



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“CONTROL DE CALIDAD Y COLOCACIÓN DE
CONCRETOS PERMEABLES”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

I N G E N I E R O C I V I L

P R E S E N T A:

EMILIANO LÓPEZ PALACIOS

DIRECTOR DE TESIS:

ING. CARLOS CHAVARRI MALDONADO



MÉXICO D.F.

2010



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/001/10

Señor
EMILIANO LÓPEZ PALACIOS
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor ING. CARLOS MANUEL CHÁVARRI MALDONADO, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"CONTROL DE CALIDAD Y COLOCACIÓN DE CONCRETOS PERMEABLES"

- INTRODUCCIÓN
- I. CONCRETO PERMEABLE
 - II. DISEÑO DE MEZCLAS
 - IV. PROPIEDADES DE LOS CONCRETOS PERMEABLES
 - V. COLOCACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DEL CONCRETO PERMEABLE
 - VI. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 11 de Enero del 2010.
EL PRESIDENTE


ING. RODOLFO SOLÍS UBALDO

RSU/MTH*gar.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I ASPECTOS GENERALES DEL CONCRETO PERMEABLE	4
1.1 Antecedentes	5
1.2 Definición Técnica	7
1.3 Uso y Aplicación.....	8
1.4 Ventajas.....	10
1.5 Desventajas	14
1.6 Recomendaciones.....	16
CAPITULO II DISEÑO DE MEZCLAS	17
2.1 Introducción	18
2.2 Materiales	19
2.2.1 Cementante.....	20
2.2.2 Agua	21
2.2.3 Agregados.....	21
2.2.4 Aditivos	22
2.3 Diseño de un pavimento permeable	23
2.4 Proporcionamiento de mezclas.....	24
2.4.1 Relación agua-cemento	25
2.4.2 Relación agregado-cemento	26
2.4.3 Contenido de agregado grueso	26
2.4.4 Procedimiento de proporcionamiento	27
2.4.5 Ejemplo	28
CAPITULO III PROPIEDADES DEL CONCRETO PERMEABLE	31
3.1 Generalidades.....	32
3.2 Propiedades en estado fresco.....	33
3.2.1 Consistencia y peso volumétrico.....	33
3.2.2 Relación contenido de huecos de aire-peso volumétrico	34
3.3 Propiedades en estado endurecido.....	35
3.3.1 Resistencia a la compresión	36
3.3.2 Resistencia a la flexión.....	37
3.3.3 Capacidad de filtración o permeabilidad.....	39
3.3.4 Cambio de volumen o contracción.....	42
3.3.5 Absorción acústica	43
3.3.6 Durabilidad.....	44

3.3.6.1 Resistencia a la congelación-deshielo	44
3.3.6.2 Resistencia a la abrasión	46
3.3.6.3 Resistencia a los sulfatos	47
CAPITULO IV COLOCACION Y CONTROL DEL CONCRETO PERMEABLE	49
4.1 Generalidades	50
4.2 Colocación y construcción del concreto permeable	51
4.2.1 Equipo y herramienta	53
4.2.2 Preparación y disposición de la capa subrasante	55
4.2.3 Mezclado	57
4.2.4 Transporte.....	58
4.2.5 Colocación.....	59
4.2.6 Cimbras y equipo de enrasado.....	61
4.2.7 Compactación.....	62
4.2.8 Juntas de construcción y acabados	64
4.2.9 Curado	66
4.2.10 Condiciones especiales de curado y protección	68
4.3 Reparación de pavimentos de concreto permeable	69
4.4 Mantenimiento	70
4.5 Supervisión y pruebas de control de calidad	71
4.5.1 Supervisión y pruebas previas a la construcción	72
4.5.2 Supervisión y pruebas durante la construcción	73
4.5.3 Supervisión y pruebas posteriores a la construcción	73
4.6 La Ciudad Universitaria	74
4.6.1 Ubicación de espacios universitarios	77
4.6.2 Características hidrológicas y geológicas.....	80
4.7 Propuesta de aplicación del concreto permeable en espacios universitarios.....	81
4.8 Desempeño	84
4.8.1 Colmatación	84
4.8.2 Deterioro estructural.....	85
CONCLUSIONES.....	86
ANEXO	89
BIBLIOGRAFÍA.....	92

INTRODUCCIÓN

La extracción excesiva de agua del subsuelo y la nula o insuficiente recarga de los mantos freáticos, además del gran número de suelos impermeables existentes en las grandes urbes, ha modificado sustancialmente la hidrología y causas naturales de las zona urbanas, no menos importante es el problema de la contaminación de las aguas pluviales, las cuales no son aprovechadas y son arrastradas hasta los sistemas de drenaje, más allá de obtener un beneficio de estas aguas, se agrava el problema ocasionando un incremento en la contaminación del ambiente, sin que la gran mayoría reciba algún tratamiento de agua residual.

Como parte de la solución a estos problemas esta la propuesta ecológica, de los concretos porosos, de ahí el interés por la realización de este trabajo, en el cual es un compromiso sustentable que adquirimos los ingenieros que nos formamos en las aulas de la Universidad Nacional, porque de una u otra manera estamos comprometidos con la población para que conjuntamente atendamos las propuestas de solución a los problemas que se han venido generando por la explotación indiscriminada de los recursos naturales, el calentamiento global y sobrepoblación, los cuales se han venido generando.

De ahí la importancia de buscar alternativas que permitan mantener el equilibrio ecológico del ambiente en que vivimos, de lo contrario, en poco tiempo los problemas tales como recarga de los mantos freáticos, la contaminación del agua pluvial, el calentamiento y la no respiración del suelo, contribuirán a los grandes caos que tarde que temprano enfrentarán las grandes y pequeñas ciudades.

Si bien el concreto permeable es de reciente creación, los usos y beneficios que ha proporcionado este en los sitios donde se ha aplicado, ha permitido ver sustancialmente la transformación del medio ambiente, lugares donde había inundaciones hoy en día son controladas, así mismo el uso apropiado y correcta aplicación de los concretos ecológicos, puede facilitar la biodegradación de algunos aceites y grasas, disminución de la temperatura urbana y ruido de tráfico, permitiendo a las raíces de los árboles obtener los nutriciones necesarios y evitar que el agua de lluvia se desperdicie, incluyendo la magnitud y frecuencia de inundaciones repentinas y conjuntamente rellenar los mantos acuíferos,

previniendo el hundimiento del subsuelo de las ciudades, tal es el caso del Valle de México donde la extracción excesiva de agua del subsuelo del Valle de México ha generado en algunas zonas hundimientos diferenciales de hasta 13 metros, como en Chalco, Cerro del Marqués y el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. De continuar así se podrían generar fracturas en la superficie.

Se ha previsto que en un futuro no muy lejano la captación de aguas de lluvia, principalmente por medios filtrantes, como los concretos porosos y el agua producto de deshielo serán el agua residual. A medida que la reutilización del agua por medio de su tratamiento se percibe más necesaria, el agua captada por los sistemas de drenaje pluvial será eventualmente vista como un elemento valioso, o inclusive como un recurso renovable, dentro de zonas urbanas. Esto es lo que hace que el concreto permeable, sea un material relevante en la administración de aguas pluviales y una importante tecnología para el futuro, que debe ser desarrollado en la actualidad para prever esta situación.

El desarrollo de este trabajo está dividido en cuatro capítulos, en el primero de ellos tratare los aspectos generales de contexto y antecedentes históricos del concreto permeable, en el segundo apartado me centro en exponer los componentes y dosificación y diseño de mezclas; en el capítulo tres desarrollo la parte correspondiente tanto a sus propiedades y características técnicas, dando mayor importancia a su resistencia y permeabilidad, para su aplicación; el cuarto capítulo tratare la parte correspondiente al control de calidad, mantenimiento y supervisión, anterior, posterior y durante su aplicación en proyectos pequeños, medianos y grandes; y finalmente exponer un caso práctico, para ello tomaré como punto de aplicación la Ciudad Universitaria.

CAPITULO I
ASPECTOS GENERALES DEL CONCRETO
PERMEABLE

1.1 Antecedentes

Hablar del concreto permeable, es remitirnos al siglo XIX, donde tenemos los primeros antecedentes, su utilización principalmente fue en la construcción de edificios, así como tal el concreto permeable puede concebirse como un concreto especial, pues no requiere de agregados finos, “conocido comúnmente como arena. Puede ser natural u obtenido por medio de trituración o combinación de ambas. Debe pasar totalmente a través de la criba G 9.5 ($\frac{3}{8}$ ”)¹.

El concreto permeable hace su aparición en el medio de la construcción bajo diferentes maneras, aplicándose en muros colados, en obras como soporte de cargas, así también en edificios de gran altura; paneles prefabricados y bloques cuadrados al vapor y, es a finales de los años 30's del siglo pasado que la Scottish Special Housing Association Limited adopto el uso de concreto permeable de manera oficial para la construcción de viviendas.

Durante la posguerra, a mediados de los años 40's, cuando más de la mitad de las ciudades europeas quedaron devastadas, producto de la guerra, surge la imperiosa necesidad de desarrollar nuevas alternativas en los materiales de construcción, para reconstruir las ciudades afectadas de manera rápida, eficiente y económica, por lo que el concreto permeable fue una solución.

En el caso particular de Alemania, país que fue destruido en su mayoría y quedando sin infraestructura urbana, el concreto permeable fue parte de la solución en la reconstrucción de lo que hoy en día es la Alemania modernista. Por otra parte, debemos considerar que en la Europa de la posguerra si algo era escaso eran los materiales de construcción, pues no había los medios necesarios para la fabricación de materiales de construcción, por lo que el concreto permeable fue una solución a dicho problema, ya que para su elaboración requería de unos cuantos insumos.

No solo en Europa el concreto permeable se uso como solución para edificaciones, pues en las regiones árticas el concreto permeable fue ocupado para la construcción de edificios domésticos públicos e industriales, ya que los materiales convencionales utilizados en la

¹ José Luis García Rivero. *Manual técnico de construcción*. 3ª. ed., México, APASCO/Holcim, 2006, pág. 83.

construcción ocasionaban muchos inconvenientes, tales como altos costos de transporte, riesgos de incendio y malos aislantes térmicos, como son el tabique, la madera y el concreto simple respectivamente.

Pero es a partir de la década de los 90's que empieza el desarrollo e investigación con mayor profundidad del concreto permeable, hoy en día básicamente es aplicado en pavimentos, guarniciones y banquetas, entre otros múltiples desarrollos, las propiedades físicas de este material han contribuido a lograr una mitigación del medio urbano en el cual es instalado este concreto. Con esto se busca revertir daños que por mucho tiempo se han hecho al medio, para esto, la ingeniería civil propone la aplicación del concreto permeable, como una solución a múltiples problemas ocasionados al medio ambiente, principalmente en zonas asfaltadas al no permitir el filtrado de agua que recargue los mantos freáticos.

El desarrollo del concreto permeable en México es relativamente nuevo, la investigación realizada acerca de este nuevo material ha sido llevada a cabo principalmente por empresas cementeras, más que por instituciones de educación superior. Dentro del mercado nacional actualmente encontramos concretos permeables elaborados por concreto, sin el requerimiento de resinas o aditivos. Aunque también se encuentran concretos elaborados con estos últimos componentes, esta tecnología ha sido utilizada en zonas residenciales de la Ciudad de México, donde el hundimiento de la ciudad es considerable debido a la explotación de los mantos acuíferos.

El crecimiento desmesurado y sin control de la población en el Valle de México, crean cada año nuevos problemas, la escasez de agua es una de las más grandes preocupaciones que enfrentan los habitantes no sólo de la Ciudad de México y su área metropolitana, sino de todo el país, dicha problemática se agrava aún más por la pavimentación desordenada de caminos, andadores, estacionamientos y áreas que rodean las edificaciones con concreto impermeable, lo que da como resultado fugas e inundaciones del vital líquido producto de las lluvias.

Poco o nada se ha hecho caso en cuanto a la realizar obras civiles que permitan la recolección de agua de lluvia, de ahí que la aplicación del concreto permeable se presente como una solución atractiva a la fuga de agua y a los problemas asociados de contaminación de esta.

El crecimiento de la población junto con la urbanización tiene un impacto significativo en el medio ambiente y en otros problemas, tales como:

- aumento en la temperatura ambiental
- disminución de la calidad del aire
- aumento de fuga de agua
- patrones alterados del clima
- pérdida de la belleza estética/carácter de la comunidad
- reducción de los terrenos de siembra y la consecuente escasez de alimentos
- deforestación.

Esta última está vinculada a consecuencias ambientales negativas como lo es la pérdida de biodiversidad, calentamiento global, erosión del suelo y desertificación.

1.2 Definición Técnica

El concreto permeable por sus características singulares y especiales lo podemos definir como un concreto hidráulico y poroso, esto quiere decir que sus principales características físicas están hechas de un alto contenido de vacíos a diferencia del concreto convencional, cuyas propiedades están dadas principalmente por agregados finos, agregados gruesos, agua y cemento. La consistencia del concreto permeable se nutre del cemento Portland, “es un material inorgánico finamente pulverizado, que al agregarle agua, ya sea solo o mezclado con arena y grava, asbesto u otros materiales similares tiene la propiedad de fraguar y endurecer, incluso bajo el agua, en virtud de reacciones químicas



Fig. 1. La estructura vacía del concreto permeable permite fácilmente el paso del agua. (Fuente, Nacional Ready Mixed Concrete Association, USA)

durante la hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad.”² La propiedad de porosidad se obtiene mediante un alto contenido de vacíos interconectados, que varían en tamaño de 2 a 8 mm. El concreto permeable tiene 15-25% de estructura vacío, lo que permite el paso de 120-320 litros de agua a través de cada metro cuadrado, con una tasa de flujo típica de 3.4 mm/s ($200L/m^2/min$) o más (ver fig. 1.). Esta tasa de flujo es mayor que el generado durante cualquier evento de lluvia, lo que permite al agua fluir a través de este. Por lo tanto, cuando se usan pavimentos de concreto permeable, el agua de lluvia se filtra al suelo debajo, recargando la capa freática natural en lugar de fugarse y causar erosión. El primer raudal de una tormenta, esto es, los primeros 25 mm a 35 mm de agua de lluvia, se lleva el 90 por ciento de contaminantes encontrados en el pavimento, los cuales pueden contaminar corrientes y ríos, puesto que normalmente se les permite fluir a las vías fluviales sin tratamiento previo.

Volviendo a las características del concreto permeable, encontramos que, el contenido de vacíos puede variar de 15% a 35%, y se pueden alcanzar resistencias a la compresión entre 28 a 280 kg/cm^2 ., normalmente este tipo de concreto contiene poco o nada de agregados finos y una mayor cantidad de pasta cemento, con el fin de cubrir las partículas de agregado grueso y sin perder la interconectividad de vacíos. “La capacidad de drenaje de un pavimento de concreto permeable varía con el tamaño del agregado y la densidad de la mezcla, pero generalmente varía en el rango de 81 a 730 $L/min/m^2$ ”³.

1.3 Uso y Aplicación

El uso y aplicación del concreto permeable es variado, bien podemos decir que es un producto ecológico y ofrece diversas aplicaciones, principalmente en: plazas, fuentes, parques, estacionamientos, ciclopistas, además de contribuir con la estética del entorno y el mejoramiento del medio ambiente, preservando el desarrollo de microorganismo y principalmente como conductor del agua. El concreto permeable por su alta resistencia a la flexión ofrece una gran durabilidad. Sin embargo, es importante decir que para cada una de las aplicaciones depende el espesor de este⁴, así por ejemplo tenemos que:

² Normas mexicana NMX-C-414-ONNCCE.

³ Concreto permeable, México, Instituto mexicano del cemento y del concreto, 2008, pág. 1.

⁴ www.concreto permeable.com/aplicaciones.html.

Uso	Espesor en cm.
Vialidades de tráfico pesado	15
Áreas de carga y patios de maniobras	15
Vialidades de tráfico medio	12
Vialidades de tráfico ligero	10
Estacionamiento vehicular ligero	8
Andadores de uso peatonal, banquetas, explanadas	6
Ciclopistas	6

Por otra parte la aplicación es muy variada, se puede utilizar como pavimento de superficies vehiculares o muros de contención, pero también se ha encontrado una gama de aplicaciones como son:

- “pavimentos permeables para áreas de estacionamiento
- capas rígidas de drenaje bajo áreas exteriores de grandes centros comerciales
- pisos de invernaderos para mantener el piso libre de agua estancada
- aplicaciones en muros estructurales en donde se requieren características de peso ligero o de mejor aislamiento térmico, o ambos
- pavimentos, muros y pisos en donde se desean mejores características de absorción acústica
- capas de base para calles de la ciudad, carreteras municipales, caminos particulares y aeropuertos
- capas de superficie para áreas de estacionamiento, canchas de tenis, áreas de zoológicos, graneros y establos para animales
- terraplenes de puentes
- plataformas en torno de albercas
- estructuras de playas y muros marinos
- lechos de sedimentos de plantas para el tratamiento de aguas negras
- sistemas para almacenamiento de energía solar
- arrecifes artificiales en donde la estructura abierta de concreto permeable semeja la estructura de los arrecifes”⁵

⁵ *Concreto permeable*, pág. 3.



Fig. 2



Fig. 3



Fig. 4

Diferentes aplicaciones del concreto permeable

Para la aplicación del concreto permeable es necesario contar con un área permeable, que permita que el agua de lluvia se infiltre libremente al subsuelo, dejando como ventaja la reducción o total eliminación de drenaje pluvial. Los sitios recomendados para la colocación del concreto permeable, son áreas de alta permeabilidad, suelos con una gran conductividad hidráulica y que no tienen pendientes mayores al 5%.

Por otra parte el concreto permeable, no es un concreto reforzado por el alto riesgo de corrosión del acero de refuerzo debido a la estructura porosa del material, dejando solo útil para las aplicaciones ya mencionadas.

1.4 Ventajas

El concreto permeable es un nuevo material de construcción innovador con muchas ventajas económicas, ambientales y estructurales. Son múltiples las razones que hacen que los pisos y pavimentos elaborados con concreto permeable sean de mucha mayor calidad que los de concreto hidráulico, de esta manera podemos resaltar:



Fig. 5. Concreto permeable, donde se observa la ausencia de finos

1. La ausencia de finos. Los concretos sin finos transmiten las cargas en forma heterogénea a diferencia de los concretos convencionales que lo hacen en forma homogénea. En los concretos sin finos la transmisión de cargas se realiza por puntos de contacto, originando que las cargas sean repartidas en forma aleatoria, dando como resultado que éstas sean distribuidas en una superficie mucho mayor.

2. Los aditivos al reaccionar con el cemento potencializa su poder de pegado logrando un súper concreto. Se han hecho pruebas en las cuales, al agregar el aditivo a un concreto hidráulico normal, se ha logrado un incremento de más del 100 % en su resistencia a la compresión.

3. Los huecos presentes en estos concretos dan como resultado:

- Una mayor elasticidad.
- Comportamiento superior frente a los cambios de temperatura, disminuyendo los movimientos de contracción y expansión.
- Pavimentos más frescos y ligeros

La transmisión heterogénea de las cargas provoca que la superficie sobre la cual éstas se reparten, sea varias veces mayor al producto de la repartición de cargas en un piso hecho con un concreto convencional o con asfalto. Aunado a esto, las bases diseñadas para los pisos permeables son más económicas, más eficientes y no generan baches.

Una ventaja adicional, provocada por la repartición heterogénea de cargas es que casi nunca hace falta mejorar el terreno natural.

Se ha desarrollado una fórmula llamada “Factor de Vacíos” que permite conocer la resistencia a la compresión de los pisos de concreto permeable cuando son analizados mediante el uso de cilindros o corazones. Aplicada en forma convencional permite establecer un punto de comparación entre ambos tipos de concretos⁶.

1. El “Factor de Vacíos” se obtiene al dividir el peso del concreto convencional (aprox. $2,400 \text{ kg/m}^3$) entre el del concreto permeable (aprox. $1,750 \text{ kg/cm}^3$).
2. El resultado se multiplica por la “f’c” obtenida al ensayar la muestra.

⁶ Concretos permeables y ecológicos: concretos permeables, sistemas para la recuperación y aprovechamiento del agua pluvial por medios de pesos y pavimentos porosos. México, Cocreto, p. 14 (formato PDF)

Ejemplo:

$$\frac{\text{Peso del concreto convencional}}{\text{Peso del concreto permeable}} = \frac{2400 \text{ kg/m}^3}{1750 \text{ kg/m}^3} 1.3714 \text{ (factor de vacíos)}$$

$$\text{Resultado de la prueba de laboratorio } f'c = 252 \text{ kg/cm}^2$$

$$f'c \text{ para el concreto permeable } 252 * 1.3714 = 345.60 \text{ kg/cm}^2$$

Este factor es aplicable tanto a pruebas a compresión como a tensión. Con esta información podrán hacerse los cálculos correspondientes para el diseño de pavimentos.

Ventajas económicas:

- la reducción de drenaje pluvial en estacionamientos y calles de tránsito ligero, evitando encharcamientos en la superficie
- ahorro en el mantenimiento del área donde se instala el concreto permeable, sin la necesidad de utilizar equipos para drenar
- eliminación parcial o total de sistemas de alcantarillado en zonas residenciales
- reducción de costos de transportación y energía durante la producción y colocación
- facilidad de obtener los agregados, agua y cementantes en cualquier localidad o región
- la creación de nuevas compañías que se especialicen en la transportación colocación y explotación de los insumos, para su producción
- mayor tiempo de vida y menor costo de mantenimiento en comparación con otro tipo de pavimentos



Fig. 6
Eliminación total o parcial de drenaje en áreas urbanas



Fig. 7

Beneficios ambientales⁷:

- retención de contaminantes, tales como aceites, anticongelantes y otros líquidos derivados del petróleo, que un momento dado podrían desembocar en lagos, ríos y océanos
- facilita el uso de geotéxiles para la retención de aceites, evitando la contaminación de las capas inferiores del



Fig. 8. Ideal para uso arquitectónico de áreas verdes.

- suelo. Aprovechando estos hidrocarburos como alimento de bacterias y hongos, los cuales biodegradan los aceites en componentes más simples
- reducción de la contaminación de agua de lluvia, ocasionando la disminución en el tratamiento de esta.
- permite la infiltración del agua de lluvia hacia el subsuelo reduciendo la cantidad de agua en los sistemas de drenaje
- creación de nuevas técnicas de construcción sustentable, basadas en la reducción de contaminantes
- reduce la captación de radiación solar, disminuyendo la temperatura del medio donde se encuentra instalado gracias a la estructura de poro abierto
- facilita la captación de agua y aire de los árboles en áreas que se encuentran pavimentadas con este material
- ideal para el uso arquitectónico y diseño de áreas verdes en estacionamientos y áreas pavimentadas

Ventajas estructurales:

- proporciona una tracción mayor a los vehículos y evita la hidroplaneación, “fenómeno físico que sucede cuando las llantas pierden contacto con la superficie del asfalto y flotan sobre una película de agua. El conductor pierde de inmediato el control de la dirección y el frenado del auto. Esto puede suceder bajo condiciones de lluvia o de

⁷ [Información del estudio realizado por EPA, 2004. Para mayor referencia véase anexo]. [www.perviuspavement.org/Benefit, porcentaje 20 enviromental.htm](http://www.perviuspavement.org/Benefit_porcentaje_20_enviromental.htm).

encharcamiento de agua. A mayor velocidad, mayor es la probabilidad de que el auto hidroplanee”⁸, durante condiciones difíciles de conducción, por ejemplo lluvia y nieve

- permite el deshielo con mayor velocidad
- una durabilidad de 20 a 40 años siempre y cuando se haya realizado una correcta instalación
- dureza alta debido al poco contenido de agua
- menor contracción de sequía, sin la necesidad de cortar el concreto
- no provoca grietas y en caso de existir no tiene ningún efecto significativo en la integridad estructural del pavimento
- alcanza resistencias superiores a 3000 *PSI*⁹ y aún más con diseños especiales de la mezcla, diseños estructurales, y técnicas de la colocación
- utilizar otros tipos de cementantes como humo de sílice, ceniza volante y escoria de horno da como resultado una mayor durabilidad, disminución de grietas y permeabilidad

Las ventajas que ofrece este nuevo material son múltiples, pues al utilizar este concreto es posible mantener el control de inundaciones de manera natural sin la necesidad de drenaje o sistemas sofisticados de alcantarillado pluvial, reducción de costos a largo plazo durante la etapa de construcción y mantenimiento, para proporcionar superficies más seguras en época de lluvias o nevadas.

1.5 Desventajas

Para extender las aplicaciones del concreto permeable, se requiere una mayor investigación y verificar su desempeño en varios ambientes. Aunque es utilizado en climas templados, hay preocupación acerca del desempeño a bajas temperaturas, y problemas de durabilidad bajo congelación y deshielo.

⁸. *Manual de manejo*. México, Secretaria de Transportes y Vialidades, 2009.

⁹ Se denomina psi (del inglés Pounds per Square Inch) a una unidad de presión cuyo valor equivale a 1 libra por pulgada cuadrada.

El concreto permeable al igual que otros materiales de construcción presenta desventajas tales como:

- el diseño está enfocado para la sustitución de áreas impermeables eficaces, no para el manejo de precipitaciones excesivas.
- no debe ser colocado en superficies expuestas a aguas negras, debido a que puede llegar a contaminar las aguas subterráneas
- su uso es limitado a calles con tránsito ligero, debido a que ofrece poca resistencia al desgaste
- no se recomienda su uso cuando el suelo tenga una pendiente mayor al 20%
- en climas fríos se presentan múltiples problemas, tales como la prohibición de esparcir sal o arena ya que tapan los poros y arrastrarían los cloruros a las aguas subterráneas
- congelamiento de la salida de infiltración
- un costo mayor que otros pavimentos durante su etapa de instalación
- la aplicación errónea de productos para el mantenimiento pueden dañar el concreto permeable
- pérdida de permeabilidad con el paso del tiempo, debido a que se van tapando los espacios vacíos con material fino, por lo que se requiere de un mantenimiento a base de agua a presión
- nula colocación de acero de refuerzo pues presentara corrosión, ocasionado por la filtración de agua



Fig. 9. Una buena instalación provee un buen funcionamiento del concreto permeable

Esto no quiere decir que el concreto permeable sea un material de usos limitados, pero su buena funcionalidad radica en una buena instalación. Se han observado casos con éxitos, donde se ha aplicado, sin embargo, en otras áreas los espacios vacíos se han tapado en corto tiempo esto debido a la inexperiencia del contratista, malos preparativos de la base y subbase, o un diseño

inapropiado según el sitio.

1.6 Recomendaciones

Para tener un óptimo funcionamiento del concreto permeable es necesario, verificar la permeabilidad de los suelos se recomienda una capacidad de filtración de 13 *mm/hr*, y una capa de suelo de 1.2 *m* o más, la superficie de concreto permeable no debe ser puesta en servicio, hasta que toda la tierra removida con pendiente hacia el pavimento permeable haya sido estabilizada por medio de vegetación, para evitar la colmatación del sistema, son esenciales los controles estrictos de la erosión y sedimentación durante la etapa de construcción, debe realizarse mantenimiento periódico a la superficie de concreto permeable y el tránsito de construcción debe ser dirigido hacia fuera del área del pavimento permeable durante su colocación para evitar compactación de las capas del suelo subyacente y la pérdida de la capacidad de infiltración.

CAPITULO II
DISEÑO DE MEZCLAS

2.1 Introducción

El concreto como lo conocemos actualmente es un material de construcción relativamente nuevo, propio del siglo XX vital para la construcción de edificaciones, grandes obras de ingeniería, e infraestructura urbana, sin embargo así como ha ido evolucionando el hombre el concreto también lo ha hecho, desde la época de los romanos hasta nuestros días.

Durante la época de los romanos se crearon concretos livianos utilizados por casi 800 años, los cuales estaban constituidos por rocas volcánicas porosas, para construir algunas estructuras, como el panteón o la iglesia de Santa María de los Mártires, que actualmente subsisten, más sin embargo este concreto aun era muy primitivo. Después de la caída del imperio romano, durante la edad media se olvida el uso de este material.

Es hasta el siglo XVIII que el concreto es redescubierto por los ingleses, cuando John Smeaton lo utilizó para la construcción del Faro de Adystone, en la costa sur de Inglaterra, pues observo que el mortero de cal ordinaria no se endurecería bajo el agua, por lo que no sería lo suficientemente durable para resistir las olas y descubrió que el mejor mortero provenía de las calizas con el más alto porcentaje de arcilla. Smeaton tuvo así la primera noción de los tiempos modernos acerca de los elementos que incrementan la resistencia de los morteros de cal y le permiten endurecerse bajo el agua.

Pero es hasta el siglo XVIII que el desarrollo del concreto como material de construcción empezó, poco después de la obtención de la patente del cemento Portland por parte de Joseph Aspin. Posteriormente el jardinero Joseph Monier francés inventó el concreto, quien construyo macetas y baldes de concreto y los reforzó con una malla de alambre de hierro. Ya para el siglo XX el uso de la relación agua-cemento y el aumento de la durabilidad con la inclusión de aire, fueron dos elementos que marcaron significativamente la tecnología del concreto, en base a estos elementos se inicio la investigación del concreto.

El concreto es un material artificial integrado por componentes, cemento, agua, aire y agregado. El agregado es el componente que predomina ya que constituye, más de las $\frac{3}{4}$ partes de su peso. El concreto es un material con la particularidad de ser, inicialmente y transitoriamente un mezcla plástica y cuya forma final es la de un sólido resistente.



Fig. 10. Aplicación de concreto convencional.

El concreto convencional, es un material resistente a la compresión, se considera que no soporta esfuerzos a tensión para efectos de cálculos. La resistencia del concreto se mide en kg/cm^2 y se representa por medio de $f'c$, generalmente variándose de 50 en 50 unidades, en construcciones comúnmente se llega a construir hasta con una resistencia $f'c$ 350 y 400 kg/cm^2 .

Por otra parte el concreto permeable es un concreto especial, el cual no deja de tener características similares al concreto convencional, con la única diferencia que se elimina parcialmente o completamente el agregado fino.

2.2 Materiales

El concreto permeable o poroso es un concreto hidráulico, sus características son similares al concreto simple, es un material artificial integrado por componentes, cemento o cementante, agua, aire y agregado grueso, despreciando al agregado fino. Esta combinación forma una aglomeración de agregado grueso rodeados por una delgada capa de pasta cemento endurecida en sus puntos de contacto.

Esta estructura permite la existencia de grandes huecos entre el agregado grueso, que permite el paso del agua por medio de él. El concreto permeable se considera un tipo especial de concreto poroso. Se clasifica en dos tipos:

- Concreto de agregado ligero, donde la porosidad se presenta en el componente del agregado de la mezcla.
- Concreto permeable, la porosidad en la mezcla no es debida a los agregados.

El primer tipo de concreto puede ser elaborado utilizando agregados naturales o sintéticos extremadamente porosos. Mientras que el concreto permeable tiene poco o nada de agregado fino en la mezcla.

Otra diferencia de estos dos tipos de concreto poroso se basa principalmente en la estructura de huecos que presenta, el concreto de agregado ligero contiene grandes porcentajes de huecos relativamente no conectados, sin embargo el concreto permeable,

contiene grandes porcentajes de huecos conectados entre sí, lo que permite el paso rápido del agua a través de la masa de concreto.

El concreto permeable se fabrica en las mismas plantas que el concreto convencional, además de no generar un costo adicional.

2.2.1 Cementante

El material cementante utilizado para la elaboración del concreto permeable, es el cemento Portland el cual debe satisfacer las normas ASTM C 150, ASTM C 595, ó ASTM C 1157, y tiene como función principal aglomerar las partículas gruesas. El cemento Portland puede ser sustituido por ceniza volante, cemento de escoria granulada y humo de sílice.

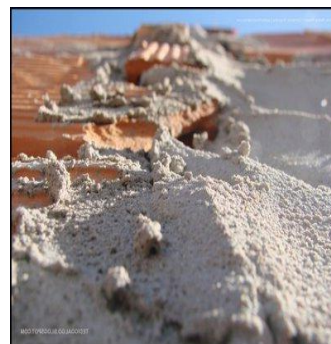


Fig. 11. Cemento portland el cual satisface las normas ASTM

“La ceniza volante es un conglomerado hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clinker portland, escoria de alto horno y usualmente sulfato de calcio. Por su parte el cemento de escoria regulado, es un conglomerado hidráulico de la molienda conjunta de clinker portland humo de sílice y usualmente sulfato de calcio. Finalmente el humo de sílice, es un conglomerado hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clinker Portland y mayoritariamente escoria granulada de alto horno y sulfato de calcio”¹, los cuales deben satisfacer los requisitos de las normas ASTM C 618, ASTM C 989, y ASTM C 1240, respectivamente, dando como resultado diferentes propiedades al concreto permeable y respondiendo a diferentes necesidades.

Es importante controlar la cantidad de material cementante agregado a la mezcla, debido a que una mayor dosis de cementante generará un concreto más resistente, pero ocasionará una disminución en el porcentaje de vacíos interconectado dentro del concreto, perdiendo su capacidad de infiltración. Para la correcta dosificación de material cementante es recomendable utilizar una cantidad que oscile entre los 270 a 415 kg/m^3 , según los requisitos de resistencia y permeabilidad.

¹ García Rivero, José Luis. *Manual técnico de construcción, Op. cit.*, pág. 77.

2.2.2 Agua

Dentro de la fabricación del concreto permeable, el agua es líquido que está presente de manera importante en la elaboración de la mezcla, en el lavado de agregados, curado y riego del concreto, por lo que debe ser un insumo limpio, libre de aceite, ácidos, álcalis, sales y en general de cualquier material que pueda ser perjudicial, según su utilidad. Por lo que la calidad del agua debe cumplir con la norma ACI 301.



Fig. 12. El agua utilizada para la elaboración del concreto permeable debe ser potable y libre de contaminantes

En cuanto a la dosificación, el concreto permeable debe ser proporcionado con una relación agua-cemento relativamente baja, ya que una cantidad excesiva de agua conducirá a drenar pasta y al atascamiento del sistema de poros. Por lo que la cantidad de agua agregada debe ser controlada y supervisada cuidadosamente.

2.2.3 Agregados

“Los agregados son elementos minerales que provienen de la naturaleza, procesados o artificiales, que se mezclan con un cementante o aglutinante hidráulico para fabricar morteros o concretos”².

Estos se clasifican en agregados gruesos y agregados finos, cabe mencionar que para la elaboración del concreto permeable el agregado fino es despreciable, por lo que se utiliza agregado grueso conocido comúnmente como grava, el cual puede ser natural o el obtenido de la trituración de roca o una combinación de ambas.

La granulometría del agregado utilizado debe de ser de tamaño uniforme, comúnmente estas deben cumplir con la norma ASTM C 33, en la cual se especifica que sólo pueden ser utilizados agregados de $\frac{3}{4}$ ” a $\frac{3}{8}$ ”.

En caso de utilizar “agregados redondeados y triturados deben de satisfacer los requisitos de la norma ASTM D 448 y ASTM C 33. Típicamente, los agregados finos

² *Ibidem*, pág. 83.

no deben ser usados en mezclas de concreto permeable, ya que estos tienden a comprometer la capacidad de conexión del sistema poroso”³.



Fig. 13



Fig. 14



Fig. 15



Fig. 16

Diferentes tipos de agregado grueso

2.2.4 Aditivos

Los aditivos son materiales diferentes al agua, de los agregados y del cemento, estos son agregados en menores cantidades y forman parte de los componentes del concreto, los cuales pueden ser agregados inmediatamente antes o durante el mezclado, interactuando con el sistema hidratante-cementante, mediante la acción física-química, que modifican una o más de las propiedades del concreto en sus etapas: fresco, fraguado, endurecimiento y endurecido. Los aditivos deben satisfacer los requisitos de la norma ASTM C 494.

Los aditivos se utilizan en el concreto permeable para los siguientes fines:

- Reductores de agua: reducir la cantidad de agua en el concreto modificando la velocidad de fraguado, así como su consistencia. Al utilizar estos aditivos se podrá reducir el contenido de cemento en proporción a la reducción del contenido de agua, conservando así la misma relación agua/cemento, además de incrementar la resistencia debido a la eficiencia de hidratación de la reacción entre cemento y agua. Es recomendable utilizar este aditivo, por que el concreto permeable está en contacto constante con el agua.
- Aditivos retardantes: como su nombre lo indica retardan el fraguado del concreto, evitando agrietamiento por contracciones térmicas o por planeación en ciudades cuando se prevé tránsito pesado.
- Aditivos colorantes: dan color al concreto sin modificar las propiedades de la mezcla.

³ *Concreto permeable, Op. cit.*, pág. 9

- Aditivos inclusores de aire: originar aire en el concreto en forma de pequeñas burbujas, mejorando la manejabilidad y resistencia al congelamiento. Siempre se debe incluir en la mezcla cuando se conozca que la estructura recién colada, se deberá resistir muchos ciclos de congelación y deshielo, principalmente cuando se sabe que existirán agentes descongelantes.

Los aditivos retardadores se usan para estabilizar y controlar la hidratación del cemento, sobre todo en mezclas rígidas, como son las del concreto permeable especialmente, en clima cálido. Además actúan como lubricantes durante la descarga del concreto de la mezcladora, mejoran el manejo y desempeño en el lugar.

Los aditivos aceleradores pueden ser usados cuando se está colocando concreto permeable en climas fríos. Por otro lado los aditivos inclusores de aire no son utilizados comúnmente en concretos permeables, pero pueden ser usados en ambientes susceptibles a congelación y deshielo. Su uso no es muy recomendado debido a la poca experiencia y cuantificación de aire para agregar.

2.3 Diseño de un pavimento permeable

El concreto permeable es un material utilizado actualmente como pavimento, sus propiedades físicas son similares al pavimento rígido, por lo que es necesario considerar tres aspectos principales a utilizar:

- Tránsito vehicular
- Resistencia del concreto
- Características del terreno de apoyo

Cuando un pavimento se diseña se pretende siempre simular las condiciones de apoyo más especulativo, debiendo tomar en cuenta que el pavimento permeable será apoyado en el terreno natural del sitio ya preparado e incluso compactado, y la capa sub-base. De esta manera este conjunto quedará representado por un módulo de reacción combinado.

La resistencia de diseño se establecerá de acuerdo a la importancia de la obra, el volumen por producir, el equipo disponible, la capacidad técnica del contratista y la calidad de agregados y cemento.

El tránsito vehicular es determinado por estudios de aforos para así conocer la distribución de cargas y estimar de una manera más exacta el número de vehículos que circularán por la vialidad en la vida útil del proyecto. “Parámetro obligado en este tipo de estructuras y se refiere básicamente a la noción del servicio que la superficie de rodamiento debe prestar al paso de vehículos en un período determinado; durante este lapso, la estructura debe ofrecer una superficie segura y cómoda. Por otro lado, como las vialidades urbanas deben ser relativamente estables, dadas las características de las áreas a las cuales sirven, las vidas útiles que se deben contemplar son de 20 años como mínimo, aunque en el caso de pavimentos de concreto se recomienda sean en periodos más prolongados.”⁴.

Los factores que determinan el diseño del concreto permeable, son las características hidráulicas y mecánicas que se deseen en el sitio de instalación. Se deben seleccionar los materiales apropiados, el ancho del pavimento, entre otras características para cumplir los requisitos hidrológicos y de distribución de cargas generadas por el tráfico simultáneamente. Los análisis por separado tanto hidráulico, como estructural dan como resultado dos valores para el grueso de carpeta y el más grande de los dos valores será el grueso final del diseño.

2.4 Proporcionamiento de mezclas

Para el concreto permeable, la relación agregado-cemento y agua-cemento son las variables que afectan principalmente las características mecánicas. Por medio de investigaciones y pruebas en laboratorios se ha encontrado como aceptable un amplio rango de factores de cemento, dependiendo de la aplicación específica. Los aditivos afectan directamente la relación agua-cemento, ocupados para intervenir en la trabajabilidad y los tiempos de fraguado, con el fin de mejorar las características del concreto permeable y mejorar su durabilidad a largo plazo. La siguiente tabla muestra los rangos permisibles de proporcionamiento de materiales en el concreto permeable.

⁴ Salazar Rodríguez, Aurelio. Guía para el diseño de pavimentos rígidos, Instituto mexicano del cemento y del concreto, 2008, pág. 49.

Material	Rango
Materiales cementantes, kg/cm^3	270 a 415
Agregado, kg/cm^3	1190 a 1480
Relación agua-cemento, en peso	0.26 a 0.45
Relación agregado grueso-cemento, en peso	4 a 4.5:1
Relación agregado fino-agregado grueso, en peso	0 a 1:1

Tabla 1. Rangos recomendables de proporcionamiento de materiales en el concreto permeable ⁵

2.4.1 Relación agua-cemento

La relación agua-cemento determina la porosidad de la pasta de cemento endurecido en cualquier etapa de hidratación. Esta relación constituye un parámetro importante de la composición del concreto. Tiene influencia directa sobre la resistencia, durabilidad y retracción. Esta relación agua-cemento es el valor más importante de la tecnología del concreto, determinando la estructura interna de la pasta de cemento endurecida.

La relación agua-cemento es el cociente entre las cantidades de agua y de cemento existentes en el concreto fresco, es decir se calcula dividiendo la masa de agua por la del cemento contenidas en un volumen dado de concreto.

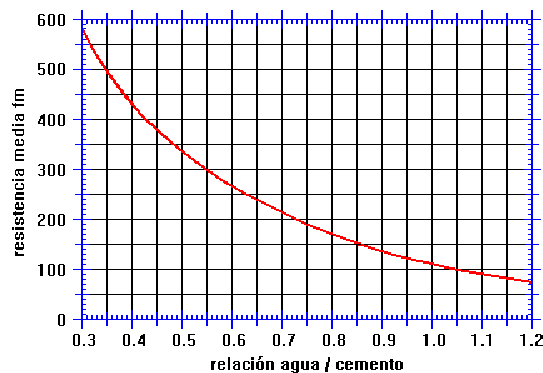
$$R = \frac{a}{c}$$

Donde:

R : Relación agua-cemento

a : Masa del agua del concreto fresco

c : Masa del cemento del concreto



Gráfica 2.1. Relación agua-cemento

⁵ <http://www.perviouspavement.org/mixture%20proportioning.htm>

La relación aumenta al incrementar la cantidad de agua y decrece al aumentar el contenido de cemento. En todos los casos, cuanto más baja es la relación agua-cemento son más favorables las propiedades de la pasta de cemento endurecida.

En el caso del concreto permeable el contenido óptimo de agua produce una pasta de cemento muy húmeda con una alta viscosidad. Esta mezcla tendrá la apariencia de brillo de un metal mojado o brillante. Utilizando una cantidad insuficiente de agua dará como resultado una mezcla sin consistencia y con baja resistencia. Una cantidad excesiva de agua, generará una pasta que sellará los vacíos de la mezcla, además de desplazar el cemento dejando expuesto al agregado. Produciendo una baja resistencia al desgaste superficial.

La relación agua-cemento depende principalmente de las características de granulometría y físicas de los agregados gruesos y del contenido de materiales cementantes de la mezcla. Para el concreto permeable, la relación agua-cemento debe variar en el rango de 0.26 a 0.45.

2.4.2 Relación agregado-cemento

La relación agregado-cemento comúnmente varía entre 4:1 a 4.5:1, pero ésta depende fundamentalmente del tipo de agregado. Tanto la relación agua-cemento y la relación agregado-cemento deben satisfacer las características de permeabilidad, capacidad de carga y durabilidad.

2.4.3 Contenido de agregado grueso

Las pruebas de peso unitario seco-compactado de agregado grueso (b/b_0) hecho por la National Aggregates Association – National Ready Mixed Concrete Association, muestra que el peso unitario seco-compactado del agregado grueso determinado de acuerdo con la norma ASTM C 29 puede usarse en el proporcionamiento del concreto permeable.

Donde:

$$\frac{b}{b_0} = \text{volumen seco compactado de agregado grueso por unidad de volumen de concreto}$$

b : volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto.

b_0 : volumen de agregado grueso por unidad de volumen de agregado grueso.

El valor b/b_0 automáticamente se compensa por los efectos de las diferentes formas de las partículas de los agregados, la graduación o tamaño, y el peso específico. Además, para un rango de agregados de tamaño máximo nominal normalmente usados para concreto permeable (3/8" a 3/4") los valores b/b_0 son muy similares. La tabla muestra los valores de b/b_0 para agregado grueso de tamaños No. 8 (3/8") y No. 67 (3/4") para un contenido de agregado fino de 0%, 10% y 20% del total de agregado.

Porcentaje de agregado fino (%)	b/b_0	
	No. 8 (3/8")	No. 67 (3/4")
0	0.99	0.99
10	0.93	0.93
20	0.85	0.86

Tabla 2. Valores efectivos b/b_0 (ACI 211.3R, 1998)

2.3.4 Procedimiento de proporcionamiento

El procedimiento para el proporcionamiento de mezclas para concreto permeable se basa en el volumen de pasta necesario para mantener unida las partículas de agregado, mientras se mantiene la estructura de vacíos necesaria. La proporción de agregado depende del peso unitario seco compactado y de los valores de b/b_0 de la tabla 2. Ya determinado el volumen de pasta con ayuda de la gráfica 1, se selecciona la relación agua-cemento, determinando los pesos del agua y del cemento por metro cúbico de acuerdo con las siguientes relaciones⁶:

$$\text{Volumen de pasta} = \text{volumen de cemento} + \text{volumen de agua}$$

O bien:

$$\text{Volumen de pasta} = \left(\frac{c}{\text{peso específico del cemento}} \right) + \left(\frac{a}{\text{peso específico del agua}} \right)$$

Considerando que el peso específico del cemento y agua es 3.15 y 1, respectivamente se tiene:

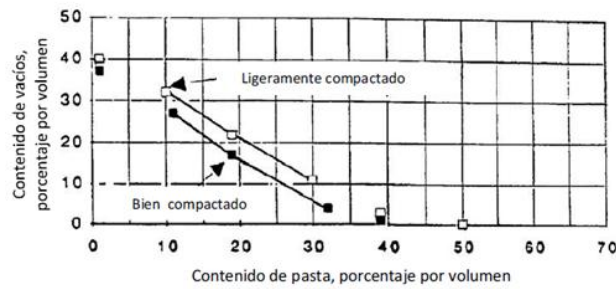
$$\text{Volumen de pasta} = \left(\frac{c}{3.15 * 1000} \right) + \left(\frac{a}{1000} \right)$$

⁶ Pérez Ramos, Daniel, "Estudio experimental de concretos permeables con agregados andesíticos", tesis de maestro en Ingeniería Civil-Construcción, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2009, p. 26.

Donde, **c** es el peso del cemento y **a** es el peso del agua, si la relación agua-cemento es (a/c) entonces:

$$a = \left(\frac{a}{c}\right) c, \text{ y}$$

$$\text{Volumen de pasta} = \left(\frac{c}{3.15 * 1000}\right) + \left(\frac{\left(\frac{a}{c}\right) c}{1000}\right)$$



Gráfica 2.1. Relación entre el contenido de vacíos y contenido de pasta para agregado de 3/8"⁷

2.3.5 Ejemplo

Se requiere determinar el proporcionamiento para una mezcla de concreto permeable bien compactada, con agregado de 3/8" que tiene un peso volumétrico seco-compactado de 1741.21 kg/m^3 y una absorción de 1.2%. La mezcla debe tener un porcentaje de vacíos de 20% y una resistencia a la compresión de 150 kg/cm^2 a los 28 días. El concreto permeable debe ser proporcionado para una relación agua-cemento (a/c) de 0.40. La mezcla no contendrá agregado fino. El peso específico (SSS) del agregado grueso No. 8 es de 2.70.

Datos:

Relación agua-cemento = 0.40

Porcentaje de vacíos = 20%

Resistencia a la compresión = 150 kg/cm^2

Peso específico del cemento = 3.15

Peso volumétrico seco-compactado de la grava 3/8" = 1741.21 kg/m^3

Peso específico de la grava = 2.70

Absorción de la grava = 1.2%

⁷ Norma ACI 211.3R 1998

Solución:

Con ayuda de la gráfica 2. Se determina el volumen de pasta para un 20% de vacíos para la mezcla de concreto permeable bien compactada, dando como resultado 16.5%.

Por lo tanto,

$$\text{Volumen de pasta (Vp)} = 0.165$$

$$\text{Volumen de vacíos (Vv)} = 0.2$$

$$0.165 + 0.2 = 0.365$$

$$\text{Volumen de grava (Vg)} = 1 - 0.365 = 0.635 \text{ m}^3$$

$$0.635 = \frac{g}{2.75 * 100}$$

$$g = \text{peso del agregado, en kg; } g = 1746.25 \text{ kg}$$

$$\text{Por otro lado: } Vp = Vc + Va$$

Por lo tanto,

$$0.165 = \frac{c}{3.15 * 1000} + \frac{(a/c)c}{1000}$$

Donde:

c = peso del cemento, en kg

a/c = relación agua-cemento

Por lo tanto,

$$0.165 = \frac{c}{3.15 * 1000} + \frac{0.40c}{1000}$$

$$c = 229.97 \text{ kg}$$

Para determinar el volumen de cemento (Vc), se tiene que:

$$Vc = \frac{c}{3.15 * 1000} = \frac{229.97}{3.15 * 1000} = 0.073 \text{ m}^3$$

Para determinar el contenido de agua,

$$a = (a/c) c$$

$$a = 0.40 c$$

$$a = 0.40 (229.97)$$

$$a = 91.98 \text{ kg}$$

Para determinar el volumen de agua (Va),

$$Va = \frac{a}{1000} = \frac{91.98}{1000} = 0.092 \text{ m}^3$$

En la siguiente tabla se muestran los pesos y volúmenes por m^3

Material	Pesos en kg	Volúmenes en m³
Cemento	229.97	0.073
Grava	1746.25	0.635
Agua	91.98	0.090
Total	2068.2	0.798

Para confirmar el porcentaje de vacíos:

$$\% \text{ de vacíos} = (1 - 0.798) \times 100 = 20\%$$

Las proporciones de la mezcla anteriormente calculada deben ser verificadas por medio de pruebas de laboratorio, para realizar los ajustes necesarios hasta encontrar las propiedades requeridas del concreto.

CAPITULO III
PROPIEDADES DEL CONCRETO PERMEABLE

3.1 Generalidades

El concreto es una mezcla de cemento, agua, arena y grava que se mantiene trabajable durante un determinado tiempo, generalmente dos horas y después comienza a endurecer hasta desarrollar la resistencia que soporta la estabilidad de las estructuras.

El concreto fresco, se puede definir como una suspensión concentrada de sólidos en agua; algunos concretos pueden ser desmoldados inmediatamente después de su compactación y resistir pesadas cargas en estado fresco, ser elevados y colocados con bandas transportadoras, bombeados a largas distancias y alturas, ser neumáticamente esparcido, fluir a través de canalones, fluir como líquidos sin segregación en su estado fresco. Esto se puede lograr variando las características reológicas [estudió de los principios físicos que regulan el movimiento de los fluidos] del concreto fresco.

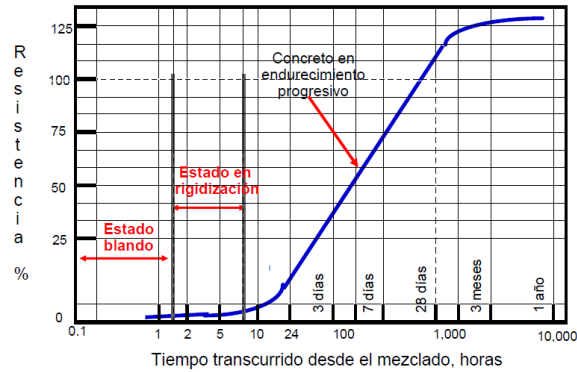
Existen diferentes tipos de concreto basados en su resistencia a la compresión:

- resistencia baja (hasta 200 kg/cm^2)
- resistencia media (> 200 a 400 kg/cm^2)
- resistencia alta (mayor de 400 kg/cm^2)

La calidad del concreto está en función de la calidad de la pasta de cemento, a su vez esta depende de cuatro factores fundamentales:

- relación agua/cemento
- contenido de cemento
- tipo de cemento
- curado

En la siguiente grafica, 3.1 se ilustran los diferentes estados del concreto, con respecto al tiempo transcurrido y la resistencia que se alcanza.

Gráfica 3.1. Estados del concreto¹

Ahora bien, las propiedades de resistencia en el concreto permeable dependen del contenido del material cementante, la relación agua-cemento, el nivel de compactación, la granulometría y la calidad del agregado. Aunque el concreto permeable se ha ocupado por más de 20 años, principalmente como pavimento, sus aplicaciones son de uso limitado, las investigaciones realizadas al respecto, hasta el momento han arrojado poca información relevante en el uso y aplicación de este material en problemas reales. Actualmente existen pocos procedimientos estándares para fabricar y ensayar especímenes de concreto permeable en el laboratorio o campo, por lo que se ha optado de manera práctica, por la aplicación de los procedimientos del concreto.

3.2 Propiedades en estado fresco

El estado fresco del concreto permeable se comprende desde el momento del mezclado del concreto hasta el momento del proceso de endurecimiento inicial, manteniendo las características de trabajabilidad, de tal manera que permiten realizar las operaciones del mezclado, transporte, colocación, compactación y acabado.

3.2.1 Consistencia y peso volumétrico

El revenimiento es la medida de la consistencia del concreto fresco en términos de disminución de altura. Para una proporción dada de cemento y agregado, sin aditivos, cuanto mayor sea el revenimiento, más húmeda es la mezcla, esta propiedad se determina de acuerdo a la norma ASTM C 143.

¹ Curso básico sobre tecnología del concreto, CD-ROM, México, Cemento Apasco, 2005.

Las mezclas de concreto permeable en estado fresco a diferencia del concreto convencional, es mucho más rígida, generando un revenimiento que varía de entre 0 a 1 *cm*.

Por otra parte el peso volumétrico de las mezclas de concreto permeable es aproximadamente 70% del peso volumétrico de las mezclas de concreto convencional, el cual se determina de acuerdo a la norma ASTM C 29, de esta manera el peso volumétrico del concreto depende del porcentaje de vacíos por lo que varía entre los 1600 a 2000 kg/cm^3 .

3.2.2 Relación contenido de huecos de aire-peso volumétrico

El cálculo del contenido del hueco de aire está determinado por el porcentaje de aire del método gravimétrico y es determinado según la norma ASTM C 138, y está relacionado directamente con el peso volumétrico de una mezcla dada de concreto permeable. El hueco de aire depende de varios factores, como pueden ser: granulometría del agregado, contenido de material cementante, relación agua-cemento y energía de compactación, la cual presenta una influencia en el contenido de los huecos de aire, y por consiguiente, en el peso volumétrico correspondiente, proporcionalmente a la mezcla dada de concreto permeable. De acuerdo a una serie de pruebas realizadas en laboratorio, quedo determinado que una sola mezcla de concreto permeable, compactada con 8 niveles diferente de energía producen valores de peso volumétrico que oscilan entre los 1680 y 1920 kg/m^3 . En la figura 17 muestra una estructura típica del concreto permeable que representa la relación de contenidos de huecos de aire-peso volumétrico.

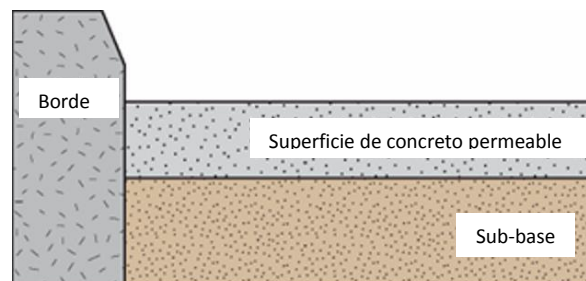
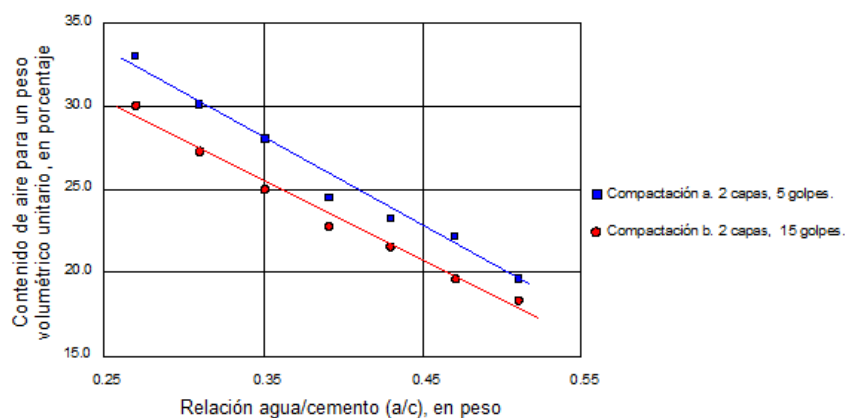


Figura 17. Sección representativa típica del pavimento concreto penetrable.

El comportamiento de resistencia en el concreto permeable aumenta si la porosidad disminuye, por el contrario si la porosidad aumenta la resistencia disminuye. Por medio de pruebas de laboratorio y estudios se ha demostrado que el porcentaje de vacíos para concreto permeable debe estar en un rango de 14% a 31%, pero ya en la práctica, se utiliza un porcentaje de vacíos de 15% a 25%, obteniendo resistencias mayores a 140 kg/cm^2 .

En la gráfica 3.2 podemos observar el contenido de aire en función de la relación agua-cemento, con dos valores diferentes de compactación.



Gráfica 3.2. Relación entre el contenido de aire y la relación agua-cemento para el concreto permeable²

En la mezcla de concreto permeable la energía de compactación tiene una influencia significativa, en el contenido de huecos de aire, la variación de los pesos volumétricos tiene un efecto importante en la resistencia a la compresión.

3.3 Propiedades en estado endurecido

Principales características del concreto permeable en su estado endurecido:

- Resistencia
 - Resistencia a la compresión
 - Resistencia a la flexión
- Módulo de elasticidad
- Contracción

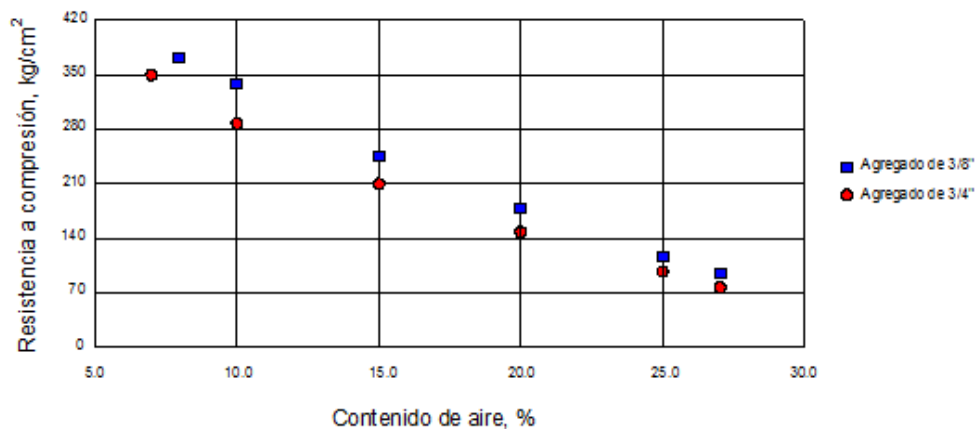
² Concreto permeable, *Op. cit.*, p. 12.

- Permeabilidad

3.3.1 Resistencia a la compresión

La máxima resistencia medida de un espécimen de concreto o mortero a carga axial se le conoce como resistencia a la compresión y se determina de acuerdo a la norma ASTM C 39 y se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm^2) a una edad de 28 días y se identifica con la siguiente nomenclatura ($f'c$). Ahora bien, para determinar la resistencia a la compresión, se realizan pruebas de especímenes, mortero y/o de concreto.

La resistencia del concreto a la compresión es una propiedad física fundamental, y frecuentemente encontramos su empleo en los cálculos para el diseño de puentes, edificios y otras estructuras. La resistencia a la compresión de este tipo de concreto está determinada por la resistencia, cuando se ve afectada por la proporción de la matriz y por el esfuerzo de la compactación durante la colocación, para esto Meininger ilustra la relación entre la resistencia a compresión del concreto permeable y el contenido de los vacíos.



Gráfica 3.3. Relación entre la resistencia a compresión a 28 días y el contenido de aire para agregado de 3/8" y 3/4"³

En cuanto a las propiedades de la pasta y de la relación pasta-agregado, es necesario mejorar la resistencia de la pasta alrededor del agregado y la cohesión entre agregado y la pasta, de esta manera mejorará la resistencia del concreto permeable, esta condición se puede lograr variando el tamaño de los agregados u ocupación de aditivos.

³ *Idem.*, p.11.

Por otra parte, la relación agua-cemento de la mezcla de concreto permeable es vital para el desarrollo y la sustentabilidad de la resistencia a la compresión y la consolidación de la estructura de huecos, la relación entre agua-cemento y la resistencia a la compresión del concreto convencional no es significativa. Así mismo, es necesario considerar que entre más alta sea la relación agua-cemento, está puede dar como resultado una adherencia reducida entre las partículas del agregado y puede presentar problemas durante su colocación. Para tal caso es necesario considerar los estudios realizados al respecto en la relación agua-cemento en los cuales se ha mostrado que dicha relación debe oscilar entre los 0.26 a 0.45 proporcionando un buen recubrimiento del agregado y estabilidad de la pasta.

El contenido de material cementante de una mezcla de concreto permeable es importante para el desarrollo de la resistencia a la compresión y estructura de huecos. Si en una mezcla de concreto permeable se presenta un alto contenido de pasta dará como resultado una estructura de porosidad baja. Un contenido de material cementante bajo dará como resultado una capa endurecida de pasta envolviendo al agregado y resistencia a la compresión reducida. El contenido óptimo de cementante depende del tamaño y granulometría del agregado.

Las mezclas de concreto permeable ofrecen una resistencia a la compresión entre 35 a 280 kg/cm^2 , ofreciendo una amplia gama de usos. En la práctica los valores más utilizados rondan alrededor de los 17 kg/cm^2 , esto debido a las características y combinaciones de materiales utilizados, así como las técnicas de colocación y condiciones ambientales.

3.3.2 Resistencia a la flexión

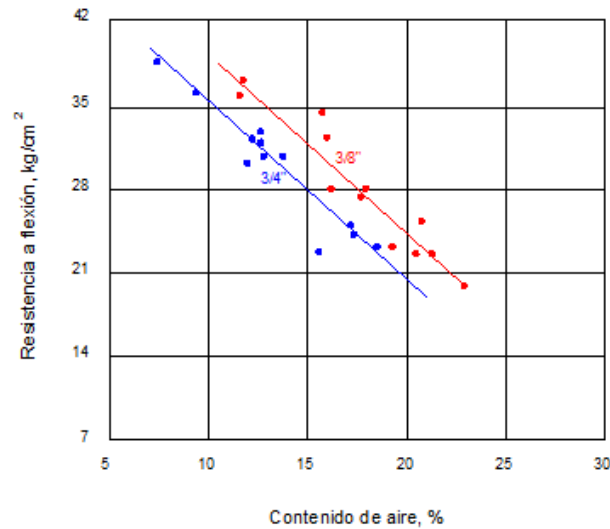
La medida de resistencia a la tracción del concreto, se define como resistencia a la flexión del concreto en donde su función principal radica en medir la resistencia de la falla en una viga o losa de concreto no reforzada y se expresa como el modulo de rotura en kg/cm^2 , se determina mediante los métodos de ensayo ASTM C 78 o ASTM C 293.

El modulo de rotura oscila en los parámetros de 10% al 20% de la resistencia a la compresión, dependiendo del tipo, dimensiones y volumen del agregado grueso utilizado,

sin embargo, la mejor correlación para los materiales específicos es obtenida mediante ensayos de laboratorio para los materiales obtenidos y el diseño de mezclas. El módulo de rotura determinado por la viga cargada en los puntos tercios es más bajo que el módulo de rotura determinado por la viga cargada en el punto medio, en algunas ocasiones tanto como en un 15%.

La resistencia a la flexión es una de las características técnicas más importantes que presenta el concreto permeable, debido a que su resistencia a la flexión es mejor que la del concreto hidráulico ordinario, comúnmente es 30% de la resistencia a la compresión, relativamente más alta que en el concreto ordinario.

En la siguiente gráfica 3.4 se muestra la relación que existe entre la resistencia a la flexión del concreto permeable y el contenido de huecos de aire.

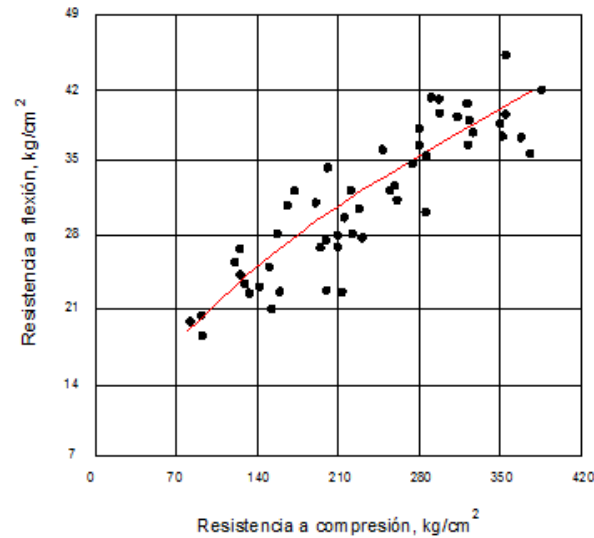


Gráfica 3.4. Relación entre la resistencia a flexión y el contenido de aire con agregados de 3/8" y 3/4" ⁴

La resistencia a la flexión en el concreto permeable generalmente varía entre 10 a 38 kg/cm², dependiendo de múltiples factores, destacando el grado de compactación, porosidad, relación agregado-cemento y relación agua-cemento. Sin embargo el uso de esta propiedad no es importante para el diseño de mezclas de concreto permeable.

⁴ *Idem.*, p. 12

La gráfica 3.5 ilustra la relación que se presenta entre las resistencias a la compresión y a flexión del concreto permeable para una serie de pruebas de laboratorio



Gráfica 3.5. Relación entre la resistencia a flexión y la resistencia a compresión para el concreto permeable⁵

3.3.3 Capacidad de filtración o permeabilidad

La permeabilidad es la capacidad de un material para que un fluido atraviese por él, sin alterar su estructura interna.

La capacidad que presenta un material es cuando un fluido lo atraviesa, se conoce como capacidad de filtración o porosidad, sin embargo es necesario resaltar que al realizar el proceso de filtración la estructura interna del material no se altera y permanece sin ningún cambio en su estructura original. La velocidad con la que el fluido atraviesa el material depende de tres factores básicamente:

1. porosidad del material
2. densidad del fluido considerado, afectada por su temperatura
3. presión a que está sometido el fluido

Para que un material sea poroso debe contener espacios vacíos o poros que permitan la absorción del fluido, a su vez, tales espacios deben estar interconectados para que el fluido disponga de caminos para pasar a través del material.

⁵ *Idem.*, p. 13



Figura 17. Capacidad de filtración del concreto permeable

Una de las características más importantes del concreto permeable es su capacidad para filtrar el agua a través de su estructura. La capacidad de filtración del concreto permeable está relacionada directamente con el contenido de huecos de aire. Estudios y pruebas han demostrado que se requiere un contenido mínimo de huecos de aire de aproximadamente 15% para lograr una filtración significativa. Puesto que la capacidad de filtración se incrementa a medida que se incrementa el contenido de huecos de aire, consecuentemente, disminuye la resistencia a la compresión, por lo que el proporcionamiento de la mezcla debe satisfacer un equilibrio entre una capacidad de filtración y resistencia a la compresión aceptable.

La permeabilidad del concreto poroso, se puede medir a través de permeámetros de carga variable, el procedimiento más común consisten en obtener la permeabilidad por medio de permeámetros LCS [Leachete Collection System]¹, primeramente se mide el tiempo que tarda en descender el nivel de agua entre dos marcas, fluyendo el agua a través de un pequeño orificio. Por su parte el permeámetro LCS obtiene los resultados óptimos de permeabilidad los cuales son comparados contra distintos estados de permeabilidad de un pavimento. En cuanto al permeámetro cabe destacar que no necesita ningún tipo de calibración previa, pues cuenta con las marcas necesarias para realizar la correspondiente medición del tiempo que tarda en infiltrarse el volumen de agua contenido entre ellas. La permeabilidad de las mezclas se considera escasa o deficiente cuando el tiempo medido está por encima de los 200 segundos y satisfactoria cuando es menor de 100 segundos. El resultado para una mezcla bituminosa porosa recién colocada debe ser inferior a 50 segundos, debiendo estas preferiblemente por debajo de los parámetros 25 a 35 segundos.

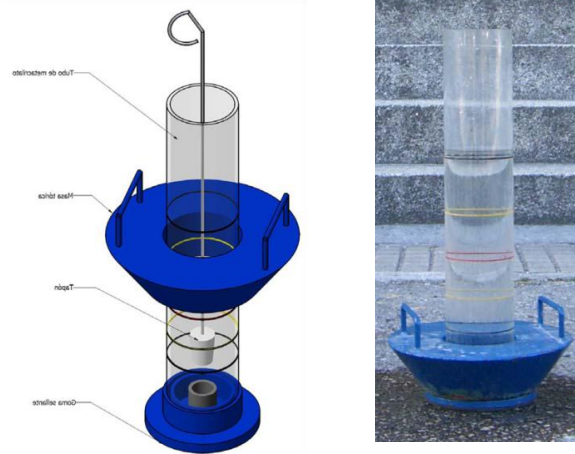
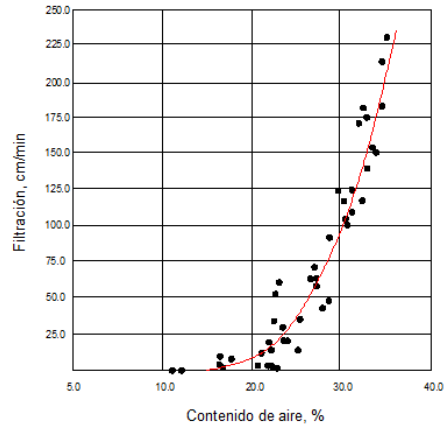


Figura 18.

Permeámetro LCS para efectuar medidas en capas drenantes. Está formado por un tubo transparente cilíndrico de 94 mm., con dos señales de medida separadas entre sí 250 mm, unido a una base de acero que dispone en su centro un orificio de 30 mm.

En la práctica cotidiana se ha observado que las mediciones no son sensibles al estado del pavimento después de la limpieza, pudiendo los efectos parecer muy pequeños, nulos o negativos, por lo que se ha desarrollado varios tipos de sistemas de medición, entre estos encontramos el permeámetro Zarauz, cuya funcionalidad radica principalmente en dejar caer el agua directamente hacia el pavimento desde una cierta altura, filtrándose libremente sobre este. Algunas de las ventajas que encontramos con este método, es que permite tomar dos tipos de medida; por una parte tiempo total de desaparición del agua de la superficie y por la otra, la máxima distancia recorrida por el agua antes de su penetración.

De esta manera podemos decir que los intervalos para el flujo del agua a través del concreto y que más típicamente se encuentran están en el parámetro 0.2 a 0.54 cm/s , para ello la siguiente gráfica 3.5 muestra la relación existente entre la filtración y el contenido de vacíos.



Gráfica 3.6. Relación entre la resistencia a flexión el contenido de aire con agregados de 3/8" y 3/4"⁶

3.3.4 Cambio de volumen o contracción

Al fenómeno que se presenta cuando el concreto pierde agua se le conoce como cambio de volumen o contracción; en términos generales la contracción en el concreto se presenta como una deformación tridimensional, comúnmente se expresa como una deformación lineal, de esta manera la contracción que se presenta dentro del concreto es ocasionado debido a las reacciones químicas de los ingredientes que conforman el concreto, pudiendo ocasionar alabeo y contracción durante la etapa de endurecimiento, así como la aparición de grietas.

Para evitar una mayor contracción en la estructura del concreto, comúnmente se agrega agua, de tal forma que la hidratación del cemento obtenga su consistencia optima. El agua libre o excedente, se evapora en poco tiempo, así la velocidad o terminado de secado depende principalmente de la humedad contenida, temperatura ambiental y de la forma y posición donde fue colocado el concreto.

La disminución en el volumen del concreto, se presenta por la pérdida de agua, ocurriendo este cambio con mayor velocidad al principio de su colocación, que al final; con esto, asintóticamente se alcanzan las dimensiones límite.

⁶ *Idem.*, p. 13.

A diferencia del concreto convencional, la contracción en el concreto permeable ocurre con mayor velocidad, sin embargo es mucho menor que la del concreto convencional,

El tiempo de pérdida de una mezcla de concreto permeable dependerá de los materiales utilizados, los valores se deberán encontrar dentro del orden de 0.002, esto según estudios realizados en campo, lo que representa la mitad de contracción que hay en concretos convencionales, esto debido al cementante y agregado. Por otra parte, la contracción y aspereza superficial ocurre en el orden de 50% a 80% durante los primeros 10 días, comparados con el 20% al 30% del mismo período para el concreto convencional. Gracias a esta contracción baja y textura superficial, la mayoría de los concretos permeables se realizan sin juntas constructivas, permitiendo agrietamientos aleatorios.

3.3.5 Absorción acústica

Es una propiedad que presentan ciertos materiales y cuya función principal es absorber energía acústica al disminuir la reflexión de las ondas incidentes; ejemplo de esto tenemos los materiales porosos, ahora bien, la capacidad de aislamiento acústico de un determinado elemento constructivo, fabricado con uno o más materiales, es su capacidad de atenuar el sonido que lo atraviesa. La atenuación o pérdida de transmisión sonora de un determinado material se define como la diferencia entre la potencia acústica incidente y el nivel de potencia acústica que atraviesa el material, así, los materiales más eficientes para aislar sonido, son aquellos que tiene una gran cantidad de poros.

La presencia de múltiples poros interconectados entre si de tamaño considerable dentro del material, hacen que el concreto permeable sea altamente efectivo como material aislante del sonido, por lo que se utiliza como medio para reducir el ruido generado por la interacción de las llantas y el pavimento de concreto, ayudando a minimizar el bombeo del aire entre la superficie de la llanta y la superficie de rodamiento. Situación posible gracias a la absorción del sonido a través de la fricción interna entre las moléculas de aire en movimiento y las paredes de los poros.

El coeficiente de absorción representado por α , como una medida de la capacidad de un material para absorber sonido, de esta manera un coeficiente de absorción de 1.0, representa un material puramente absorbente, por el contrario un material con coeficiente de absorción 0 indicara que el material es completamente reflexivo. En la práctica en concreto convencional, típicamente tiene un coeficiente de absorción de 0.3 a 0.5⁷. Por otra parte el concreto permeable presenta un rango de absorción de 0.1, esto para desempeños de pobres, hasta casi 1.0, para mezclas de un volumen de poros y tamaños óptimos. De esta manera el coeficiente de absorción de esta función de la frecuencia de las ondas de sonido que golpean con fuerza y en consecuencia es importante seleccionar un grosor apropiado del concreto permeable a fin de reducir los sonidos de la frecuencia deseada, en este caso lo recomendable para el oído humano es de 800 a 1200 Hz.

3.3.6 Durabilidad

Es la capacidad de resistencia a la intemperie, a la congelación y descongelación, a la acción de agentes químicos al desgaste, sin la alteración de sus propiedades mecánicas. Al igual que en el concreto convencional, la durabilidad del concreto permeable se refiere a la vida de servicio bajo las condiciones ambientales dadas. Los efectos físicos que influyen desfavorablemente en la durabilidad del concreto son la exposición a sulfatos y ácidos, que dañan tanto la estructura interna como la superficie del concreto poroso, sin embargo no se han llevado a cabo estudios sobre la resistencia del concreto permeable bajo el ataque agresivo por agua conteniendo sulfatos o ácidos, ni bajo condiciones de congelación y deshielo.

3.3.6.1 Resistencia a la congelación-deshielo

El concreto permeable debe tener una buena durabilidad para resistir condiciones ambientales de exposición anticipadas. Aun cuando las condiciones climáticas en nuestro país no son propicias a cambios climáticos extremos, es necesario considerar que durante su diseño el concreto permeable, fue sometido a pruebas estrictas de rendimiento sobre todo para la resistencia de climas invernales, pues bajo estos climas el concreto permeable está

⁷ *Ibidem.*, pág. 15.

expuesto a fuertes condiciones de congelación deshielo, lo cual hace que la estructura del concreto poroso se llene agua y su durabilidad sea escasa⁸.

El intemperismo a la congelación y deshielo es mucho más destructivo cuando el concreto se encuentra húmedo, principalmente en la presencia de descongelación. El deterioro es causado por la congelación del agua y su posterior expansión en la estructura interna del concreto.

La durabilidad y resistencia a la congelación y deshielo del concreto permeable una vez instalado depende del nivel de saturación de los vacíos dentro de la estructura interna del concreto en épocas del año de clima frío. En la práctica, es recomendable un rápido drenado del concreto permeable, para evitar una saturación y es de vital importancia mencionar que pocos concretos permeables han sido construidos en zonas frías, los cuales han estado en servicio por más de 10 años.

Durante el proceso de congelación del agua ocurre una expansión de volumen de la misma, aproximadamente del 9%, trayendo como consecuencia la expansión de los cristales de hielo, acarreado como principal consecuencia el desplazamiento del agua. Lo ideal sería contener poca agua, para no desarrollar presión hidrostática, sin embargo, si los poros de la estructura interna del concreto se saturan cuando inicia la congelación, entonces se acumula una presión hidrostática a medida que avanza la congelación.



Figura 19. Funcionamiento del concreto permeable en un estacionamiento bajo condiciones de congelación y deshielo

Conforme a la norma ASTM C 666, una porción de concreto permeable sin aire incluido completamente saturado tuvo una pobre resistencia a la congelación y deshielo, aunque esta norma no es recomendable para evaluar la resistencia a la congelación y deshielo del concreto permeable, ya que no simula el desempeño en campo. Actualmente, no existe método alguno para evaluar la resistencia a la

⁸ [NORMCA 204]

congelación y deshielo del concreto permeable, por lo que uno de los factores más importantes es la capacidad para drenar cualquier cantidad de agua que entra en la estructura del concreto permeable en condiciones de clima anticipadas a la congelación y deshielo.

Para mejorar la resistencia del concreto permeable bajo condiciones de congelación y deshielo, es recomendable:

- Incorporar un aditivo inclusor de aire en la mezcla de concreto permeable.
- Colocar un tubo de PVC en la base del agregado para capturar toda el agua y permitir que drene hacia fuera por debajo del pavimento.
- Utilizar una capa de 20 a 60 *cm.* de grueso de una base de agregado sin finos debajo del concreto permeable.

La utilización del concreto permeable no es recomendable en ambientes de congelación y deshielo donde el nivel freático se encuentre a un nivel menor de 90 *cm.* de la capa subrasante. Si el concreto permeable se encuentra parcialmente saturado debe tener suficientes huecos para el desplazamiento del agua, y así obtener una buena resistencia a la congelación y deshielo.

3.3.6.2 Resistencia a la abrasión

Todos los pavimentos o superficies de rodamiento están expuestos a un alto desgaste, en cuanto al concreto permeable podemos decir que este debe tener dentro de sus propiedades una alta resistencia a la abrasión, pues se ha observado que tal resistencia está relacionada directamente con la resistencia a compresión del concreto, de esta manera, un concreto con mayor resistencia a la compresión presenta una mayor resistencia a la abrasión, que un concreto con menor resistencia a la compresión.

Como ya se ha mencionado anteriormente la resistencia a la compresión depende de la relación agua-cemento y del curado, para un buen desempeño es necesaria una baja relación agua-cemento y un buen método de curado, logrando una optima resistencia a la abrasión. Otros factores que afectan esta resistencia son los agregados incluidos en la mezcla y el

acabado de la superficie o el tratamiento utilizado. Un agregado duro es más resistente a la abrasión que un agregado más blando, mientras que por otro lado una superficie terminada con llama de metal resistirá mejor el desgaste que las superficies que aun no han recibido este terminado.

La aspereza de la superficie y estructura abierta del concreto permeable, resulta un problema de abrasión y desintegración de las partículas de los agregados sobre todo en localidades donde el uso de quitanieves es constante para la limpieza de pavimentos cubiertos por nieve. Por medio de la utilización de pavimentos de concreto permeable se ha observado que permiten un deshielo en menor tiempo.

La mayoría de los pavimentos de concreto permeable tendrán menor cantidad de agregados sobre la superficie a las pocas semanas de haber puesto en servicio la superficie al tránsito urbano. Estas partículas son inicialmente desprendidas de la superficie y son removidas fuera del área del concreto permeable, para que en pocas semanas se obtenga una superficie más estable. Una compactación y un curado adecuado logran reducir la ocurrencia de la desintegración de la superficie.

3.3.6.3 Resistencia a los sulfatos

Una de las sustancias químicas que más afecta a los concretos son los sulfatos, generando una destrucción del concreto permeable o convencional que no fue diseñado adecuadamente. Los sulfatos atacan al concreto reaccionando con los compuestos hidratados en la pasta de cemento, estas reacciones pueden llegar a crear suficiente presión para romper la pasta de cemento, resultando en la desintegración del concreto.

Los agentes agresivos químicos en el suelo o en el agua, como son ácidos, como ya mencione anteriormente los sulfatos, son una preocupación para el concreto convencional e igual para el concreto permeable, pues los mecanismos de ataque son similares. El concreto permeable puede ser usado en áreas de alto contenido de sulfatos y agua contaminada siempre y cuando el concreto esté aislado de estos.

La colocación de concreto permeable sobre una capa de 15 *cm.* con tamaño máximo de agregado de 25 *mm.* proporciona una base para el pavimento, almacenamiento de las aguas de lluvia, y aislamiento para el concreto permeable.

CAPITULO IV
COLOCACION Y CONSTRUCCIÓN DEL
CONCRETO PERMEABLE

4.1 Generalidades

El concreto permeable es un material nuevo dentro de la industria de la construcción y uno de los principales usos que se le ha dado es el de pavimento, pues la forma de su estructura permite la infiltración del agua a través del pavimento, con el fin de permitir la infiltración del agua a través de la superficie y almacenamiento temporal de esta en la sub-base o subrasante, para su posterior infiltración en el terreno. Como pavimento el concreto permeable se aplica principalmente en áreas de estacionamiento y calles con tránsito ligero, con el objetivo de disminuir escurrimientos superficiales provenientes de lluvia. La siguiente gráfica ilustra las diferentes capas que componen al pavimento permeable.¹

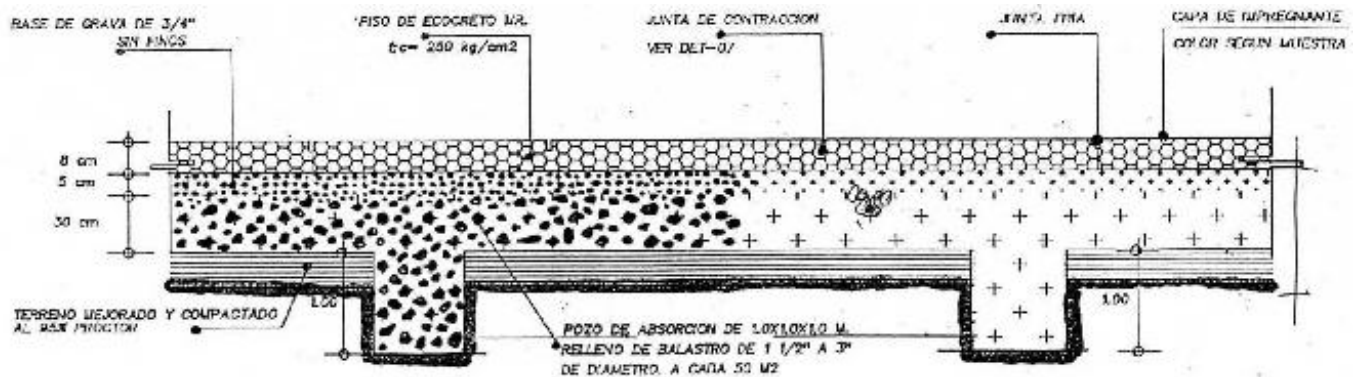


Figura 20. Estructura de un pavimento permeable

Al contar con un mínimo o nulo porcentaje de agregado fino se obtiene la capacidad de porosidad del concreto permeable, mientras que el agregado grueso cumple la función de proveer una superficie lisa en el pavimento. Por otra parte el contenido de cemento en los pavimentos de concreto permeable es mucho mayor que el contenido en los concretos convencionales, esto atribuido a las cargas vehiculares que transitan sobre él, este contenido adicional proporciona una mayor resistencia siendo capaz de unir las partículas de agregado grueso con respecto a los vacíos de la estructura del pavimento.

El procedimiento constructivo del concreto permeable varía un poco al del concreto convencional, principalmente por que se utiliza un método de compactación especial, pues se prevé el deterioro de la permeabilidad del suelo natural durante la construcción.

¹ Concretos permeables y ecológicos, *Op. Cit.*, p. 9.

Al utilizar pavimentos de concreto permeable se obtiene como ventaja una reducción de flujo superficial proveniente de lluvias torrenciales mediante la infiltración, al evitar que la zona pavimentada sea totalmente impermeable, dando como resultado una captación del agua 3 veces mayor a la superficie del concreto permeable y de este modo minimizar la colmatación del pavimento pudiendo ser ocasionado por los sedimentos arrastrados por el escurrimiento, que disminuye la porosidad y por consiguiente la infiltración.

La utilización del concreto permeable no es recomendable en zonas y áreas con suelos impermeables, regiones climáticas con ciclos permanentes hielo-deshielo, regiones áridas o con un alto contenido de erosión eólica, zonas de alto tráfico, o donde existan posibilidades de colmatación.

4.2 Colocación y construcción del concreto permeable

La construcción del concreto permeable debe realizarse de acuerdo con los planos y especificaciones del proyecto para proveer un pavimento que satisfaga las necesidades de los usuarios y/o los reglamentos locales. La construcción inicia con una cuidadosa planeación, donde se debe determinar la secuencia del desarrollo del proyecto, fechas de entrega de superficies pavimentadas, equipo óptimo para el tamaño del proyecto, pruebas y supervisión.



Figura 21. Colocación de concreto permeable en camellones de la ciudad de México

Los pavimentos permeables se construyen siguiendo un procedimiento diferente al de los pisos tradicionales, ya que se construyen con bases de agregados pétreos los cuales deberán estar confinados, estas bases deberán estar libres de materiales finos como la arena, ya que

estos serían disueltos y arrastrados por el agua dando lugar, después de cierto tiempo, a la formación de “baches”. “A continuación se presenta el procedimiento constructivo general para la instalación del concreto permeable

1. Abrir cajas con la profundidad requerida, según el proyecto a realizar.
2. Compactación del terreno natural por medios mecánicos.
3. Abrir pozos de absorción según el proyecto a realizar.
4. Relleno con balastro, el cual será aplicado en los pozos y en toda el área.
5. Compactación del relleno por medios mecánicos.
6. Relleno con grava de $\frac{3}{4}$ ”²

Al término de la construcción de la base, se cuela el pavimento permeable, cuyo espesor final varía de acuerdo al proyecto, debido al proceso de vibro-compactación realizado durante su colocación.

Cabe aclarar que hay lugares en los cuales es posible colar los pavimentos permeables directamente sobre el terreno natural, es decir, sin necesidad de la construcción de bases, tal es el caso de los terrenos rocosos y los cercanos al mar. Los terrenos rocosos tienen un alto valor relativo de soporte y normalmente presentan grietas por las cuales se podrá filtrar el agua. Por ser superficies irregulares en estos casos se recomienda colocar un relleno de grava sólo para nivelar la superficie para el colado. En el caso de los terrenos junto al mar, la arena que los caracteriza no es soluble al agua y tiene un alto valor de soporte, por lo cual se pueden colar los pavimentos permeables directamente sobre ellos. En todos los casos será necesario confinar las áreas sobre las cuales se realizarán los colados, aclarando que las guarniciones servirán para este propósito.

Los pozos construidos dependerán de la permeabilidad del subsuelo, no es importante su forma, lo que realmente interesa es que funcionen mejor mientras más profundos, siempre tomando en cuenta que el propósito de los pozos es el de crear cargas hidrostáticas más altas.

² Concretos permeables y ecológicos, *Op.cit.* p. 8



Figura 22. Pozo de absorción



Figura 23. Pozo de absorción relleno con boleos

4.2.1 Equipo y herramienta

El equipo a utilizar dependerá del tamaño, volúmenes de obra y características específicas del proyecto. De alguna manera influye también la disponibilidad que tengan los contratistas locales. A continuación se mencionan los equipos a utilizar en cada etapa constructiva del concreto permeable.³

Remoción y despeje de caja en el área de trabajo

En obras urbanas es frecuente tener que remover fragmentos de cimentaciones antiguas, brocales de pozos de visita, camellones, guarniciones, entre otras instalaciones urbanas. En caso de que el tramo sea virgen, será necesario retirar fragmentos de roca, raíces de árboles de gran tamaño, si es que existen. En caso de presentarse demoliciones, será necesario contar con equipo que funcione con aire comprimido: compresores, perforadoras manuales, rompedoras de losas de concreto y pavimentos asfálticos. Como equipo de carga, remoción y de maniobra resulta conveniente el empleo del cargador frontal.

Escarificación

Para estas actividades se emplean motoniveladoras para suelos equipadas con barra escarificadora, normalmente de 11 dientes. Cuando se tenga que remover roca, se aconseja el empleo de arados, para no dañar las hojas de las motoniveladoras.

³ Salazar Rodríguez, Aurelio, *Op.cit.*, p. 21-22.

Extracción

Esta parte de la preparación de la superficie se puede realizar mediante cargadores frontales, buldócer o motoniveladoras. Cuando los volúmenes por tratar son pequeños, se pueden emplear tractores agrícolas complementados con cargador frontal.

Transporte

La movilización de suelo recortado, o bien los volúmenes hacia el sitio de trabajo, por ejemplo de rellenos de importación de bancos, se podrá realizar mediante camiones de volteo. En obras pequeñas es conveniente contar con un tractor para mover equipo menor, materiales, moldes y equipos dentro del área de trabajo.

Mezclado, homogeneización y distribución

Normalmente, se utilizan motoniveladoras para realizar el mezclado y la uniformización, incluido el extendido de materiales en las cajas ya preparadas. En ocasiones, y dependiendo de si se utilizan sustancias estabilizadoras, podrán emplearse equipos especiales, como los tractores con rastras agrícolas, para preparar el mezclado en el sitio.

Equipo de riego

Es frecuente el empleo de pipas o contenedores montados en camiones y provistos de dispositivos y bombas especiales para distribuir en forma controlada y homogénea el agua a todo lo ancho del camino.

Compactación

El equipo de compactación se escogerá en función de los tipos de suelos por compactar y de las exigencias del proyecto. Los requisitos básicos adicionales que los equipos de compactación deben cumplir son los siguientes:

- Los compactadores vibratorios deberán contar con mecanismos que le permitan controlar las velocidades.
- En caso de que se utilicen equipos con llantas neumáticas, estos podrán ser lastrados. Si son de remolque, los tractores deberán contar con llantas neumáticas.

- Los equipos vibratorios pesados (5 ton) pueden ser empleados en la gran mayoría de los casos. También los “patas de cabra” con forma trapezoidales o modificados podrán ser utilizados.
- De preferencia las frecuencias y amplitudes de los rodillos vibratorios deberán ser regulables. La frecuencia de este equipo va normalmente de 1,500 a 2,500 *ciclos/minuto*. En suelos granulares se recomiendan amplitudes bajas combinadas con frecuencias altas. En los suelos plásticos es exactamente al revés.
- En trabajos pequeños es recomendable contar con un rodillo vibratorio de doble tambor, con un peso estático de 1 *ton.* o mayor.
- En el caso específico del concreto permeable se requiere un equipo especial para la compactación.



Figura 24. Uso de auto-hormigoneras para la mezcla

La preparación de la mezcla puede hacerse en obra, mediante el uso de trompos o de máquinas revolvedoras o también puede hacerse en una planta de premezclado. El uso de trompos y de auto-hormigoneras es recomendable cuando se requiera que la apariencia del pavimento sea excelente, ya que normalmente las empresas que ofrecen el servicio de premezclado no pueden

garantizar la perfección de la mezcla. La herramienta básica para la construcción de estos pisos y pavimentos consiste en palas, rastrillos, reglas para nivelar, además de pisones de mano y cucharas o llanas para detallar.

4.2.2 Preparación y disposición de la capa subrasante

Para iniciar la construcción de la capa subrasante deberá muestrearse el suelo encontrado en el lugar del proyecto, someterse a pruebas de permeabilidad y capacidad de carga. Si existe un porcentaje predominante de arena es posible que las condiciones de graduación no favorezcan a la permeabilidad.

La uniformidad y apoyo de la subrasante, es un criterio clave para la colocación del concreto permeable, al igual que en otros pavimentos los surcos generados por el paso de camiones y otras irregularidades deben ser reparados y compactados antes de la colocación. Es necesario tomar en cuenta el diseño hidrológico y estructural, debido a que la preparación de la capa subrasante es un componente crítico del comportamiento del pavimento de concreto permeable,

Ya que la uniformidad del soporte de la subrasante es esencial en la función del pavimento, esta debe estar garantizada tanto para condiciones secas como húmedas. Una adecuada construcción del pavimento de concreto permeable facilita estos requerimientos, específicamente cuando estén expuestos al agua de lluvia. Lo que podría provocar la ocurrencia de pérdidas en el soporte de la subrasante en suelos arenosos, sin embargo los problemas que se pueden presentar en el soporte de la subrasante es variable y pueden resultar por la presencia de limos y arcillas, los cuales son altamente compresibles, tiene poca cohesión o se expanden en condiciones húmedas. Estas condiciones pueden ser analizadas individualmente para obtener los valores de soporte y ser modificados, reemplazados o bien colocar un material permeable adicional de menos de 15 *cm* encima de un suelo inadecuado. El uso de pavimentos permeables es una opción donde se encuentren suelos arcillosos o capas impermeables.

La compactación de la subrasante dependerá del tipo de suelo, esta deberá compactarse entre el 90% y 95% de la densidad determinada por la norma AASHTO T 180, en caso de aumentar la densidad de la subrasante disminuirá la permeabilidad de la misma.

El pavimento de concreto permeable tiene una humedad mínima libre y si la subrasante está en condiciones secas, el tiempo de colocación se acelerará generando una reducción en 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 convencional.

Debido a que es de vital importancia la capa subrasante, es esencial tener una buena preparación al nivel correcto para la construcción de un pavimento de calidad. Es recomendable que los primeros 150 *mm* de la parte superior de subrasante estén compuestos de material granular con abundante contenido de grava y una cantidad moderada de finos, menos del 10%.

La subrasante no debe encontrarse irregular, lodosa, saturada o congelada al iniciar su colocación. Antes de la colocación del concreto permeable, la subrasante debe ser humedecida. Al proporcionar una subrasante con una alta humedad dará como resultado una reducción en la resistencia del pavimento y puede conducir a una falla prematura del pavimento.

Para asegurar una compactación uniforme, debe “rastrillarse” y recompactarse las deformaciones causadas por las rodadas de los vehículos antes de las operaciones de colocación del concreto. Las propiedades del suelo de la subrasante requieren que se construya una capa adicional de agregados según el diseño de drenaje, ésta debe ser colocada sobre una subrasante preparada, compactada y nivelada a la elevación apropiada.

4.2.3 Mezclado

Debido a las características especiales del concreto permeable, se requiere un control de calidad estricto al momento de dosificar la mezcla. Particularmente el contenido de agua del concreto permeable está limitado a un pequeño rango para proporcionar la fuerza y permeabilidad adecuada, además de evitar la desintegración del cementante y los agregados y la pérdida de la estructura porosa. Un contenido limitado de cemento ocasiona que el agua y agregados tengan un impacto más drástico que lo experimentado en concretos convencionales. El grado de humedad en el agregado debe ser supervisado cuidadosamente, debido a que el agua es absorbida por el agregado y un exceso de humedad suministrado al agregado puede ser perjudicial.

Es recomendable que los contratistas y productores trabajen con el mismo criterio, para asegurar una mezcla apropiada antes de colocarla en el sitio de trabajo. Es común realizar

ajustes menores en la cantidad de agua, estos pueden ser realizados en el sitio de trabajo para alcanzar la consistencia apropiada, sin embargo, esta acción se debe realizar con sumo cuidado, porque las adiciones en el sitio de trabajo de agua pueden ser difíciles de controlar. La cantidad correcta de agua proveerá un brillo en la mezcla.

Las pruebas de peso de unidad son recomendables para verificar las proporciones correctas de la mezcla. Los pesos de unidad deben variar entre 1600 y 2000 kg/cm^3 y se requieren típicamente estos valores para estar dentro del rango de 5% del peso de unidad de diseño.

La proporción del agregado y del cemento se establecen experimentando con los materiales disponibles en el sitio de trabajo, pues las variaciones en características de materiales limitaran la utilidad de los diseños preceptivos de la mezcla.

4.2.4 Transporte

Debido a que el concreto permeable tiene un bajo contenido de agua, se requiere de un cuidado especial durante su transportación.

Para ello, es recomendable inspeccionar las aspas de los camiones revolvedores debido al gasto que sufren por el uso, además de que cada “olla” no debe tirar más de dos cargas antes de ser asignado a otro concreto. Las mezclas de concreto permeable tienden a

unirse fuertemente a las aspas por lo que es necesario que éstas se limpien adecuadamente y se inspeccionen, por otro lado las mezcla debe ser descargada completamente una hora después de que se haya agregado el agua a la mezcla. El uso de aditivos reductores de agua podrían extender el tiempo de colocación hasta una hora y media o más, provocando que el fraguado inicial de la mezcla sea más tardío cuando se manejen grandes tiempos en la colocación. Es de tomarse en cuenta las altas temperaturas ambientales y las condiciones de viento ya que afectaran la transportación y colocación de la mezcla.



Figura 25. Camión revoladora, especial para concreto permeable

4.2.5 Colocación

Existen una gran variedad de técnicas que pueden ser utilizadas para la construcción y colocación de pavimentos de concreto permeable, al igual que en el concreto convencional, la técnica de construcción depende principalmente del lugar donde será instalando el concreto poroso y los requerimientos específicos del proyecto. Es importante mencionar que las mezclas de concreto permeable no pueden ser bombeadas, por lo que es importante realizar una buena planeación para el acceso en el sitio de trabajo. Antes de la colocación, es necesario revisar la preparación de la subrasante y la forma; no deben existir irregularidades, desalineaciones o surcos, en caso de existir deben ser corregidos.

Una disposición bien planeada del proyecto puede facilitar las operaciones de construcción, permitir el uso eficiente de equipo de colocación, y proporcionar acceso para los camiones de entrega del concreto. El contratista y el diseñador deben de planear y estar de acuerdo sobre las disposiciones de las juntas y las técnicas de construcción antes de iniciar la construcción. Es recomendable tener un plano que muestre la localización de todas las juntas y la secuencia de colocación antes de empezar la construcción, además de establecer la localización de objetos fijos teniendo en mente el patrón de juntas y los métodos de construcción.

La colocación del concreto permeable debe ser completada tan rápidamente como sea posible. El tiempo en que se permita que el material fresco esté expuesto a los elementos es un tiempo en el que se está perdiendo el agua necesaria para el curado. El secado de la pasta de cemento puede llevar a una falla por desmoronamiento en los bordes de la superficie del pavimento. Las operaciones y equipos a utilizar deben estar planeados, diseñados y seleccionados teniendo en cuenta la colocación rápida y curado inmediato del pavimento.

Es necesario que la subrasante sea completada acorde a las especificaciones establecidas, antes de colocar la mezcla de concreto permeable, esto debido a que la subrasante debe tener el contenido de agua adecuado, ocasionando que esta capa absorba agua de la mezcla,

acelerando el fraguado y provocando una reducción en la resistencia del pavimento permeable.



Figura 26. Acomodo de la mezcla con rastrillos y palas

Previo a la colocación de la mezcla, es recomendable revisar tanto la cimbra como la nivelación que se encuentren colocadas e instaladas de manera correcta. Durante el proceso de descarga se debe realizar una inspección visual de la mezcla, para asegurar una relación *agua-cemento* optima, la cual debe tener un aspecto *metálico-brillante*, en caso de que el material presente grumos la mezcla será rechazada. En caso de continuar estos grumos

durante la colocación del material, será necesaria una revisión de humedad y del estado de las aspas de las ollas. La operación de descarga debe ser continua, además de depositar tan cerca de su nivel final como sea práctico. Esto comúnmente se logra por la descarga directa de la canaleta del camión mezclador directamente en la subrasante y el traspaleo debe de ser evitado.

Durante la colocación del concreto, al contener zonas dentro del proyecto donde no puedan alcanzarse con los mezcladores, es recomendable la utilización de bandas transportadoras, debido a que el revenimiento de las mezclas de concreto es cero, por lo que el bombeo no se recomienda. Al ser depositado en su sitio el concreto permeable su acomodo se realiza por medio de rastrillos o herramientas similares.

Para una correcta colocación, se debe tener precaución y supervisión en las siguientes actividades:

- Arrastrar o palear el concreto fresco a su posición final;
- El llenado de los huecos en el concreto;
- La contaminación del concreto permeable con material dañino;
- Caminar sobre el concreto permeable fresco.

4.2.6 Cimbras y equipo de enrasado

Las cimbras utilizadas en la construcción del concreto permeable pueden ser de madera, plástico, acero, o mixtas cumpliendo como requisito el mismo espesor del pavimento, deben ser suficientemente fuertes y estables para soportar el equipo mecánico. Para construcciones en las que el tiempo es determinante y el número de usos de una misma cimbra es considerable, es recomendable optar por un sistema de cimbra industrializado fabricado con materiales como aluminio, fibra de vidrio, entre otros materiales; aunque el costo inicial de adquisición sea mayor que el de la cimbra de madera.

La cimbra debe ser fuerte y rígida para garantizar el soporte adecuado del elemento que se construye y satisfaga las tolerancias dimensionales permitidas, para soportar el equipo de rodillo y enrasadores usados, debiendo utilizar suficientes estacas para resistir el movimiento lateral.

Por otra parte la cimbra debe ser lo suficientemente hermética para evitar escurrimientos, durante el proceso de vibrado y fraguado del concreto, así como la subrasante por debajo de la cimbra para compactarse de acuerdo con las recomendaciones del diseñador y nivelarlas correctamente. A su vez la cimbra debe ser fácilmente desmontable para no dañar el acabado especificado del concreto y permitir su reutilización el mayor número de veces posible.



Figura 27. La cimbra deberá tener el espesor del pavimento, además de ser lo suficientemente resistentes y estables



Figura 28. Cimbra de madera sujeta a base de clavijas

El método de enrasado a utilizar varía dependiendo del tamaño colocado. Para trabajos pequeños, tales como caminos particulares, o aéreas estrechas es aceptable el uso de reglas rectas manuales o “bailarinas”. Si se trata de trabajos más grandes, es recomendable el uso de una enrasadora vibratoria de marco con sección tipo “A”. Es de vital importancia enrasar el concreto lo más rápido posible, por lo que el trabajo manual no es recomendable si el tamaño de la obra es muy grande debido a la insuficiencia de velocidad en el trabajo.



Figura 28. Enrasado del concreto permeable mediante el uso de una enrasadora vibratoria de marco con sección tipo “A”

4.2.7 Compactación

El tiempo y cantidad de compactación en el funcionamiento del concreto permeable tiene efectos verdaderamente considerables. Un alto grado de compactación ofrecerá una resistencia mayor en el concreto, esto debido a la densificación del concreto y la eliminación de espacios vacíos internos de la mezcla, sin embargo estos espacios vacíos son necesarios para obtener la permeabilidad y permitir la filtración del agua. Una alta compactación traerá como resultado una baja considerable en la permeabilidad del concreto y por consiguiente una falla en el sistema del concreto permeable, como medio filtrante

Para la compactación de concretos permeables se han aplicado un sin fin de técnicas, principalmente se utilizan pisones manuales, bordes para facilitar la compactación a lo largo de las cimbras o rodillos de acero, con el objeto de crear una adherencia mayor en la pasta de cemento entre las partículas del agregado y para proveer un acabado regular en la superficie del concreto. “El rodillo debe tener un ancho adecuado para desplazarse sobre la cimbra y debe proporcionar una presión mínima vertical de 0.07 MPa . El rodillo normal del

tamaño necesario para cubrir una franja de 3.7 m y pesa aproximadamente de 270 a 320 kg⁴. En áreas estrechas puede utilizarse un rodillo para jardinería más pequeño o rodillos contruidos a pedido especial, este tipo de rodillos pesa aproximadamente de 90 a 140 kg, además de no ser recomendables para colados más grandes debido, al largo tiempo de compactación necesario, conduciendo a fallas por desmoronamiento en las orillas.



Figura 29. Compactación del concreto permeable por medio de un rodillo de acero

El procedimiento de compactación debe durar entre 15 y 20 minutos después de la vibración de impactos, esto debido a la estructura de la mezcla, esto generando una evaporación rápida del agua, produciendo el inicio del fraguado. Si el concreto ha fraguado, el rodillo no compactara al nivel deseado, además de causar agrietamiento superficial en el cementante e incrementar la posibilidad de aparición de futuras fallas. Una vez terminada la compactación del concreto no es recomendable pulir la superficie, pues se obstruirán los poros de la superficie disminuyendo la permeabilidad. En caso de existir algún defecto en el trabajo realizado, debe corregirse en forma manual.

En algunos casos se requiere de esfuerzos adicionales para asegurar un pavimento de calidad. En áreas donde el proyecto requiera un requisito especial, el pavimento debe ser compactado en cruz para emparejar cualesquiera desviaciones verticales en la elevación de la superficie. Junto a las aceras y bordes de pavimentos expuesto, el concreto debe ser acabado con la herramienta adecuada para proporcionar una esquina lisa y suave.

⁴ Concreto permeable, *Op. cit.*, pág. 24.

4.2.8 Juntas de construcción y acabados

Las juntas de construcción se forman generalmente, por circunstancias imprevistas o por necesidad del procedimiento constructivo, las primeras surgen cuando el elemento estructural no se cuela de manera monolítica y las segundas cuando el mismo proceso no permite colar los elementos de manera monolítica.

Las juntas de construcción se forman cuando se coloca concreto fresco, sin endurecer, sobre concreto ya endurecido sin la posibilidad de integrarlos por medio de vibración, debiendo tomar las medidas adecuadas para obtener la adherencia deseada. Esto se logra mediante la preparación de la superficie del concreto endurecido para recibir al nuevo concreto, se deben retirar los materiales sueltos, mal adheridos, lechada o mortero superficial, con el objeto de tener una superficie rugosa y sana. La limpieza del concreto ya endurecido se puede realizar por medio de agua o aire a presión, para retirar partículas finas.

La ubicación de estas juntas debe planearse antes de la colocación y hay que apegarse a estas ubicaciones tanto como sea posible. Generalmente, dichas juntas marcan la parte superior de un colado, el extremo de un monolito, o el final de un día de trabajo, siempre se debe procurar que estén apropiadamente localizadas, limpias y bien adheridas. Como gran desventaja de las juntas es que se tiene filtraciones y se degradan con el clima, se recomienda evitarlas tanto como sea posible.



Figura 30. Realización de una junta constructiva en el concreto permeable

Las juntas constructivas en el concreto permeable deben ser colocadas como una prevención al agrietamiento, éstas mismas difieren a las convencionales, debido a que el pavimento poroso tiene menos de un tercio de la retracción de un concreto convencional. Las juntas se deben colocar en un intervalo de 6 m, sin embargo pueden colocarse como máximo hasta 13.5 m, deben de tener una profundidad de $\frac{1}{3}$ a $\frac{1}{4}$ del espesor del pavimento, por lo que en este caso los equipos convencionales no son aplicables, obligando a utilizar un rodillo especial con una hoja filosa.

Las juntas longitudinales se colocan en el punto medio del ancho del carril, en caso de exceder los 4.50 m, estas juntas pueden ser construidas cuando el concreto se encuentra en estado fresco, con las herramientas adecuadas o con una sierra cortadora, después de que el concreto se haya endurecido (ver fig. 30), aunque al realizar el trabajo en estado fresco con las herramientas adecuadas produce un mejor resultado. Las herramientas para la construcción de juntas en concretos convencionales no sirven, orillando a utilizar rodillos especialmente diseñados con una hoja que sea $\frac{1}{4}$ del espesor de la losa y con el suficiente peso para forzar a que la hoja corte limpiamente la junta. En situaciones con carriles muy anchos, puede cortarse una junta longitudinal con el rodillo de compactación.

Si se utiliza la sierra para realizar el corte, el procedimiento debe iniciarse tan pronto como el pavimento se haya endurecido lo suficiente para evitar daño a la superficie, debe removerse el material de curado plástico del recubrimiento en el ancho suficiente para aserrar las áreas requeridas. En caso de utilizar sierras que no cuenten con sistemas de aspirado para recoger el polvo, las áreas expuestas deben ser lavadas con agua, para lograr una limpieza en los poros por los finos generados por el aserrado. Es importante recubrir inmediatamente el área expuesta con el material plástico de curado tan pronto como se hayan hecho los cortes con sierra.

Las juntas transversales de construcción sólo pueden ser instaladas, siempre y cuando se haya terminado el tramo de construcción, de otra manera el concreto será afectado y nunca empezara 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. La experiencia muestra que las juntas longitudinales son más susceptibles a desconche. Una compactación adicional en esta zona es necesaria para evitar la aparición de estas fallas.

Típicamente, los pavimentos de concreto permeable no tienen el mismo acabado que los pavimentos de concreto convencional. Normalmente las operaciones de sellado y pulido no se realizan, pues tienden a taponar la superficie porosa, dejando invalida la principal

función del concreto permeable. Para la mayoría de los concretos permeables instalados el último paso de su construcción es la compactación, dejando como ventaja una superficie con mayor rugosidad, ayudando a mejorar la tracción.

4.2.9 Curado

El objetivo del curado es el de facilitar el desarrollo de la hidratación del cemento, así como el de reducir los efectos nocivos de las contracciones producidas por las condiciones ambientales, tales como, temperatura, viento y humedad, las cuales promueve fisuramientos aleatorios.

Durante este proceso es de vital importancia controlar las temperaturas en las mezclas, así como la de tomar medidas que contrarresten los efectos del viento excesivo y humedad del aire, existe un sin fin de métodos para curar los pavimentos recién colocados, entre los que destacan, el método húmedo que consiste en esparcir o rociar agua, arpilleras húmedas o arena húmeda, y el método de membrana que a diferencia del método húmedo en este se aplican compuestos para el curado, tales como polietileno saturado.

Sin importar cual sea el tipo que se utilice, el primer requisito para llevar a cabo el curado es que se aplique con oportunidad. Siempre se busca que se pueda iniciar en las etapas más tempranas posibles de la colocación del concreto, y toda vez que no se dañe la superficie. Los compuestos químicos colocados por aspersion cumplen mejor con este propósito y deberán apearse a los lineamientos de calidad contenidos en las normas ASTM y AASHTO vigentes además de cumplir con los siguientes requisitos:

- Poder aplicarse inmediatamente después del allanado y terminado del concreto, aún en presencia de agua superficial.
- Tener un color blanco que refleje en alto porcentaje la luz solar.
- Presentar una viscosidad alta y secado al tacto en un lapso no mayor a 30 *minutos*.

La estructura y rugosidad de la superficie del concreto permeable hace que haya una mayor exposición de la superficie de cemento a la evaporación, es por esto que el procedimiento de curado es uno de los elementos fundamentales para obtener un pavimento con las

condiciones deseadas. El agua es necesaria para las reacciones químicas del cemento y esto es fundamental para el concreto permeable obteniendo un curado más rápido. Sin embargo, es común aplicar retardadores de agua antes de la compactación, con el fin de minimizar cualquier posibilidad de pérdida de agua en la superficie.

Debido al nulo sangrado del concreto permeable, tiene una alta propensión a la fisuración por retracción plástica. De hecho, el curado del pavimento de concreto permeable inicia antes de la colocación del concreto, pues la capa subrasante debe ser humedecida para prevenir la absorción de agua de la mezcla. Después de la colocación, el método recomendable de curado es el de cubrir las losas recién instaladas con plástico durante los próximos 7 días para mezclas de concreto simple y 10 días para mezclas de concreto que incorporan materiales cementantes suplementarios.

El material de recubrimiento debe ser de preferencia una hoja de polietileno claro de 0.15 *mm* de espesor o más grueso, en la dimensión suficiente para que pueda cubrir el ancho completo del carril a lo largo de una distancia razonable. Los materiales tejidos, tales como el yute telas geotextiles, no deben ser usados, ya que no retendrán la humedad en el concreto. Los compuestos de curado a base de cera no producen resultados aceptables. El recubrimiento con el polietileno debe de traslaparse en todas las superficies expuestas de modo que pueda quedar fijo en el lugar, el uso de arena o tierra para sostener las hojas de plástico en su lugar, no se recomiendan debido a la obstrucción de huecos que pudieran generar resultando del derramamiento en el retiro. En su lugar, se pueden utilizar estacas, pedazos de madera, barras de refuerzo u otros métodos. Todas las orillas del pavimento deben ser cubiertas apropiadamente. Si no se hace esto, puede dar como resultado desmoronamiento en los bordes expuestos.

El señalamiento en el piso debe pintarse hasta después de que haya terminado el periodo de curado. No debe permitirse el tránsito sobre el pavimento durante su curado. El constructor deberá tomar las precauciones necesarias para evitar daño en el pavimento como consecuencia o abuso de las operaciones de construcción, además de prohibir la remoción de material curado y evitar toda forma de tránsito sobre el pavimento de concreto

permeable. Adicionalmente, el contratista no debe permitir el almacenamiento de materiales de construcción ni para jardinería sobre la superficie del pavimento, ya que estos materiales pueden obstruir los poros o dañar de alguna otra manera los pavimentos permeables.

El curado debe iniciar tan pronto como sea posible después de la instalación, compactación y relleno. El mejor resultado se obtiene cuando el proceso de curado se inicia 20 *min.* después de todos estos procedimientos. Las altas temperaturas ambientales y condiciones del viento tendrán efectos más pronunciados en relación con los concretos convencionales y deben de ser tomados en cuenta.



Figura 31.



Figura 32.

Curado de concreto permeable por medio de polietileno

4.2.10 Condiciones especiales de curado y protección

Aunque los requerimientos de curado para el concreto colado en climas extremadamente cálidos o fríos son los mismos que para temperaturas normales, las técnicas utilizadas para lograr los curados se vuelven más complejas. Las técnicas de curado y protección para ambos tipos de climas extremos se deben planear con mucha anticipación.

Deben tomarse las medidas apropiadas en clima frío para proteger al concreto permeable contra congelamiento, al mismo tiempo que se mantiene la humedad por el tiempo necesario para lograr las propiedades físicas deseadas. Las láminas de curado son los suficientemente eficaces para servir a ambos propósitos.

En clima cálido, la transportación, la colocación y la compactación deben hacerse tan rápidamente como sea posible. Puede aplicarse un retardador de evaporación a la superficie del concreto después del proceso de enrasado para retardar la pérdida de humedad en una superficie. Después de la compactación y antes de la colocación de polietileno, la superficie puede ser rociada por medio de vapor o con un retardador de evaporación cuando la superficie parezca estar perdiendo su apariencia brillante.

4.3 Reparación de pavimentos de concreto permeable

Durante la etapa de construcción o puesta en servicio del pavimento de concreto permeable pueden ocurrir ciertas fallas estructurales, principalmente por un mal proceso constructivo o por la necesidad de alguna instalación de servicio, por lo cual es necesario reparar estas fallas para dar un buen servicio a los usuarios. En caso de la ocurrencia de un desbastado, los puntos altos pueden ser rebajados con un desbastador pesado. Sin embargo, éste cortará y expondrá el agregado en áreas desbastadas, cambiando la apariencia del pavimento.

Las depresiones pequeñas deben ser resanados con una mezcla epóxica conteniendo agregado. Para igualar la apariencia de la superficie del pavimento, el agregado debe ser recubierto de cemento mojado y curado antes del resane. Las depresiones grandes deben ser resanadas con un concreto permeable de las mismas proporciones de la mezcla utilizada. Al resanar existe una alta probabilidad que el color de resane no sea igual que el material original de la superficie. Es necesario la utilización de agentes epóxicos para asegurar la adherencia apropiada entre la superficie nueva y la anterior. Para igualar el color se pueden utilizar pinturas acrílicas en el área del resane con un éxito variable.

En el caso de que una sección de concreto permeable sea cortada, debe de llevarse a cabo la reparación a toda profundidad. Esto incluiría remover una sección cuadrada con el ancho de una franja colocada de tal modo que el material nuevo sea lo suficientemente grande para mantener su integridad estructural bajo carga.

4.4 Mantenimiento

La mayoría de los concretos permeables funcionan con un mantenimiento mínimo. Este mantenimiento principalmente consiste en tomar medidas de prevención para evitar el taponamiento de los poros, haciendo necesario preparar el sitio antes de la construcción y diseñar de una manera adecuada el drenaje circundante para impedir el flujo de materiales en superficies de pavimento. Sólidos, rocas, hojas caídas de árboles y otras partículas finas que se pueden infiltrar en los poros del concreto dificultan el flujo del agua a través del concreto, ocasionando una disminución en la utilidad del pavimento permeable, materiales como arenas y sólidos finos no deben encontrarse en contacto alguno con el concreto, ni siquiera temporalmente.

Los métodos de mantenimiento comúnmente mas aceptados, para la limpieza del concreto permeable son el lavado a presión y el uso de una aspiradora. El lavado a presión empuja con fuerza los contaminantes a través de la superficie del pavimento. Este sistema es efectivo, pero debe tenerse suma precaución de no usar demasiada presión, ya que esto dañara la porosidad del concreto permeable. Debe de lavarse a presión una sección pequeña de pavimento usando varias presiones de agua para determinar la presión apropiada para el pavimento dado. El uso de una aspiradora potente remueve los contaminantes, extrayéndolos de los huecos del pavimento. El sistema más efectivo, sin embargo, es el de combinar las dos técnicas y aspirar después el lavado a presión. Este tipo de operaciones se lleva a cabo con diferentes modelos de máquinas, centrándose en máquinas autopropulsadas con equipos de lavado y succión trasero con agua, de alta potencia y ancho de 2.5 mts. el agua utilizada para la limpieza, esta es recuperada y filtrada para continuar el proceso. Valores experimentales muestran que en algunos casos la pérdida de permeabilidad que se puede producir en el primer año es recuperable en un 50 % y que manteniendo la frecuencia anual, las pérdidas del segundo año se pueden recuperar en un 70 %.

En relación a la periodicidad con que debe realizarse la limpieza, es recomendable hacerlo una vez al año y después del periodo de lluvias, para encontrar un ablandamiento máximo de la suciedad y así alcanzar los mejores resultados con el menor esfuerzo. En la siguiente

tabla se muestra un esquema sugerido para el mantenimiento de superficies de pavimentos permeables.

<i>Actividad</i>	<i>Programa</i>
Asegúrese de que no haya tierra sobre el pavimento. Asegúrese de que el área esté limpia de sedimentos.	Mensualmente
Siembre vegetación en el área de aguas arriba. Limpie con aspiradora para mantener la superficie libre de sedimentos.	Cuando sea necesario
Inspeccione la superficie para localizar los deterioros o astillamientos.	Anualmente

Tabla 1. Actividades típicas de mantenimiento para concreto permeable

Las investigaciones realizadas por el *Florida Concrete & Products Association* cuantificaron el grado de infiltración de los contaminantes en los pavimentos de estacionamientos hechos de concreto permeables. La investigación consistió en examinar 5 estacionamientos como parte del estudio; los resultados fueron niveles bajos de infiltración de contaminantes, se encontró que la infiltración estaba dentro de un rango de 0.16 a 3.4 % del volumen total de huecos después de haber pasado 11 años de servicio. Además, al lavar la superficie con escoba, se restauró más del 50% de la permeabilidad del pavimento atascado.

4.5 Supervisión y pruebas de control de calidad

El concepto de supervisión como se utiliza en el campo de la construcción de concreto, incluye no solo observaciones y mediciones de campo sino también pruebas de laboratorio, con obtención y análisis de resultado.

Al igual que en cualquier material de ingeniería, es importante verificar la calidad de un pavimento de concreto permeable, es por esto que se realizan pruebas de la condición de la subrasante para asegurar el grado de compactación en valor de soporte y la permeabilidad adecuada. Por otra parte las pruebas de la mezcla deben ser realizadas con el objeto de asegurar la calidad tanto en estado fresco, como en estado endurecido, la verificación de todos estos parámetros se lleva a cabo por medio de pruebas de la ASTM y AASHTO las cuales son aplicables a la construcción de concreto permeable; sin embargo debido a las características físicas del material, no todas las pruebas del concreto simple son apropiadas para el concreto permeable.

4.5.1 Supervisión y pruebas previas a la construcción

La supervisión es sumamente importante previo a la construcción del concreto, es necesario verificar las condiciones de preparación de la subrasante, para tener la seguridad de una compactación y humedad apropiada. Por otro lado no se debe permitir la existencia de charcos de agua, pues estos incrementan la relación *agua-cemento* del concreto en contacto con la tierra. Se requiere que las cimbras sean herméticas, que estén alineadas, que tengan un agente de descimbrado, y que exista limpieza, tanto para lograr superficies expuestas visualmente placenteras, así como para obtener un concreto sano. Las imperfecciones comunes y los resultados decepcionantes en las construcciones de concreto se deben con frecuencia a la falta de una preparación adecuada para el trabajo.

La determinación de la permeabilidad de la subrasante y análisis del suelo son particularmente en el diseño y construcción del proyecto. Las pruebas básicas de la subrasante deben incluir un análisis granulométrico, clasificación de suelo, y peso volumétrico obtenido en pruebas de Proctor estándar, ASTM D 422, ASTM D 2487, ASTM D 698, respectivamente, los resultados obtenidos de estas pruebas proveerán al diseñador los datos necesarios.

La prueba de infiltración utilizada para diseñar fosas sépticas no es apropiada para determinar la permeabilidad de la subrasante para los pavimentos permeables. Por lo que es necesario compactar una sección de prueba de la subrasante ya especificada generalmente

al grado de compactación como parte del análisis de suelo antes de completar el diseño del proyecto, como equipo especial para realizar la prueba debe ocuparse un infiltrómetro de anillos doble, según la norma ASTM D 3385, u otra prueba apropiada para probar adecuadamente la permeabilidad. En proyectos pequeños la utilidad de estas pruebas no es necesaria, especialmente si el diseñador tiene la experiencia con este tipo de suelos locales o similares.

Deben de llevarse a cabo procedimientos de prueba normales para control de acuerdo con el proceso estandarizado de pruebas ASTM sin modificaciones antes de colocar el concreto, como parte de un plan normal de control de calidad.

4.5.2 Supervisión y pruebas durante la construcción

Debido a las características de la mezcla de concreto, los métodos comunes no pueden ser los apropiados para el control del peso volumétrico, la relación de huecos, rendimiento, filtración, y otras propiedades de los pavimentos de concreto permeables. Mientras no se tengan nuevos métodos de prueba que estén completamente desarrollados, las especificaciones del proyecto deben estar basadas en proporciones de mezclas específicas para concreto permeable. Las especificaciones generalmente requieren contenidos mínimos de cementantes, volúmenes de agregado y granulometría, aditivos y agua.

Los criterios de aceptación deben tener dos aspectos distintos. El primero, se basa en la mezcla de cemento Portland, tal como es entregada y se soporta en el peso volumétrico. Para el colado de cada día, o cuando una inspección visual indique un cambio en la apariencia del concreto fresco, debe realizarse al menos una prueba para verificar el peso volumétrico del material. La prueba de la mezcla debe realizarse de acuerdo con el ASTM C172 y C29. La aceptación debe ser sobre un valor de $\pm 80 \text{ kg/m}^3$ del peso volumétrico de diseño. El segundo criterio se bosqueja en el siguiente apartado.

4.5.3 Supervisión y pruebas posteriores a la construcción

El segundo criterio de aceptación debe estar basado en el pavimento terminado. El grado de compactación de la mezcla fresca puede tener un impacto en la vida y la permeabilidad del

producto terminado. La obtención de tres muestras de núcleo del pavimento dará como resultado muestras de aceptación para el espesor, el contenido de huecos, y el peso volumétrico. Los corazones deben obtenerse de acuerdo con el ASTM C 42 y ser probados en una edad de 28 días. No existen todavía métodos de prueba estandarizados para determinar el peso volumétrico. Además, la supervisión visual de los corazones tomará en cuenta la verificación del volumen necesario de huecos abiertos para facilitar el drenaje.

Una supervisión visual que muestre una estructura de poros completamente cerrada o severamente restringida podrá indicar que el pavimento no funcione apropiadamente, y esas secciones que se hayan demostrado que son esencialmente impermeables deben ser removidas y reemplazadas. Se debe lograr un acuerdo sobre qué área es esencialmente impermeable y sobre el método de medición antes de iniciar la colocación.

En ningún momento la aceptación debe basarse en la resistencia a compresión del concreto permeable, ya sea como es entregado, o tal se muestrea por núcleos del pavimento. Debido a la relación entre la compactación y la resistencia a la compresión, existe un amplio rango de resistencias que pueden ser generadas desde una simple entrega de concreto permeable.

Adicionalmente, todavía no hay métodos de prueba estándar para probar la resistencia a compresión del concreto permeable. La experiencia local con materiales a través de proyectos terminados, secciones de prueba, o ambos, debe dar una indicación respecto a si una proporción de mezcla específica tendrá la resistencia suficiente para soportar los esfuerzos de las cargas del tránsito de diseño.

4.6 La Ciudad Universitaria

Tres fueron los presidentes que desempeñaron un papel decisivo en hacer realidad el proyecto de Ciudad Universitaria. Manuel Ávila Camacho, quien expropió los terrenos; Miguel Alemán, que financió la construcción y Adolfo Ruíz Cortines, apoyando a la universidad para que se transportara a los nuevos edificios y para que siguiera creciendo. Y también fueron tres rectores los que asumieron con entusiasmo sus responsabilidades en la

construcción y puesta en marcha de la Ciudad Universitaria, Salvador Zubirán, Luis Garrido y Nabor Carrillo.



Figura 32. Palacio de Minería obra de Manuel Tolsá construido entre 1779 y 1803, que por décadas albergó a la Escuela de Ingeniería

Incluso antes de lograr la autonomía, ya se proponía que la universidad se reagrupara en un campus. En este sentido el ejemplo más notable es la tesis profesional elaborada por Mauricio M. Campos y Marcial Gutiérrez Camarena, en 1928, en la cual proponían la construcción de la Ciudad Universitaria al sur de la Ciudad de México, en Huipulco, proyecto que nunca se llevo a cabo.

En 1930, el arquitecto Federico Mariscal, entonces director de la Escuela de Arquitectura, proyectó otra Ciudad Universitaria en terrenos de las Lomas de Sotelo con extensas habitaciones para profesores, idea que no se concretó, aunque el presidente de ese tiempo ordenó la compra de los terrenos en las Lomas de Chapultepec. Durante los años treinta la Universidad tuvo graves problemas presupuestales, obligando a gastar los fondos ya recaudados para la construcción en gastos nominales.

Es hasta 1943 que el rector Rodolfo Brito Foucher empezó a hacer gestiones para comprar unos terrenos en el Pedregal de San Ángel, los cuales no fructificaron sino hasta 1946, cuando Salvador Zubirán ocupaba la rectoría. El 25 septiembre de 1946, se publicó en el Diario Oficial de la Federación, la expropiación de los terrenos de 733 hectáreas, 2 de cultivo y 641 terrenos pedregosos, en los ejidos situados en Tlalpan y Copilco, en ese tiempo eran parte de la Delegación Magdalena Contreras.

El proyecto en conjunto contaba ya con las necesidades especificadas de las escuelas e institutos establecidos por sus directores. El proyecto se calculo para 25000 alumnos considerando un crecimiento previsible, por que en la universidad de ese entonces había una población de 15000 estudiantes, sin considerar alumnos de preparatoria, indicando los lugares donde iban a estar las edificaciones y reservaba espacios para estacionamientos, andadores y jardines. El Estadio Olímpico se proyecto en el lado Poniente de la Avenida Insurgentes y las instalaciones escolares en el lado Oriente, comenzando por la Rectoría. De las 733 hectáreas solo se pensaban utilizar 200 y dejar el resto como área de expansión y protección ecológica. Se rectifico a los arquitectos Pani y Del Moral en sus cargos de directores del proyecto de conjunto, y Novoa designo como gerente del proyecto al arquitecto Carlos Lazo y al ingeniero Luis Enrique Bracamontes como gerente de obras.



Figura 32. Construcción de la Ciudad Universitaria

El proyecto en conjunto asignaba los lugares para cada edificación. En general se formaron equipos de tres arquitectos reconocidos para que desarrollaran en coordinación con los directores de escuelas, cuando fuera el caso, el proyecto detallado de cada edificio para afirmar minuciosamente el programa de necesidades.

Dentro de lo que ahora es el Circuito Escolar se construyó primero la Torre de Ciencias, luego la parte Norte con los edificios de Humanidades y la Rectoría, después al Sur con los de Ingeniería, Química y Arquitectura y por último, en la parte Oriente, las construcciones de Medicina, Veterinaria, Odontología así como el Instituto de Biología. Al mismo tiempo que se construía el Estadio Olímpico.

Finalmente la Ciudad Universitaria quedó construida, la inauguración oficial fué el 20 de noviembre de 1952, aunque el inicio de las actividades en las escuelas fue hasta marzo de 1954, cuando empezaron a mudar Facultades y Escuelas. Lo que nadie previo, o no pudo preverse, fue el enorme y rapidísimo crecimiento de la comunidad. En pocos años se duplico la estimación original de 25,000 alumnos de licenciatura, lo que obligo a las

autoridades sucesivas a ampliar los locales de Ciudad Universitaria. Esto se hizo a veces con prisa y otras con buen gusto. Aunque es importante notar que ninguna de estas ampliaciones modificó la estética básica del cuadrángulo original

A poco más de cincuenta años de la creación del Campus, la Ciudad Universitaria sigue teniendo gran influencia en la vida política, intelectual y cultural con la que nació la Universidad de México.

4.6.1 Ubicación de espacios universitarios

Construida entre 1950 y 1954, la Ciudad Universitaria de México ejemplifica paradigmáticamente un momento álgido en la vida política y cultural de México. La Ciudad Universitaria es una evocación del hombre moderno, del sitio y de su historia, su creación, es en sí misma la del mexicano moderno como continuación del proceso revolucionario iniciado en 1910; la modernidad nacionalista se fundió entonces con los ideales del mundo moderno y el hombre universal, y fue capaz de representar los contrastes y las diferencias de México a través de una nueva identidad.



Figura 33. Vista del estadio olímpico

Los edificios del Campus muestran claramente la interpretación de los postulados de la arquitectura y la ingeniería moderna internacional, racionalista, técnica y objetiva, pero al mismo tiempo de la arquitectura tradicional, así como de la sólida y vanguardista ingeniería mexicana. La Ciudad Universitaria es una verdadera fusión, logro de la unión sin precedentes de los arquitectos mexicanos modernos; que interactuaron para dar origen a una de los conjuntos más emblemáticos del México moderno.

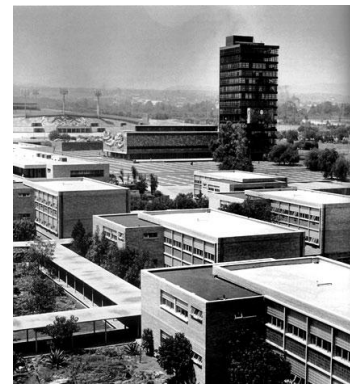
El plan maestro de la Ciudad Universitaria fue producto de ideas organizadas por la entonces Escuela Nacional de Arquitectura. La superficie original donde se desplantó la Ciudad Universitaria contaba con más de siete millones de metros cuadrados donde se

encontraba una serie de “plataformas rocosas” que a su vez dejaban espacios bien definidos.

El elemento principal de este esquema general es un Eje Oriente-Poniente que se supone de manera perpendicular al Eje de las vialidades más importantes de la ciudad, llamada Avenida de los Insurgente, así la Ciudad Universitaria, en su concepción original, se conforma con tres grandes zonas que se relacionan permanentemente con este trazo. Estas tres zonas son:

- Estadio Olímpico
- Zona Escolar
- Campos deportivos

El Estadio fue la primera obra iniciada del conjunto de la Ciudad Universitaria, debido a la aceptación unánime de todo el comité de construcción del conjunto sobre su volumetría y funcionalidad. Se diseñó para que se realizaran todo tipo de actividades deportivas, y se demostró por el desempeño durante las Olimpiadas de 1968. El talud exterior que forman las gradas del lado Oriente fue decorado con mural titulado: “La Universidad, la familia y el deporte en México”, con piedras de color natural en altorrelieve obra de Diego Rivera. El acceso desde exterior se hace por medio de rampas que, al ir ascendiendo, permiten la entrada a mitad de la gradería, para así ocupar la totalidad de las localidades.



Figuras 33. Vista de la Ciudad Universitaria en 1954

La zona escolar, originalmente esta zona tiene como elemento central y dominante la gran explanada principal conocida como “Las Islas” que agrupa a su alrededor los edificios de las principales facultades y escuelas y que a su vez se subdividía en cinco grandes grupos:

- Gobierno y servicios
- Humanidades
- Ciencias Biológicas
- Ciencias

- Artes y Museos

La zona deportiva está ubicada al Sur de la Zona Escolar manteniendo una postura congruente con el discurso de la modernidad donde la recreación y la práctica del deporte se plantearon como parte vital del desarrollo y bienestar del hombre. Concediendo toda la importancia que este punto merece y debido en gran parte a la afición por el deporte presentada por la juventud mexicana, la Ciudad Universitaria es una de las universidades en el continente que cuenta con mayor número de campos deportivos, tanto de entrenamiento como de exhibición, y aún la más vasta en lo que se refiere a variedad y calidad de sus instalaciones. Para ello fue necesario destinar desde el mismo Plan Maestro el espacio requerido para tal fin, una vasta zona constituida por plataformas a diversos desniveles que propician la colocación de las canchas deportivas.

Aquí son destacables los Frontones. Estas estructuras singulares nos muestran el sincretismo de elementos de la arquitectura tradicional mexicana y la arquitectura contemporánea. Con unos requerimientos de programa elementales como los de un frontón, se logra una obra de gran plasticidad que le otorgan al conjunto fuerza para definir su condición de arquitectura moderna mexicana. Cuatro frontones abiertos y uno cerrado se disponen formando una diagonal, la única en el conjunto y así limitan, contienen y articulan la zona de Campos deportivos, además de formar distintas perspectivas y puntos de vista y contrastes volumétricos. Cada frontón está resuelto como una plataforma con talud, elemento arquitectónico utilizado muy frecuentemente en la arquitectura mesoamericana; esta imagen nos remite necesariamente a las pirámides y a los lugares de Juego de Pelota Prehispánico.



Figura 34. Vista de la zona deportiva de la Ciudad Universitaria

Dentro del Plan Maestro, la preocupación por el paisaje y la ingeniería de las vialidades ocupó un lugar muy importante. Lo anterior queda demostrado con el diseño de las áreas exteriores del Campus Central, obra del arquitecto y Premio Pritzker Luis Barragán, quien manifestó una gran sensibilidad por el espacio que se destinaría a la circulación peatonal, al estudio al aire libre y a la contemplación, definiendo terrazas, plazas, patios y jardines de diferentes escalas definiendo su función a través del uso de los materiales y su forma. Cabe destacar que el Campus es considerado, y utilizado, como uno de los espacios públicos más importantes y generosos de la Ciudad de México.

4.6.2 Características hidrológicas y geológicas

La Ciudad Universitaria se ubica al Suroeste de la Ciudad de México, dentro de la zona conocida como el Pedregal de San Ángel, se trata de un ecosistema endémico formado por el derrame de lava del Volcán Xitle, el tipo de suelo que se encuentra son los basaltos mismos generados por las erupciones volcánicas del Xitle, formados por coladas lávicas que presentan discontinuidades como fracturas y cavernas, eventualmente rellenas con escoria.

En la Reserva Ecológica del Pedregal el clima que se presenta es semifrío húmedo con abundantes lluvias, pudiéndose observar dos temporadas de floración bien definidas: la seca y la de lluvias durante el verano, con una precipitación media anual total de entre los 1200 a 1500 *mm*. El lecho de roca basáltica protegido por la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, posee un alto valor biológico, ecológico y geomorfológico; recarga los mantos acuíferos, gracias a que este tipo de lecho permite la circulación de agua a través de las fisuras y grietas, mantiene la humedad y la calidad del aire, y contribuye a amortiguar los cambios de temperatura en el microclima.



Figura 35. Vista y alrededores actuales de la Ciudad Universitaria

4.7 Propuesta de aplicación del concreto permeable en espacios universitarios

Dadas las características arquitectónicas, hidrológicas y geológicas de la Ciudad Universitaria, así como las características específicas del concreto permeable, se propone el uso de este último, en las siguientes áreas:

- Plazas o explanadas
- Estacionamientos, banquetas y andadores peatonales
- Otras áreas

La aplicación en plazas se recomienda tomando las siguientes consideraciones, la fácil aplicación del concreto permeable así como el manejo y uso del equipo de construcción durante todas sus etapas de colocación, en un segundo plano, las ventajas de aplicación de este material reside en su capacidad de filtración permitiendo la recarga de los mantos freáticos de la Ciudad Universitaria, evitando encharcamientos, así como la eliminación total o parcial de infraestructura de drenaje pluvial.

Además de permitir la aeración y el libre paso del agua hacia las raíces de los arboles, cumpliendo una función de sustentabilidad de las áreas verdes existentes en la Ciudad Universitaria sin modificar sustantivamente el diseño arquitectónico planteado inicialmente.

Siendo el mantenimiento y preservación de los recursos naturales, un tema prioritario en la actualidad, se han llevado a cabo una serie de programas destinados a cumplir dicho objetivo: “La sustentabilidad ambiental se refiere a la administración eficiente y racional de

los recursos naturales, de manera tal que sea posible mejorar el bienestar de la población actual sin comprometer la calidad de vida de las generaciones futuras”.⁵

Las explanadas de la Ciudad Universitaria donde se puede aplicar el concreto permeable, es el área delimitada por Rectoría, la Facultad de Arquitectura y la Biblioteca Central, debido a la presencia de áreas verdes que forman parte de los espacios abiertos de la universidad, la explanada de la Facultad de Medicina es otra de las zona en la que se puede aplicar este material poroso, debido a que se cuenta con un gran espacio, que permite gran captación de agua pluvial, eliminando totalmente el drenaje existente en dicho espacio.



Figura 36.



Figura 37.



Figura 38.

Áreas propuestas para la aplicación de concreto permeable

En estacionamientos, banquetas y andadores peatonales dentro de Ciudad Universitaria el uso ayudará a manejar enormes cantidades de agua que corren en estos lugares durante una tormenta; provocando que el agua se filtre al suelo bajo el pavimento. Por otra parte la Agencia para la Protección del Medio Ambiente (EPA), ha adoptado dicha política recomendando el uso de pavimentos de concreto permeable como una solución apta para mitigar el problema de los escurrimientos de agua pluvial.

Otro elemento importante es que los concretos permeables no absorben la misma cantidad de calor que los concretos de asfalto comunes, por lo tanto, al ser aplicados en los estacionamientos de Ciudad Universitaria, darían como resultado que el aire existente sobre esa área sea más fresco. Siendo una solución integral al problema de los pavimentos calientes.

⁵ Véase *Plan Nacional de Desarrollo*. Eje 4. Sustentabilidad Ambiental 2007-2012.

Ecológicamente el concreto permeable es un elemento que no contamina el medio ambiente y esto es de suma importancia, pues como ya se ha mencionado la Ciudad Universitaria se encuentra dentro de una zona ecológica protegida.

La aplicación de concreto permeable dentro de la Ciudad Universitaria puede llevarse a cabo en la mayoría de sus estacionamientos, como en la mayoría de sus andadores peatonales y aceras ubicadas en los circuitos principales y secundarios.



Figuras 39. Estacionamientos donde se puede aplicar el concreto permeable

Dentro de la Ciudad Universitaria otra utilización es el drenado en las instalaciones de agua y electricidad para la construcción de placas permeables para drenaje, así como drenes por debajo de las estructuras hidráulicas, pues este tipo de elementos alivian las subpresiones y permiten que el agua freática sea drenada por debajo de los tubos de las alcantarillas.

La aplicación de este elemento novedoso servirá a las instalaciones de viveros e invernaderos de la Ciudad Universitaria, creando un sistema de almacenamiento térmico en el piso, además de que este mismo elemento tendrá la función de área de almacenamiento, así como también intercambiador de calor para el invernadero, calentado por el sol. La utilización del concreto permeable como pavimento dentro del invernadero beneficiará evitando encharcamientos de aguas, eliminación y el crecimiento de vegetación, para proporcionar una superficie resistente y durable para el movimiento del equipo de operación del situado en el invernadero.

En las instalaciones deportivas, canchas de tenis, basquetbol y frontones, todas las superficies existentes de concreto convencional se podrían sustituir por el material propuesto, debido a que las losas de concreto permiten una rápida filtración del agua para posteriormente ser drenadas a través de una base de grava a las orillas de la losa. Este mismo método se puede aplicar dentro de alberca, aplicándose el material a todo el perímetro, para la recuperación del agua de esta misma y reutilizarse como agua de riego u otras aplicaciones.

4.8 Desempeño

La principal problemática en esta propuesta es la reducción en la capacidad de filtración debido a la colmatación y deterioro estructural ocasionado por el desgaste, esto es importante tomarlo en cuenta para saber cómo será el comportamiento de los pavimentos de concreto permeable si se implantara este sistema en las instalaciones del Campus de Ciudad Universitaria, así como también para dar el mantenimiento y reparaciones adecuadas.

4.8.1 Colmatación

Hay que tomar en cuenta que la colmatación es un fenómeno que ocurre cuando elementos extraños restringen la capacidad de filtración del agua, esto es necesario considerarlo pues hay una gran número de elementos finos como son: materia vegetal producto de árboles y humedad, que entran a la estructura interna del material o simplemente se acumulan en la superficie bloqueando los poros del concreto.

Dadas las circunstancias ya mencionadas es necesario un diseño geométrico del pavimento de concreto permeable que no permita que el agua pluvial introduzca finos en el pavimento para minimizar el efecto de la colmatación. Los finos transportados por el viento generalmente son de un volumen limitado en muchas áreas, pero podrían generar preocupaciones en áreas áridas. La materia vegetal constantemente es depositada en la superficie de los pavimentos permeables, dejando como solución una limpieza constante.

Para prolongar la vida útil de la superficie en caso de instalación de concreto permeable en la Ciudad Universitaria será necesario un correcto diseño, una correcta construcción y un mantenimiento periódico para minimizar efectos de colmatación.

4.8.2 Deterioro estructural

El deterioro estructural de los pavimentos permeables posiblemente instalados en la Ciudad Universitaria podría presentarse en dos formas, agrietamiento o subsidencia debido a la pérdida del soporte de la subrasante o desintegración de la superficie, esto puede ser causado por cargas pesadas, es decir más allá de la capacidad de la estructura del pavimento, materiales débiles de la subrasante, o flujo horizontal del agua a través del pavimento de concreto permeable que erosiona el material de la subrasante. Las altas presiones de contacto o una débil superficie de concreto permeable pueden causar la desintegración de la superficie.

El mal desempeño de un concreto poroso por desintegración se debe a una relación agua-cemento o una compactación inadecuada.

CONCLUSIONES

El concreto permeable es una alternativa viable como superficie de infiltración de escurrimientos y que al mismo tiempo cumple una función de pavimento para uso ligero, dando como resultado una herramienta que facilita la reducción de escurrimientos superficiales en áreas urbanas; así pues, considero que los mayores beneficios del concreto permeable están en sus propiedades hidrológicas, además su adaptabilidad lo hace de fácil aplicación, pues los aspectos básicos de esta tecnología son flexibles a cualquier zona geológica, así en zonas urbanas su aplicación se convierte en una solución ecológica que permite con gran facilidad el tratamiento de aguas pluviales antes de ser evacuadas del sitio.

De las propiedades del concreto permeable podemos concluir que entre menor sea el porcentaje de vacíos, la resistencia y peso volumétrico incrementaran, pero la permeabilidad disminuirá, es por esto que el porcentaje de vacíos influye de manera directa y significativa en todas las propiedades de la mezcla de concreto permeable. Por otra parte la permeabilidad es una propiedad que también se ve afectada y que depende del grado de compactación aplicado al concreto durante su etapa de construcción, ya que si se da una compactación excesiva, la permeabilidad se perderá.

En cuanto a la supervisión y control de calidad del concreto permeable, debe ser sumamente estricto, por lo que es necesario realizarlo, antes, durante y después de su instalación, tanto en el sitio donde se aplicara como en los materiales que se ocuparan para su fabricación, respetando las características de sus componentes, puesto que es de vital importante asegurar un funcionamiento del sistema de concreto permeable para cumplir con su función de permeabilidad, además de los cuidados adecuados desde los estudios preliminares y sobre todo un correcto mantenimiento preventivo, para asegurar una larga vida útil.

Finalmente considero que la aplicación del concreto permeable en las plazas andadores y estacionamientos de la Ciudad Universitaria, son necesarios para la preservación ecológica del subsuelo, donde se encuentra ubicada la Universidad. Cabe destacar que la misma Universidad es un reflejo de los problemas de los habitantes de México, pues no ha sido la

excepción en cuanto a la saturación y erradicación de áreas verdes, las construcciones de Institutos, Posgrados y Extensiones Académicas han reducido en gran medida los espacios que anteriormente estaban considerados como ecológicos, de ahí que sea de vital importancia, aplicar en los nuevos desarrollos alternativas de ingeniería ecológica, una de estas alternativas es el concreto permeable.

ANEXO

Los documentos de las diferentes organizaciones que producen normas a las que se hace referencia bajo se indican a continuación con sus designaciones seriales.

American Concrete Institute

ACI 211.3R “Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete”

ACI 305 “Hot Weather Concreting”

ACI 306 “Cold Weather Concreting”

ACI 522R-06 “Pervious Concrete”

ACI 522.1-08 “Specification for Pervious Concrete Pavement”

American Society for Testing and Materials

ASTM C 29 “Test for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate”

ASTM C 33 “Specification for Concrete Aggregates”

ASTM C 39 “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens”

ASTM C 42 “Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete”

ASTM C 94 “Specification for Ready-Mixed Concrete”

ASTM C 117 “Test Method for Material Finer than 75- μm (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing”

ASTM C 138 “Test Method for Density (Unit Weight), Yield and Air Content (Gravimetric) of Concrete”

ASTM C 140 “Test Methods for Sampling and Testing Concrete Masonry Units and Related Units”

ASTM C 150 “Specification for Portland Cement”

ASTM C 172 “Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete”

ASTM C 260 “Specification for Air-Entraining Admixtures for Concrete”

ASTM C 494 “Specification for Chemical Admixtures for Concrete”

ASTM C 595 “Specification for Blended Hydraulic Cements”

ASTM C 618 “Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete”

ASTM C 989 “Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars”

ASTM C 1077 “Practice for Laboratories Testing Concrete and Concrete Aggregates for use in Construction and Criteria for Laboratory Evaluation.”

ASTM C 1116 “Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete”

ASTM C 1602 “Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete”

ASTM D 448 “Classification for Sizes of Aggregate for Road and Bridge Construction”

ASTM D 1557 “Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lb/ft³)”

ASTM D 1751 “Specification for Preformed Expansion Joint Filler for Concrete Paving and Structural Construction (Non-extruding and Resilient Bituminous Types)”

ASTM D 1752 “Specification for Preformed Sponge Rubber Cork and Recycled PVC Expansion Joint Fillers for Concrete Paving and Structural Construction”

ASTM D 2434 “Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head)”

ASTM D 3385 “Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field Using Double-Ring Infiltrometer”

ASTM D 5093 “Test Method for Field Measurement of Infiltration Rate Using a Double-Ring Infiltrometer with a Sealed-Inner Ring”

ASTM D 5084 “Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter (Falling Head, Method C)”

ASTM D 6767 “Standard Test Method for Pore Size Characteristics of Geotextiles by Capillary Flow Test”

ASTM E 329 “Specification for Agencies Engaged in the Testing and/or Inspection of Materials Used in Construction”

BIBLIOGRAFÍA

1. Cibrián Fernández, Irving “Reducción de escurrimientos pluviales mediante la utilización de pavimentos de concreto permeable”, tesis de maestro en Ingeniería Civil-Construcción, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2009, 109 p.
2. Ciudad Universitaria: Crisol del México moderno / (Coordinador general Roger Díaz de Cossio, textos Roger Díaz de Cossio, Raúl Domínguez Martínez, Francisco López Morales), México; Fundación UNAM, 2009. 279 p., il.
3. Concreto permeable. México, Instituto mexicano del concreto, 2008. 52 p., il
4. Concretos permeables y ecológicos: concretos permeables, sistemas para la recuperación y aprovechamiento del agua pluvial por medios de pesos y pavimentos porosos. México, Concreto, (formato PDF).
5. Curso básico sobre tecnología del concreto, CD-ROM, México, Cemento Apasco, 2005.
6. Ferguson, B., 1994, Stormwater Infiltration, CRC, 288 p.
7. García Rivero, José Luis. Manual técnico de construcción, 3ª ed., México, Cemento Apasco, 2006. 306 p., il
8. Gutiérrez Sáenz, Raúl, Metodología del trabajo intelectual. 19ª ed., México, Esfinge, 2002, 200 p.
9. Hernández Sanpieri Roberto [et al.] Metodología de la investigación, 3ª ed., México, McGraw-Hill, 2003. XXIX; 703 p.
10. Meininger, R.C., 1988, “No-fines Road,” Concrete Construcción, V. 15, No. 3, pp 116-117.
11. National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA), 2004, “Freeze-thaw resistance of pervious concrete,” Silver Spring, Md., 17 p.
12. Neithalath, N.; Weiss, W. J.; and Olek, J. 2005, “Modifying the surface texture to reduce noise in Portland cement concrete pavements,” Report No. SN 2878, Portland Cement Association, Skokie, Ill., 67p.
13. Pérez Ramos, Daniel, “Estudio experimental de concretos permeables con agregados andesíticos”, tesis de maestro en Ingeniería Civil-Construcción, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2009, 150 p., il.

14. Salazar Rodríguez, Aurelio. Guía para el diseño de pavimentos rígidos, Instituto mexicano del cemento y del concreto, 2008, pág. 49.
15. [www.perviuspavement.org/Benefit, porcentaje 20 enviromental.htm](http://www.perviuspavement.org/Benefit_porcentaje_20_enviromental.htm).
16. www.perviuspavement.org/mixture%20proportioning.htm