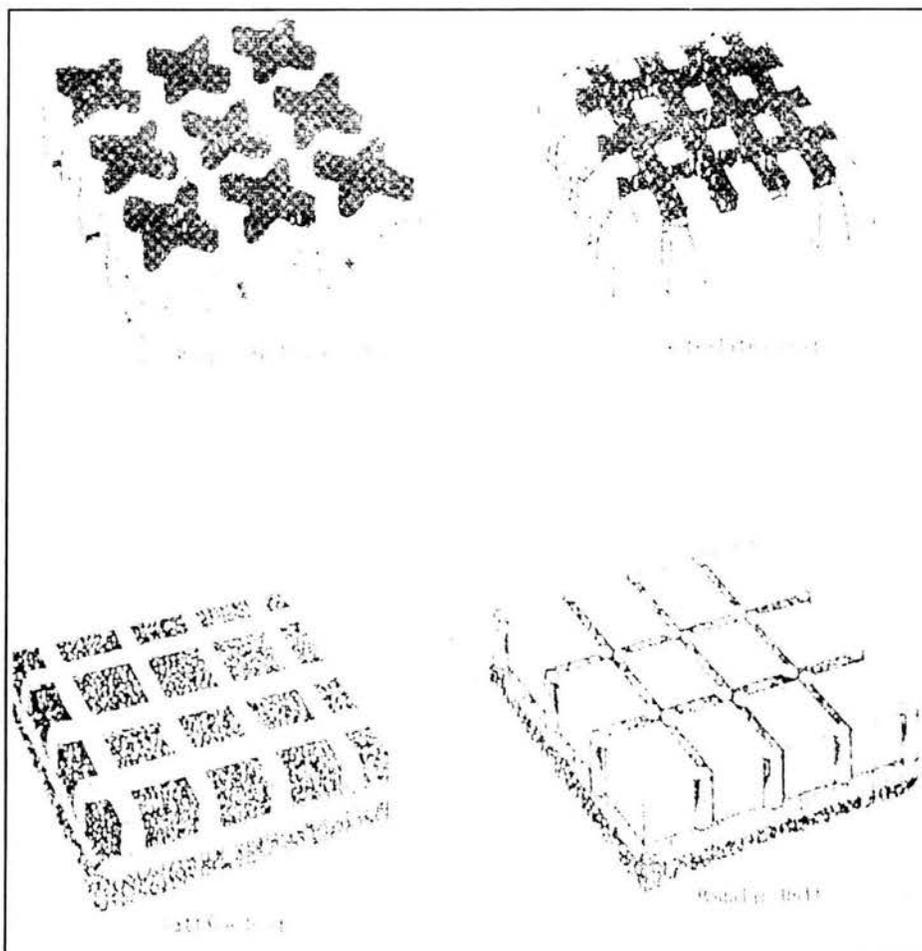


Figura 2.4. Tipos de pavimentos modulares  
 FUENTE: *Best Management Practice Standards. Capítulo 4.  
 Concrete Grid and Modular Pavement*

<sup>14</sup> Best Management Practice Standards. Capítulo 4. Concrete Grid and Modular Pavement

## II.5. CONDICIONES DONDE SE DEBE APLICAR EL PAVIMENTO PERMEABLE

Este pavimento se debe aplicar donde el pavimento es requerido y donde hay áreas de bajo flujo vehicular. Además de usarse con precaución en áreas donde la base tiene suelos con alta permeabilidad (superficie de arena o grava) cuando se infiltran los contaminantes pueden alcanzar el agua subterránea sin la oportunidad de atenuar.

De acuerdo con el Departamento de Recursos Naturales de Maryland los sitios apropiados para las instalaciones del pavimento permeable son áreas de alta permeabilidad, suelo natural con una gran conductividad hidráulica de 7 mm/hr (0.3 in/hr). También las instalaciones no deberán tener pendientes mayores al 5%.

Las aplicaciones del pavimento permeable en climas nórdicos no están restringidas dado que todas las condiciones climáticas ya fueron estudiadas. La profundidad de los agregados en la estructura de depósito, deben de usarse en este tipo de climas ya que también garantiza el adecuado drenado, eliminando la tendencia potencial de congelación.

## II.6. USOS PARA EL PAVIMENTO PERMEABLE

La porción del estacionamiento, áreas de estacionamiento especialmente en la franja o en el desbordamiento

Cajones de estacionamiento, las pistas de rodaje, y los hombros del cauce en las cargas de los aeropuertos (las pesadas cargas pueden exigir el uso del refuerzo del sistema de rejillas)

En los altos de emergencia y los carriles de estacionamiento y los cruces del vehículo en carreteras divididas

En calles cerradas en áreas residenciales privadas

En pistas de estacionamientos de áreas recreativas de campamento

En caminos privados, caminos de servicio, y pistas

En yardas industriales de almacenaje y zonas del carga (cargas más pesadas pueden exigir el uso de los sistemas reforzados de las rejillas)

En calzadas para el uso comercial, residencial y ligero

En caminos de uso para conducción de bici, calzadas, patios, y las áreas de bordos en piscinas

Como alternativa del pavimento convencional en las áreas donde haya protección y preservación de árboles.<sup>15</sup>

---

<sup>15</sup> Permeable Pavement. Natural Resource Conservation Service. Conservation Practice Standard. January 1999.

## III. PAVIMENTO PERMEABLE DE CONCRETO

### III.1. ¿QUÉ ES EL PAVIMENTO DE CONCRETO?

El Pavimento permeable de concreto está constituido de manera similar a los demás concretos, con agregado grueso y cemento Pórtland como aglutinante. Similar al pavimento permeable de asfalto, la porosidad de éste pavimento se debe a la omisión de agregado fino. Ver Figura 3.1. y Figura 3.2. La densidad del pavimento permeable de concreto está entre 70 y 80% de acuerdo con los concretos convencionales, aunque este porcentaje dependerá del suministro de agregado y del grado de compactación.<sup>16</sup>

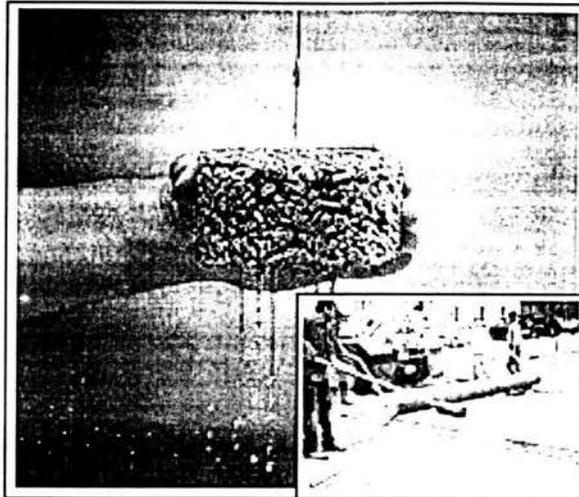


Figura 3.1. Pavimento permeable de concreto  
FUENTE: Dare concrete inc. <http://tm.wc.ask.com/>



Figura 3.2. Pavimento permeable de concreto  
FUENTE: Charger Enterprises Inc,  
[www.chargerconcrete.com](http://www.chargerconcrete.com)

### III.2. DESCRIPCIÓN DEL PAVIMENTO PERMEABLE DE CONCRETO

El pavimento permeable de concreto, como su nombre lo dice tiene huecos en su estructura y esta compuesta de una mezcla discontinua en la base, cemento hidráulico, aditivos, agua y otros materiales cementantes; la cual permite el paso del agua y del aire. Este tipo de pavimento tiene una variedad de nombres como son:

- poroso
- gap-graded
- no-finos
- permeable
- drain-crete
- baja densidad
- perk-krete
- sin finos

La omisión de la mayoría de todos los agregados finos<sup>17</sup> da la porosidad al pavimento permeable. Para proporcionar una superficie relativamente lisa se realizan la manipulación donde las características requieren de un agregado grueso de 9.525 mm (3/8 in) como máximo, sin embargo son las dimensiones más utilizadas. En el

<sup>16</sup> Idem 16

<sup>17</sup> que es un ingrediente estándar del concreto

pavimento permeable de concreto se utiliza este agregado para dar una porosidad del 15 al 25 % para que se pueda realizar la filtración.

En las aplicaciones del pavimento permeable de concreto para la carga vehicular, el contenido del cemento es generalmente más alto que la del pavimento de concreto normal. El material cementante adicional proporciona mayor resistencia siendo capaz de pegar las partículas de agregado grueso con respecto a los vacíos de la estructura del pavimento.

El contenido en agua en un punto bajo llevado a cabo para producir una mezcla con un revenimiento entre cero y 2.5 cm. El agregado triturado tendrá un revenimiento bajo mientras que la grava tendrá un rango más alto para el revenimiento. La cantidad de agua en la mezcla debe ser suficiente para promover la hidratación y el aumento de la resistencia. Si se tiene menos de la cantidad del agua requerida en la mezcla, la hidratación no procederá adecuadamente y la mezcla tendrá una pérdida de partículas. Demasiada agua causará una mezcla fluida aguada la cual drenará en las capas más bajas del pavimento, por lo que las deteriorará o bloqueará la filtración del escurrimiento después del endurecimiento.

Aunque el revenimiento se refiere a veces como concepto visual, la prueba de revenimiento no es conveniente para determinar la consistencia del pavimento permeable de concreto.

Cuando la proporción y el colado sean los correctos, el pavimento permeable endurecido proporcionará una superficie lisa, conservando una textura abierta en la superficie.<sup>18</sup>

### III.3. USOS DEL PAVIMENTO PERMEABLE DE CONCRETO

Pavimentos de estacionamientos de tránsito ligero

Pasillos

Andadores

Banquetas

Calles de conjuntos habitacionales

Caminos de bajo tránsito

Andadores de parques

Zonas de ornato

Zonas de lavado de autos

Instalaciones deportivas

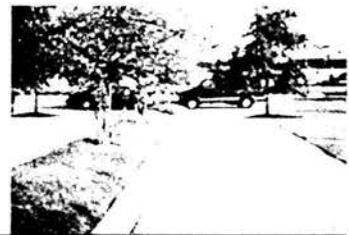
Zona de albercas

En calles cerradas en áreas residenciales privadas

En pistas de estacionamientos de áreas recreativas de campamento

Caminos de servicio

Como alternativa del pavimento convencional en las áreas donde haya protección y preservación de árboles, la cual es una preocupación.



### III.4. ÁREAS DONDE SE HA APLICADO EL PAVIMENTO PERMEABLE DE CONCRETO

El pavimento permeable de concreto es clasificado como un nuevo material para la construcción. Aunque el uso de este pavimento es relativamente reciente, el concreto permeable fue utilizado en Europa e Inglaterra durante 15 años. En 1852 en Reino Unido, se construyó una pared de concreto permeable con 30-35 cm (12-14 in).

<sup>18</sup> Portland Cement Pervious Manual. Florida Concrete and Products Association.

Después de la Segunda Guerra Mundial, el concreto permeable se extendió en Alemania, Holanda, Francia, Bélgica, Rusia, y el Reino Unido para la construcción de edificios, durante este tiempo, una firma británica construyó 250 mil viviendas.

### **III.5. DISEÑO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO PERMEABLE DE CONCRETO**

El objetivo del diseño estructural es proporcionar un marco de referencia para el análisis de datos conocidos y ofrecer procedimientos para la determinación de espesores requeridos y establecer las consideraciones del diseño geométrico para un pavimento permeable de concreto.

Una mezcla permeable es un material único y sus características difieren de un concreto o asfalto convencionales. Aunque estas características difieren hay previsiones y estimaciones. Hasta la fecha hay investigaciones y datos de pruebas que relatan las aplicaciones en la construcción y las limitantes en la investigación específicamente en pavimentos.

Aunque hay relativas limitantes en la investigación de reacción de la subrasante, propiedades básicas del material y análisis de procedimientos constructivos, las observaciones han sido conducidas a un número de proyectos en Florida, que han tenido un buen desempeño. Estos proyectos tienen un rango de buen servicio de 6 meses a 10 años.

Mayores investigaciones y observaciones son obtenidas, se harán futuras revisiones para el método propuesto presentado.

#### **III.5.1. Diseño estructural**

En la determinación estructural de un pavimento permeable, se usan dos tipos de análisis diferentes. Los procedimientos para diseñar tanto pavimentos rígidos como flexibles, proporcionan los espesores requeridos aceptables para aplicaciones específicas con resultados previsibles. Los espesores de los pavimentos resultantes y el criterio de la subrasante deberán ser analizados por la capacidad de depósito y permeabilidad de la subrasante. Ya que los vacíos de la estructura del pavimento son usados, en muchos casos, como depósito de almacenamiento para el agua de lluvia, el espesor tiene que permitir también los volúmenes anticipados. El mayor espesor requerido de los dos análisis, tanto estructural como depósito de retención, deberá ser usado.

La mezcla permeable tiene propiedades físicas tales que permiten el análisis de la estructura del pavimento ya sea como rígido o flexible. En cualquiera de los dos procedimientos deberían ser considerados, índices para el desempeño del pavimento, tráfico, superficie de rodamiento, propiedades de los materiales, ambiente, drenaje, confiabilidad y costos del ciclo de vida.

El diseño de un pavimento permeable normalmente conduce a espesores entre 15 y 30 cm. (6 a 12 in) estando constituido por arena con cantidades moderadas de limo y arcilla sin cumplir con los requisitos de granulometría. (AASHTO A-3). Este tipo de material de apoyo ofrece buenos valores de soporte, definidos en términos del Módulo de reacción de Westergaard de la subrasante ( $k$ ) en pci. El valor de soporte esta normalmente en un rango de  $k=150$  a  $k=220$ . Se sugiere que  $k$  no exceda los 200 pero valores entre 150 y 175 pueden ser adecuados para propósitos de diseño. El módulo de reacción compuesto de la subrasante es definido usando una relación teórica entre los valores de  $k$  de la prueba de placa y el módulo de reacción elástico del suelo, como:

$$k = MR / 19.4$$

Donde:

MR: Módulo de resiliencia del suelo de apoyo (psi)

Los resultados de las pruebas de campo y su evaluación dan datos de sitio que podrían incrementar la confiabilidad del diseño.

Se deben considerar precauciones especiales en el diseño del pavimento de concreto permeable en áreas con suelos de apoyo que contengan cantidades significativas de limo y arcilla de alta compresibilidad, lodo y suelos expansivos (AASHTO A4 a A7). Se recomienda que en suelos altamente orgánicos, estos se excaven y reemplacen por suelos que contengan altas cantidades de arena (suelo A-3). También el diseño puede incluir un depósito filtrante de arena, fragmentos de roca bien graduados y grava que darán un adecuado confinamiento e incremento en el valor de soporte. Otra alternativa de diseño es colocar en la subbase material arenoso sobre el geotextil para contener las partículas finas. En lugar de suelo arenoso, un pavimento permeable con agregado granular bien graduado 2.54 – 1.27 cm. (1 a ½ in) puede constituir una sub-base granular para una mezcla permeable conteniendo agregado de 9.5 mm. (3/8 in).

La profundidad de la subrasante considerada está directamente relacionada con la permeabilidad del suelo y el por ciento de vacíos de la estructura del pavimento. La permeabilidad calculada de la subrasante junto con el por ciento de vacíos del espesor del pavimento, determinarán el valor de la capacidad de retención del sistema. Si el valor total de los sistemas encontrados requerirá 24 horas estas pueden no ser adecuadas para 25 años de retenciones reguladas. Puede usarse una guarnición perimetral de suficiente altura como elemento de contención.

Las proyecciones anticipadas de la carga de tráfico (E18kip SAL) y la serviciabilidad apropiada terminal (Pt) pueden ser determinadas como en cualquier procedimiento de diseño reconocido. Hay que tener cuidado con la estimación de las cargas de tránsito, pues ellos inciden directamente en las expectativas de vida y el desempeño del pavimento. El diseño no cubrirá en profundidad el análisis de cargas de tránsito anticipadas por lo que su determinación se discutirá en otros procedimientos de diseño reconocidos. Las propiedades del concreto son una función muy importante en el análisis y diseño del pavimento rígido. El diseño del pavimento rígido está basado en la resistencia de una viga del pavimento la cual distribuye las cargas uniformemente a la subrasante. La resistencia de la viga determina el nivel de desempeño del pavimento y la vida de servicio, las propiedades del concreto permeable deberán ser evaluadas cuidadosamente.

El diseño de una mezcla de concreto para la construcción de un pavimento permeable debe contemplar un amplio rango de resistencias y valores de la permeabilidad, dependiendo del grado de compactación. Un pavimento sujeto a cargas causará deflexiones continuas de la losa. La resistencia a estas deflexiones depende del módulo de reacción del suelo, la resistencia de la viga y del espaciamiento de las juntas. En un procedimiento de diseño para pavimentos rígidos, el valor del módulo de ruptura (resistencia a la flexión) se puede determinar usando fórmulas, monogramas y gráficas. Estos valores influenciarán directamente al espesor requerido de la propuesta del pavimento. El módulo de ruptura debería ser seleccionado en un valor razonablemente obtenido para la servicialidad y economía del pavimento.

Las pruebas que se realizan a una mezcla permeable proporcionan datos que deben ser usados en el procedimiento de diseño. Los resultados de la resistencia a la tensión de la mezcla pueden ser razonablemente asumidos para un 65% de la resistencia a la flexión actual. Los cilindros de prueba de la mezcla indicarán el nivel de permeabilidad y peso unitario del concreto. Como permeabilidad estipulada en este trabajo, se debe alcanzar un mínimo de vacíos en la estructura de 15%. Los datos de prueba indican un rango de valores de la resistencia a flexión comprendidos entre 300 y 600 psi.

La resistencia del pavimento permeable está altamente influenciada por el grado de compactación, además del criterio estándar de resistencia tal como agregado, contenido de cemento, relación agua/cemento, etc. El diseñador deberá ser cuidadoso con los valores de la resistencia a tensión de los cilindros de prueba, preparados en la descarga de la mezcla, ya que pueden diferir de los valores obtenidos in situ a causa de los diferentes métodos de consolidación.

El grado de consolidación del pavimento permeable está directamente afectado por el peso unitario. El diseñador deberá establecer los criterios para los valores de diseño del peso unitario con respecto al módulo de ruptura,

soporte de la subrasante, valor de la permeabilidad y el equivalente anticipado 18-k para carga axial (E18k SAL). Estos valores establecerán los espesores y los requerimientos de retención del pavimento basados en procedimientos de diseño de pavimento rígido reconocido. Un ajuste en los espesores obtenidos a la luz de los datos de prueba in-situ para la permeabilidad de la mezcla, es sólo viable cuando la duración de los proyectos es tal que estos valores puedan estar disponibles, previo a la terminación del proyecto. Si es aplicable, los resultados de prueba permitirán un ajuste del espesor establecido originalmente. Para el desarrollo de los factores de ajuste a los espesores, un conjunto de espesores fueron determinados para incrementos del módulo de ruptura de 25 psi, hasta alcanzar los valores de 300 a 600 psi como se muestra en el Apéndice A. Los valores de los espesores correspondientes a cada valor del módulo de ruptura fueron usados mientras los otros valores se quedaron constantes.

El análisis mostró una relación inversa de 0.12 [in] en espesores por cada incremento de 25 psi en el módulo de ruptura, o

$$\Delta D = (0.12 \text{ [in]}/25 \text{ [psi]}) * \Delta MR \dots(1)$$

Donde:

D: espesor  
MR: módulo de ruptura

*Nota: cuando MR es positivo,  $\Delta D$  disminuirá*

El ajuste de los espesores se realizará con:

$$D_{adj} = D_d + \Delta D \dots(2)$$

Donde los subíndices significan:

adj: espesor ajustado  
d: espesor de diseño  
 $\Delta D$  se ajustará con (1)

El módulo de ruptura del pavimento construido puede ser establecido a partir de pruebas a tensión como sigue:

$$MR_c = (1.54)ST_c (w_d/w_c) \dots(3)$$

Donde

Los subíndices son:

c: construcción  
d: diseño

Las notaciones son:

ST: Resistencia a la tensión  
w: peso unitario

El valor del módulo de ruptura se determinará con la ecuación (3), el cual puede ser sustituido en la ecuación (1) para establecer la corrección necesaria. Éste valor estará sustituido en la ecuación (2) para dar el espesor ajustado.

La resistencia a flexión puede también estar basada en los valores de la resistencia a tensión, determinada con los corazones muestreados usando la siguiente ecuación:

$$MR = (1.54/0.85)ST_p$$

O bien

$$MR = 1.82 ST_p$$

Donde:

Subíndice p: resistencia a la tensión del pavimento

El factor de 0.85 en la ecuación (4) está basado en la suposición de que la resistencia de los núcleos es el 85% de la resistencia de los cilindros. La relación logarítmica entre el espesor calculado y el módulo de ruptura es:

$$\log D = \log(a) - \log(MR) \dots(5)$$

O bien

$$D = a (MR)^b \dots(5a)$$

Donde:

$$a = 11.8$$

$$b = -0.58$$

Ver apéndice B

Los datos presentados en el apéndice B sugieren la siguiente ecuación:

$$D = 11.8 * (MR / 100)^{-0.58} \dots(6)$$

La ecuación (5) conduce a los valores aproximados consignados en el apéndice A, esto es:

MR	Apéndice A	Ec. (5)	Ec. (6)
300	6.19	6.24	6.240
500	4.61	4.64	4.640
650	4	3.98	3.985

Una manera fácil de calcular el espesor D es:

$$D = ((100/MR)^{0.58}) * 11.8 \dots(6 a)$$

Como en todos los procedimientos de diseño, deberán establecerse un espesor estructural mínimo.

A continuación se recomiendan algunos espesores.

Áreas de estacionamientos, para autos y camiones ligeros	5 in
Carriles comerciales	5 a 6 in
Carriles industriales	6 in

El espesor estructural mínimo obtenido deberá aumentarse para compensar las variaciones en resistencia o la deficiencia en la retención. Una reducción del 2% abajo del contenido de vacíos mínimo de 15% requiere un incremento en el espesor de 1 in (2.5 cm.).

### **III.6. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO GEOMÉTRICO DEL PAVIMENTO PERMEABLE DE CONCRETO DE CEMENTO PÓRTLAND**

El establecimiento del grado del perfil para un pavimento permeable es relativamente simple en comparación con un pavimento impermeable. La estructura porosa de una mezcla de concreto permeable no solo permite la transmisión vertical sino también el flujo horizontal. Ésta característica deberá ser considerada en el establecimiento de los perfiles de drenado.

La velocidad de flujo vertical está directamente relacionada a la permeabilidad de la subrasante y a los espesores, así como también la relación de vacíos del pavimento.

Esto permitirá el aumento en el tiempo de absorción de la subrasante y la transmisión del agua a los estratos bajos y reducir la velocidad del flujo horizontal. Donde las condiciones no lo permitan para el nivel en los grados del perfil, el diseñador puede colocar barreras transversales en dirección del flujo horizontal. Estas barreras pueden ser instaladas fácilmente -para aumentar la consolidación de las tiras (STRIP) del pavimento- a lo largo del corte de la junta transversal de construcción. El incremento de la consolidación cerrará la estructura porosa en ese lugar. La instalación de cortes transversales como en un concreto normal impermeable permite lograr una reducción del flujo lateral. La contención con bordillos (guarniciones) todos en todos lados del perímetro de un área dada crea una reducción de la velocidad del flujo lateral entre 25 y 100 años.

El diseñador deberá ser precavido en proyectos donde se observen grados de inclinación de la subrasante que excedan 5% ya que pueden socavar las esquinas. Ésta socavación también ocurre cuando el perímetro de los bordos en el proyecto cuente con una pendiente de 5% transversal. Después de colocar el pavimento permeable a un sistema de drenado de agua de lluvia, se observó que se colectó agua en la superficie de la cuneta. Si la cuneta y los drenes diseñados, colectan el exceso de agua de lluvia, se tendrán que tomar las medidas necesarias para permitir que el agua entre a la cuneta a una elevación menor de 1 a 1.5 in encima de la base del pavimento. Esto permitirá que el agua de lluvia entre por la cuneta y reduzca la consolidación del material de relleno alrededor de la cuneta por la humedad excesiva.

El diseño geométrico es importante para el desempeño del pavimento permeable. Las regulaciones locales y del estado deben ser tomadas en cuenta en relación con las restricciones del agua de lluvia. El pavimento permeable cumple con los requerimientos para contener el agua de lluvia y proporcionar integridad estructural.

Adicionalmente, los materiales de la subrasante que constituyen drenes libres de arena son necesarios para una profundidad de 6 a 12 in en áreas con suelos de baja permeabilidad. Después de la compactación, los suelos tienen menos transmisión vertical de agua que transmisión lateral por una razón de 1:10. En estos casos, los huecos o zanjas de 12 a 24 in de profundidad y llenada con grava bien graduada o una mezcla permeable son útiles para aumentar la velocidad de absorción del agua en la subrasante. Éste método puede ser usado donde la capacidad de almacenamiento del agua del pavimento sea marginal o cuando los suelos tengan una baja permeabilidad. Sin embargo hay que tener cuidado dado que este método puede causar valores diferenciales en el soporte del pavimento<sup>19</sup>.

### **III.7. DISEÑO DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL**

La planeación de un lugar llega a ser uno de los aspectos más significativos que afectan la factibilidad económica de cualquier desarrollo. Hoy los diseños profesionales más creativos e innovadores son capaces de encontrar retos los cuales tienen una gran variedad de reglas y regulaciones gubernamentales para la mejora del lugar, mientras utilizan el máximo disponible de tierra para uso de propiedad.

<sup>19</sup>Interim Guide for Design of Portland Cement Pervious Pavement. Florida. E.U. 1990.

### III.7.1. Regulaciones y aplicaciones

Históricamente las regulaciones de agua de lluvia fueron diseñadas para reducir el coeficiente de los picos de lluvia que han contribuido a los ríos aguas abajo, la erosión de las orillas de los ríos y la sedimentación de los lagos, estuarios y otras aguas. En los más recientes tiempos, estas regulaciones fueron establecidas por agencias locales, estatales y federales y fueron modificadas para incluir las provisiones proyectadas para mejorar la calidad de la descarga del agua en las aguas superficiales, así como, mantener el nivel de recarga de los acuíferos por la filtración y acción bacterial.

Los diseños relacionados con la administración del agua de lluvia, incorporados al pavimento permeable proporcionan, distintivas ventajas sobre otros sistemas de retención. Hasta de los nuevos diseños para el agua de lluvia y las consideraciones ambientales, recientemente la mayoría de las nuevas instalaciones incluyen áreas de retención secas o mojadas o una instalación para exfiltración. La aceptación por las autoridades locales y estatales del pavimento permeable proporciona una adecuada alternativa a propietarios y a profesionales del diseño para encontrar retos en la administración del agua de lluvia.

### III.7.2. Diseño

El pavimento permeable permite el depósito y transmisión del agua superficial al suelo natural. El diseñador puede por lo tanto utilizar el depósito y la capacidad de filtración encima del Nivel Freático del suelo natural o del suelo de relleno para que sirva como depósito de retención de agua de lluvia. El método de diseño se considera un método de depósito de separación de capas, cada capa sucesiva debe estar por arriba de la elevación del agua estacional teniendo una capacidad de almacenamiento medible. Cada sitio presenta condiciones que pueden requerir un análisis que facilite la retención para dar una solución económicamente óptima y ambiental.

### III.7.3. Procedimiento de diseño

#### III.7.3.1. Calidad del agua de lluvia

Generalmente, el pavimento permeable de concreto es una opción viable para satisfacer las regulaciones de calidad del agua de lluvia en cualquier área, con suelos arenosos favorables. Similar a un depósito de retención, el pavimento permeable de concreto debe tener la capacidad de retención para almacenar la primera media pulgada de agua de lluvia no tratada y recuperar el dicho volumen en un periodo de 72 horas.

Para satisfacer los criterios de almacenamiento de la calidad del agua, el volumen del almacenamiento requerido ( $V_r$ ) puede calcularse de manera semejante como se hace en otros sistemas de retención. La expresión matemática es:

$$V_r = \text{agua de lluvia [in]} \cdot A \cdot 43560 \text{ [ft}^2\text{]} / A \cdot 1 \text{ [ft]} / 12 \text{ [in]} \dots\dots(a)$$

$$V_r = (1/2 \text{ in } A \cdot 43560 \text{ [ft}^2\text{]} / ac \cdot 1 \text{ ft} / 12 \text{ [in]})$$

$$V_r = 1815 A \dots\dots\dots(a.1)$$

Donde:

$$V_r = \text{volumen requerido de almacenamiento en ft}^3$$

$$A = \text{dimensiones del recurso del área de contribución (Ac)}$$

#### III.7.3.2. Cantidad del agua de lluvia

En un inicio los suelos del sitio deberán ser examinados. La mayoría de los diseños profesionales deban considerar el arreglo topográfico del sitio planeado que incluye elevaciones antes del desarrollo y después de la

construcción. Esta topografía es utilizada para establecer las elevaciones del perfil de suelos que reducirán al mínimo el flujo lateral de agua e incrementará el funcionamiento del pavimento permeable.

Es recomendable llevar a cabo sondeos exploratorios para clasificar el suelo, el nivel máximo estacional del agua subterránea, cualquier capa inferior impermeable, y una estimación inicial de la permeabilidad. Puesto que las 15.24 cm. (6 in) superiores del subsuelo deben ser compactadas a una densidad máxima de  $94\% \pm 2$  de la prueba AASHTO T180, se debe realizar una prueba de infiltrómetro de doble anillo a la elevación de la subrasante para determinar su permeabilidad antes de la colocación del pavimento permeable de concreto. La investigación del suelo debería ser revisada por el diseñador para determinar no sólo los requerimientos de la calidad del depósito del agua sino también la cuantificación de la capacidad de almacenamiento del sistema de retención de agua de lluvia en general. Al especificar el pavimento permeable el volumen de retención requerido se cumplirá parcial o totalmente. Típicamente, la detención requerida para delimitar la velocidad de escurrimiento.

El potencial de agua de lluvia en 25 años con 24 horas de duración de los eventos puede ser determinada mediante gráficas encontradas en el Manual de drenaje del Departamento del Transporte de Florida o en publicaciones técnicas TP-40 US Weather Bureau, (Histogramas). Después de calcular el volumen del agua superficial para un cierto lugar y la cantidad de área impermeable, el diseñador puede estimar la capacidad de almacenamiento del sistema de retención usado en el pavimento.

La capacidad de almacenamiento del sistema incluye los vacíos del suelo por arriba del máximo nivel del agua estacional y cualquier almacenamiento del pavimento permeable. Este almacenamiento del suelo puede no usarse en los cálculos de la calidad de agua de lluvia. Los vacíos son calculados de acuerdo a los procedimientos de las pruebas recomendadas (Federal Highway Administration Report No. FHWA-RD-74-2). El volumen de la muestra debe ser medido en lugar de calcularlo con el método del agua desplazada ya que una gran cantidad de agua mecánicamente es absorbida. Estas fuentes de error afectan los cálculos de la capacidad de almacenamiento. (FDM, 1998, SW BMP 3.06, p6-173).

Los vacíos de un pavimento permeable usando un agregado de ( $\frac{3}{4}$  in) están en el rango de 15 a 22%, siendo usual en el diseño de 18% de vacíos. Esto significa que para un pavimento con espesor de 5 [in], que 0.9 [in] de agua pueden ser almacenados en el mismo pavimento. Aproximadamente 0.4 [in] de agua almacenada será adecuada sobre o encima del volumen requerido normalmente en la calidad de agua. Muchos eventos de lluvia serán adaptados por considerar solo la capacidad de almacenamiento del pavimento.

Aplicando el concepto y los principios de capacidad de almacenamiento de las capas (estratos), el volumen de almacenamiento puede determinarse como sigue:

$$V_p = A \cdot d_1 \cdot P_1 / 100$$

$$V_s = A \cdot d_2 \cdot P_2 / 100$$

Donde:

$V_p$ : almacenamiento adecuado en el pavimento [ $\text{ft}^3$ ]

$V_s$ : almacenamiento adecuado en la subrasante [ $\text{ft}^3$ ]

A: área del pavimento [ $\text{ft}^2$ ]

$d_1$ : espesor del pavimento [ft]

$d_2$ : espesor de la subrasante [ft]

$P_1$ : % de vacíos en el pavimento

$P_2$ : % de vacíos en la subrasante

Una vez concluidos los cálculos para la cantidad del volumen de agua de almacenamiento requerido ( $V_r$ ) y tomando en cuenta el volumen del suelo de la subrasante ( $V_s$ ) y el volumen de almacenamiento disponible del pavimento ( $V_p$ ), la diferencia final estará dada por los siguientes resultados: si el resultado es positivo indicará que el almacenamiento es correcto pero si es negativo se requerirá un almacenamiento adicional.

El caculo es como sigue:  $V_r - (V_s + V_p) \geq 0$

Si es necesario un almacenamiento adicional, una solución económica es la proporcionada por una sub-base granular no cementada "FDOT#57" con un 30% de vacíos o mayor. Ésta capacidad de almacenamiento de la subbase se agregará al volumen de almacenamiento del pavimento permeable.

El área encima del pavimento es adecuada para el almacenamiento además del volumen de los estratos subsecuentes o capas inferiores.

El diseñador debe ser cuidadoso cuando se aplique esta técnica de diseño, el nivel del agua a una altura no prevista para las tormentas no esperadas puede causar una elevación del agua por encima de la superficie del pavimento. La elevación del pavimento debe ser menor que la elevación del piso de las construcciones adyacentes o utilizable en áreas donde se requiera evitar los daños por las inundaciones. El uso de bordo tiene la ventaja de controlar el escurrimiento impidiendo que aumente el volumen o la velocidad del sistema de drenado del agua de lluvia adyacente, tal como las cunetas de las carreteras o alcantarillas para lluvia. El acceso adecuado es usualmente elevado a la altura del perímetro de retención del bordo para contener el agua superficial en el lugar.

Otra técnica es emplear un sistema de admisión o sustituyendo el bordo perimetral. Esto es llamado *pop-off* es un dispositivo que puede ser localizado en una sola cuneta cerca del perímetro para reducir los orificios de la tubería con el área de retención pavimentada o un dren subterráneo perforado para retención. Todas las técnicas y dispositivos son para diseños con flujo poco profundo en cunetas de retención para adaptar encima un volumen parcial en el pavimento.

El diseño debe también satisfacer la capacidad del volumen del agua de lluvia. Esto es, el almacenamiento de la calidad del agua debe recuperarse en 72 horas. La cantidad de almacenamiento del agua de lluvia debe ser recuperada en el tiempo establecido por las regulaciones locales.

Esta recuperación es evaluada de manera similar a como se hace con otras instalaciones de retención mediante una solución simultánea de la ecuación de Darcy y la ecuación de Continuidad.

$$Q = KiA$$

Donde

Q: gasto [ $\text{ft}^3/\text{s}$ ]

K: conductividad hidráulica o rango de filtración del suelo subrasante [ $\text{in}/\text{hr}$ ]

i: gradiente hidráulico (usualmente 1 el cual se maneja conservadoramente)

A: área del pavimento ( $A_c$ )

Nota:  $1 A_c [\text{in}/\text{hr}] = 1 [\text{ft}^3/\text{s}]$

El valor determinado para  $V_r$  se divide de manera subsecuente por el valor de Q para determinar el periodo de recuperación en segundos ( $T_s$ )

$$T_d = V_r / Q$$

### III.7.4. Ejemplo de diseño

El siguiente ejemplo ilustra el método de diseño usado en el desarrollo del sistema de retención de agua de lluvia usando pavimento permeable.

Se cuenta con un área aproximada de 3 acres, donde el suelo predominante es arena sin ninguna capa impermeable y con topografía plana. Asumiendo el 15% de vacíos, para la subrasante y para el pavimento permeable un 18% de vacíos, la sub-base granular con 30% de vacíos (Si es necesaria una sub-base). El espesor de diseño del pavimento permeable es de 6 [in] (siendo el mínimo recomendado de 5 in), la elevación estacional del agua de lluvia está localizada a 2.5 ft debajo de la elevación propuesta del pavimento.

El diseño del sitio incluye una construcción y un estacionamiento impermeable y áreas permeables.

SITIO ITEMS	NET ACRES
Techo	0.5
Acera	0.125
Total (impermeable)	0.625
Estacionamiento (pav. permeable)	1.803
Perímetro del lugar	*
Total (permeable)	2.303
Total del proyecto	2.928

\* Nota: para este ejemplo, la elevación del perímetro del lugar no permite la entrada o la salida del agua. Ver figura 1 Apéndice C.

Procedimiento:

Lo que sigue es una simplificación aproximada del método de diseño utilizado en el desarrollo de sistemas de retención de agua de lluvia usando pavimento permeable.

1.- Determinar el volumen de escurrimiento de agua de lluvia que se requiere para almacenar, con la ecuación (1):

$$\begin{aligned}
 V_r &= (0.5 \text{ in} * A * 43560 \text{ ft}^2/\text{ac} * 1 \text{ ft}/12 \text{ in}) \dots \dots \dots (1) \\
 &= 1815 A \\
 &= 1815 (2.43) \text{ (impermeable + estacionamiento)} \\
 &= 4410 \text{ ft}^3
 \end{aligned}$$

2.- Estimar el almacenamiento adecuado del pavimento.....(2)

$$\begin{aligned}
 V_p &= A_1 * d_1 * p_1 / 100 \\
 A_1 &= 1.803 * 43560 = 78539 \text{ [ft}^2\text{]} \\
 D_1 &= 6 \text{ in de pavimento permeable} = 0.5 \text{ ft} \\
 P_1 &= \% \text{ vacíos del pavimento} = 18 \\
 V_p &= 7450 \text{ [ft}^3\text{]}
 \end{aligned}$$

Si  $V_p - V_r > 0$

El diseño no solo cumple los requerimientos en la calidad del agua, también cuenta con un volumen de almacenamiento adicional de 3040 ft<sup>3</sup>.

3.- Determinar el volumen de almacenamiento previsto para encontrar los requerimientos en la cantidad de agua requerida para 25 años con 24 horas de duración. La cantidad de agua de lluvia puede ser determinada de forma local o bien con los manuales del distrito para administrar el agua, las cuales se tienen gráficas o cartas del lugar. El hietograma para este ejemplo es para 8 [in]. Ver Figura 2 en el apéndice C.

4.- Determinar las 24 horas, 25 años del volumen del evento requerido usando las 8 in de volumen de agua de lluvia estimado, ecuación (1)

$$\begin{aligned} V_{25} &= \text{lluvia in } A \cdot 43560 \text{ ft}^2/A \cdot 1 \text{ ft} / 12 \text{ in} \\ &= 18150 \text{ ft}^3 \text{ (área impermeable)} \\ &= 52359 \text{ ft}^3 \text{ (área de estacionamiento)} \end{aligned}$$

$$\text{Total } V_{25} = 70509 \text{ ft}^3$$

5.- Cálculo de la sección transversal para obtener la cantidad del agua de lluvia

$$\begin{aligned} \text{a) } V_q &= 3040 \text{ ft}^3 \text{ (procedimiento 2)} \\ \text{b) } (V_q - V_{25}) &= (3040 - 70509) = -67469 \text{ ft}^3 \end{aligned}$$

almacenamiento adicional requerido

c) Se puede lograr un almacenamiento adicional empleando agregado grueso entre la sub-base y la superficie del almacenamiento del pavimento.

$$\begin{aligned} V_{ca} &= 4 \text{ [in sub-base]} \cdot 1.803 \text{ ac} \cdot 43560 \text{ ft}^2/\text{ac} \cdot 30/100 \cdot 1 \text{ ft} / 12 \text{ in} \\ V_{ca} &= 7854 \text{ ft}^3 \text{ (almacenamiento)} \end{aligned}$$

Por lo que:  $V_s = 34373 \text{ ft}^2$

$$(2.428 \cdot 43560 \cdot 26/12 \cdot 15/100)$$

d) Almacenamiento requerido del pavimento y de la altura del bordo perimetral:

$$\begin{aligned} \text{Altura del bordo} &= \text{almacenamiento aprox. del pavimento} / \text{área de almacenamiento} \\ &= V_{25} - BV_q - BV_{ca} - V_s / \text{área de almacenamiento} \\ &= [V_{25}] - [V_q(\text{pav. Perm.})] - [V_{ca} (\text{subbase } 4 \text{ in})] - [V_s(\text{subrasante } 26 \text{ in})] / [\text{área de almacenamiento} \cdot 43560] \end{aligned}$$

*Nota: el perímetro del lugar se excluye*

El diseño debe evaluarse con otras combinaciones de espesores de sub-base de piedra caliza en combinación con la altura del bordo aproximado el cual debe ser económico, para lograr el volumen de almacenamiento requerido de agua de lluvia. Para el ejemplo una solución matricial se muestra en la Tabla 1 del Apéndice C.

También ver Figura 3 en el apéndice C para la sección del pavimento.

### III.7.5. Opciones de diseño

En apariencia las condiciones del suelo tienen un factor de restricción en la planeación y el diseño de la administración del agua de lluvia en el lugar. Previamente se debe de estudiar el suelo para obtener los parámetros para un diseño económico y funcional.

Hay áreas de donde las condiciones el suelo presentan una baja permeabilidad o bien estratos impermeables que requerirán un diseño económico y funcional.

Hay áreas donde las condiciones del suelo muestran una baja permeabilidad o estratos de subbase permeable que requerirán consideraciones en el diseño. Combinando la capacidad de almacenamiento del espesor del pavimento

permeable y sub-base permeable o capa sub-rasante del pavimento permeable de concreto con sistemas suplementarios de agua de lluvia prudentes. Hay una variedad de anchos de prueba con diseño de drenes suplementarios que pueden ser considerados en combinación con la capacidad de almacenamiento del pavimento permeable.

Se muestran a continuación los sistemas de drenes adicionales que pueden usarse en combinación con el pavimento permeable de concreto:

#### **A. Sub-base de concreto de cemento Pórtland**

Utilizando una sub-base de cemento tratada con agregado de  $\frac{3}{4}$  a 1.5 [in] de diámetro, es una solución viable para aumentar la capacidad de almacenamiento y el valor estructural de la composición de pavimento. La sub-base no se deberá exponer a tráfico vehicular, la relación de cemento puede ser reducida para dar estabilidad a la mezcla.

Dependiendo de la graduación del agregado, la relación de cemento puede estar en el rango de 250 a 300 [lb/yd<sup>3</sup>]. Esta mezcla debe ser estudiada y probada para proporcionar el almacenamiento y la estabilidad necesaria. Una base permeable da un depósito estable e incrementa la capacidad de carga transmitida del depósito de la superficie. Los vacíos de esta sub-base permeable también eliminarán la acción de bombeo o bacheo asociado con el pavimento impermeable. La capacidad de almacenamiento de una subbase permeable con piedra caliza ofrecerá frecuentemente una capacidad de almacenamiento adicional para sitios con condiciones de permeabilidad marginal del suelo.

#### **B. Rock Filled Trench**

Este sistema se usa con agregado bien graduado en zanjas o cunetas con sub-bases interconectadas abajo del pavimento. Los drenes están localizados a lo largo del borde o en la superficie plana lateral espaciada por debajo del área de estacionamiento permeable.

#### **C. V-Trench water removal to pond**

Este método usa zanjas en V poco profundas en punto la sección transversal del pavimento para coleccionar el agua superficial y transportarla al área de detención.

#### **D. Sand Underdrain**

La arena funciona como un medio filtrante, con aproximadamente 61 cm (2 ft) de profundidad en la zanja, arriba de la tubería perforada. Este sistema no debe requerir tratamiento adicional<sup>20</sup>. Ver Figura 4 del Apéndice C.

<sup>20</sup> Stormwater Design Guide. Portland Cement Pervious Pavement. Florida Concrete and Products. Florida. E.U. Febrero 1990.

## IV. ESPECIFICACIONES Y PRUEBAS DE LABORATORIO DEL PAVIMENTO PERMEABLE DE CONCRETO

### **IV.1. SOBRE EL CONTRATISTA:**

Antes de la adjudicación del contrato, el constructor equipará al propietario /ingeniero /arquitecto una declaración que avale su calificación y su experiencia, además de:

- Un mínimo de dos proyectos terminados con sus respectivas direcciones.
- Datos de la aceptación por peso unitario
- Resultados de prueba "in-situ" del pavimento incluyendo contenido de vacíos y peso unitario
- Muestra del producto (paneles de prueba y núcleos)

Si el constructor y el fabricante de concreto no tienen la suficiente experiencia en el Pavimento Permeable de Concreto, el constructor tendrá un consultor experimentado (según lo dicho arriba) para supervisar el proyecto, así como dirigir las operaciones de la colocación y los costos del concreto.

### **IV.2. PANELES DE PRUEBA:**

El constructor debe colocar, meter juntas y curar dos paneles de prueba, cada uno con un mínimo de 20.9032 m<sup>2</sup> (225 ft<sup>2</sup>) con el espesor requerido en el proyecto demostrando que sean arquitectónicamente aceptables y alcanzando el peso unitario de colocación en el lugar. Los paneles de prueba se pueden colocar con cualquier cemento Portland o el especificado. Los paneles de prueba serán probados según su espesor de acuerdo con ASTM C 42<sup>21</sup>; para la estructura porosa de acuerdo con ASTM C 138<sup>22</sup>; y para el peso unitario del núcleo de acuerdo con ASTM C 140<sup>23</sup>.

El funcionamiento requerido de los paneles de prueba está determinado por:

1. La compactación del espesor deberá ser menor de 6.40 mm (1/4") del espesor especificado
2. Estructura porosa: mínimo de 15%, máximo de 25%
3. El peso unitario deberá estar comprendido en el rango de  $\pm 80 \text{ kg/m}^3$  (Pcf de  $\pm 5$ ) del peso unitario de diseño

Si la estructura porosa (permeable) tiene dimensiones por debajo del 15 por ciento de vacíos o si el espesor medido es mayor que 6.35 mm (1/4"), o menor que el espesor especificado o si el peso unitario medido es menor que el  $\pm 80 \text{ kg/m}^3$  del peso unitario de diseño, el panel de prueba se quitará y se tendrá que disponer de un terraplén, el cual debe ser aprobado por el departamento a evaluar. Si el panel de prueba reúne los requisitos antedichos, se puede dejar sobre el terreno e incluirlo en el trabajo terminado.

<sup>21</sup> ASTM C 42 métodos de prueba para obtener y probar núcleos perforados y vigas cortadas de concreto

<sup>22</sup> ASTM C 138, método de prueba para el peso unitario, producción, y contenido del aire (gravimétrico) del concreto

<sup>23</sup> ASTM C 140 métodos de muestreo y pruebas para unidades de mampostería de concreto, párrafo 6.3

### IV.3. DISEÑO DE LA MEZCLA DE CONCRETO:

El contratista diseñará una mezcla con las proporciones adecuadas de los materiales y la someterá a consideración del dueño o agente antes de comenzar la obra. Los datos incluirán los pesos unitarios que se determinaron<sup>24</sup>.

El diseño típico de la mezcla crea vacíos de aire o poros en un rango de 15-25%. Este diseño hace que las secciones de concreto permeable parezcan tortas del arroz, mejorando la filtración y una cantidad de área superficial capta los aceites y los agentes contaminantes químicos. Las bacterias que viven en estos espacios abiertos captan los agentes contaminantes, mejorando la calidad del agua en la salida de ésta.

#### IV.3.1. Materiales y proporciones para el concreto permeable

El material debe estar disponible localmente y se tendrá un expediente de su funcionamiento.

##### IV.3.1.1. Cemento

Tipo I o II del Cemento de Portland o el cemento Portland IP ó IS<sup>25</sup>.

El contenido de cementante generalmente usado hasta la fecha para este tipo de pavimentos está en un rango de 308.54 a 373.80 kg/m<sup>3</sup> (520 a 630 libras por yarda cúbica), pero generalmente para aplicaciones en pavimentos es de 356 kg /m<sup>3</sup> (600 libras por yarda cúbica)

Cemento volante Fly ash y escoria granulada de alto horno:

El Fly Ash<sup>26</sup> se puede utilizar en cantidades que no exceda el 20% de material de cementante total, con un mínimo de 15%. La escoria granulada de alto horno<sup>27</sup> se puede utilizar no excediendo las cantidades de 50% por peso de material cementante total.

##### IV.3.1.2. Contenido de cemento

Para los pavimentos sujetos a carga vehicular, el total de material cementante no será menor de 356 [kg /m<sup>3</sup>] (600 lb/yd<sup>3</sup>)

##### IV.3.1.3. Agregado

El Departamento de Georgia del Transporte (GDOT) Utiliza el agregado grueso No. 8 (3/8 a No.16)<sup>28</sup>; o agregado grueso del No. 89 (3/8 a No. 50)<sup>29</sup>. Si se utiliza otra graduación o tamaño del agregado éstos deben someterse a los datos del material propuesto al dueño para su aprobación.<sup>30</sup>

##### IV.3.1.4. Contenido de agregado

El volumen del agregado por yarda cúbica será igual a 0.765 [m<sup>3</sup>](27 ft<sup>3</sup>)cuando está calculado en función del peso unitario<sup>31</sup>. El agregado fino, si se utiliza, no debe exceder 0.085 m<sup>3</sup> (3ft<sup>3</sup>) y no deberá incluirse en el volumen del agregado total.<sup>32</sup>

<sup>24</sup> Parrafo 11, ASTM C 29 prueba para el peso unitario y los vacíos en el agregado. Procedimiento de cribado

<sup>25</sup> Conformados con NMX C ONNCCE 414 Industria de la construcción- cementos hidráulicos – especificaciones y métodos de prueba

<sup>26</sup> Que se conforma ASTM C 618 especificación para las cenizas volantes de carbón y crudo o Puzolana natural para el uso como aditivo mineral en concreto de cemento de Portland

<sup>27</sup> Conformada con ASTM C 989 especificación para la escoria del alto horno para uso en concreto y en mortero

<sup>28</sup> ASTM C 33 especificaciones para los agregados de concretos

<sup>29</sup> ASTM D 448 especificación para los tamaños estándares de los agregados gruesos para Construcción de Carretera

<sup>30</sup> Georgia Concrete and Products Association. Specification. [www.gcpa.org/specification.htm](http://www.gcpa.org/specification.htm). copiado el 2 de marzo de 2002

<sup>31</sup> Idem 24

#### IV.3.1.5. Inclusor de aire:

Se conformará, de acuerdo con ASTM C 260<sup>33</sup>

#### IV.3.1.6. Aditivos

Tipo A Reductor de agua<sup>34</sup>

Tipo B Retardante de agua<sup>35</sup>

Tipo D Reductores / Retardantes de agua<sup>36</sup>

También, se puede usar un estabilizador para la hidratación; se recomienda en el diseño y en la producción del concreto permeable. Este estabilizador suspende la hidratación del cemento formando una barrera protectora alrededor de las partículas de cemento, retrasando el fraguado inicial que alcanzan las partículas. La función primaria de los aditivos es la de estabilizar la hidratación; sin embargo, debe también resolver los requisitos para retardantes/ reductores de agua del tipo D o tipo de B<sup>37</sup>.

La inclusión de aditivos mejorará las características de colocación y endurecimiento. Los aditivos reductores de agua Tipo A (ASTM C 494) y el reductor de agua y retardante tipo D, según ASTM C 494, tienen una buena función, particularmente en la aplicación para clima cálido.

Una gran cantidad de aditivo reductor de agua no tiene hasta la fecha resultados efectivos en el mejoramiento de la colocación del concreto permeable.

Las investigaciones futuras requerirán proveer más recomendaciones referentes a su uso. En cuanto a las recomendaciones para la dosificación de aditivos y secuencias de carga habría que dar un mayor seguimiento.

Los aditivos para la inclusión de aire ASTM C 260 realizados para crear estructuras porosas en la pasta cementante, mejoran la resistencia del pavimento la cual se ve deteriorada por los ciclos de hielo /deshielo.

Los grandes poros en la estructura del pavimento y la elasticidad dada por la inclusión de aire en la pasta cementante son producidos por la eliminación de agregado fino proporcionando a los cristales de hielo una estructura tal que permita su expansión.

Las proporciones de aditivo en una mezcla permeable de 0.7646 [m<sup>3</sup>] (1 yarda<sup>3</sup>) son para dar estabilidad, de acuerdo con ASTM C 94 "Specifications for Ready-Mixed Concrete".<sup>38</sup>

En un estudio limitado, si se adiciona una doble cantidad de lo normal de los aditivos para la inclusión de aire, ésta incrementará las características de cohesión de la pasta cementante y de los agregados.

#### IV.3.1.7. Agua

El agua será potable o se conformará con especificaciones estándares de GDOT.

---

<sup>32</sup> Idem 30

<sup>33</sup> ASTM 260 especificación para los aditivos inclusores de aire para el concreto

<sup>34</sup> ASTM 494 especificación para los aditivos químicos para concreto

<sup>35</sup> Idem 34

<sup>36</sup> Ibidem 34

<sup>37</sup> Ibidem 34

<sup>38</sup> Ibidem 30

#### IV.3.1.8. Agua para la mezcla

El agua de la mezcla será tal que la pasta cementante exhiba un brillo metálico mojado sin hacer a la pasta fluir (si el agua de la mezcla da a la pasta cementante un aspecto opaco significa que el agua es escasa para la hidratación.)

Este nivel de consistencia, aproxima a la mezcla permeable a las características de colocación y manejo de mezclas al pavimento asfáltico o bien para carga. Si la mezcla tiene un exceso de agua, la pasta cementante se conducirá a las capas mas bajas del pavimento, resultando en los estratos inferiores una obstrucción de los poros (vacíos). Y una mezcla con una menor cantidad de agua da lugar a inconsistencia en la mezcla y la pasta cementante no sería suficientemente adhesiva y no se podría lograr la composición propia del concreto.

#### IV.3.1.9. Relación agua-cemento (W/C)

La relación agua/ cemento como tal no es el principal factor que controla, las características de la mezcla, sin embargo hay una relación agua cemento óptima para cualquier agregado dado. Es bastante difícil predecir la relación agua /cemento óptima especialmente porque es afectada por la absorción del agregado, pero como regla general, el contenido de agua de la mezcla se puede tomar como 80 [kg/m<sup>3</sup>] de concreto. La relación agua /cemento dependerá entonces del contenido necesario de cemento para un recubrimiento suficiente del agregado; habitualmente la relación agua /cemento está entre 0.34 a 0.52.

#### IV.3.1.10. Relación agregado-cemento

La relación agregado-cemento debe estar entre 4:1 a 4.5:1. Tanto la relación agua-cemento y la relación agregado-cemento deban satisfacer las características de permeabilidad, capacidad de carga, y durabilidad.

#### IV.3.1.11. Peso unitario

El peso unitario del pavimento permeable estará en el rango de 1682 [kg/m<sup>3</sup>] (105 lbs /ft<sup>3</sup>) con un porcentaje de vacíos de 15 a 25 %. La alta permeabilidad resultante para el núcleo del pavimento tiene un peso menor al teórico.<sup>39</sup>

#### IV.3.1.12. Gravedad específica

La gravedad específica de la piedra caliza debe estar en un rango aproximado de 1.68 a 1.9, dependiendo del tipo de agregado. Para las proporciones dadas que utilizan los cementos hidráulicos, el funcionamiento del pavimento permeable es inversamente proporcional a sus vacíos.

Un mayor grado de compactación aumentará la densificación de los agregados con una disminución en el contenido vacío o de los poros.

A menos que un grado similar de compactación se obtenga en el pavimento sobre el terreno y en las pruebas correspondientes de resistencia en los especímenes, no se podrá realizar ninguna inferencia de los especímenes de prueba sobre la resistencia del pavimento permeable. Algunas relaciones se han establecido empíricamente entre los métodos específicos de colocación y los niveles de compactación de los especímenes de prueba.

La validez de la relación puede ser verificada bajo las consideraciones del peso unitario. El peso unitario de la mezcla permeable es aproximadamente del 70% con respecto a un concreto normal. Se debe realizar mínimo una prueba por día de colocación, la cual verificará que el varillado en el peso de material sea lo indicado, por lo que se seguirá la norma ASTM C 172<sup>40</sup> y ASTM C 29<sup>41</sup>.

La mezcla debe estar entre  $\pm 80$  [kg /m<sup>3</sup>] ( $\pm 5$  Pcf) del peso unitario de diseño. Si la mezcla está fuera de este rango, las proporciones se deben modificar por completo. Se deben de extraer mínimo 3 núcleos, en 7 días de

<sup>39</sup> Ibidem 18

<sup>40</sup> ASTM C 172 práctica de muestreo del concreto fresco

<sup>41</sup> Ibidem 24

colocación aproximadamente, todo de acuerdo con la ASTM C 42<sup>3</sup>. Con los núcleos se puede verificar el espesor del pavimento, los extremos de la base pueden ser cortados para facilitar la determinación del volumen. El peso unitario de los núcleos debe ser calculado por medio de los resultados obtenidos cuando fueron probados, de acuerdo con ASTM-C- 140 párrafo 14.1<sup>42</sup>

La aceptación del pavimento se basará en el promedio de los pesos unitarios de los núcleos, los cuales estarán entre  $\pm 80$  [kg /m<sup>3</sup>] ( $\pm 5$  Pcf) del peso de diseño. Los espesores del pavimento para una carga de tráfico ligero será de 12.5 [cm] (5 pulgadas). Se necesitaran espesores adicionales para pavimentos sujetos a ejes de una carga pesada.<sup>43</sup>

## IV.4. PROPIEDADES DEL CONCRETO PERMEABLE

### IV.4.1. Desarrollo de la resistencia

El desarrollo de los esfuerzos resistentes del concreto permeable dependen de la relación Agua / cemento y la relación agregado /cemento.

La resistencia a compresión teórica de este tipo de concreto varía generalmente entre 15.327 y 143 kg/cm<sup>2</sup> (1.5 y 14 MPa) lo que depende principalmente de su densidad, que es regida por su contenido de cemento. Ver Figura 4.1.

La relación resultante se ha de determinar por medio de pruebas. A este respecto se deberá observar que los especímenes de prueba para la resistencia a compresión tienen que compactarse de una manera especial, utilizando una pieza de extensión de molde y una aspiradora en un tubo guía; la norma BS 1881: parte 113:1983 prescribe el método de prueba.<sup>44</sup>

El aumento de la resistencia del concreto permeable con la edad se presenta al igual que en el concreto normal. La resistencia a la flexión es comúnmente 30% de la resistencia a la compresión, es decir, relativamente mas alta que en el concreto ordinario.<sup>45</sup>

El módulo de elasticidad varía con la resistencia; por ejemplo un módulo de resistencia de 10 GPa se halló a una resistencia de 51.1 [kg/cm<sup>2</sup>] (5 MPa). La contracción del concreto permeable es considerablemente más baja que la del concreto normal: un valor típico es de  $120 \times 10^{-6}$ , pero hasta  $200 \times 10^{-6}$  cuando la humedad relativa es extremadamente baja. Esto es porque la pasta de cemento está presente sólo como un delgado recubrimiento y la contracción por secado esta muy restringida por el agregado. Puesto que la pasta tiene una gran superficie expuesta al aire, la rapidez de contracción es muy alta, el movimiento total puede terminar en poco más de un mes y la mitad de la contracción puede tener lugar en 10 días.<sup>46</sup>

---

<sup>42</sup> Ibidem 18

<sup>43</sup> Nevill. Tecnología del concreto. Edit. Trillas

<sup>44</sup> Da el método para la realización y curando de los cubos de la prueba de concreto permeable de 150 milímetros de lado hechos con agregados de dimensión máxima nominal de 40 milímetros o menor.

<sup>45</sup> Ibidem 18

<sup>46</sup> Ibidem 18

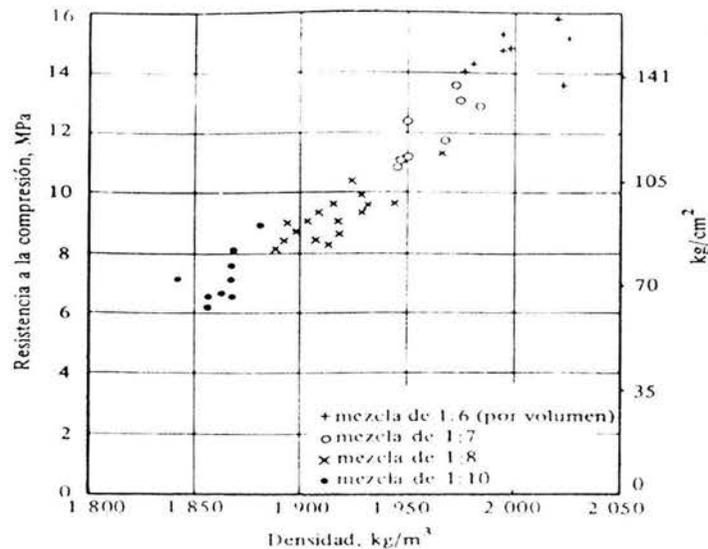


Figura 4.1. Resistencia a la compresión de concreto sin finos a la edad de 28 días como una función de su densidad en el momento de la prueba.

FUENTE: Nevil, *Tecnología del Concreto*. Edit. Trillas

#### IV.4.2. Coeficiente de expansión térmica

El coeficiente de expansión térmica del concreto permeable está alrededor de 0.6 a 0.8 del que se presenta en el concreto normal, pero el verdadero valor del coeficiente de expansión térmica depende del tipo de agregado utilizado.

#### IV.4.3. Coeficiente de conductividad térmica

El coeficiente de conductividad térmica del concreto permeable está entre 0.69 y 0.94  $l/m^2s^{\circ}C/m$  cuando se emplea agregado de peso normal, pero solo es alrededor de 0.22  $J/m^2s^{\circ}C/m$  con agregado de peso ligero.<sup>47</sup>

#### IV.4.4. Permeabilidad

Las pruebas de permeabilidad conducen a que con agregado de 5/8 in es mas que suficiente para tener una capacidad de drenado aceptable, además de un 20 % de vacíos para anticipar una precipitación de 24 horas y recibir eventos de 10 a 25 años de tormenta. Recientes pruebas evaluaron el uso de reciclado de agregados para secciones de drenado secundario y otras opciones de filtración.<sup>48</sup>

Un pavimento con 15 por ciento de vacíos, proporcionan una adecuada velocidad de flujo, para reunir el mínimo aceptable de agua de lluvia. Algunas pruebas muestran que con 6 in de concreto permeable con un coeficiente de A/C de 4:1 se colocaran una base de arena de 36 in de profundidad teniendo 54.7 in por hora flujo a una profundidad de 4 ft bajo el tope del pavimento. Para la obtención del flujo vertical se realizaron pruebas con agregado cribado, con las cuales se obtuvo 6.8 galones por minuto de flujo vertical, con 12 in de un coeficiente de A/C de 6:1.

La velocidad de flujo de la muestra de infiltración de 6 in fue determinada con 3.92 gpm por ft<sup>2</sup>. Una prueba de permeabilidad estandarizada es necesaria para obtener datos de uso para calcular la velocidad de filtración y volumen de retención. Esta prueba debería de dar datos para la velocidad de flujo en gpm por ft<sup>2</sup> y la velocidad vertical en pulgadas por minuto. En lugar de datos específicos, una escala de 1 a 10 podrán ser adoptados para indicar el desempeño del pavimento permeable.<sup>49</sup>

<sup>47</sup> Ibidem 18

<sup>48</sup> Washington Aggregates & Concrete Association.htm. copiado el 4 de octubre de 2003

<sup>49</sup> Ibidem 18

#### IV.4.5. Refuerzo

En aplicaciones de este pavimento, no es necesario el acero de refuerzo. Sin embargo, en caso necesario el acero de refuerzo se ha de recubrir con una capa delgada de alrededor de 3 [mm] de pasta cementante para mejorar las características de adherencia y para impedir la corrosión. La manera más fácil de recubrir el acero de refuerzo es con el uso de concreto lanzado.<sup>50</sup>

#### IV.4.6. Contenido de vacíos

Un efecto benéfico de los poros grandes del concreto permeable es que permiten el drenado fácil en circunstancias apropiadas. Este se aprovecha en el uso de concreto hecho permeable con un contenido de vacíos de aire de al menos 15% en pavimentos alrededor de árboles (los cuales van a verse desprovistos de agua) y en estacionamientos domésticos (sobre-capa en una superficie permeable)

#### IV.4.7. Capilaridad

La acción de la capilaridad del pavimento permeable es extremadamente baja, por lo que se considera que este tipo de concretos no está sujeto a succión capilar. Para una mezcla con un agregado de 1 cm (3/8 in), la acción de la capilaridad debe de ser menos de una pulgada es decir 2.5 cm.

En consecuencia, es altamente resistente a la congelación, siempre que los poros no estén saturados; si estuvieran saturados, la congelación causaría una destrucción rápida. Sin embargo, la absorción de agua hace al concreto permeable inconveniente para su uso en cimentaciones y en las situaciones en que pueda llegar a saturarse con agua. La saturación máxima puede ser tan alta como 25% por volumen, o la mitad de esa cantidad por masa pero, en condiciones normales, el agua absorbida no excede de un quinto del valor máximo. Sin embargo, las paredes externas tiene que cubrirse con revestimiento en ambos lados; esto tiene también el efecto de reducir la permeabilidad al aire. El revestimiento y la pintura reducen las propiedades de absorción de sonido del concreto permeable (por el cierre de los poros) de modo que de allí donde se consideren de suma importancia las propiedades acústicas, un lado de la pared deberá quedar sin cubrir con revestimiento. Se puede observar que la textura abierta del concreto permeable lo hace muy conveniente para revestimientos.

### IV.5. PREPARACIÓN DE LA SUBRASANTE

El suelo natural encontrado en cualquier proyecto deberá de muestrearse y someterse a pruebas para permeabilidad y capacidad de carga. Cuando en los suelos existentes predomina la arena, las condiciones de graduación no favorecen la permeabilidad.

La uniformidad del soporte de la subrasante, en lugar de la resistencia, es el mejor criterio para una adecuada selección de la subrasante. Ver Figura 4.2. El pavimento permeable de concreto tiene una losa que distribuye las cargas sobre una gran área similar a la del pavimento de concreto convencional. Ésta distribución de cargas disminuye la presión en la subrasante y elimina la necesidad de grandes espesores de la subrasante.

Ya que la uniformidad del soporte de la subrasante es esencial en la función de los pavimentos, esto debe de garantizarse tanto en condiciones secas como húmedas de la subrasante. Una adecuada construcción del pavimento permeable de concreto facilita estos requerimientos, específicamente cuando están expuestos al agua de lluvia. Lo que podría provocar la ocurrencia de pérdidas en el soporte de la subrasante en suelos arenosos. Sin embargo, el tipo de problemas en un soporte de la subrasante es variable y pueden resultar de la presencia de limo y arcilla, los cuales son altamente compresibles, tienen poca cohesión o se expanden en condiciones

<sup>50</sup> Ibidem 18

húmedas. Estas condiciones en los suelos pueden ser analizados individualmente para otros valores en los soportes y pueden ser modificados, reemplazados o bien colocar un material permeable adicional en menos de 15.25 cm (6 pulgadas) encima de un suelo inadecuado.

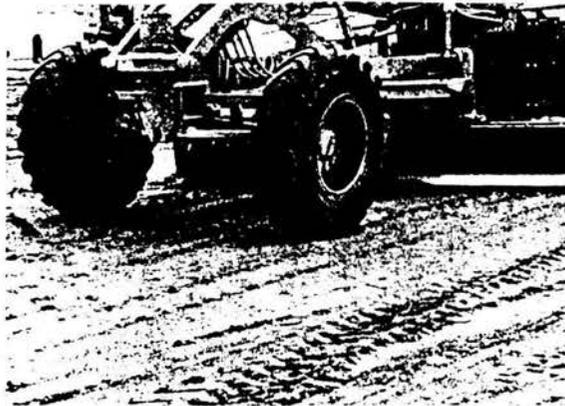


Figura 4.2. Uniformidad de la subrasante  
FUENTE: Florida Concrete and Products Association.  
*Portlan Cement Pervious Pavement Manual.*

La acumulación de humedad en la subrasante en dos tipos de pavimentos causó una deflexión excesiva y siendo mayor en el pavimento impermeable convencional. Donde hay suelos arcillosos o capas impermeables, hay opciones disponibles para diseñar, permitiendo el uso de pavimento permeable de concreto.

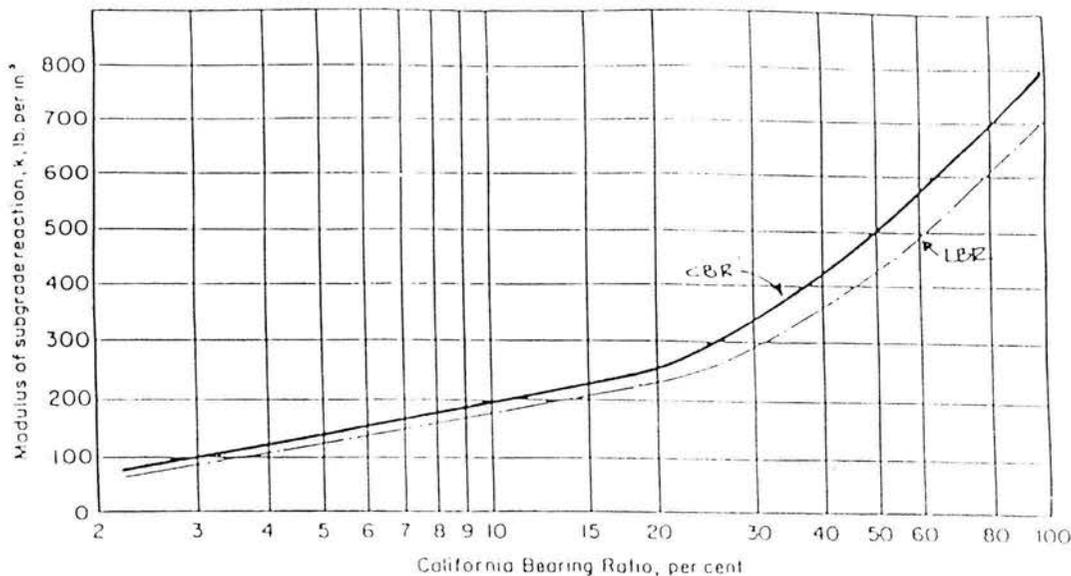
Dependiendo del tipo de suelo, la subrasante debería compactarse entre 90 y 95% de la densidad determinada por AASHTO T-9951 ó AASHTO T-18052. El módulo de reacción de la subrasante (k) [lb/in<sup>3</sup>] debería estar determinado con las condiciones del suelo existente y estableciendo los requerimientos de diseño. Ver Figura 4.3.

Antes de la colocación del pavimento, la subrasante o sub-base debería ser compactada de acuerdo a las especificaciones y a las condiciones de humedad. El pavimento permeable tiene una humedad mínima libre y si la subrasante o sub-base está en condiciones secas, el tiempo de colocación se acelerará y se reducirá el desempeño del pavimento.

El tiempo de colocación es importante para cumplir con la humedad de la subrasante sin la presencia de la resistencia libre del agua como en los métodos del pavimento de concreto convencional.

<sup>51</sup> AASHTO T 99

<sup>52</sup> AASHTO T 180 relaciones de la Humedad-Densidad de suelos usando un pistón de 10 libras (454kg) Pisón y de 18 pulgadas (457m m) de longitud.



Relationship between California Bearing Ratio and modulus of subgrade reaction.

Figura 4.3. Gráfica para obtener el valor de K  
 FUENTE: Florida Concrete and Products Association.  
 Portlan Cement Pervious Pavement Manual.

#### IV.5.1. Material de la subrasante

Los 15.24 cm (6 pulgadas) superiores estarán compuestos de material granular o suelo granular donde predomine arenilla sin más de que una cantidad moderada de limo o arcilla.

#### IV.5.2. PERMEABILIDAD DE LA SUBRASANTE

Antes de la colocación del pavimento permeable de concreto, la aceptación de la subrasante se hará a través del índice de la permeabilidad determinado mediante un infiltrómetro de doble anillo, u otra prueba conveniente de permeabilidad del suelo de la subrasante. La permeabilidad de campo debe ser razonablemente igual a la permeabilidad de diseño.

#### IV.5.3. Soporte de la subrasante

Se requiere material limpio además de estar libre de materiales deletéreos. El espesor máximo de capas será de 20.32 cm (8 in), y será compactado con un equipo vibratorio a una densidad mínima del 92% de la densidad seca máxima según lo establecido en ASTM D 1557<sup>53</sup> o AASHTO T 180<sup>18</sup>. Ver Figura 4.4.

<sup>53</sup> ASTM D 1557 pruebas para las relaciones de la Humedad-Densidad de suelos y suelo. En las mezclas de los agregados se usa el pisón de 4.55 [kg] (10 libras) y 45 [cm] (18-in) de longitud



Figura 4.4. Compactar con un equipo vibratorio según lo establecido en la norma  
 FUENTE: Florida Concrete and Products Association.  
 Portlan Cement Pervious Pavement Manual.

#### IV.5.4. Humedad de la subrasante

La subrasante estará en condiciones húmedas (dentro del  $\pm 3\%$  del contenido de agua óptimo, de acuerdo con la prueba de compactación, modificada ASTM D 1557<sup>16</sup> o AASHTO T 180).<sup>54</sup>

#### IV.6. GEO-TEXTIL

Desde la antigüedad se han colocado materiales naturales como pieles o fibras vegetales sobre los suelos muy blandos, para reforzarlos y evitar la incrustación de materiales de préstamo en la construcción de caminos, bordos, etc. El empleo de telas con estos fines se inicia en la década de los años 60's y los primeros textiles fabricados específicamente para obras de ingeniería aparecen a principios de los años 70's.

A partir de los años 80's, se desarrollaron las geo-redes, geomallas y geodrenes, productos que representan la segunda generación de geosintéticos y que fueron diseñados para satisfacer los requerimientos de obras realizadas en todo el mundo. Los geosintéticos se dividen en discontinuos o geotextiles permeables y continuos o geotextiles impermeables.

Los geosintéticos discontinuos o geotextiles (permeables), son materiales de construcción, flexibles y permeables a los fluidos, capaces de retener partículas de suelo mayores que el tamaño de sus poros, que han sido diseñados y fabricados para trabajos de ingeniería civil.

Los geosintéticos continuos o geomembranas (impermeables) son recubrimientos sintéticos impermeables a fluidos o partículas que se utilizan en ingeniería geotécnica.

Han surgido nuevas palabras para nombrar estos productos como geocompuestos, geopanales, encapsulados, geobloques, geotubos, geo-redes mono y biorientadas, geoceldas, geomatrices y biomatrices.

En la actualidad se reconocen cuatro funciones principales:

- ✓ Separación, al evitar o minimizar la mezcla de materiales de diferente granulometría
- ✓ Filtración y drenaje, al evitar la migración de partículas de suelo y permitir el libre flujo de agua y gases
- ✓ Refuerzo, al soportar tensiones, estabilizar la masa de suelo y proteger geomembranas
- ✓ Impermeabilizantes, al formar una barrera que impida el paso de fluidos y partículas de suelo

<sup>54</sup> Ibidem 18

Estos productos se aplican a una gran variedad de obras, como taludes y muros de tierra, terraplenes en suelos blandos, control de erosión, almacenamientos, cortinas de presas, canales, vías de comunicación, sistemas de filtración y drenaje y en la disposición de residuos líquidos y sólidos.

Los geotextiles se usan progresivamente con más confianza en obras hidráulicas para asegurar la doble función de filtración y de drenaje.

Un geotextil se usa como un separador permeable para prevenir el entremezclado de materiales diferentes como subrasante y materiales de pavimentación superficiales o no superficiales así como cimientos y materiales de relleno selectos. El geotextil deberá estar diseñado para permitir el paso de agua mientras retiene el suelo del lugar. Estas especificaciones no incluyen geotextiles usados para refuerzo. Por lo que el geotextil deberá estar compuesto de fibras sintéticas. Las fibras usadas para la fabricación del geotextil deberán estar compuestas al menos de 85% en peso de poliésteres o poliamidas. El geotextil deberá estar libre de defectos o fallas las cuales alteren significativamente sus propiedades físicas.<sup>55</sup>

---

<sup>55</sup> CONGRESO DE GEOTECNIA Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos

# V. MANEJO Y COLOCACIÓN DEL PAVIMENTO PERMEABLE DE CONCRETO

## **V.1. CONSTRUCCIÓN DEL PAVIMENTO PERMEABLE DE CONCRETO**

Algunos sitios bien planeados proporcionan un adecuado sistema de agua. El gobierno requieren que estos sistemas mejoren la calidad de las descargas de agua.

Los requerimientos de la mezcla así como las técnicas de colocación son regularmente actualizados y los contratistas deben de consultar regularmente los manuales y las especificaciones de los materiales para los últimos por menores antes de la colocación del pavimento. Las operaciones a seguir están directamente relacionadas con la calidad de la subrasante, la adecuada proporción de la mezcla, la colocación, el acabado y el curado.

## **V.2. MEZCLADO Y TRANSPORTACIÓN**

Las propiedades de la mezcla permeable requieren especial cuidado en el mezclado y la transportación.

Para producir una mezcla de consistencia adecuada, las proporciones deben ser correctamente ajustadas para la humedad de los agregados. El peso inicial de los materiales en la mezcladora debe tener una secuencia tal que minimice los apelmazamientos (grumos, bolas) del material de la mezcla. Los camiones revolvedores para ayudar a la descarga deberán tener mas abiertas las aperturas o bien los canalones deberán ser lo más ancho posible dando un revenimiento de cero, como se muestra en las Figura 5.1. Las unidades descargarán por la parte de atrás, y la parte de enfrente deberá estar lo más elevado posible para ayudar a la descarga. Ver Figura 5.2.



Figura. 5.1. Camión revolvedor descargando con la máxima abertura del canalón, la mezcla de concreto permeable

FUENTE: <http://www.chargerconcrete.com/perviousconcrete.htm>

Copiado el 6 de octubre de 2003

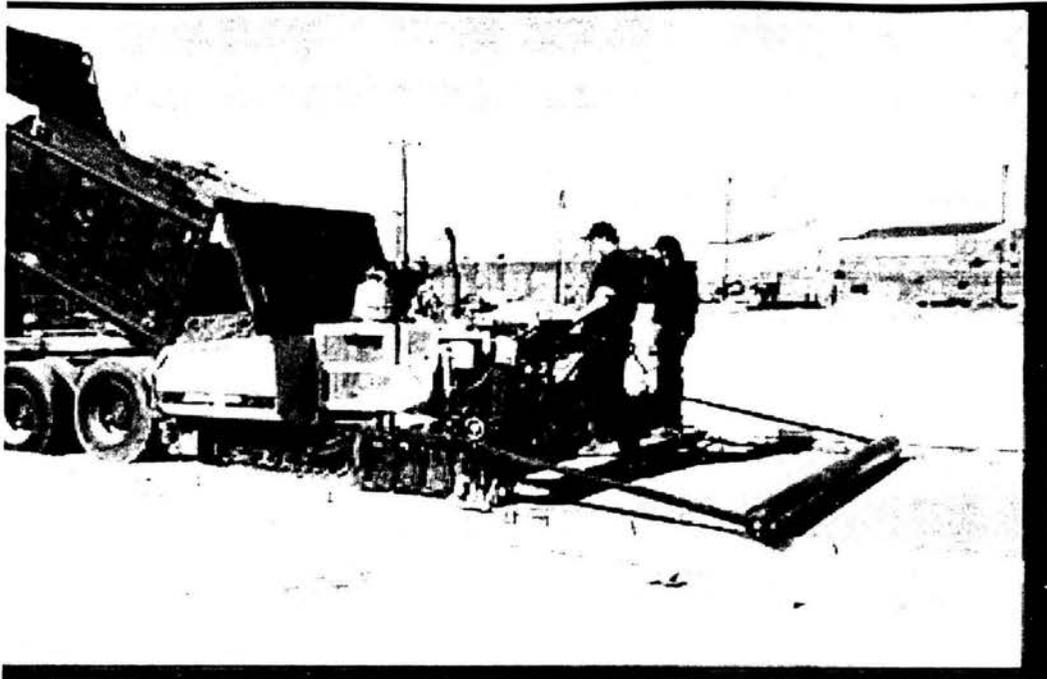


Figura 5. 2. Descarga de concreto permeable por medio de un camión  
*FUENTE: N. Mike Jackson, Ph.D., P.E., Technical Consultant,  
Alan Sparkman, Executive Director, Tennessee Ready Mixed Concrete Association*

Se recomienda inspeccionar las aspas de los camiones revolvedores dado el desgaste que sufren por el uso, además de que cada olla no debe tirar más de dos cargas antes de ser asignado a cargar otro concreto. La mezcla permeable tiende a unirse fuertemente en las aspas por lo que es necesario que éstas se limpien adecuadamente y se inspeccionen.

El uso de un aditivo retardante / reductor de agua ayudará en las operaciones de colocación provocando que el fraguado inicial de mezcla sea más tardío cuando se manejen grandes tiempos en la colocación

Si estas recomendaciones se siguen después de una carga de concreto, se deberá realizar una inspección visual para garantizar la adecuada consistencia de la relación agua/cemento (A/C). Durante la transportación el producto se mezclará a una baja velocidad. La descarga de la mezcla deberá completarse una hora después de que se haya agregado el agua a la mezcla. Un ambiente con alta temperatura provocará un efecto directo en el fraguado inicial por lo que se deberá tener cierto cuidado. De acuerdo a la experiencia, se dice que este tipo de concreto no se recomienda para bombeo dado que no es práctico ni factible.

### **V.2.1. Colocación y consolidación**

Los procedimientos de colocación adecuados son muy importantes porque conducen a un buen desempeño del pavimento permeable. También es necesario que se cuente con gente experimentada en ese campo.

Antes de la colocación, la subrasante o sub-base deberá ser completada de acuerdo a las especificaciones establecidas. Toda la mezcla permeable tiene un contenido mínimo libre de humedad. Si la sub-base o la subrasante no tiene el contenido de agua adecuado, esta capa puede absorber agua de la mezcla, acelerando el fraguado y provocando una reducción en la resistencia del pavimento.

Previo a la colocación de la mezcla, tanto la cimbra como la nivelación se revisarán como en el caso de un concreto convencional. Se re-compactará la sub-rasante para dar un espesor y soporte uniforme. Antes de iniciar la descarga, se realizará una inspección visual a la mezcla la cual debe estar hecha de acuerdo con la relación agua/cemento óptima y la superficie de la mezcla deberá tener un aspecto metálico-brillante. Si el material llega a tener apelmazamientos (bolas, grumos) se reportarán a la planta y éstos no se incorporarán en el pavimento. Si continúan éstos apelmazamientos durante la colocación del material, entonces se deberá revisar humedad y el estado de las aspas de la olla.

La descarga del material deberá ser lo más rápido posible y continúa. Como se muestra en la Figura.5.3 y 5.4. Si llega a ser interrumpido, la mezcla permanecerá en el canalón, la cual tendrá que removerse y ser depositada en el piso.

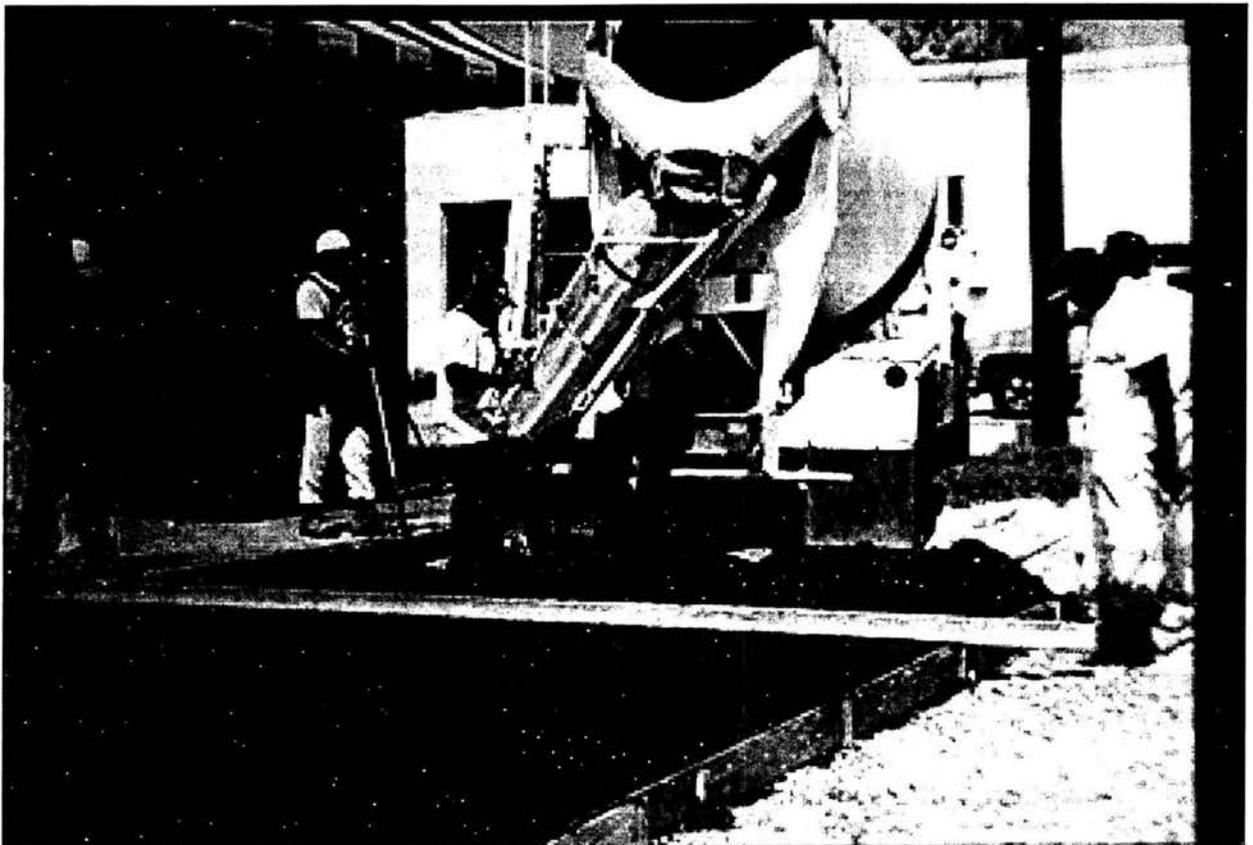


Figura 5.3. Descarga de material rápida de un camión revolvedor  
FUENTE: N. Mike Jackson, Ph.D., P.E., Technical Consultant,  
Alan Sparkman, Executive Director. Tennessee Ready Mixed Concrete Association



Figura 5.4 Distribución de la descarga del material la cual debe ser rápida y continua  
*FUENTE: Charger Enterprises. <http://www.chargerconcrete.com>  
copiado el 4 de octubre de 2003*

El uso de equipo mecánico de esparcimiento mejorará la producción y reducirá la contaminación de los materiales de la subrasante. Si este equipo no está disponible, la distribución será manual. Figura 5.5 y Figura 5.6. La siguiente operación es para la nivelación o compactación del material. Hasta la fecha los procedimientos de colocación tiene incluido un enrasador y un rodillo. Tanto el enrasador como el rodillo no tienen la capacidad para compactar la mezcla, ver Figura 5.7. y Figura 5.8. En estos tipos de equipos, la presión vertical es muy baja además de que su posición está por debajo de la elevación establecida en la cimbra. La utilización de una frecuencia alta en el vibrado del concreto empleando el equipo mecánico de colocación puede causar en la mezcla una densificación y con ello eliminar la estructura permeable si continua el vibrado.

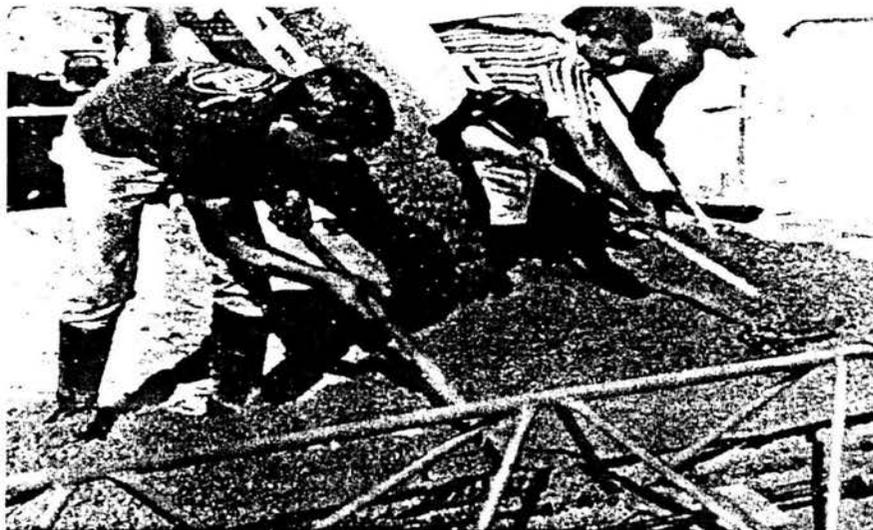


Figura 5.5. Distribución manual del material  
*FUENTE: Florida Concrete And Products Association Inc. Florida. E. U.*

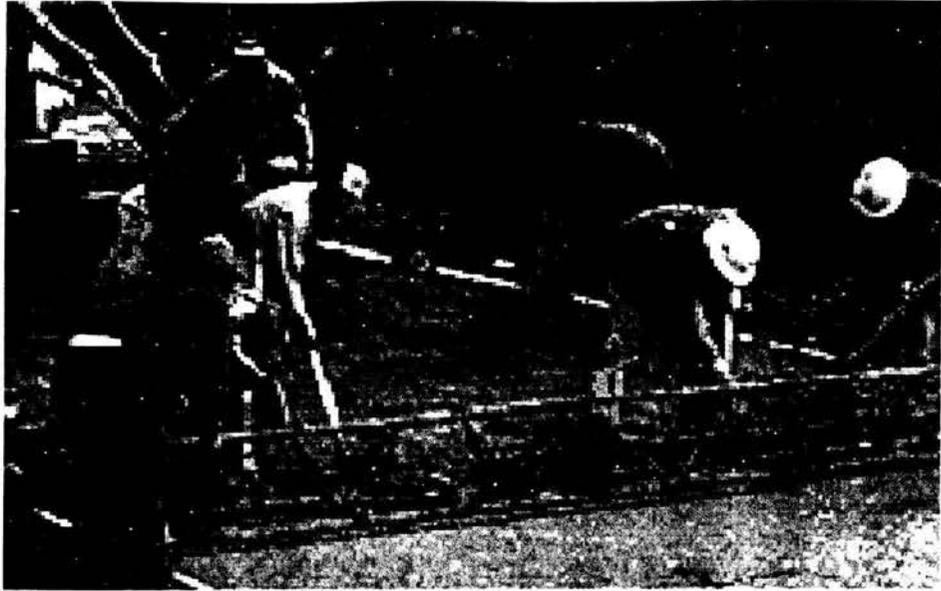


Figura 5.6 La distribución será manual, si el equipo de equipo mecánico de esparcimiento no está disponible

*FUENTE: N. Mike Jackson, Ph.D., P.E., Technical Consultant,  
Alan Sparkman, Executive Director, Tennessee Ready Mixed Concrete Association  
Copiado el 6 de octubre de 2003*

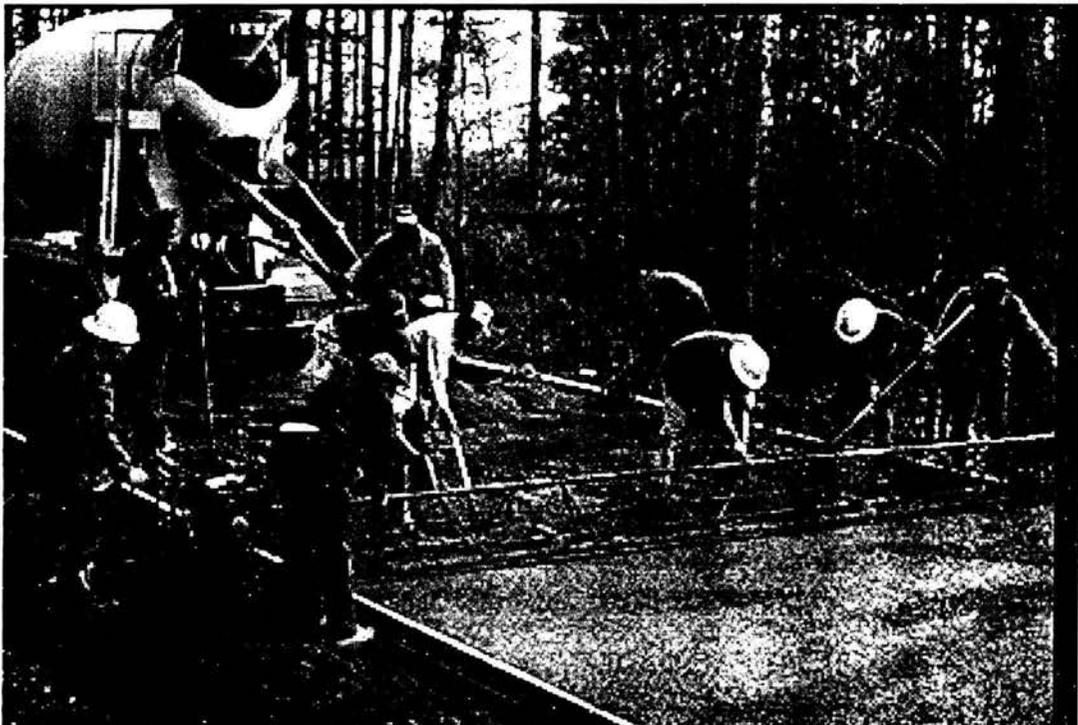


Figura 5.7. Enrasamiento del material ya distribuido, por medio de la regla

*FUENTE: N. Mike Jackson, Ph.D., P.E., Technical Consultant,  
Alan Sparkman, Executive Director, Tennessee Ready Mixed Concrete Association  
Copiado el 6 de octubre de 2003*

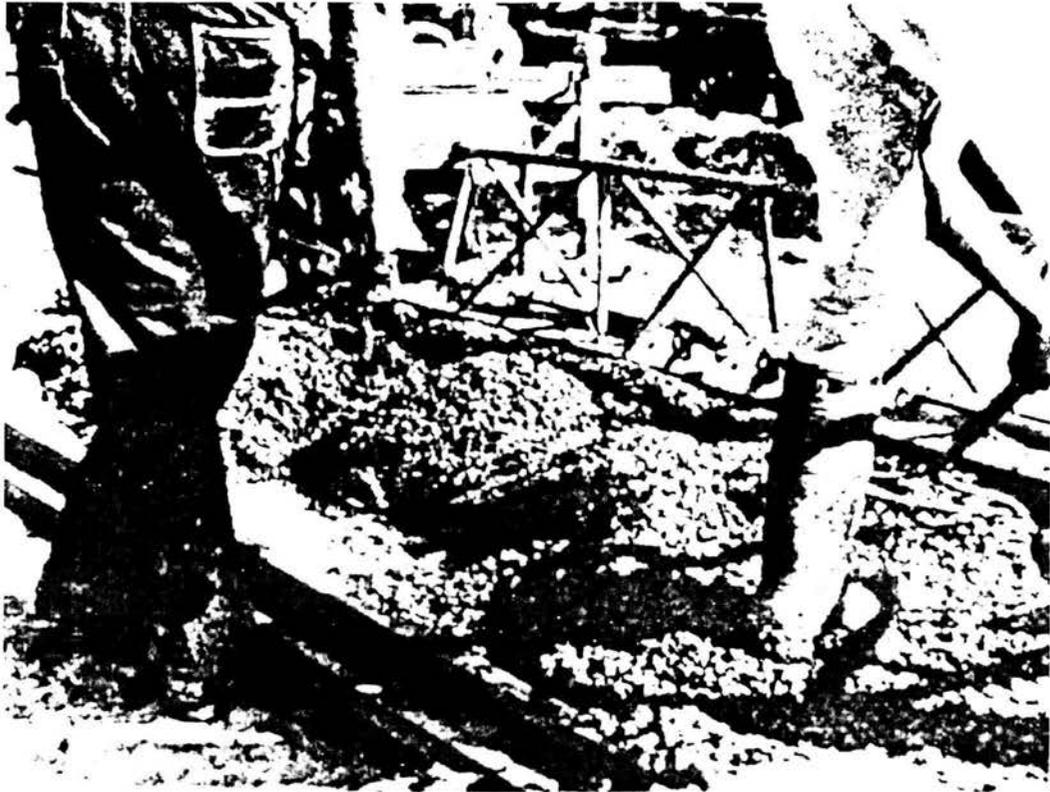


Figura 5.8. Enrasamiento del material ya distribuido, por medio de la regla  
*FUENTE: Florida Concrete And Products Association Inc. Florida. E. U.*

La vibración puede causar a la pasta cementante una fluidez tal, que llene la parte baja de la estructura permeable del pavimento dejando en la superficie los agregados. Esto reducirá la resistencia del concreto en la superficie y debilitará la permeabilidad en la porción baja del pavimento. Si se usa un rodillo u otro método es usado para introducir las partículas sobresalientes se seguirá la operación de enrasamiento. Si existiera algún retraso al final de las operaciones de colocación, la compactación perjudicaría seriamente en la capacidad estructural y en la durabilidad de la superficie permeable. Los métodos de enrasamiento mecánico con rodillos o con regla, producen un bajo esfuerzo de compactación; en un pavimento colocado, la relación del peso unitario en los resultados es ligeramente menor que el peso unitario teórico. Como se muestra en la Figura 5.9, Figura 5.10 y Figura 5.11. La reducción del peso unitario, en las operaciones de colocación o diseño de la mezcla, se puede permitir en los espesores, siempre que éstos entren en el rango de diseño.



Figura 5.9. Enrasamiento del material ya distribuido, por medio de rodillos o de forma manual

FUENTE: <http://www.chargerconcrete.com/goodinstall.htm>

Copiado el 6 de octubre de 2003

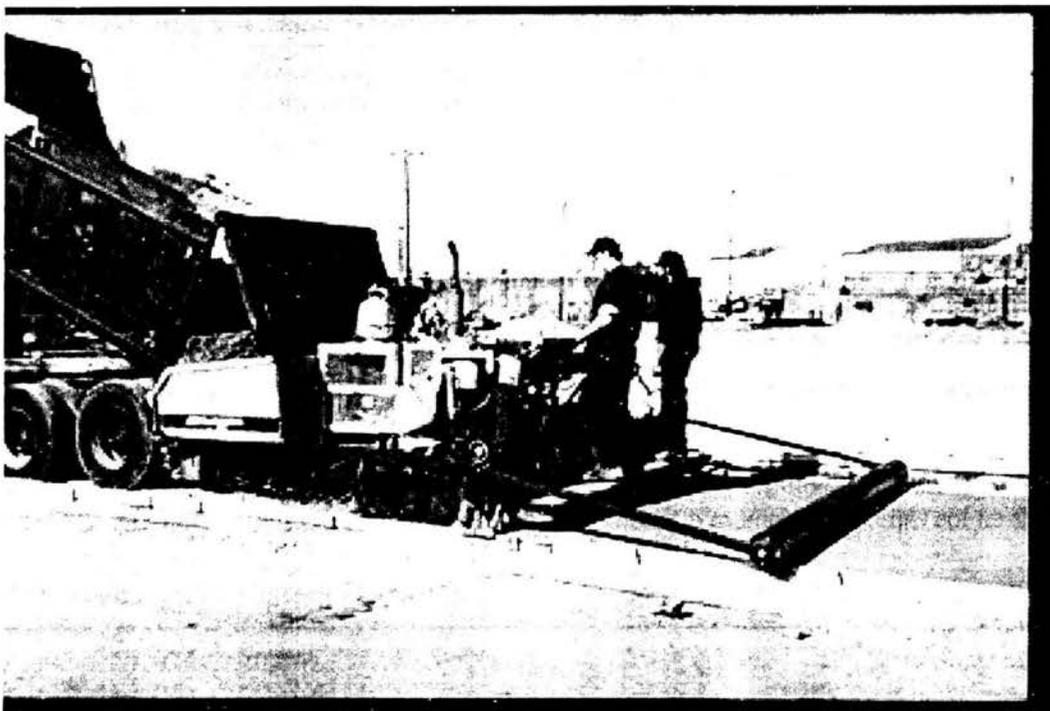


Figura 5.10 Enrasamiento del material ya distribuido, por medio de rodillos

FUENTE: N. Mike Jackson, Ph.D., P.E., Technical Consultant,  
Alan Sparkman, Executive Director, Tennessee Ready Mixed Concrete Association



Figura 5.11 Enrasamiento del material ya distribuido, por medio de rodillos  
 FUENTE: : N. Mike Jackson, Ph.D., P.E., Technical Consultant,  
 Alan Sparkman, Executive Director, Tennessee Ready Mixed Concrete Association

Otro problema que puede ocurrir por el uso de los métodos descritos es el desgaste de la superficie. Estos desgastes aparecerán de 3 a 6 meses después de la colocación y no en la superficie sujeta a flujo vehicular. En muchos casos el desgaste se concentra en la capa de  $3/8$  a  $1/2$  in de las partículas superficiales además de presentar un bajo y continuo deterioro en la superficie. Para evitar el deterioro de los vacíos de la superficie del pavimento, el uso de rodillos en el pavimento deberá ejecutarse en un tiempo no mayor de 20 minutos, después del procedimiento de enrasado. Con los rodillos no se dañará la superficie si se cumple con el tiempo especificado y si en la colocación inicial no se pierde rápidamente la humedad. Si hay un retraso de tiempo en el procedimiento de rodillos esto provocará un fracturamiento en la matriz de mortero, no permitiendo la adherencia de las partículas superficiales, además de incrementar el potencial para un desgaste futuro.

Después de revisar los anchos del pavimento y la variedad de métodos de colocación en la función de los proyectos existentes, se presentan las siguientes recomendaciones. El ancho de colocación no debe exceder normalmente de 4.6 m (15 ft). Por experiencia previa en la colocación de concreto permeable, si las secciones son mayores a estos anchos, el equipo mecánico se deberá adecuar para la colocación. El esfuerzo de compactación deberá aplicarse a un mínimo de 10 a 20 psi de la presión vertical en la superficie del pavimento.

Después de la colocación mecánica, no se requieren operaciones de acabado adicional. Ningún acabado adicional, dañará la integridad de la superficie y las características superficiales del pavimento permeable. La ligera niebla en la superficie por el calor y el viento previo a la cubierta de polietileno mejorará la adherencia de las partículas en la superficie.

ESTA TESIS NO PUEDE  
 DE LA BIBLIOTECA

Un método de colocación usado recientemente con buenos resultados, incluye el uso de un rodillo en el enrasador de la mezcla permeable. En seguida se compacta el pavimento en la cimbra utilizando un pequeño plato vibrador o un rodillo compactador en la capa de  $\frac{3}{4}$  in.

### V. 2.2. Velocidad de mezclado

Los mezcladores del camión deberán de funcionar a la velocidad señalada por el fabricante, es decir, con una velocidad de mezclado de 75 a 100 rpm.

### V.2.3. Transporte y tiempo de mezclado

La mezcla del agregado del cemento Pórtland se puede transportar de la planta o mezclar en sitio y debe ser utilizada en el plazo de una hora, después de agregar agua a la mezcla, a menos que sea aprobado por un especialista, si se requiere de un tiempo mayor a 90 minutos, utilizar un estabilizador de hidratación el cual debe ser especificado.

### V.2.4. Descarga

Cada camión mezclador será examinado de acuerdo a la uniformidad del concreto. El agua se agregará para obtener la consistencia requerida de la mezcla, para lo cual se debe aplicar mínimo a 20 revoluciones en los camiones revolventes así como después de cualquier adición de agua. La descarga será una operación continua y se terminará lo más rápido posible. Figura 5.12 y Figura 5.13. El concreto se depositará cerca de su posición final, de tal forma que el concreto fresco se incorpore a la masa de concreto colocado previamente. La práctica de descarga sobre el subsuelo, tirado o traspaleo previa a la colocación final no se permite.



Figura 5.12. La descarga del material es continua

FUENTE: *Charger Enterprises*. <http://www.chargerconcrete.com>  
copiado el 4 de octubre de 2003

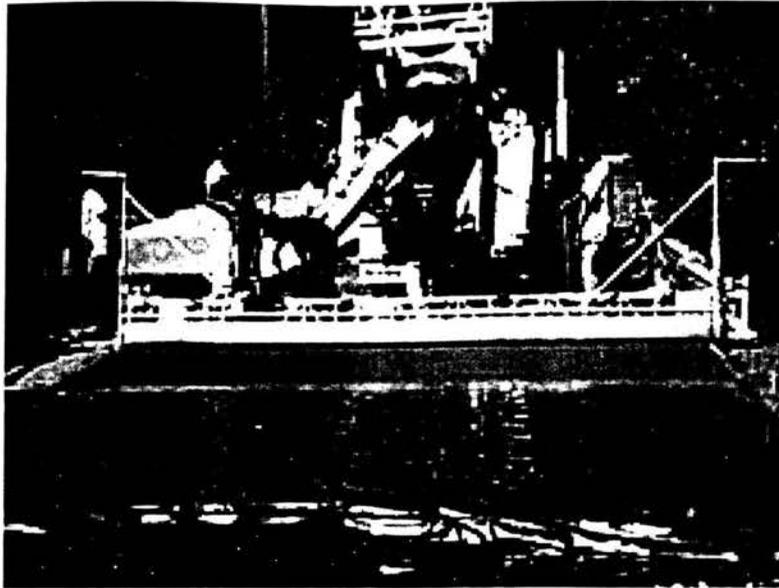


Figura 5.13. Descarga del material, la cual debe ser continúa

*FUENTE: Dare Concrete Inc.  
Copiado el 4 de octubre de 2003*

### V.3. EQUIPO DE COLOCACIÓN Y ACABADO

A menos que sea aprobado por el dueño y el ingeniero, el contratista, proveerá solo equipo mecánico el cual se deberá colocar en la cimbra. El pavimento permeable de concreto será puesto de acuerdo a los requerimientos de la estructura y no rebasará más de  $\pm 9.525$  mm. ( $\pm 3/8$  pulgadas) en 3.05 m (10 ft). Automáticamente después del enrasamiento y de la compactación, no se permitirá otro acabado. Si la vibración se aplica en la superficie o internamente se cerrarán inmediatamente los poros. El contratista restringirá la colocación del pavimento a un ancho máximo de 38 cm. (15 pies), a menos que se requiera una mayor capacidad en los anchos del pavimento, el ingeniero lo indicará. Ver Figura 5.14 y Figura 5.15.

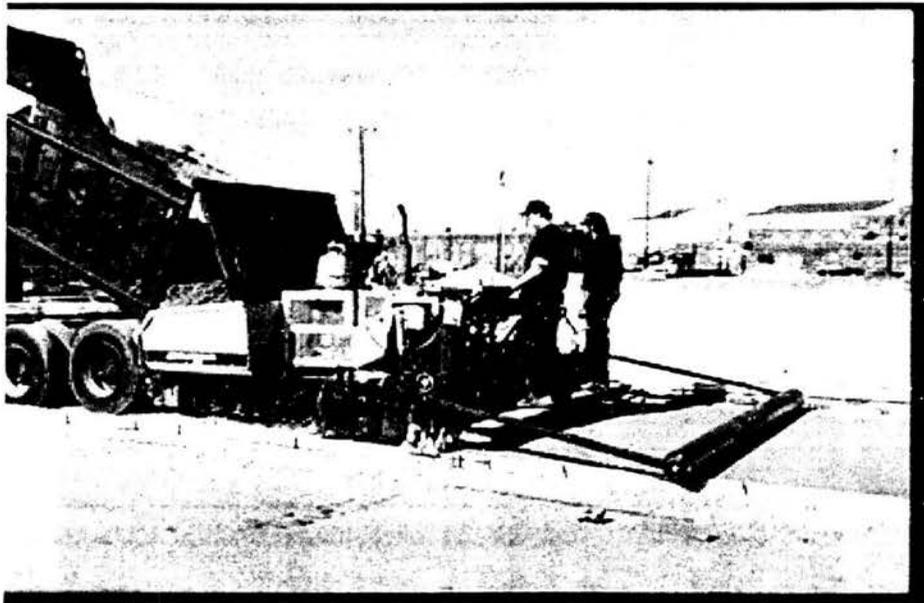


Figura 5.14. El ancho del pavimento será especificado

*FUENTE: N. Mike Jackson, Ph.D., P.E., Technical Consultant,  
Alan Sparkman, Executive Director. Tennessee Ready Mixed Concrete Association*

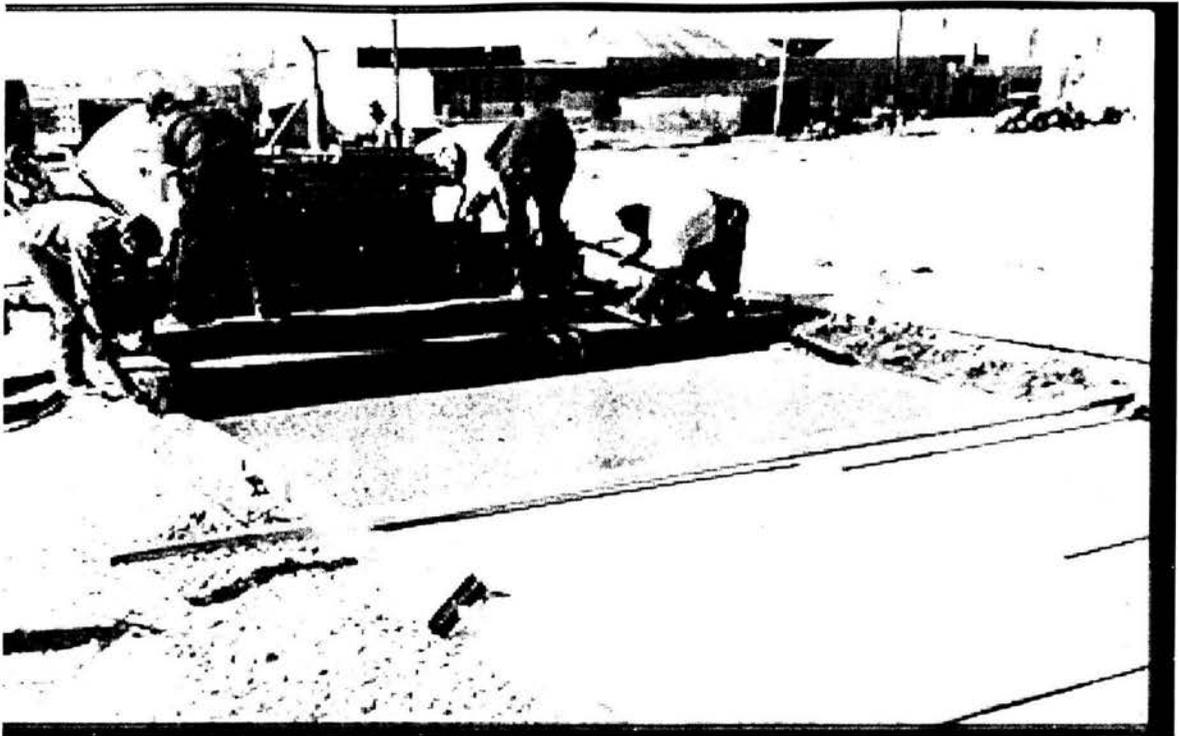


Figura 5.15. El ancho del pavimento será especificado por el ingeniero  
*FUENTE: N. Mike Jackson, Ph.D., P.E., Technical Consultant,  
Alan Sparkman, Executive Director. Tennessee Ready Mixed Concrete Association*

#### V.4. CIMBRAS

Las cimbras pueden ser de madera o acero y tendrán la profundidad del pavimento. Deberán ser lo suficientemente resistentes y estables para soportar equipo mecánico sin tener alguna deformación, desarrollando las operaciones de compactación y esparcimiento. Como se muestra en la Figura 5.16 y Figura 5.17.



Figura 5.16. Cimbra de madera  
*FUENTE: N. Mike Jackson, Ph.D., P.E., Technical Consultant,  
Alan Sparkman, Executive Director. Tennessee Ready Mixed Concrete Association*

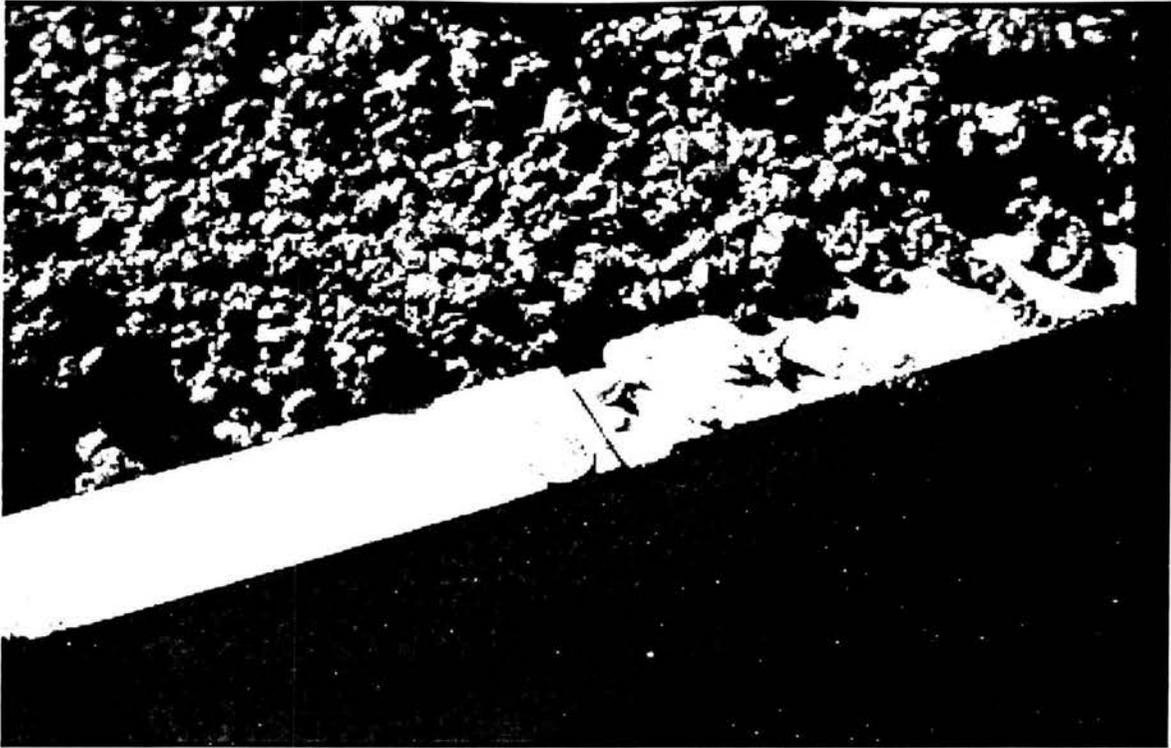


Figura 5.17. La cimbra metálica además deberá tener la profundidad del pavimento y lo suficientemente resistentes y estables

*FUENTE: N. Mike Jackson, Ph.D., P.E., Technical Consultant,  
Alan Sparkman, Executive Director. Tennessee Ready Mixed Concrete Association*

## V.5. JUNTAS

Las juntas transversales de contracción serán instaladas en intervalos de 6.1 [m] (20 ft). Se instalarán a una profundidad de 6.35 mm ( $\frac{1}{4}$  in) del espesor del pavimento.

Las juntas longitudinales serán colocadas en el punto medio del ancho del carril si la construcción del ancho del carril excede los 4.57 m (15 ft). Estas juntas pueden colocarse con concreto plástico o con una cortadora. Si se utiliza una cortadora, el procedimiento es rápido ya que el pavimento endurece lo suficiente para prevenir los desvíos. Normalmente se hacen las juntas después del curado. Ver Figura 5.18., Figura 5.19, Figura 5.20 y Figura 5.21.

Las juntas transversales de construcción sólo pueden ser instaladas, siempre que se haya terminado el tramo de construcción, de otra manera el concreto nunca empezará a endurecer. Para garantizar el vínculo de los agregados con la construcción de las juntas, se debe tener un adecuado agente de adherencia para colocar el concreto fresco al ya existente, el cual será cepillado o esparcido al límite de la superficie del pavimento existente.

Las juntas de aislamiento se usarán solo cuando haya algún bloque o losa u otras estructuras contiguas.

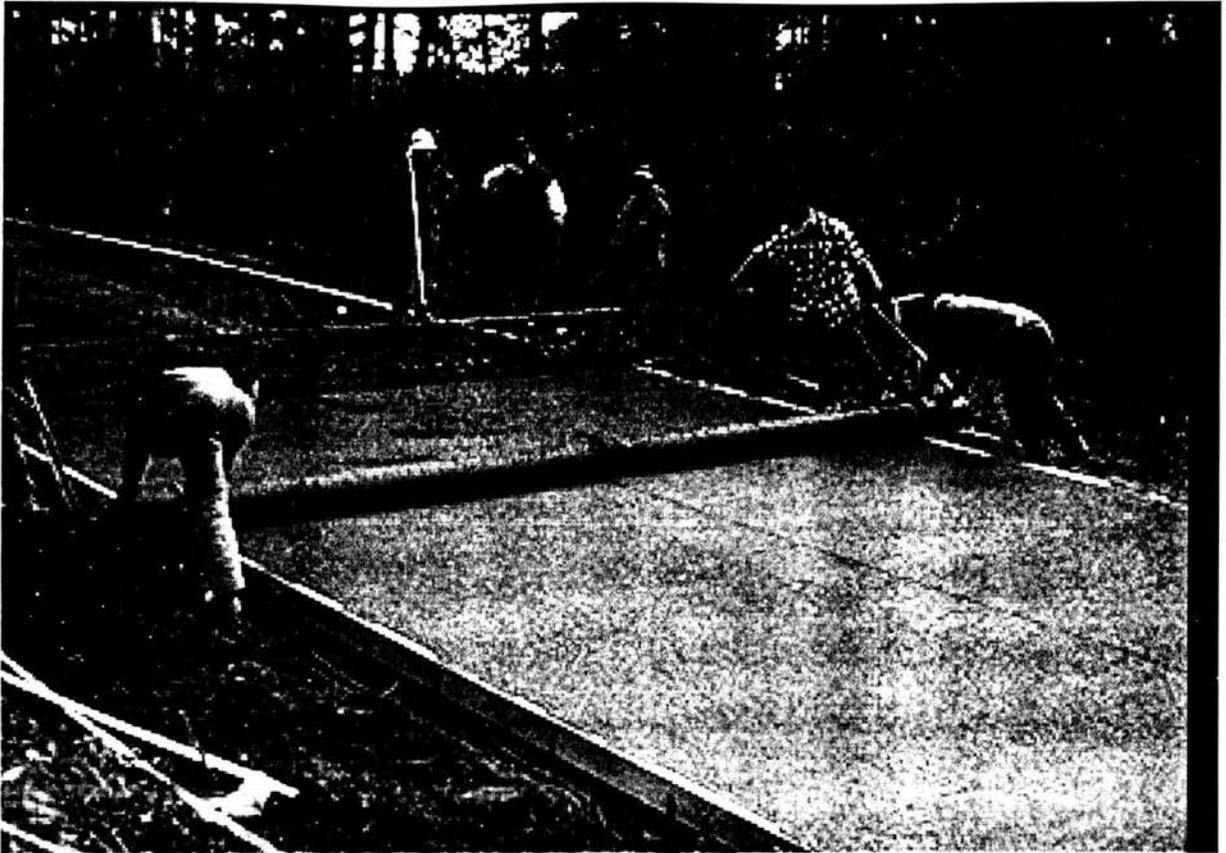


Figura 5.18. Junta longitudinal

*FUENTE: N. Mike Jackson, Ph.D., P.E., Technical Consultant,  
Alan Sparkman, Executive Director. Tennessee Ready Mixed Concrete Association*



Figura 5.19. Junta transversal

*FUENTE: N. Mike Jackson, Ph.D., P.E., Technical Consultant,  
Alan Sparkman, Executive Director. Tennessee Ready Mixed Concrete Association*

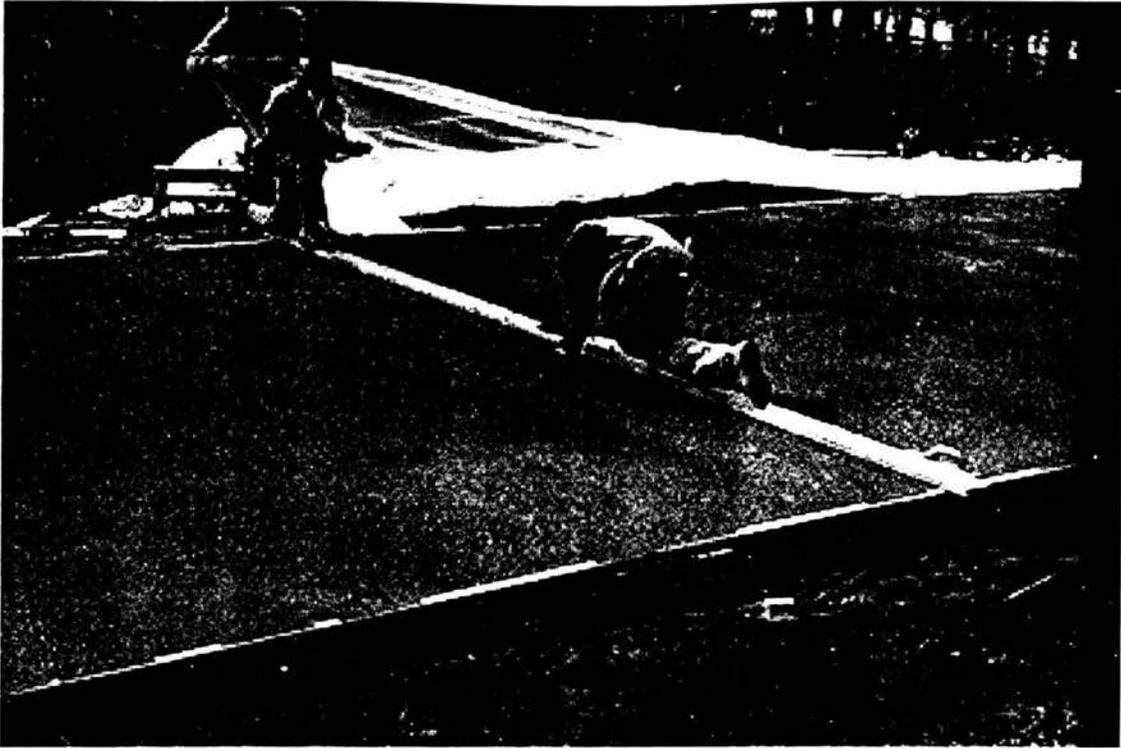


Figura 5.20. Junta transversal

*FUENTE: N. Mike Jackson, Ph.D., P.E., Technical Consultant,  
Alan Sparkman, Executive Director. Tennessee Ready Mixed Concrete Association*



Figura 5.21. Junta transversal

*FUENTE: : N. Mike Jackson, Ph.D., P.E., Technical Consultant,  
Alan Sparkman, Executive Director. Tennessee Ready Mixed Concrete Association*

## V.6. CURADO

El procedimiento de curado normalmente utilizado es el de cubrir la superficie expuesta con un material de polietileno o bien por algún otro material a cubrir de 6 [mil] y se comenzará a cubrir después de 20 minutos de haber hecho la colocación final. Ver Figura 5.22, Figura 5.23, Figura 5.24 y Figura 5.25. Previo a la cubierta se tendrá una niebla o una ligera niebla en la superficie, garantizando la resistencia normal obtenida en la superficie del pavimento y esto es debido a la temperatura, viento y humedad. La cubierta abarcará los límites, asegurándose con piedras o tierra, para prevenirla de las condiciones de tráfico o del viento, como se muestra en la Figura 5.26 y Figura.5.27. Se debería cuidar el procedimiento de curado desde la niebla hasta la cubierta ya que de otra manera se removerán los agregados superficiales y se reducirá la durabilidad



Figura 5.22. El procedimiento de curado normalmente utilizado es el de cubrir la superficie expuesta con un material de polietileno 20 minutos después de la colocación final

*FUENTE: Beter Roadsfor the government/ contractor project team  
Copiado el 4 de octubre de 2003*

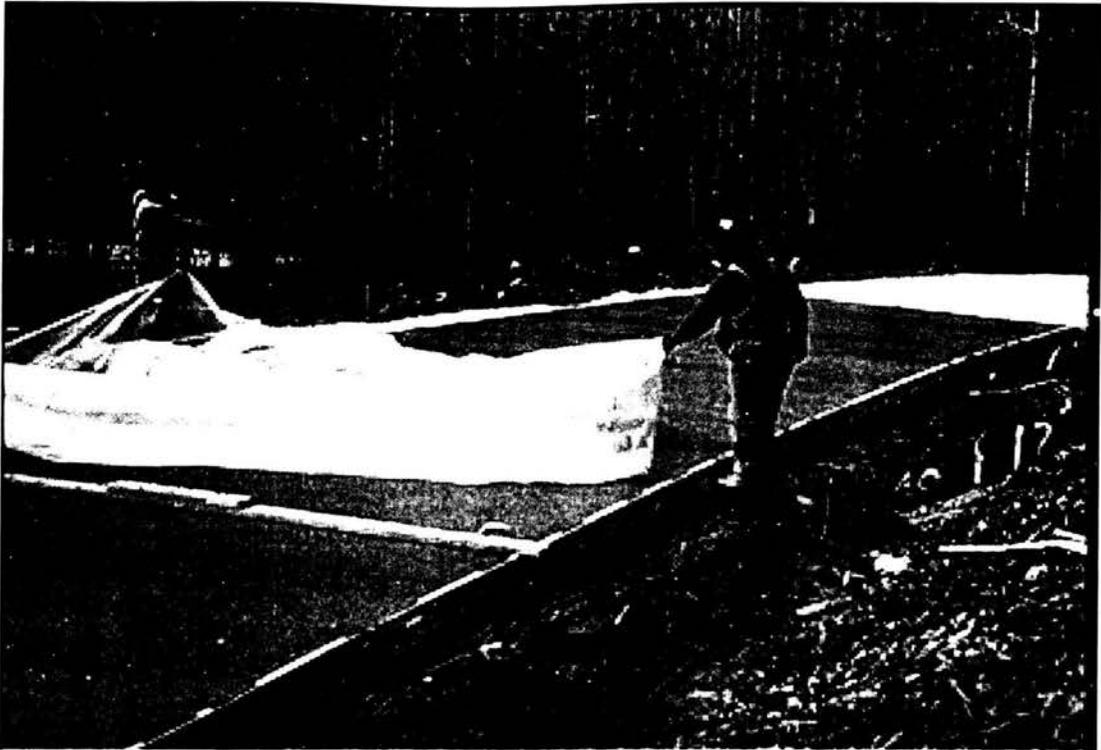


Figura 5.23. El procedimiento de curado normalmente utilizado es el de cubrir la superficie expuesta con un material de polietileno 20 minutos después de la colocación final

*FUENTE: N. Mike Jackson, Ph.D., P.E., Technical Consultant,  
Alan Sparkman, Executive Director. Tennessee Ready Mixed Concrete Association*

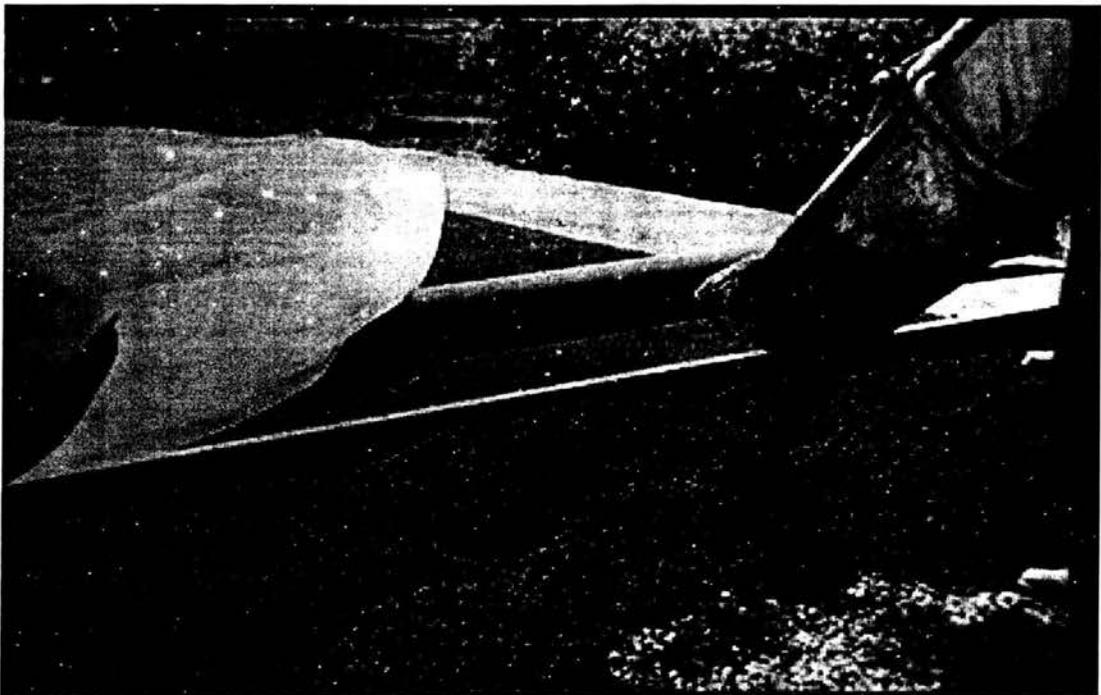


Figura 5.24. El procedimiento de curado normalmente utilizado es el de cubrir la superficie expuesta con un material de polietileno 20 minutos después de la colocación final

*FUENTE: N. Mike Jackson, Ph.D., P.E., Technical Consultant,  
Alan Sparkman, Executive Director. Tennessee Ready Mixed Concrete Association*



Figura 5.25. El procedimiento de curado normalmente utilizado es el de cubrir la superficie expuesta con un material de polietileno y se comenzará a cubrir después de 20 minutos de haber hecho la colocación final

*FUENTE: N. Mike Jackson, Ph.D., P.E., Technical Consultant,  
Alan Sparkman, Executive Director. Tennessee Ready Mixed Concrete Association*

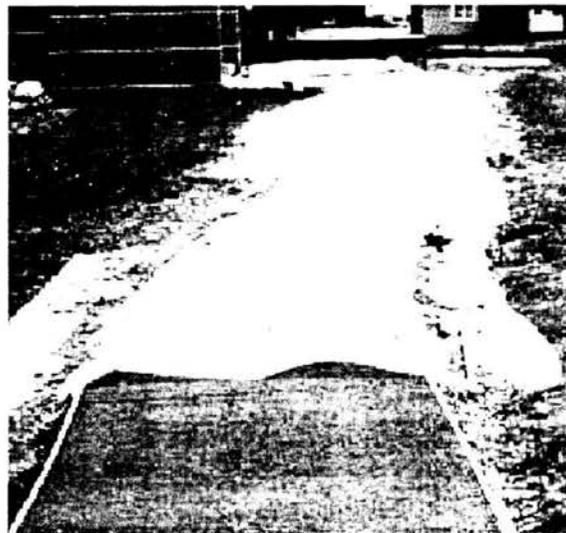


Figura 5.26 La cubierta abarcará los límites, asegurándose con piedras o tierra, para prevenirla de las condiciones de tráfico o del viento

*FUENTE: Beter Roadsfor the government/ contractor project team  
Copiado el 4 de octubre de 2003*

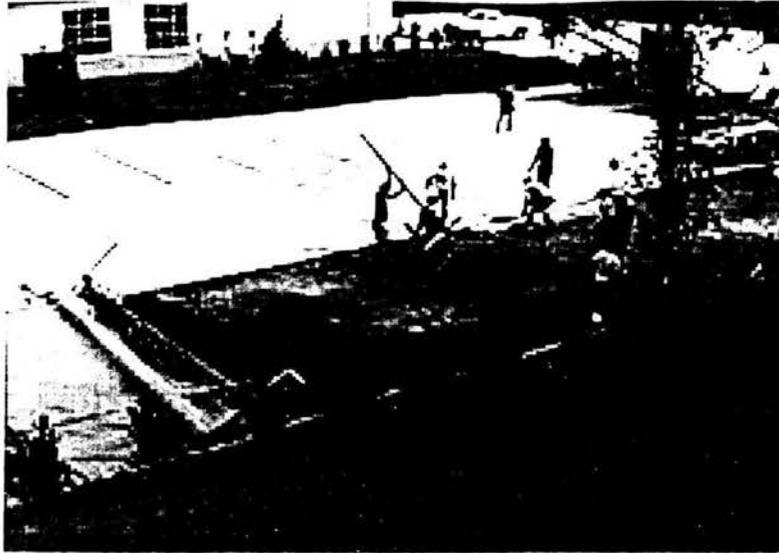


Figura 5.27. La cubierta abarcará los límites, asegurándose con piedras o tierra, para prevenirla de las condiciones de tráfico o del viento  
 FUENTE: Dare Concrete Inc. Copiado el 4 de octubre de 2003

### V.6.1. TIEMPO DE CURADO

El tiempo de curado dependerá del material cementante usado y del porcentaje de resistencia de diseño. Sin el adecuado curado, el pavimento permeable de concreto puede alcanzar sólo el 40% de la resistencia de diseño, volviéndolo susceptible al incremento del deterioro superficial.

Cemento Pórtland Tipo I sin asclerante – 5 a 7 días

Cemento Pórtland Tipo I Y II - de 7 a 15 días

Cemento Pórtland Tipo I o II con Fly ash (como parte de las 600 lbs/cu mínimo cementitious) o Tipo IP – mínimo 10 días

Cemento Pórtland Tipo III - 3 días para una temprana apertura al tráfico

No se permitirá el tráfico de camiones durante 10 días. Es necesario que se tengan investigaciones a cerca de las membranas de curado más eficientes, además de los métodos de curado, que incrementen la calidad y la economía del pavimento.<sup>56</sup>

### V.7. RECOMENDACIONES DE COLOCACIÓN

Durante la colocación del pavimento permeable se recomienda la utilización de un rodillo vibratorio para extender y compactar el material.

El pavimento permeable se debe colocar rápidamente debido a la pérdida de trabajabilidad que se tiene por una rápida evaporación del agua de mezclado al contacto con el aire.

El pavimento permeable sólo puede mantenerse en la olla hasta un máximo de 90 minutos por la rápida hidratación del cemento en este material.

El pavimento permeable, al igual que un concreto convencional, requiere de juntas de contracción las cuales pueden realizarse en fresco con un rodillo cortador o con cortadora de disco de diamante en el material endurecido.

Es de vital importancia proporcionar un curado con una cubierta de polietileno inmediatamente después de haber colocado el pavimento permeable.

<sup>56</sup> Ibidem 18

## VI. SITUACIÓN ECONÓMICA DEL PAVIMENTO PERMEABLE DE CONCRETO

Un aspecto importante en el desarrollo de cualquier construcción es el relacionado con lo económico. Si una solución en particular de un proyecto requiere costos excesivos, se buscara una solución que proporcione costos no tan elevados. El pavimento permeable puede ser la más económica solución, para el uso del suelo, ya que reduce los costos.

En un nuevo complejo multifamiliar, construido en Jacksonville, Florida, se utilizó pavimento permeable de concreto. El uso de este material posibilitó e incrementó el número de construcciones. Esto tuvo un incremento significativo en los ingresos de la inversión comparado con el plan original, el cual incorpora un pavimento convencional, áreas de retención y sistemas de drenaje.<sup>57</sup>

La Tabla 6.1 es una tabla de los costos de un pavimento de asfalto, en la Tabla 6.2 se muestran los costos para un pavimento de concreto convencional y en la Tabla 6.3 se muestran los costos para un pavimento permeable de concreto.<sup>58</sup>

ESTRUCTURA	ESPESOR [cm]	LONGITUD [m]	ANCHO [m]	P. U.	UNIDAD	IMPORTE
Carpeta asfáltica	10	1	1	\$815.00	m <sup>3</sup>	\$81.50
Base	15	1	1	\$82.00	m <sup>3</sup>	\$12.30
Subbase	25	1	1	\$81.00	m <sup>3</sup>	\$20.25
Filtro	25	1	1	\$57.26	m <sup>3</sup>	\$14.32
Excavación de caja	60	1	1	\$38.90	m <sup>3</sup>	\$23.34
<b>Precio por m<sup>2</sup> =</b>						<b>\$151.71</b>

Tabla 6.1. Costos para un pavimento de asfalto  
Fuente: Pagina electrónica de ECOCRETO, copiado le 14 de febrero de 2002

ESTRUCTURA	ESPESOR [cm]	LONGITUD [m]	ANCHO [m]	P. U.	UNIDAD	IMPORTE
Concreto hidráulico	15	1	1	\$1,184.49	m <sup>3</sup>	\$177.67
Base	20	1	1	\$82.00	m <sup>3</sup>	\$16.40
Filtro	25	1	1	\$57.26	m <sup>3</sup>	\$14.32
Excavación de caja	40	1	1	\$38.90	m <sup>3</sup>	\$15.56
Cimbra	cantidad		0.60	\$35.00	m <sup>3</sup>	\$21.00
Acero de refuerzo	cantidad	1	3.50	\$6.6	Kg	\$23.31
<b>Precio por m<sup>2</sup> =</b>						<b>\$268.26</b>

Tabla 6.2. Costos para un pavimento de concreto convencional  
Fuente: Pagina electrónica de ECOCRETO, copiado le 14 de febrero de 2002

<sup>57</sup> Ibidem 18

<sup>58</sup> Idem 3. Copiado el 14 de febrero de 2002

ESTRUCTURA	ESPESOR [cm]	LONGITUD [m]	ANCHO [m]	P. U.	UNIDAD	IMPORTE
Ecocreto	8	1	1	\$1,827.56	m <sup>3</sup>	\$146.21
Pozo de absorción (1 a 50 m <sup>2</sup> )	100	1	1	\$4.73	m <sup>3</sup>	\$4.73
Filtro	25	1	1	\$57.26	m <sup>3</sup>	\$14.32
Geomalla		1	1	\$8.50	m <sup>2</sup>	\$8.50
Excavación de caja	33	1	1	\$38.90	m <sup>3</sup>	\$12.84
<b>Precio por m<sup>2</sup> =</b>						<b>\$186.59</b>

Tabla 6.3. Costos para un pavimento permeable de concreto  
Fuente: Pagina electrónica de ECOCRETO, copiado le 14 de febrero de 2002

Tomando como base el pavimento permeable de concreto, se puede observar en las tablas anteriormente presentadas que el pavimento permeable genera un menor costo, que el de un concreto hidráulico. Ya que la diferencia de los costos del pavimento permeable de concreto con relación al pavimento de concreto convencional oscila en un 43.77%. Con respecto al pavimento de asfalto, podemos apreciar en la Tabla 6.1 y Tabla 6.3 que el pavimento de asfalto es mas barato que el pavimento permeable de concreto en un 18.69% como diferencia.

## CONCLUSIONES

El Pavimento permeable de concreto está constituido de manera similar a los demás concretos, con agregado grueso y cemento Pórtland como aglutinante donde su permeabilidad radica en la omisión de agregado fino. Por lo que tiene un costo muy bajo sin embargo, este se incrementa con la mano de obra, la cual debe ser especializada, además de requerir mantenimiento cada dos años. Además de que su uso es limitado y no debe usarse como un pavimento convencional ya que tiene una menor resistencia al desgaste que el concreto normal por lo que sólo debe colocarse en zonas de tránsito ligero.

Los procedimientos de colocación adecuados son muy importantes porque conducen a un buen desempeño del pavimento permeable. También es necesario que se cuente con gente experimentada en ese campo. Además de que la descarga del material deberá ser lo más rápido posible y continúa.

Es de vital importancia proporcionar un curado con una cubierta de polietileno inmediatamente después de haber colocado el pavimento permeable. Por lo que no se debe transitar por el pavimento después de su colocación si no que hay que esperar 7 días -que es cuando se realiza el curado-. Así mismo considero que es necesario realizar investigaciones a cerca de las membranas de curado para que estas sean más eficientes, además de los métodos de curado, para que incrementen la calidad y la economía del pavimento.

El pavimento de asfalto sigue siendo más barato que el pavimento permeable de concreto, pero éste es más barato que el pavimento de concreto convencional, sin embargo el costo no es el único factor a tomar en cuenta en el diseño de un pavimento.

El pavimento permeable puede perder permeabilidad a lo largo del tiempo al taparse los espacios vacíos con material fino, por lo que requiere de un mantenimiento que consiste en un lavado con agua a presión aproximadamente cada dos años. Si el lavado a presión no limpia los vacíos la única alternativa es quitar la superficie contaminada y retransmitir el nuevo material.

Debe usarse con precaución en áreas donde la base tiene suelos con alta permeabilidad (superficie de arena o grava), suelo natural con una gran conductividad hidráulica de 7 mm/hr (0.3 in/hr). También las instalaciones no deberán tener pendientes mayores al 5%. Si se usa geotextil sólo será como elemento de filtración y drenado, evitando la migración de partículas al suelo permitir el libre flujo de agua.

Su nivel de consistencia, aproxima a la mezcla permeable a las características de colocación y manejo de mezclas al pavimento asfáltico o bien para carga. Si la mezcla tiene exceso de agua, la pasta cementante se conducirá a las capas más bajas del pavimento, resultando en los estratos inferiores una obstrucción en los poros (vacíos). Y una mezcla con una menor cantidad de agua da lugar a inconsistencia en la mezcla y la pasta cementante no sería suficientemente adhesiva y no se podría lograr la composición propia del concreto.

La consistencia del concreto es muy importante para un buen desempeño del pavimento, por lo que hay que revisarlo antes de colocarlo; durante la colocación del pavimento permeable se recomienda la utilización de un rodillo vibratorio para extender y compactar el material, se debe colocar rápidamente debido a la pérdida de trabajabilidad que se tiene por una rápida evaporación del agua de mezclado al contacto con el aire. Sólo puede mantenerse en la olla hasta un máximo de 90 minutos por la rápida hidratación del cemento en este material.

El pavimento permeable, al igual que un concreto convencional, requiere de juntas de contracción las cuales pueden realizarse en fresco con un rodillo cortador o con cortadora de disco de diamante en el material endurecido. Las investigaciones futuras requerirán proveer más recomendaciones referentes a su uso. En cuanto a las recomendaciones para la dosificación de aditivos y secuencias de carga habría que dar un mayor seguimiento.

## BIBLIOGRAFÍA

- AMENI-PHALTSERIES [www.auburn.edu/administration/univrel/news/archi](http://www.auburn.edu/administration/univrel/news/archi)
- Best Management Praticce Standards. Capitulo 4. Concrete Grid and Modular Pavement
- Beter Roadsfor the goverment/ contractor project team. Copiado el 4 de octubre de 2003
- Cemex Concretos. Pavimentos de concreto. México. 2000
- Charger Enterprises Inc, <http://www.chargerconcrete.com/perviousconcrete.htm>
- Concrete Grid and Modular Pavement. [www.lrc.usace,army.mil/co-r/best\\_management\\_practices](http://www.lrc.usace.army.mil/co-r/best_management_practices).
- CONGRESO DE GEOTECNIA Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos
- Cool Communities. Pervious pavements for a more livable environment. Obtenido el 11 mazo de 2002 en [www.coolcommunities.org/cool\\_pavements](http://www.coolcommunities.org/cool_pavements)
- Dare concrete inc. [http:// tm.wc.ask.com/](http://tm.wc.ask.com/)
- ECOCRETO. Garantía de agua para el futuro. <http://www.ecocreto.com.mx>. Obtenido el 14 de febrero de 2002 a las 10 horas.
- Estructuración de Vías Terrestres. Olivera Bustamante, Fernando. CECSA .México.1996
- Geogia Concrete and Products Association Specification.  
<http://www.gcpa.org/specification.htm> copiado en 2002
- Hale, Gordon. Pavimentos. Edit. Blume. España. 1976
- N. Mike Jackson, Ph.D., P.E., Technical Consultant, Alan Sparkman, Executive Director.Tennessee Ready Mixed Concrete Association

- ✓ Nevill. Tecnología del concreto. Edit. Trillas
- ✓ Olivera Bustamante, Fernando. Estructuración de Vías Terrestres. CECSA .México.1996.
- ✓ Permeable Pavement. Natural Resource Conservation Service. Conservation Practice Standard. January 1999.
- ✓ Pervious Pavement. Universidad de Guelph, Canada
- ✓ Porous Asphalt Pavement. Diciembre 1992.
- ✓ Portland Cement Pervious Manual. Florida Concrete and Products Association. Orlando, Florida.
- Proactive Architecture PLLC. Design for the next generation. Obtenido el 19 de marzo de 2002 en <http://proactivearchitecture.com/water.htm>
- ✓ Rico, Alfonso. Del Castillo, Hermilo. "Ingeniería de suelos en las vías terrestres. Vol. 2. Edit. Limusa. México.1982
- ✓ Normas ASTM (Sociedad Americana de Pruebas y Materiales)
- ✓ Normas AASHTO ( American Association of State Highway and Transportation Officials)
- ✓ Normas NMX (Normas Mexicanas)
- ✓ Departamento de Georgia del Transporte (GDOT). Especificaciones estándares para la construcción de caminos y de puentes

# ANEXOS

## DISEÑO DE ESPESORES

Módulo de ruptura	Módulo de elasticidad	Espesor
650	4010500	4
625	3856250	4.08
600	3702000	4.17
575	3547750	4.27
550	3393500	4.37
525	3239250	4.49
500	3085000	4.61
475	2930750	4.74
450	2776500	4.88
425	2622250	5.05
400	2468000	5.22
375	2313750	5.42
350	2159500	5.65
325	2005250	5.9
300	1851000	6.19

Criterio de diseño:

k= 150

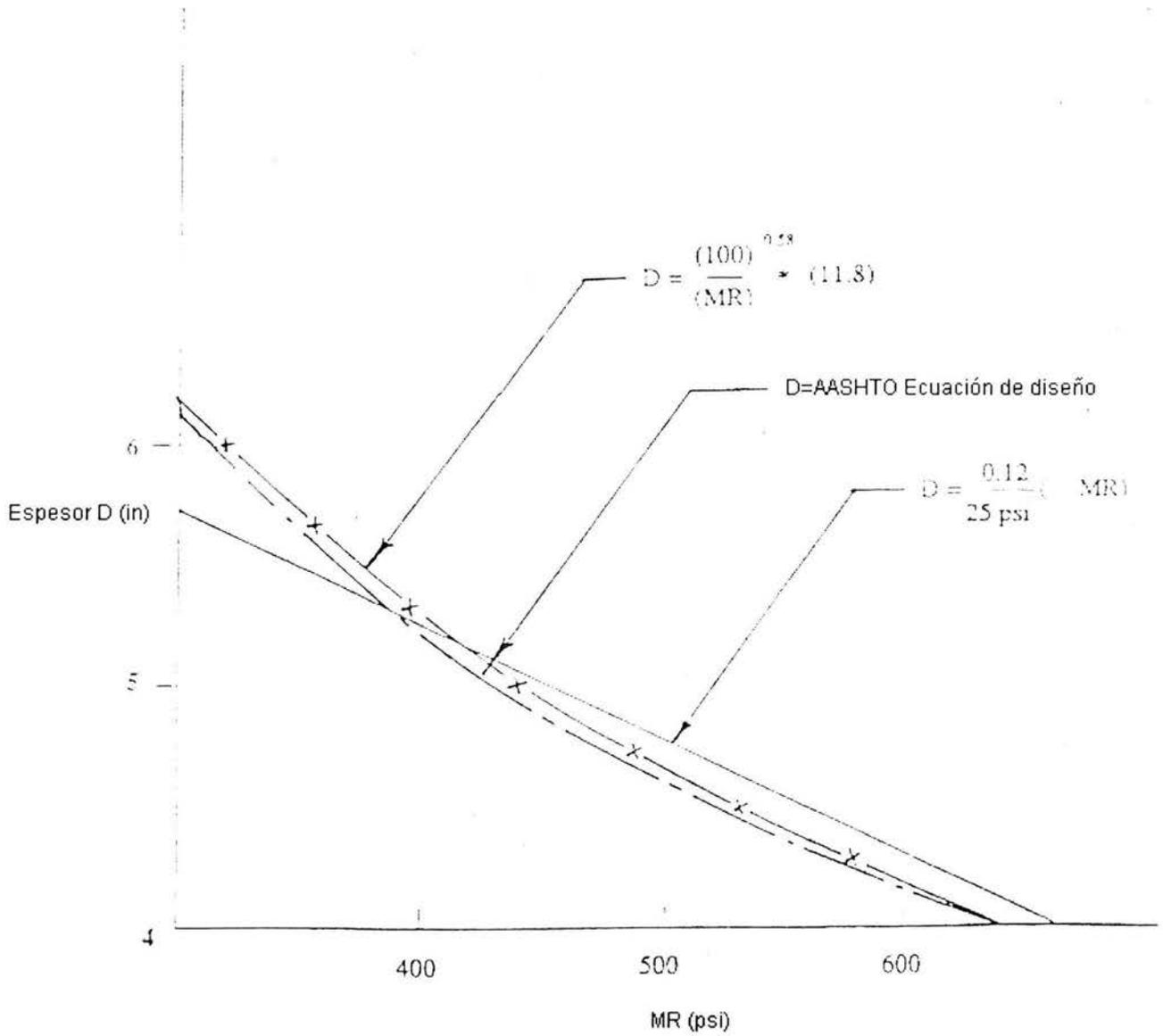
Pt= 2.5

E: 8kipSAL - 75000

Florida Concrete and Products ASSN.

### ANEXO A

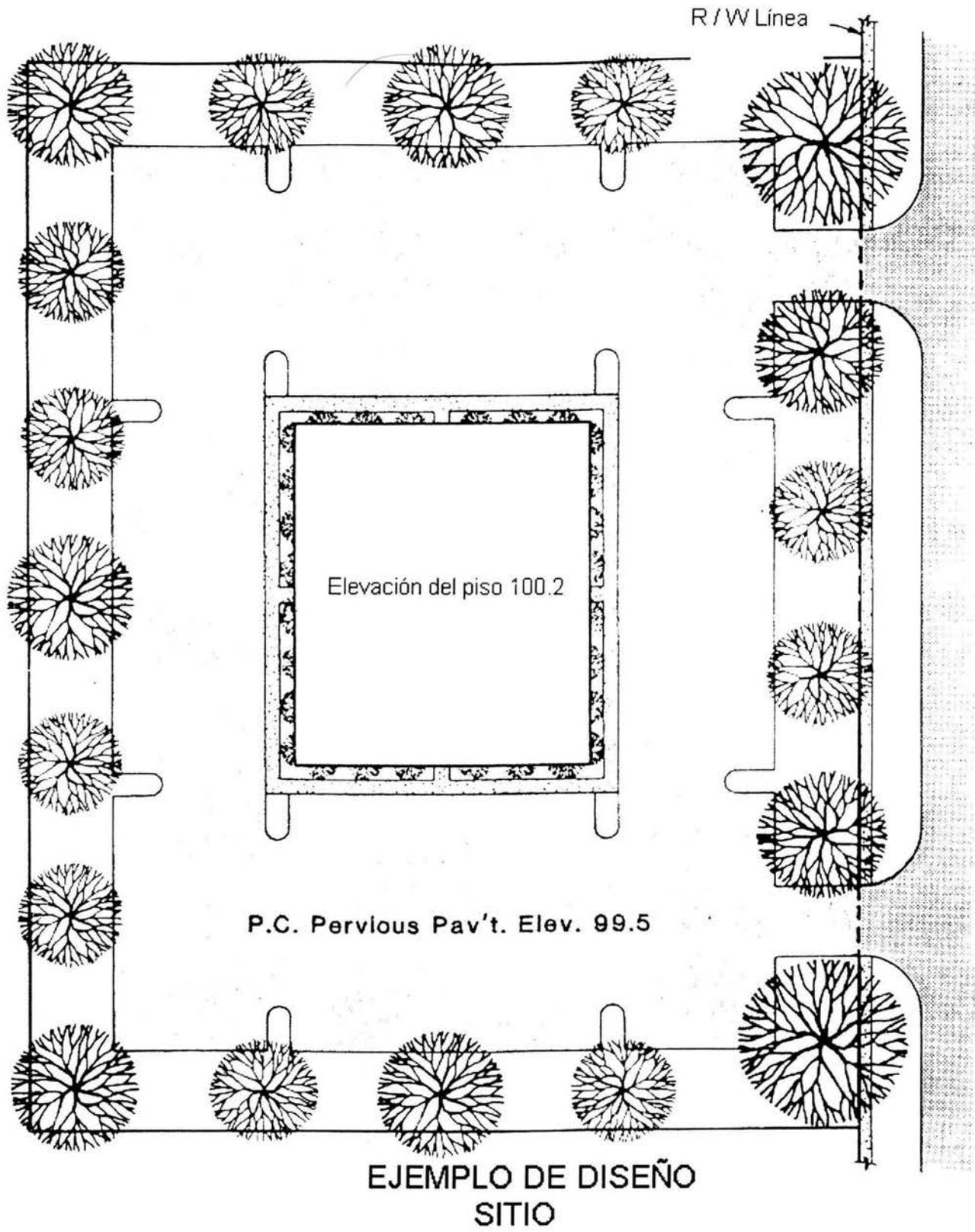
*FUENTE: Florida Concrete And Products Association Inc. Florida. E. U.*



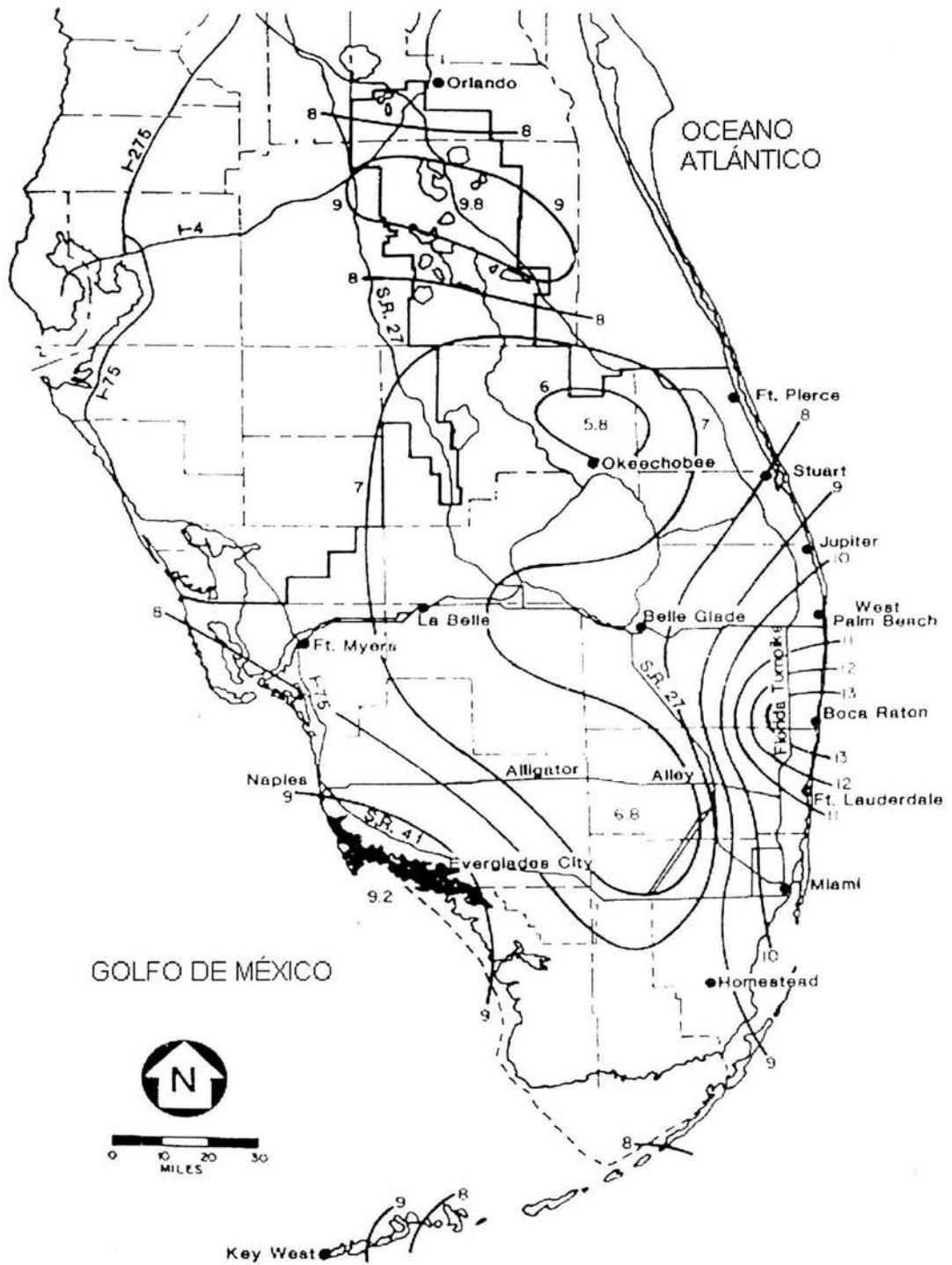
RELACION DE DISEÑO DE ESPESORES

ANEXO B

FUENTE: Florida Concrete And Products Association Inc. Florida. E. U.



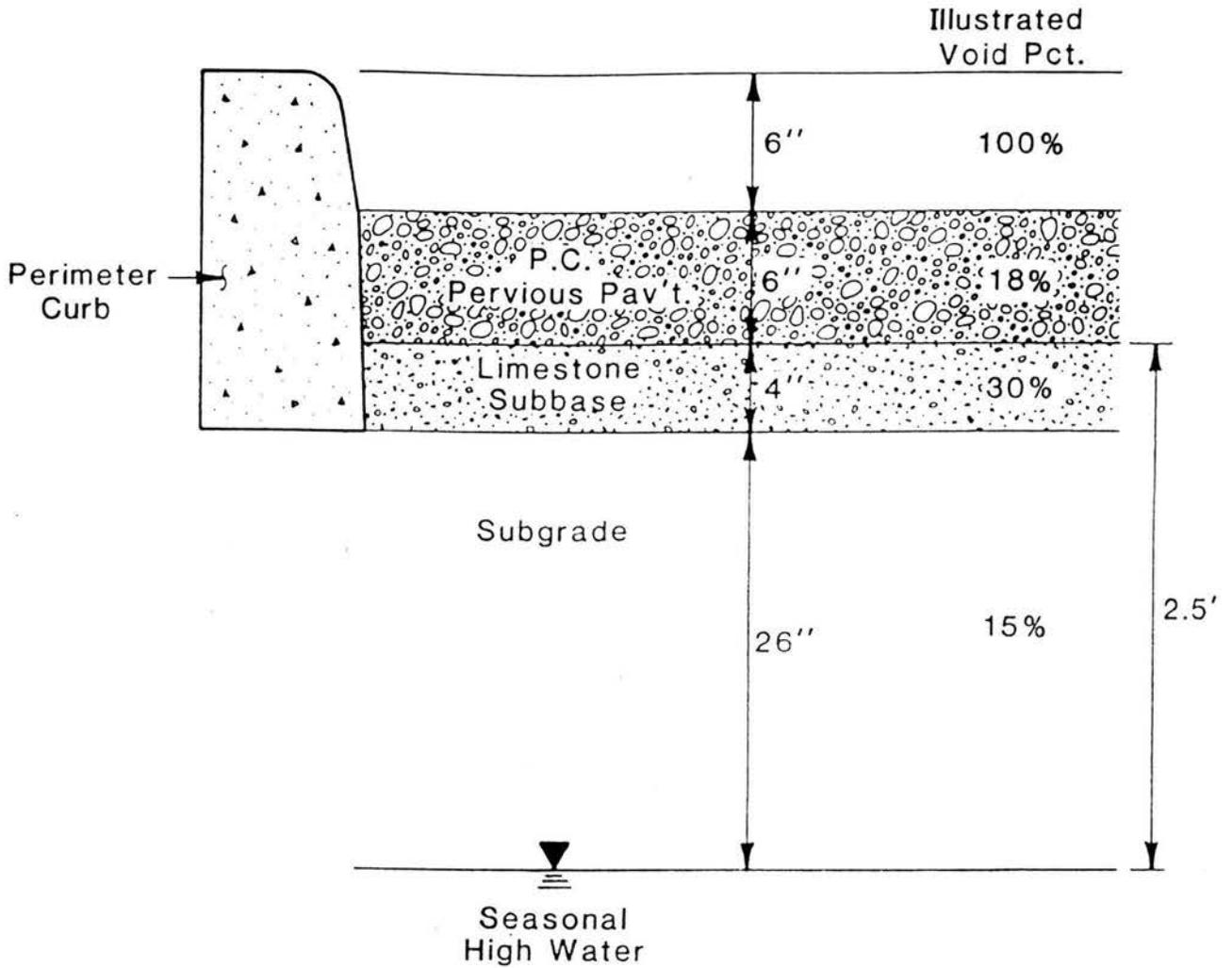
ANEXO C. Figura 1  
FUENTE: Florida Concrete And Products Association Inc. Florida. E. U.



Typical Hyetograph  
1 Day Rainfall: 25 Year Return Period

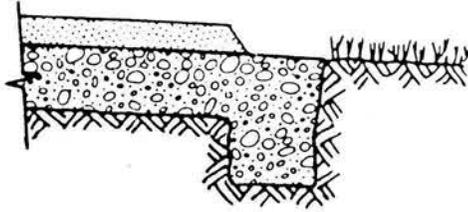
ANEXO C. Figura 2

FUENTE: Florida Concrete And Products Association Inc. Florida. E. U.

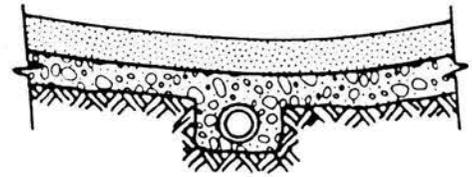


ANEXO C. Figura 3

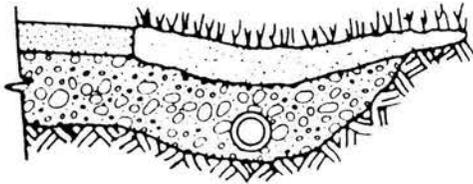
FUENTE: Florida Concrete And Products Association Inc. Florida. E. U.



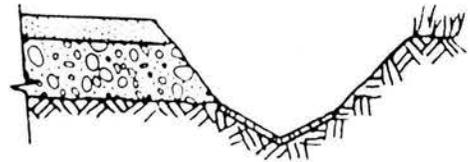
B-1 Rock Filled Trench



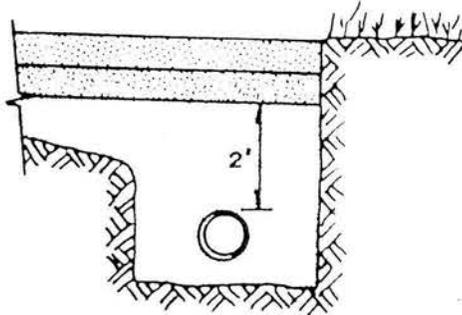
B-2 Rock Filled Trench



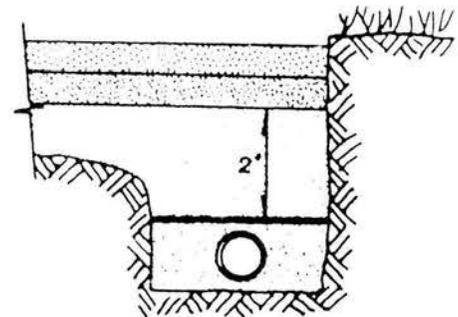
B-3 Rock Filled Trench



C. V-Trench Water Removal to Pond



D-1 Sand Underdrain



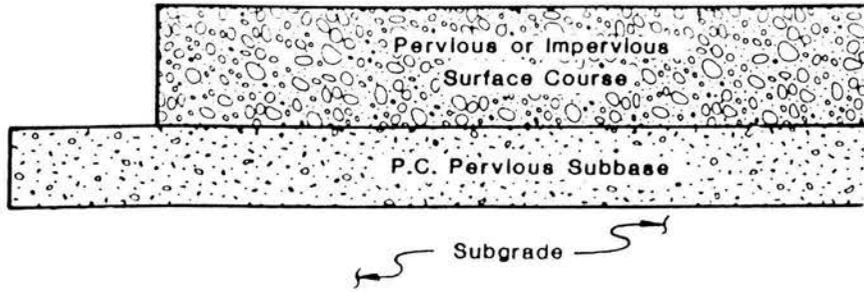
D-2 Sand Underdrain

Source: Investigation of Porous Pavements for Urban Runoff Control, Thelen et al (after Virginia State Water Control Board, 1979. "Urban Best Management Practices Handbook")

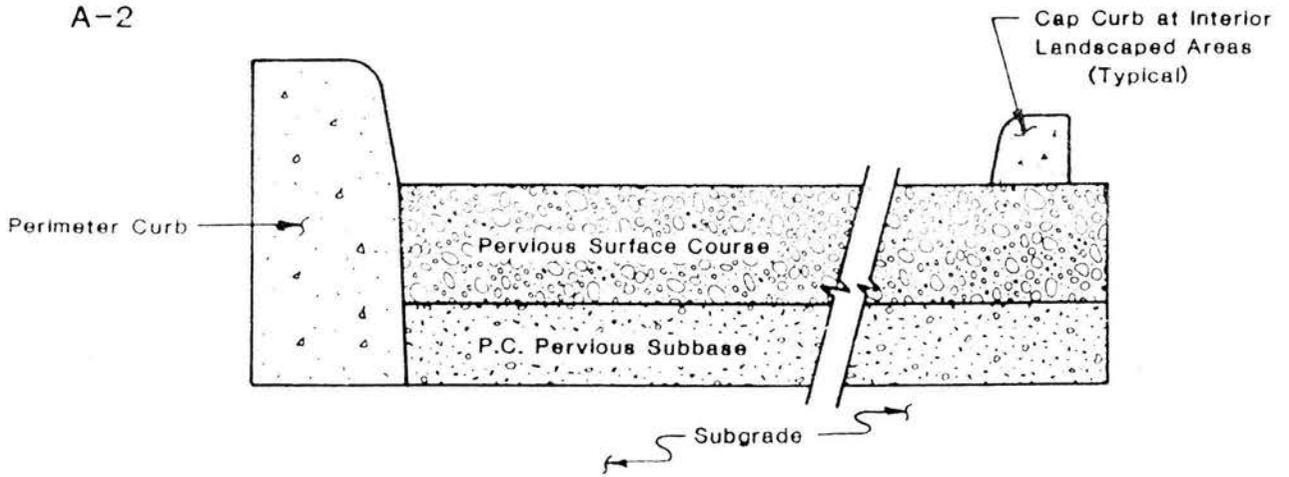
ANEXO C. Figura 4

FUENTE: Florida Concrete And Products Association Inc. Florida. E. U.

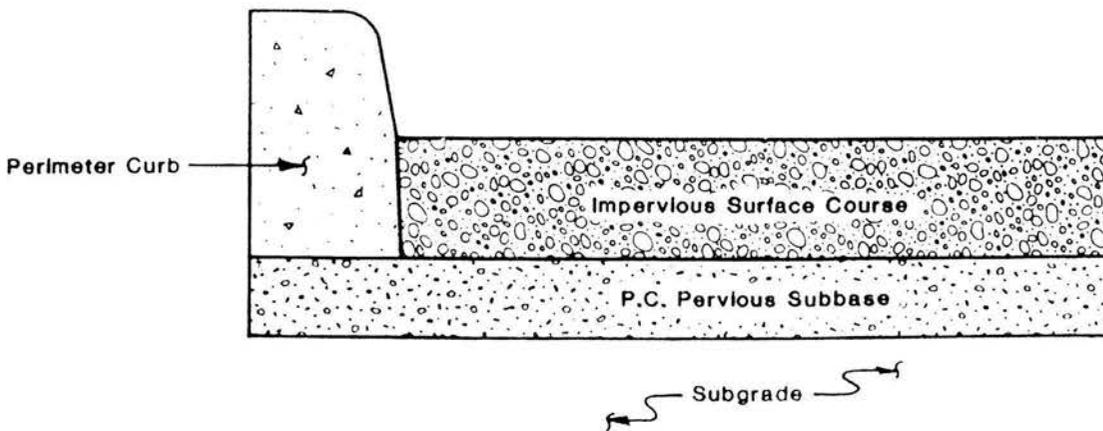
A-1



A-2



A-3



ANEXO C. Figura 4 (cont.)

FUENTE: Florida Concrete And Products Association Inc. Florida. E. U.