



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISION DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA

**REDUCCIÓN DE ESCURRIMIENTOS
PLUVIALES MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE
PAVIMENTOS DE CONCRETO PERMEABLE.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

(C O N S T R U C C I Ó N)

P R E S E N T A:

Irving Cibrián Fernández

TUTOR:

Dr. Jesús Hugo Meza Puesto



CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO D.F, 2009

JURADO ASIGNADO

Presidente : Ing. Ernesto René Mendoza Sánchez.

Secretario : M.I. García Domínguez Octavio

Vocal : Dr. Jesús Hugo Meza Puesto

1er. Suplente: Ing. Juan Luis Cottier Caviedes

2do. Suplente: M.I. Marco Tulio Mendoza Rosas.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Jesús Hugo Meza Puesto

Agradecimientos.

A la **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**, por la formación que me dio y por haberme permitido tomar clases en sus instalaciones.

Al **CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**, por el apoyo que me dio para poder realizar mis estudios de Maestría.

A mis profesores de la maestría por haber compartido sus conocimientos y experiencias.

A mi familia porque se que siempre podre contar con su apoyo incondicional.

A mis compañeros y amigos por permitirme compartir con ellos momentos agradables.

ÍNDICE

Introducción.	I
Capítulo 1 Antecedentes.	1
Introducción Capitular 1.	2
1.1 Antecedentes.	3
1.1.1 De los sistemas de drenaje.	3
1.1.2 Del concreto permeable.	8
1.2 Problema.	13
1.3 Hipótesis.	14
1.4 Objetivos.	14
1.5 Alcances.	15
Capítulo 2 Control de Escurrimientos Urbanos.	16
Introducción Capitular 2.	17
2.1 Estrategias para el Control de Escurrimientos Urbanos.	18
2.1.1 Control de Afluentes.	18
2.1.2 Control del Sistema Colector.	20
2.1.3 Control de Acumulación y Tratamiento.	20
2.2 Técnicas de Almacenamiento, Obras de Detención y Retardo de Escurrimientos.	21
2.2.1 Obras de Almacenamiento.	21
2.2.2 Tipos de Obras de Almacenamiento.	22
2.2.3 Ventajas y Desventajas de las Medidas para Reducir y Retardar los Escurrimientos Pluviales.	23
2.3 Estructuras de Control de Escurrimientos Mediante Superficies Filtrantes.	24
2.3.1 Filtros de Arena.	25
2.3.2 Zanjas de Infiltración.	25
2.3.3 Filtros Orgánicos.	25
2.3.4 Filtros de Arena Bajo Tierra.	26
2.3.5 Superficies Permeables.	26
2.3.6 Asfalto Permeable.	26

2.4 Tipos de Dispositivos para la Disminución de	
Escurrimientos Mediante Eliminación Local.	27
2.4.1 Pavimentos Permeables.	27
2.4.2 Disminución de Superficies Impermeables	
Directamente Conectadas.	29
Capítulo 3 Tecnología del Concreto Permeable.	30
Introducción Capitular 3.	31
3.1 Generalidades.	32
3.2 Materiales.	33
3.2.1 Los Agregados.	33
3.2.2 El Agua.	34
3.2.3 El Cemento.	34
3.2.4 Los Aditivos.	34
3.3 Propiedades.	35
3.3.1 Resistencia a la Compresión.	35
3.3.2 Resistencia a la Flexión.	38
3.3.3 Contenido de Huecos de aire/peso Unitario.	40
3.3.4 Capacidad de Filtración.	41
3.3.5 Durabilidad.	42
3.3.6 Absorción Acústica.	44
3.4 Proporcionamiento de mezclas.	45
3.4.1 Generalidades.	45
3.4.2 Criterios para el Proporcionamiento.	45
Capítulo 4 Aspectos Hidrológicos y Contaminación de	
Escurrimientos Pluviales.	47
Introducción Capitular 4.	48
4.1 Cuencas y Drenajes.	49
4.2 Permeabilidad e Infiltración en Suelos.	50
4.3 Tipos de Contaminantes y Transportación.	51
4.4 Relación entre Precipitación y Escorrimento.	56

Capítulo 5 Diseño, Cálculo y Construcción de la Superficie de Concreto Permeable.	59
Introducción Capitular 5.	60
5.1 Diseño de Pavimentos Permeables.	61
5.2 Estimación de Volúmenes de Almacenamiento.	63
5.3 Estudios Pluviales Necesarios para la Estimación de Volúmenes de Almacenamiento.	64
5.3.1 Datos sobre Intensidad-duración-frecuencia.	66
5.3.2 Diseño de Tormenta Estandarizado.	66
5.3.3 Registros Cronológicos sobre Lluvias.	67
5.3.4 Registros Cronológicos sobre Series de Flujos.	68
5.4 Calculo para Obras de Infiltración.	70
5.4.1 Caudal de Diseño.	71
5.5 Selección y diseño de las superficies de infiltración.	74
5.5.1 Selección del Lugar.	74
5.5.2 Diseño de la Superficie de Infiltración.	76
5.6 Construcción de Pavimentos Permeables.	80
5.6.1 Preparación y Disposición de la Subrasante.	80
5.6.2 Colocación.	81
5.6.2.1 Cimbras.	82
5.6.2.2. Colocación del Concreto.	82
5.6.2.3 Tiras Niveladoras.	83
5.6.2.4 Equipo de Enrasado.	83
5.6.2.5 Herramientas Varias.	83
5.6.2.6 Usando el Concreto Adyacente como una Cimbra.	84
5.6.3 Compactación.	84
5.6.4 Juntas.	85
5.6.5 Curado y Protección.	86
5.6.6 Protección en Clima Frío.	87
5.6.7 Protección en Clima Caliente.	87

Capítulo 6 Usos y Beneficios.	89
Introducción Capitular 6.	90
6.1 Supervisión y Pruebas de Control.	91
6.1.1 Generalidades.	91
6.1.2 Supervisión y Pruebas Previamente a la Construcción.	91
6.1.3 Supervisión y Pruebas Durante la Construcción.	92
6.1.4 Supervisión y Pruebas Posteriores a la Construcción.	93
6.2 Desempeño.	94
6.2.1 Generalidades.	94
6.2.2 Colmatación.	94
6.2.3 Deterioro Estructural.	95
6.3 Mantenimiento.	96
6.4 Reparación de Pavimentos de Concreto Permeable.	97
6.4.1 Desbastado.	97
6.4.2 Depresiones o Puntos Bajos.	97
6.4.3 Cortes para Instalaciones de Servicio.	98
6.5 Manejo de las Aguas Pluviales.	98
6.6 Necesidades de Investigación.	102
Conclusiones.	104
Recomendaciones.	106
Bibliografía.	108

Introducción

Los pavimentos son algo muy común en nuestra vida diaria, particularmente en áreas urbanas. El desarrollo que han tenido hasta nuestros días la población, los desarrollos industriales y desarrollos habitacionales mantienen a la par la implementación de pavimentos en casi todo tipo de construcciones, si embargo uno de los principales problemas de los pavimentos es que no permiten el paso del agua de lluvia al subsuelo. Por otro lado las reglamentaciones asociadas a la calidad del agua se mantienen al frente de los principales temas a implementar dentro de la planeación del crecimiento urbano.

Se puede decir que los pavimentos son las estructuras más construidas por el hombre, después de la vivienda y sistemas de servicios públicos. Estos ocupan casi la mitad del área que es ocupada por los edificios. Dos terceras partes del total de las lluvias que caen en superficies impermeables y que podrían potencialmente abastecer las cuencas o mantos acuíferos en zonas urbanas, caen en pavimentos y posteriormente son conducidos por gravedad a los sistemas de drenaje y alcantarillado. Debido a esto, la hidrología natural y el medio ambiente se ven afectados. Las inundaciones que producen los escurrimientos superficiales se hacen cada vez más frecuentes, con sus aspectos negativos como el entorpecimiento del tráfico y el acarreo de contaminantes disueltos o lavados.

Una técnica adecuada de infiltración de las aguas pluviales hacia el subsuelo es la utilización de un pavimento hecho a base de concreto permeable que permita que el agua captada en la superficie del concreto, así como los escurrimientos superficiales y sus cargas de contaminantes que se originen a su alrededor, sean dirigidos, a través del pavimento, y se infiltren directamente al subsuelo natural.

Los pavimentos permeables son diseñados para permitir el paso de aire y agua a través de ellos. Si se usan apropiadamente, estos pavimentos pueden

facilitar la biodegradación de algunos aceites y grasas, disminuir la temperatura urbana, rellenar mantos acuíferos, permitir a las raíces de los árboles obtener los nutrientes necesarios, evitar que el agua de lluvia se desperdicie, incluyendo la magnitud y frecuencia de inundaciones repentinas.

La utilización de sistemas de pavimentos permeables en áreas urbanas permite también la reducción de la cantidad de escurrimientos pluviales captados por los sistemas de drenaje urbano combinados y sistemas de alcantarillado pluvial, permitiendo a su vez una adecuada disposición de los escurrimientos y sus contaminantes, así como un funcionamiento adecuado de las redes de drenaje reduciendo en gran medida las necesidades de ampliación de las redes existentes y eliminando o reduciendo el costo y número de nuevas alcantarillas pluviales.

Es en el sistema de pavimentos permeables a base de concreto permeable donde centraremos nuestro trabajo de investigación, ya que éste concreto presenta propiedades de infiltración de aguas pluviales que permiten la reducción de escurrimientos superficiales, disminuyendo de ésta manera problemas de inundaciones, acumulación de contaminantes, erosión por altas velocidades y saturación de ambos sistemas de drenaje.

Se ha previsto que en un futuro cercano el agua de lluvia, particularmente la captada por los pavimentos y el agua producto de deshielo, serán el agua residual del siglo veintiuno. A medida que la reutilización del agua por medio de su tratamiento se percibe más necesaria, el agua que se capta y se conduce al drenaje pluvial será eventualmente vista como una mercancía valiosa, o inclusive como un recurso renovable. Esto hace al concreto permeable, con su potencial para revolucionar la administración de aguas pluviales, una importante tecnología para el futuro.



CAPITULO 1

ANTECEDENTES



Introducción Capitular 1

En el presente capítulo se mencionan los antecedentes sobre la problemática que se ha venido acarreado con los sistemas de drenaje pluvial desde su origen. En el mismo, se mencionan los acontecimientos que originaron el uso que tiene en la actualidad este sistema. Los dos problemas primordiales sobre los sistemas de drenaje pluvial, como lo son la cantidad y calidad de los escurrimientos pluviales que se descargan al sistema, son abordados; también se hace mención sobre sus consecuencias más recurrentes. Se hace mención del impacto que tienen las superficies impermeables y los esfuerzos que se han hecho para controlar los problemas mencionados anteriormente. También se mencionan los comienzos sobre la utilización del concreto permeable en pavimentos y su aportación para la disminución de los problemas existentes con los escurrimientos superficiales.

Sobre el concreto permeable y su uso en pavimentos, se trata de dar una breve semblanza del uso que tiene el concreto debido a sus características y propiedades. Se hace una breve reseña histórica sobre su origen y aplicación en diferentes países; así como su uso de acuerdo a las necesidades de cada región.

Se hace una comparación entre el uso de pavimentos convencionales y pavimentos a base de concreto permeable, resaltando las ventajas que presenta la propiedad de infiltración con que cuenta el concreto permeable.

En el presente capítulo se plantean también los problemas, la hipótesis, los objetivos y los alcances de la investigación, que ha continuación se desarrolla, tratando reunir los conocimientos necesarios para un adecuado uso y cuidado en la implementación del concreto permeable en pavimentos, y su aportación a la disminución de los problemas que tienen los sistemas de drenaje pluvial con los escurrimientos superficiales.



1.1 Antecedentes

1.1.1 De los Sistemas de Drenaje

De las muchas alcantarillas primitivas que se describen en la literatura, los grandiosos desagües subterráneos de la antigua Roma son los mejor conocidos. Los romanos fueron grandes constructores de acueductos, alcantarillas, caminos y puentes. El sistema de alcantarillas llamado *cloaca máxima* construido en el siglo seis A.C. para drenar el Forum de Roma todavía está en servicio¹. En base a los escritos de la época se sabe que la conexión directa de las casas a dichos desagües no era práctica generalizada.

Algunas de las ciudades más antiguas de la humanidad contaban con alcantarillas. Por ejemplo, excavaciones arqueológicas de asentamientos en las riveras de los ríos Tigris e Indú han revelado la utilización de conductos para alcantarillas, desde hace tanto tiempo como en los años 3500 A.C.

Siguiendo la práctica romana, las primeras alcantarillas construidas en Europa y en los Estados Unidos tuvieron como función principal la recolección de las aguas pluviales.

Desde el comienzo de las grandes urbanizaciones, a lo largo del milenio y hasta nuestra era, las alcantarillas se siguen utilizando siguiendo esencialmente una misma filosofía. Esto es, las alcantarillas son construidas para drenar solamente los escurrimientos de agua de lluvia. Así que, esta práctica era seguida por los romanos tan estrictamente, que se hicieron leyes que prohibían que cualquier cosa que no fuera agua de lluvia entrara al sistema de alcantarillas. De esta manera, las alcantarillas se ubicaban primordialmente por razones de conveniencia, para minimizar la acumulación de agua de lluvia en caminos y demás superficies.

Los desechos humanos y domésticos eran acumulados en las afueras de los hogares para ser retirados por las noches. Esta práctica se mantuvo hasta el

¹ Cfr. Barry J. Adams, Fabian Papa, Urban Stormwater Management Planning with Analytical Probabilistic Models, ed. John Wiley & Sons Inc., 2000, pg. 2. Traducción personal.



siglo diecinueve. En Europa, durante la industrialización, aumentaron enormemente las poblaciones urbanas, lo que resultó en un congestionamiento poblacional. La acumulación de los desechos aumentó la transmisión de enfermedades, como la tifoidea y el cólera, por medio de una variedad de mecanismos: el aumento de contacto humano con los desechos, el aumento de posibilidades de propagación, contaminación fecal de acuíferos locales que funcionaban como una fuente común de abastecimiento de agua de uso doméstico.

Las epidemias resultantes en ciudades como Londres y París en los años 1840s y 1850s fueron de tal magnitud que la solución fue permitir que se vertieran los desechos humanos a lo que hasta ese tiempo habían sido exclusivamente drenajes pluviales. Así nació el sistema combinado de drenaje y alcantarillado. Los sistemas de alcantarillado existentes, fueron convertidos a sistemas combinados y los sistemas se fueron diseñando para que funcionaran como sistemas combinados de drenaje.

Como la solución de combinar ambos drenajes fue hecha para dar una solución rápida a la presión que significaban para las sociedades ambos problemas, no es de sorprenderse que esto acarrearía problemas propios. Los sistemas de alcantarillado, convertidos a sistemas combinados de drenaje, descargaban su contenido a las corrientes naturales de agua. Esto, en un principio parecía una práctica razonable porque el alcantarillado conducía esencialmente agua de lluvia a un sistema hidrológico, al que tendría que descargar de cualquier manera. En segunda instancia, un sistema de drenaje combinado que descargara al mismo afluente, era una propuesta menos razonable. Pronto salió a relucir que el tratamiento de las aguas de los sistemas combinados de drenaje era necesario antes de su descarga.

Un problema adicional que presentan los sistemas combinados de drenaje son las conexiones directas de las descargas de los hogares al drenaje. Usualmente la conexión es más baja que el arroyo de la calle, por lo tanto cuando las condiciones de escurrimiento pluvial causan la saturación de la capacidad hidráulica del sistema de drenaje, eso es, que la tubería este bajo presión



hidrostática, y si la presión es lo suficientemente alta, el flujo se puede revertir, es decir, fluir en sentido contrario al que fue diseñado, produciendo inundaciones y riesgos potenciales de salubridad.

Los dos problemas inherentes a la operación de sistemas de drenaje combinados son el desbordamiento y la saturación, causantes principales de contra flujos e inundaciones. El problema de contra flujo no está relacionado directamente con la calidad del agua residual, está indirectamente incluido en este rubro debido a que compite por fondos para el control de problemas sobre la calidad del agua.

Un factor muy importante sobre el nivel de control de calidad de agua en sistemas de drenaje y alcantarillado combinados, es la calidad de los escurrimientos producto de agua de lluvia. Existen numerosos estudios que indican que la calidad de los escurrimientos superficiales en áreas urbanas causado por lluvias torrenciales, particularmente en áreas densamente pobladas, pueden estar altamente contaminadas por muchos de los componentes que se encuentran en el drenaje sanitario. Además, así como los componentes del drenaje sanitario se pierden en inundaciones, la mayoría de los contaminantes del escurrimiento superficial también se pierden.

Como resultado de la urbanización tradicional, se tienen efectos negativos en cuanto al rango y volumen de los escurrimientos superficiales ya que la superficie de terreno impermeabilizado por pavimentos, construcciones, azoteas, estacionamientos, etc., disminuye la capacidad de infiltración y almacenamiento del terreno natural, permitiendo la acumulación y posterior escurrimiento sobre la superficie impermeable del agua pluvial captada. Estos flujos son conducidos a alcantarillas pluviales, o en su caso a cauces naturales, los cuales no están adaptados a las avenidas extraordinarias, ni a su frecuencia. Los efectos de tal aumento son, el aumento de frecuencia de escurrimientos e inundaciones, que ocurren en las partes bajas de los arroyos de calles, en sistemas de drenaje urbano, así como el gran potencial de erosión que producen las altas velocidades de desagüe, lo que puede degradar la calidad del agua y contribuir a los cambios drásticos en la morfología de las cuencas urbanas.



Aún más, los grandes flujos y cambios de morfología amenazan el ecosistema de los cuerpos de agua a los que se descarga; el efecto es amplificado si el escurrimiento pluvial está, a su vez, contaminado. También es notable que la gran cantidad de superficies impermeables (pavimentos, construcciones, estacionamientos, azoteas, etc.) en áreas urbanas, contribuyen a otra forma de contaminación: aumento de los escurrimientos pluviales.

Los sistemas de alcantarillado han sido diseñados para conducir los escurrimientos superficiales directamente a caudales de agua. Esta práctica se basa en el principio de que, como el escurrimiento producto de lluvia se genera por agua pura, el escurrimiento a su vez es puro. Existen estudios en Estados Unidos que indican que no es el caso. El agua de lluvia atrapa contaminantes presentes en la atmósfera antes de caer al suelo. Una vez en la superficie, los escurrimientos pluviales erosionan áreas permeables y lavan superficies impermeables. El resultado es un escurrimiento contaminado.

Los sistemas de drenaje urbano se pueden remontar a los comienzos de la historia escrita de la humanidad. La disposición del agua de lluvia de áreas urbanas era motivada primordialmente por razones de conveniencia y la reducción del potencial daño a causa de inundaciones. La remoción de desechos domésticos se empezó a utilizar usando agua como conducto para deshacerse de ellos. Estas prácticas se implementaron para mejorar la calidad de la vida urbana, sin embargo, esto ha recaído en otros problemas, ya que es una corriente artificialmente inducida, aumenta la erosión así como la degradación ambiental, debida a la contaminación, generada a los cuerpos de agua en los que se descarga finalmente.

Como resultado, la atención se concentró en un manejo comprensivo de los sistemas de drenaje urbano, lo cual incluye, además de los conductos tradicionales, la implementación de cuerpos de almacenamiento y plantas de tratamiento así como el monitoreo en tiempo real de los sistemas completos. Ahora el objetivo es utilizar inteligentemente componentes de sistemas de drenaje



de manera que mejore la calidad de la vida urbana al mismo tiempo que se protege el ambiente a un costo razonable².

El diseño tradicional de los sistemas de drenaje pluvial ha sido para captar y conducir los escurrimientos producto de agua de lluvia tan rápido como sea aceptable a un lugar donde se pueda descargar. Mientras más áreas se urbanizan, este tipo de diseño puede resultar en mayores problemas de drenaje e inundaciones al final de la cadena del sistema. El impacto de desarrollo urbano incluye volúmenes de flujo, cada vez más grandes y rápidos, más altas velocidades, más altas temperaturas, flujos más bajos durante temporadas de secas, y más grandes volúmenes de contaminación³.

Los sistemas urbanos de drenaje han demandado grandes inversiones por años, incluso aún después de que se invierten grandes cantidades de capital para resolver problemas que se ha venido acarreado y que siguen aumentando con el aumento superficies impermeables. Los sistemas urbanos de drenaje tienen problemas de dos tipos. El primero esta relacionado con el manejo de cantidades considerables de agua e involucra los problemas del sistema de drenaje pluvial y de control de inundaciones asociado a sistemas sobrecargados. El segundo está relacionado al manejo de la calidad del agua e involucra los escurrimientos producto de la combinación de agua pluvial y sistemas de drenaje sanitario, que al combinarse y saturarse resultan en una degradación de la calidad del agua captada⁴.

Los primeros esfuerzos para controlar la contaminación se concentraban en controlar las descargas de aguas residuales industriales y las descargas de plantas de tratamiento de aguas residuales. Ahora se sabe que el control de los problemas de contaminación se debe expandir a los sistemas de alcantarillado.

Una nueva tendencia es la de disminuir la cantidad los escurrimientos pluviales permitiendo que el agua penetre a través de las capas superficiales del pavimento permeable y las capas subyacentes de soporte, dejando en las primeras dos pulgadas del suelo natural por debajo de la subbase los

² Cfr. BARRY J. ADAMS, FABIAN PAPA, op. cit., pg. 1. Traducción personal.

³ Cfr. THOMAS DEBO, ANDREW REESE, op. cit., pg. 605. Traducción personal.

⁴ Cfr. BARRY J. ADAMS, FABIAN PAPA, op. cit., preface xv. Traducción personal.



contaminantes que pudieran haberse lavado o disuelto en el agua; disminuyendo a su vez la carga hidráulica que ingresa al sistema de alcantarillado y la carga de contaminantes disueltos en los escurrimientos; mejorando a su vez la calidad del agua que se infiltra.

1.1.2 Del concreto permeable⁵

El concreto permeable se ha usado en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo:

- 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 las 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;
- Terraplenes de puentes;
- Plataformas alrededor 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;
- Revestimiento de muros para pozos de agua; y
- Arrecifes artificiales en donde la estructura abierta de concreto permeable asemeja la estructura de los arrecifes.

⁵ Concreto permeable, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 2008, pag. 3.



Típicamente, el concreto permeable no reforzado se usa en todas estas aplicaciones por el alto riesgo de corrosión del acero de refuerzo debido a la estructura porosa de este material.

En Edificios

El concreto permeable se ha venido usando en la construcción de edificios desde al menos a mediados del siglo XIX. El término concreto permeable se usa para describir el material, pero en las referencias, e históricamente, puede haber sido descrito como un concreto sin finos o un concreto de granulometría discontinua. Los países europeos han usado concreto permeable e diferentes maneras: muros colados en la obra para soportar cargas, en casas de uno o varios pisos y, en algunos casos, en edificios de gran altura; paneles prefabricados, y bloques curados al vapor. En 1852, el concreto permeable se usó por primera ocasión en la construcción de dos casas en el Reino Unido. Este concreto consistía en solamente grava gruesa y cemento. No se menciona en la literatura publicada, sino hasta 1923 cuando se construyó un grupo de 50 casas de dos pisos con agregado de clinker en Edimburgo, Escocia. A finales de los años 1930's, la Scottish Special Housing Association Limited adoptó el uso de concreto permeable para la construcción residencial. Para 1942, el concreto permeable se había usado ya para construir más de 900 casas.

La Segunda Guerra Mundial de 1939 a 1945 dejó a casi toda Europa con vastas necesidades habitacionales, lo que alentó el desarrollo de nuevos métodos, o que no se habían usado previamente en la construcción de edificios. De manera notable, entre estos estaba el concreto poroso. Este usaba menos cemento por volumen unitario de concreto, en comparación con el concreto convencional, y el material era ventajoso en donde la mano de obra era escasa o costosa. A través de los años, el sistema de concreto permeable contribuyó sustancialmente a la producción de nuevas casas en el Reino Unido, Alemania, Holanda, Francia, Bélgica, Escocia, España, Hungría, Venezuela, África Occidental, el Medio



Oriente, Australia y Rusia. En Alemania se usó este sistema debido a que la eliminación de grandes cantidades de escombros de ladrillos era un problema después de la guerra, llevando a la investigación de las propiedades del concreto permeable. En otros lugares, la demanda sin precedente de ladrillo, y la subsiguiente incapacidad de la industria de fabricación de ladrillos para garantizar una provisión adecuada, condujo a la adopción del concreto permeable como un material de construcción. Similarmente, en Escocia, entre 1945 y 1956, muchas casas se construyeron con concreto permeable. Esto se debió principalmente a la presencia de provisiones ilimitadas de agregado duro y la ausencia de buenos ladrillos para fachadas. El primer reporte sobre el uso de concreto permeable en Australia fue a principios del 1946.

Antes de la Segunda Guerra Mundial, la producción de concreto permeable estaba confinada a casas de dos pisos. Sin embargo, después de 1946 el concreto permeable se usó para un rango mucho más amplio de aplicaciones. Se especificó como un material para elementos de soporte de cargas en edificios de hasta 10 pisos de alto.

El concreto permeable se usó extensivamente para edificios industriales, públicos y domésticos en áreas al norte del Círculo Ártico debido a que el uso de los materiales tradicionales de construcción probó no ser práctico.

Aunque el concreto permeable se ha venido usando en Europa y en Australia durante los últimos 60 años, su uso como un material de construcción en América del Norte ha sido extremadamente limitado. Una razón para este uso limitado es que, después de la Segunda Guerra Mundial, América del Norte no experimentó la escasez de materiales en el mismo grado que en Europa.

En Canadá, el primer uso reportado del concreto permeable fue en 1960. El concreto permeable se usó en la construcción de algunas casas en Toronto. También se usó en un elemento no estructural en un Edificio Federal en Ottawa.



En Pavimentos

Uno de los usos más característicos del concreto es en los pavimentos, ya sea en calles, estacionamientos, carreteras, etc. Un pavimento es una superficie artificial, mejorada para que sirva de superficie de rodamiento a vehículos para los cuales fue diseñado. Las superficies pavimentadas son tan reconocibles en áreas urbanas de nuestros días que la mayoría de nosotros no le tomamos mucha importancia al impacto que tienen sobre la calidad del agua y el medio ambiente. Mientras más área de terreno sea pavimentada, una cantidad mayor de agua pluvial terminará cayendo sobre superficies pavimentadas como estacionamientos, cocheras, banquetas y calles, en lugar de filtrarse al subsuelo.

Los pavimentos son algo muy común en nuestra vida diaria, particularmente en áreas urbanas. Se puede decir que los pavimentos son las estructuras más construidas por el hombre, después de la vivienda y sistemas de servicios públicos. El desarrollo que han tenido hasta nuestros días la población, los desarrollos industriales y desarrollos habitacionales mantienen a la par la construcción de pavimentos, sin embargo uno de los principales problemas de los pavimentos es que no permiten el paso del agua de lluvia al subsuelo. Dos terceras partes del total de las lluvias que caen en superficies impermeables y que podrían potencialmente abastecer las cuencas o mantos acuíferos en zonas urbanas, caen en pavimentos.

Los pavimentos permeables son diseñados para permitir el paso de aire y agua a través de ellos. Si se usan apropiadamente, estos pavimentos pueden facilitar la biodegradación de algunos aceites y grasas, disminuir la temperatura urbana, rellenar mantos acuíferos, permitir a las raíces de los árboles obtener los nutrientes necesarios, evitar que el agua de lluvia se desperdicie, incluyendo la magnitud y frecuencia de inundaciones repentinas.

Las ventajas de los pavimentos hechos de concreto permeable sobre los pavimentos hechos de concreto convencional incluyen:

- El control de la contaminación de las aguas pluviales;



- Mayores facilidades para estacionamientos al eliminar la necesidad de áreas de contención de agua;
- Control del escurrimiento de aguas pluviales;
- Reducción del hidroplaneo sobre la superficie de carreteras y autopistas;
- Creación de un impulso adicional de elevación a los aviones durante el despegue por el efecto de enfriamiento;
- Reducción del deslumbramiento sobre las superficies de carreteras en alto grado, particularmente cuando están mojadas por la noche;
- Reducción del ruido de interacción entre la llanta y el pavimento;
- Eliminación o reducción de las dimensiones de las alcantarillas pluviales; y
- Posibilidad de que el aire y el agua alcancen las raíces de los árboles, aún con el pavimento dentro del canal para riego de los árboles.

El éxito de los sistemas de pavimento permeable ha sido variado. En algunas áreas, los sistemas de pavimento de concreto permeable se han aplicado exitosamente, mientras que en otros, se han taponado en un corto tiempo. Muchas fallas pueden atribuirse a la inexperiencia del contratista, a una compactación del suelo más alta de la especificada, y al diseño inapropiado según el sitio.

Los pavimentos de concreto permeable tienen la propiedad de permitir el flujo horizontal y vertical del agua pluvial, mantiene las capas subyacentes de agregado grueso en confinación, cuentan con un contenido de huecos que facilita el almacenamiento del agua para que posteriormente sea infiltrada al suelo natural, evitando de esta manera el escurrimiento superficial. Esta alternativa del manejo de escurrimientos pluviales permite recargar los mantos freáticos, mantener el ciclo hidrológico (interrumpido por la urbanización), preservar acuíferos, reducir escurrimientos pluviales y remover algunos de los contaminantes más comunes disueltos en los escurrimientos pluviales.

La utilización del concreto permeable como pavimento puede disminuir el volumen de escurrimiento pluvial para minimizar los impactos de contaminación y aumentar la infiltración del agua pluvial hacia los mantos acuíferos, mejorando la calidad del agua. Disminuyendo las necesidades de grandes sistemas de drenaje



pluvial y alcantarillas, reduciendo a su vez, los altos costos que requieren la planeación, la construcción y el mantenimiento de los sistemas tradicionales de drenaje pluvial.

1.2 Problema

Los sistemas de drenaje pluvial son planeados para disponer de manera adecuada los escurrimientos pluviales que se originan durante las precipitaciones. Estos sistemas tienen problemas con la cantidad de agua que es ingresada a sus conductos, así como con el acarreo de los contaminantes disueltos en los escurrimientos, si no se tiene un adecuado diseño.

Así como el agua potable puede ser filtrada para remover las impurezas, las partículas de suelo filtran el agua de lluvia a través de las capas permeables en su camino hacia los mantos acuíferos. Este importante paso en el proceso natural de purificación del agua es interrumpido cuando el agua de lluvia cae sobre pavimentos con superficies impermeables y es conducida por los sistemas de drenaje.

Los problemas de los escurrimientos urbanos son de dos tipos, diferentes pero muy relacionados entre sí, a su vez: la cantidad, o volumen de escurrimiento y la calidad de los escurrimientos.

La construcción de pavimentos impermeables crea un desnivel en el ecosistema natural y lleva a graves problemas a largo plazo en los cuales se incluyen la erosión, aumento de escurrimientos superficiales, inundaciones repentinas, disminución de agua en mantos acuíferos, contaminación de ríos, lagos y costas a medida que el agua pluvial que corre a través de superficies pavimentadas levanta y se mezcla con otros materiales.

El concreto permeable se ha implementado en la construcción de pavimentos para ayudar a reducir los problemas de escurrimientos superficiales, específicamente de cantidad y calidad del agua, que se tienen en los sistemas de drenaje pluvial y combinado. Pero su utilización es causa de críticas debido a que



aproximadamente el 75% de los pavimentos permeables fallan por un inadecuado diseño o construcción.

1.3 Hipótesis

La implementación de concretos permeables como superficies pavimentadas que permitan el paso del agua al subsuelo es una manera de reducir los problemas de drenaje superficial urbano. Si se construyen pavimentos de concreto permeable en lugar de construirlos con concreto convencional se tiene la posibilidad de retener el agua pluvial, disminuir la contaminación y rellenar los sistemas de cuencas o acuíferos naturales.

Una estrategia adecuada para la disminución de los escurrimientos superficiales, es la incorporación integral a los sistemas de drenaje y alcantarillado, de sistemas que reduzcan los volúmenes de escurrimientos, minimicen la erosión y la contaminación de escurrimientos, así como las inundaciones repentinas producto de precipitaciones. Un sistema que tiene las características adecuadas para su integración a los sistemas de drenaje y alcantarillado es la utilización de pavimentos de concreto permeable que permiten la infiltración del agua de lluvia al subsuelo y evitan la acumulación del escurrimiento en vías de comunicación, así como la disminución de cargas de contaminantes disueltas en los escurrimientos que ingresan a los sistemas de drenaje pluvial.

1.4 Objetivos

El presente estudio tiene como objetivo:

Recabar y analizar información disponible de fuentes primarias y secundarias, sobre la utilización de concreto permeable, que proporcionen un aspecto más amplio en el diseño y construcción de elementos de infiltración que permitan el control de escurrimientos superficiales. Para así; proporcionar una



guía básica de las características y propiedades del concreto permeable, así como también verificar el comportamiento satisfactorio del mismo; crear una imagen más amplia de la planeación, diseño y construcción de superficies de pavimento permeable para que pueda adecuarse a los sistemas integrales de drenaje y alcantarillado.

1.5 Alcances

El trabajo de investigación es del tipo descriptivo, el cual se enfoca principalmente en el análisis bibliográfico de los sistemas de drenaje urbano, los escurrimientos pluviales y el concreto permeable. Con ello se pretende dar difusión a este nuevo concreto, para que sea ampliamente conocido por Ingenieros, Arquitectos y Técnicos de la construcción. Quedando abierta la posibilidad para posibles líneas de investigación, por ser éste, un producto innovador, con un desarrollo en aumento en estos últimos años.



CAPITULO 2

CONTROL DE ESCURRIMIENTOS URBANOS



Introducción Capitular 2

El capítulo número 2 trata de dar una imagen más amplia sobre los esfuerzos que se han hecho para el control de escurrimientos urbanos. Mencionando los problemas de los drenajes sanitarios y pluviales debido a la carga de contaminantes acarreada por los escurrimientos superficiales producto de pavimentos convencionales. Se realiza una mención breve de las estrategias de control que se aplican a los sistemas combinado y pluvial: control de afluentes, control de sistemas reguladores y control de captación o sistemas de tratamiento.

Se hace referencia a técnicas de almacenamiento, obras de detención y retardo de escurrimientos, además de mencionar sus ventajas y desventajas al ser aplicadas para el control de escurrimientos. También se mencionan los objetivos del manejo de las cantidades de agua pluvial por medio de dichas obras.

Ya que este trabajo de investigación se concentra en el estudio de pavimentos de concreto permeable se hace un reconocimiento de las diferentes estructuras de control de escurrimientos existentes mediante superficies filtrantes. Tratando de ampliar la visión de los diseñadores y constructores de dichas estructuras de control exponiendo las características del uso de cada una de estas para un ambiente urbano. Dándole significativa importancia a la disminución de escurrimientos superficiales mediante eliminación local.

Siendo el concreto permeable una opción de control de afluentes, el cual permite almacenar y retardar el escurrimiento pluvial así como facilitar la infiltración al subsuelo. Se realiza una mención breve de las características de este concreto.



2.1 Estrategias para el Control de Esgurrimientos Urbanos

Existen varias estrategias de control para la reducción o mitigación de problemas en drenaje urbano y control de esgurrimientos. La mayoría abarca problemas específicos y por lo tanto provee soluciones parciales. Una estrategia a seguir para el control de la cantidad y la calidad del drenaje urbano sería el hacer énfasis en la adecuada planeación y diseño de sistemas de drenaje que permitan una menor afectación por contaminantes.¹

Los problemas de los sistemas combinados son los contaminantes producto de la erosión continua y el lavado de áreas permeables, así como drenajes sanitarios e industriales, con sus problemas de contra flujo y saturación.

Los problemas de los sistemas de alcantarillado se relacionan con los contaminantes producto de la erosión continua y el lavado de residuos de superficies impermeables y con las conexiones ilegales o filtraciones de drenes sanitarios e industriales, los cuales son típicamente transportados sin tratamiento previo. Además, las descargas del sistema de alcantarillado deben ser controladas para reducir la velocidad de descarga a los cuerpos de agua en los que se deposita, para mitigar el potencial de inundación y erosión de su cauce.

2.1.1 Control de Afluentes

Debido a que el proceso para conocer el desempeño de los sistemas combinado y pluvial, es el mismo, muchas opciones de control son comunes en ambos sistemas. Estos son: control de afluentes, control de sistemas reguladores y control de captación ó sistemas de tratamiento.

¹ Cfr. BARRY J. ADAMS, FABIAN PAPA, op. cit., pág. 20. Traducción personal.



El control de afluentes busca reducir la cantidad de escurrimiento de agua de lluvia mediante el aumento de la permeabilidad y la capacidad de almacenamiento de la obra de captación y mejorar la calidad del agua que escurre previniendo que los contaminantes entren al sistema de alcantarillado. Mediante la reducción de la cantidad de escurrimiento que penetre los sistemas de drenaje, son reducidas a su vez, las probabilidades de saturación y desbordamientos. Las técnicas de control de afluentes son aplicables a ambos sistemas de drenaje.

Barrer y limpiar las superficies que entran en contacto con los escurrimientos puede ser una manera efectiva de reducir la masa disponible de contaminantes por absorción, erosión o por lavado del agua pluvial². El uso de pavimentos permeables permite la infiltración de agua a una base granular, y consecutivamente es infiltrada al subsuelo. Además de reducir los volúmenes de escurrimiento, los pavimentos permeables son capaces de remover algunos contaminantes. Los químicos tóxicos y nutrientes que contienen los escurrimientos pluviales urbanos pueden reducirse limitando el uso de fertilizantes, pesticidas y herbicidas en los hogares. La adecuada disposición de sedimentos, que comúnmente se pierden en las construcciones, puede ser implementada para mitigar la contaminación.

Retardar el flujo del escurrimiento, antes de que entre al sistema de drenaje, mediante la incorporación de zanjas que no permitan el acceso directo al drenaje, reduciendo la capacidad de las alcantarillas para que el escurrimiento tenga la oportunidad de infiltrarse en áreas de superficies que contengan pavimentos permeables como andadores, banquetas, estacionamientos y reteniendo el agua en contenedores reguladores de infiltración, son métodos comunes usados para disminuir el volumen total del escurrimiento, ya que aumenta la oportunidad de infiltración.

La implementación de controles de afluencia es económicamente más factible que los tratamientos tradicionales de las aguas residuales, especialmente en áreas urbanas. Las técnicas de control de afluentes pueden ser diseñadas

² SUTHERLAND and JELEN, *Advances in Modeling the Management of Stormwater Impacts*, Prentice Hall, 1990, pg 179



especialmente para satisfacer las necesidades del lugar, ya que los contaminantes emanados dependen del uso de la tierra; por ejemplo los pavimentos contribuyen típicamente más metales pesados, y los parques contribuyen con nutrientes. Las estrategias de control de afluencias ofrecen una solución parcial a los problemas, asociados con el drenaje, de los escurrimientos urbanos.

2.1.2 Control del Sistema Colector

Muchos controles del sistema colector son comunes en ambos, el sistema combinado de drenaje y el sistema de alcantarillado, como el mantenimiento regular de conductos, así como también las técnicas de reducción del flujo, que puede ser implementado para la reducción de la magnitud de la saturación.

Las técnicas de reducción de flujo reducen las cantidades de infiltración y conducción de escurrimientos hacia el sistema de drenaje, de esta manera disminuyen la sobrecarga del drenaje sanitario y los problemas de saturación. Sistemas de alcantarillado con tuberías permeables filtran el flujo que conducen al subsuelo mientras es conducido por gravedad dentro de la tubería. Estos sistemas reducen los volúmenes de escurrimiento y proveen la remoción de contaminantes; sin embargo, su efectividad depende de las características del suelo en el que se encuentran, las características de los sólidos suspendidos en el escurrimiento y el mantenimiento de las tuberías.

2.1.3 Control de Almacenamiento y Tratamiento

Las obras de almacenamiento y las plantas de tratamiento son construidas para tomar ventaja de la economía de escalas. Las obras de almacenamiento pueden ser diseñadas para el control de calidad del agua por medio del tratamiento de las descargas del sistema de drenaje.



2.2 Técnicas de Almacenamiento, Obras de Detención y Retardo de Esgurrimientos.³

Bajo condiciones favorables, el almacenamiento temporal de una gran cantidad del escurrimiento puede disminuir el volumen del caudal y por lo tanto el costo de los sistemas de conducción. Las obras de detención o retardo pueden ser desde pequeñas obras en estacionamientos hasta grandes lagos y embalses.

2.2.1 Obras de Almacenamiento.

El uso de estas construcciones se ha incrementado en los años recientes, los beneficios que proveen pueden ser divididos en dos grandes categorías, control de calidad y control de cantidad.

Controlar la cantidad de escurrimientos usando obras de acumulación puede proveer de los siguientes beneficios potenciales:

- Prevenir y reducir el aumento de la relación de escurrimientos altos causados por desarrollos urbanos.
- Mitigar los problemas de la capacidad de drenaje al final del sistema.
- Recargar los mantos acuíferos.
- Reducir o eliminar la necesidad de embalses o plantas de descarga.

Controlar la calidad de escurrimientos usando obras de acumulación puede proveer de los siguientes beneficios potenciales:

- Disminución de la erosión, por medio del control de la velocidad y reducción del flujo.
- Reducción de la contaminación por sedimentación, reacción química y mecanismos biológicos.
- Mejorar las condiciones de flujo en temporada de secas.

³ Cfr. DEBO THOMAS, REESE ANDREW, op. cit., pg. 608. Traducción personal.



- Mostrar beneficios estéticos y ecológicos.
- Controlar la sedimentación.
- Mejorar la calidad del agua filtrando el agua pluvial.

Los objetivos del manejo de la cantidad de agua pluvial por medio de obras de acumulación están comúnmente basados en la limitación de altos volúmenes de escurrimientos y se relacionan con uno o más de los siguientes valores:

- Relaciones históricas para condiciones específicas de diseño.
- Capacidad segura de descarga del sistema de drenaje.
- Un valor específico para la descarga permisible regulada por las normas actuales.

2.2.2 Tipos de Obras de Almacenamiento.

Existen varias aplicaciones para reducir o retardar los escurrimientos pluviales. Estas son pensadas para proveer de diferentes opciones a quienes producen y operan los diseños sobre el manejo de aguas pluviales. Los desarrollos urbanos tienen grandes impactos sobre la hidrología. Las corrientes en áreas urbanas no se asemejan a las corrientes rurales. Pero estas corrientes no tienen porque ser líneas alargadas y estériles por causa de la erosión.

Los operadores de sistemas de drenaje y alcantarillado están en una posición que les permitiría cambiar su manera de pensar sobre el manejo de las precipitaciones y ocuparse del agua pluvial desde el momento en que toca la superficie hasta el momento en que abandona la jurisdicción municipal.

Así como la contaminación es la suma de actos mínimos de irresponsabilidad, las inundaciones urbanas y la erosión son el resultado de muchas elecciones de infraestructura. Muchos gobiernos han aprendido a lidiar con el problema y responder con los cambios necesarios que consideran la lluvia como un recurso y a las corrientes superficiales como fuentes fortalecedoras de las comunidades.



2.2.3 Ventajas y Desventajas de las Medidas para Reducir y Retardar los Ecurrimientos Pluviales.⁴

Nuestro estudio estará basado en el pavimento permeable, por lo que concentraremos nuestra atención en las principales propiedades de filtración de este material. Sin demeritar los estudios detallados sobre otros sistemas de control de escurrimientos producto de agua pluvial y sus discusiones disponibles sobre las ventajas y desventajas de cada método.

La tabla 2.1 nos da una idea de las maneras posibles en las que se pueden reducir o retardar los escurrimientos pluviales. Ésta se provee para que se amplíe la visión de los diseñadores cuando se trata del manejo de escurrimientos pluviales.

Medidas	Ventajas	Desventajas
Cisternas y lagunas cubiertas	Usos alternativos para agua captada Ocupa pequeñas áreas La cubierta tiene usos alternativos Conservación del agua	Instalación cara Capacidad reducida Acceso restringido para mantenimiento
Espacios abiertos y áreas verdes	Agradable estéticamente Remoción de contaminación Rentable	Disponibilidad de terreno Problemas de aceptación pública si no se hace correctamente Dificultades por seguridad
Acumulaciones verde-azules	Usos múltiples Aceptación pública alta Agradable estéticamente Usualmente rentable	Dificultad para encontrar sitios adecuados Dificultades especiales de mantenimiento Podría ser peligroso
Acumulación en techos	Retraso de escurrimientos Efecto refrescante en edificios Posible protección contra incendios	Aumento de peso estructural Posibilidad de taponamientos si existen árboles cerca Problemas de congelamiento Filtraciones en techos
Lagunas superficiales	Buen control en áreas grandes Puede ser agradable estéticamente Usos múltiples Provee hábitat acuático Puede incrementar el valor del suelo	Requiere áreas grandes Posible contaminación y eutroficación Área de infección (posible) Puede convertirse en molestia urbana Dificultades por seguridad

⁴ Ibid.



Aumento de rugosidad en techos-ondulaciones y gravilla	Reducción de la contaminación Retardo de escurrimientos	Posibles problemas de mantenimiento Costo y aumento de peso estructural
Pavimento permeable, grava y bloques de pavimento	Potencial de reducción de escurrimientos Recarga de mantos acuíferos La grava es más barata Reducción de la contaminación	Costo y mantenimiento Taponamiento o posible compactación Contaminación de mantos acuíferos Eleva las posibilidades de congelamiento Pueden crecer césped y raíces
Canales y zanjas cubiertas de césped, estrías con vegetación	Retraso del escurrimiento Algo de reducción del escurrimiento Agradable estéticamente Reducción de la contaminación	Pérdida de terreno Aumento de mantenimiento
Lagunas impermeables	Retraso del escurrimiento Reducción de la contaminación	Se restringen otros usos cuando llueve Daños por humedad y congelamiento Problemas de sedimentos
Instrumentos de infiltración	Reducción de escurrimientos Recarga de mantos acuíferos Poca pérdida por evaporación Reducción de la contaminación Conservación del agua	Taponamientos Costo inicial Contaminación de mantos acuíferos

Tabla 2.1 Ventajas y desventajas de las medidas para reducir y retardar los escurrimientos

2.3 Estructuras de Control de Escurrimientos Mediante Superficies Filtrantes.

Estos sistemas remueven los contaminantes mediante el proceso de filtración natural del subsuelo y la reducción del volumen de escurrimiento. Estos sistemas generalmente conducen los escurrimientos al subsuelo por filtración.

Existen otros sistemas especializados que son prefabricados y requieren ingeniería mas sofisticada, los cuales comprenden una serie de mecanismos de eliminación y son usados en áreas pequeñas, áreas industriales, o en aplicaciones especiales.

Aunque las medidas mencionadas a continuación pueden ser usadas individualmente para remover contaminantes, puede ser aprovechable la combinación de dos o más de estas estructuras para obtener ventajas como:



- Incremento de la vida operacional de una estructura de control.
- Incremento en la efectividad de eliminación de contaminantes.
- Sobrellevar cualquier factor de limitación que ofrezca el lugar.

La combinación de estructuras de control de escurrimientos superficiales causados por lluvia es limitada solo por la necesidad de emplear medidas de efectividad probada y que cumplan las normas locales y requisitos del lugar de colocación.

2.3.1 Filtros de Arena

Los filtros de arena son de cámaras múltiples o estructuras diseñadas para su aplicación en superficie para tratar el escurrimiento superficial mediante filtración, usando una cama de arena como su filtrante principal; el escurrimiento filtrado puede ser regresado al sistema de drenaje combinado o pluvial, o parte del escurrimiento puede filtrarse al subsuelo.

2.3.2 Zanjas de Infiltración

Una zanja de infiltración es una excavación alargada, llenada con grava gruesa, usada para capturar y permitir la infiltración del escurrimiento agua de lluvia al subsuelo desde las paredes y el fondo de la excavación.

2.3.3 Filtros Orgánicos

Los filtros orgánicos son filtros superficiales de arena donde materia orgánica, como compostas de hojas de árbol, sirven de material filtrante, este



material permite la eliminación de algunos contaminantes como metales pesados; debido a su alto mantenimiento, solo deben ser usados en ambiente que garanticen un uso adecuado.

2.3.4 Filtros de Arena Bajo Tierra.

Estos sistemas de filtros de arena son localizados bajo tierra por razones de espacio. Estos sistemas solo pueden ser considerados para áreas con extremadamente altas densidades o sitios con espacio limitado.

2.3.5 Superficies Permeables.

Las superficies permeables son superficies de pavimento permeable con capas subyacentes de grava para almacenar temporalmente el escurrimiento superficial antes de que se infiltre al subsuelo; concreto permeable, es el termino dado a la mezcla de agregado grueso, cemento Pórtland y agua que permite la rápida filtración del agua; los sistemas modulares de pavimento poroso consisten en unidades de pavimento de alto contenido de vacíos sobre una capa de grava; los sistemas de concreto permeable y de pavimento poroso proveen beneficios sobre el control de calidad de agua y cantidad de escurrimiento, sin embargo, requieren un alto mantenimiento y tienen un alto grado de falla.

2.3.6 Asfalto Permeable.

Las superficies de asfalto permeable son fácilmente taponadas por arcillas, limos y aceites, resultando en una carga potencial de alto mantenimiento para mantener la efectividad de esta estructura de control; aún mas, el calor del verano en ciertas localidades puede causar el derretimiento del asfalto, destruyendo las propiedades porosas de la superficie.



2.4 Tipos de Dispositivos para la Disminución de Escurrimientos Mediante Eliminación Local.

La propiedad que tiene el suelo para absorber el agua pluvial depende de factores como:

- Cubierta vegetativa.
- Tipo y condiciones del suelo.
- Condiciones de los mantos acuíferos.
- Calidad del agua pluvial.

Cada que la precipitación toca el suelo, cierta cantidad del agua se infiltra en el suelo. El proceso en el cual el agua contenida en el suelo se mueve hacia abajo de las capas de suelo se llama infiltración. Movimientos de otra índole son llamados flujos de mantos acuíferos. Las capas superiores están influenciadas por el intemperismo, por lo que pueden estar flojas o se sueltan por factores externos y son relativamente porosas.

En suelos arcillosos, las capas superiores pueden tener algo de porosidad en la forma de cavidades o fracturas, pero las capas subyacentes son impermeables. Como resultado, las áreas que contienen grandes porcentajes de arcillas no son candidatos para la eliminación local por dispositivos que usen como medio la infiltración.⁵

2.4.1 Pavimentos Permeables.

El termino pavimento permeable describe básicamente tres tipos de superficies pavimentadas diseñadas para minimizar el escurrimiento superficial. El pavimento asfáltico poroso y el pavimento de concreto permeable son construidos similarmente al pavimento convencional, la diferencia básica es que la arena y la

⁵ URBONAS BEN, STAHERE METER, Stormwater Best Management Practices and Detention, Prentice-Hall, 1993, pgs. 7,8,21-25. Traducción personal.



fracción de finos en los agregados no son utilizados en la mezcla para pavimento. Además, el pavimento es colocado generalmente arriba de una sustancial capa de base granular.

Otro tipo de pavimento permeable es el que se construye con bloques de concreto modulares interconectados con celdas abiertas. Los bloques son colocados sobre una gruesa capa de grava uniforme, la cual a su vez, esta colocada sobre un geotextil que funciona como filtro y que previene que los suelos subyacentes emigren hacia la base granular. Si este pavimento es diseñado para eliminación local debe tener un espesor no menor de 1.2 m. por debajo de la superficie del pavimento.

El uso de pavimentos permeables no es exclusivo de lugares donde se requiere eliminación local por medio de infiltración. Ya que también puede usarse como medio de detención o acumulación de escurrimientos para su posterior disposición con la implementación de otros tipos de instalaciones que complementen su operación.

Los pavimentos permeables ofrecen otra alternativa para la disposición o eliminación local, así como detención y acumulación de escurrimientos pluviales. En efecto reduce o modifica la impermeabilidad superficial de cauces urbanos conectados directamente.

Cuando se colocan correctamente los pavimentos de bloques de concreto celular interconectados, experimentan un mejor registro de servicio bajo cualquier condición, aún cuando se sella más lento que los concretos permeables continuos. Sin embargo, algunos bloques individuales se pueden desalinearse una vez colocados debido al tráfico vehicular pesado. Como resultado, este tipo de pavimento es usado únicamente en estacionamientos.



2.4.2 Disminución de Superficies Impermeables Directamente Conectadas.

La disminución de superficies impermeables directamente conectadas es un proceso que ayudaría a reducir el escurrimiento superficial. Requiere el aislamiento de los escurrimientos superficiales del cauce hidráulico, con respecto a otras superficies impermeables adyacentes lo más que se pueda. Como resultado, el escurrimiento se verá forzado a pasar sobre superficies permeables, aumentando la posibilidad de infiltración antes de llegar a una alcantarilla o conducto. Así, la infiltración al suelo del agua de lluvia es aumentada, y los sólidos suspendidos junto con otros contaminantes son reducidos por el contacto con capas vegetativas.



CAPITULO 3

TECNOLOGÍA DEL CONCRETO PERMEABLE



Introducción Capitular 3

Siendo el concreto permeable una propuesta de utilización en pavimentos para la disminución de escurrimientos superficiales y el riesgo de inundaciones repentinas a causa de precipitaciones, se hace referencia a sus características generales, a los materiales con que es elaborado este concreto además de sus propiedades de resistencia, que aunque se ha usado el concreto permeable por más de 20 años existen pocas investigaciones para determinar su desempeño después de la elaboración. También se muestra los componentes de la mezcla, generalidades y criterios para su trabajabilidad y uso satisfactorio.



3.1 Generalidades

Aunque el uso del concreto permeable se ha venido usando con más frecuencia en años recientes, hay una muy limitada experiencia en cuanto sus estudios prácticos. Según la Agencia de Protección al Ambiente (EPA) de los Estados Unidos, aquellos lugares donde se ha colocado concreto permeable han tenido aproximadamente un 75% de fallas. Estas fallas han sido atribuidas principalmente al diseño, técnicas inadecuadas de construcción, suelos con baja permeabilidad, tráfico vehicular pesado y muy poco mantenimiento. Otros investigadores han encontrado muchos sitios que han funcionado correctamente, por lo que se esperan nuevos resultados en los próximos años¹

El concreto permeable, también conocido como concreto poroso, de granulometría discontinua, ó de alta porosidad, consiste principalmente en cemento Pórtland normal, agregado grueso de tamaño uniforme y agua. Esta combinación forma una aglomeración de agregados gruesos rodeados por una delgada capa de pasta de cemento endurecida en sus puntos de contacto. Esta configuración produce grandes huecos entre el agregado grueso, que permite que el agua se filtre en una cantidad mucho más alta que en el concreto convencional.

El concreto permeable tiene poco, o nada de agregados finos en la mezcla; contiene grandes porcentajes de huecos conectados entre sí, que permiten el paso rápido del agua a través de la masa de concreto.

La capa de concreto tiene una alta permeabilidad, frecuentemente es muchas veces más permeable que el suelo que lo soporta y permite la rápida filtración de agua de lluvia a través de la superficie hacia las capas subyacentes.

El volumen de vacíos en el concreto permeable es de entre 15% y 22%, comparado con un 3-5% para pavimentos convencionales. La superficie

¹ DEBO THOMAS, REESE ANDREW, op. cit., pg. 872. Traducción personal.



permeable se coloca sobre una capa de grava. Los espacios libres entre las piedras actúan como un almacén para los escurrimientos².

3.2 Los Materiales

El concreto permeable, también conocido como concreto poroso, de granulometría discontinua, o de alta porosidad, consiste principalmente en cemento Pórtland normal, agregado grueso de tamaño uniforme y agua. Esta combinación forma una aglomeración de agregados gruesos rodeados por una delgada capa de pasta de cemento endurecida en sus puntos de contacto. Esta configuración produce grandes huecos entre el agregado grueso, que permite que el agua se filtre en una cantidad mucho más alta que en el concreto convencional. El concreto permeable tiene poco, o nada de agregados finos en la mezcla. El porcentaje de huecos conectados entre sí permite el paso rápido del agua a través de la masa de concreto.

3.2.1 Los Agregados

Las granulometrías del agregado usado en el concreto permeable típicamente son, ya sea de agregado grueso de un solo tamaño o granulometría de entre 3/4 y 3/8 de pulgada (19 y 19.5 mm). Los agregados redondeados y triturados han sido usados para hacer concreto permeable y deben satisfacer los requisitos de ASTM D 448 y C 33. Típicamente, los agregados finos no deben ser usados en mezclas de concreto permeable, ya que ellos tienden a comprometer la capacidad de conexión del sistema de poros³.

² Ibid. Traducción personal.

³ Concreto permeable, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 2008, pg. 9



3.2.2 El Agua

La calidad del agua para el concreto permeable está gobernada por los mismos requisitos que para el concreto convencional. Los concretos permeables deben ser proporcionados con una relación agua-cemento (w/a) relativamente baja (0.30 a 0.40), ya que una cantidad excesiva de agua conducirá a drenar pasta y al atascamiento del sistema de poros. La adición de agua, por lo tanto, tiene que ser vigilada cuidadosamente en el campo.

3.2.3 El Cemento

El cemento Pórtland que satisface las normas ASTM C 150, C 595, o C 1157, se usa como aglomerante principal. También pueden usarse materiales suplementarios como la ceniza volante, el cemento de escoria, y el humo de sílice, los cuales deben de satisfacer los requisitos de ASTM C 618, C 989, y C 1240, respectivamente⁴.

Una mayor dosis de cemento generará un concreto más resistente, pero demasiado cemento disminuirá el porcentaje de vacíos interconectados en el concreto, perdiendo este su capacidad de infiltración. Es recomendable utilizar una dosis que fluctúe entre los 270 a 415 kg/cm³, según requisitos de resistencia y permeabilidad.

3.2.4 Los Aditivos

Los aditivos deben de satisfacer los requisitos de ASTM C 494. Los aditivos reductores de agua (de alto o mediano rango) se usan dependiendo de la relación w/c . Los aditivos retardadores se usan para estabilizar y controlar la hidratación del cemento. Con frecuencia se prefieren los aditivos retardadores cuando se está

⁴ Ibid.



tratando con mezclas rígidas, tales como concreto permeable, especialmente en aplicaciones en clima cálido. Los aditivos retardadores pueden actuar como lubricantes para ayudar a descargar el concreto desde una mezcladora, y pueden mejorar el manejo y las características de desempeño en el lugar. Los aceleradores pueden ser usados cuando se están colocando concretos permeables, pero pueden ser usados en ambientes susceptibles de congelación y deshielo. Sin embargo, no existe un método confiable para cuantificar el volumen de aire incluido en estos materiales⁵.

3.3 Propiedades

Las varias propiedades de resistencia del concreto permeable dependen del contenido del material cementante, la relación de agua-material cementante (w/cm), el nivel de compactación, la granulometría y calidad del agregado.

Aunque por más de 20 años se ha usado concreto permeable para pavimentos en los Estados Unidos, solo se han llevado a cabo algunas investigaciones para determinar su desempeño.

Estas investigaciones se han basado principalmente en pruebas de laboratorio obteniéndose pocos datos de las instalaciones de campo reales. Actualmente, existen pocos procedimientos estándar para fabricar y ensayar especímenes de concreto permeable en el laboratorio o en el campo.

3.3.1 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión del concreto permeable se ve afectada fuertemente por la proporción de la matriz y el esfuerzo de compactación durante la colocación. Esto fue demostrado por una serie de pruebas de laboratorio hechas en 1988 por Meininger, donde se mostró la relación entre la resistencia a compresión del concreto permeable y el contenido de vacíos (Fig. 4.1). Se usaron

⁵ Ibid.



dos tamaños de agregado grueso y se variaron el esfuerzo de compactación y la granulometría del agregado. La prueba mostró resistencias a compresión relativamente altas de las mezclas de concreto permeable.

También existe una relación entre la resistencia a compresión del concreto permeable y el peso volumétrico. Demostrado por otra serie de pruebas de laboratorio en donde se usó un tamaño de agregado grueso y se variaron el esfuerzo de compactación y la relación de agregado-cemento (Fig. 4.2).

Aunque la relación w/cm de una mezcla de concreto permeable es importante para el desarrollo de la resistencia a compresión y la estructura de los huecos, la relación entre la w/cm y la resistencia a la compresión del concreto convencional no es significativa. Una alta relación w/cm puede dar como resultado que la pasta fluya desde el agregado y llene los huecos de la estructura. Una baja relación w/cm puede dar como resultado una adherencia reducida entre las partículas del agregado y problemas de colocación. La experiencia ha demostrado que una w/cm de 0.26 a 0.45 proporciona un buen (re)cubrimiento del agregado y estabilidad de la pasta.

El contenido total de material cementante de una mezcla de concreto permeable es importante para el desarrollo de la resistencia a compresión y la estructura de huecos. Un alto contenido de pasta dará como resultado una estructura de huecos (rellenos) llena y, consecuentemente, porosidad reducida. Un contenido insuficiente de material cementante puede dar como resultado una capa reducida de pasta envolviendo al agregado y resistencia a la compresión reducida (Fig. 4.3). El contenido óptimo de material cementante depende grandemente del tamaño y la granulometría del agregado.

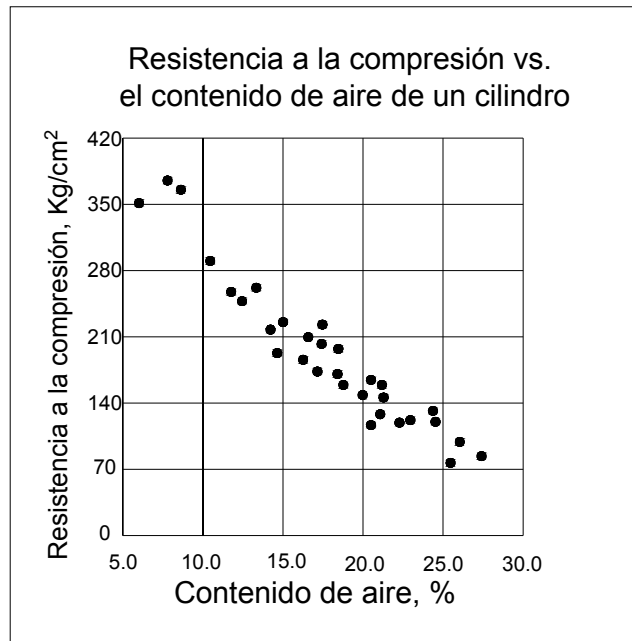


Fig. 4.1- Relación entre el contenido de aire y la resistencia a compresión para el concreto permeable (Meininger 1988)(1 $psi = 0.006895MPa$).

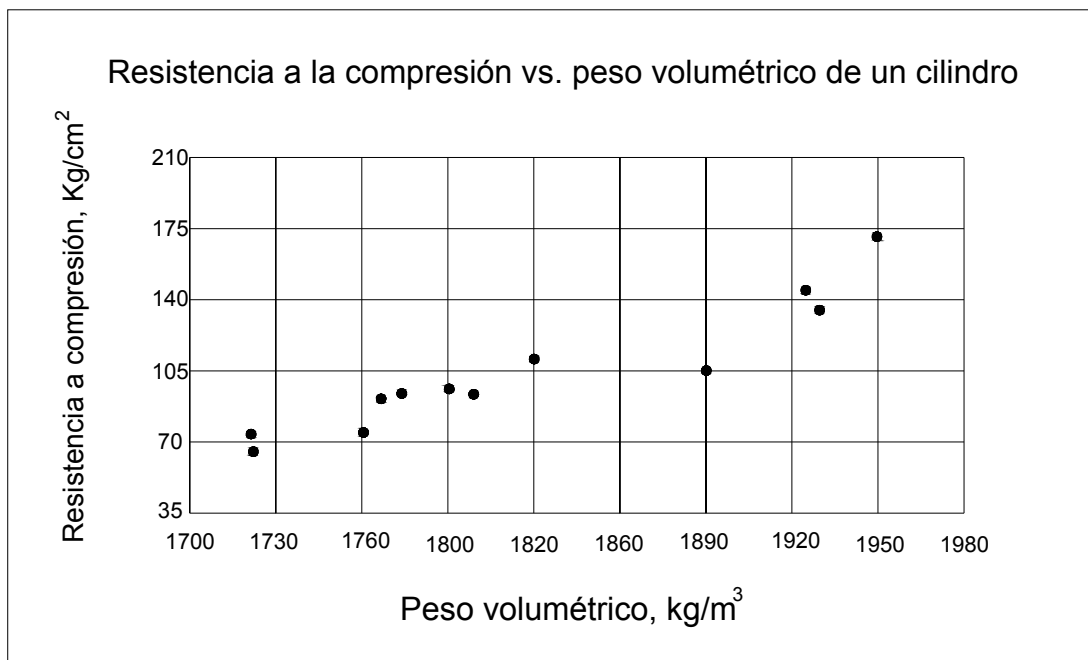


Fig. 4.2- Relación entre peso volumétrico y la resistencia a la compresión para el concreto permeable (Mulligan 2005)(1 $psi = 0.006895 MPa$; 1 $lb/pe^3=16.02 kg/m^3$).

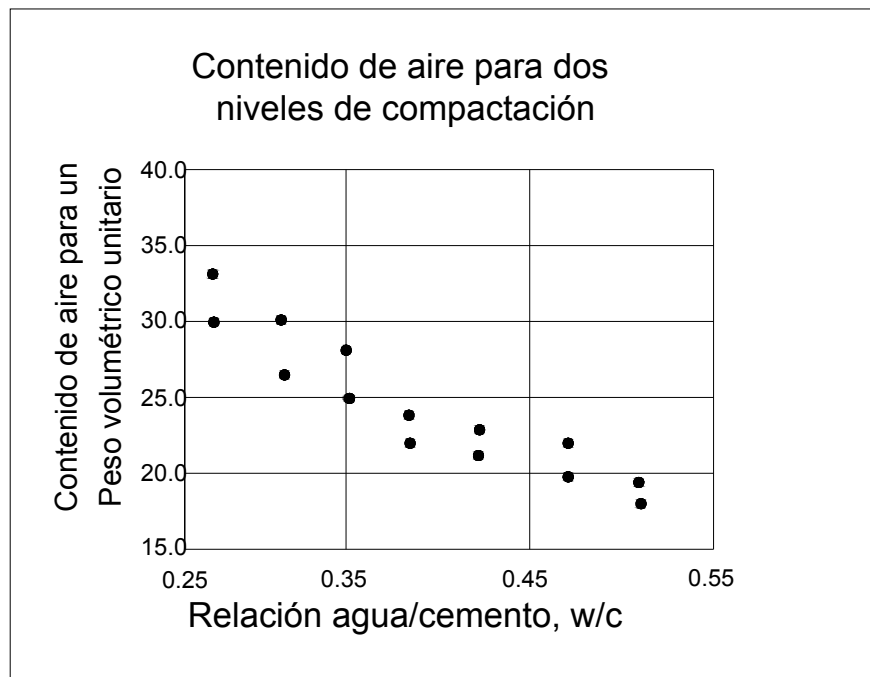


Fig. 4.3- Relación entre el contenido de aire y la energía de compactación para el concreto permeable (Meininger 1988).

3.3.2 Resistencia a la flexión

La figura 4.4 muestra la relación entre la resistencia a la flexión del concreto poroso y el contenido de huecos de aire basada en especímenes de vigas probadas en la misma serie de las pruebas de laboratorio descritas para la figura 4.1. Aunque estos resultados se basan en un número limitado de especímenes, la comparación de los datos en la figura 4.1 y 4.4 indica que existe una relación entre las resistencias a la compresión y a la flexión del concreto permeable. Esta relación como la resistencia a compresión, depende de varias variables.

La figura 4.5 muestra la relación entre las resistencias a compresión y flexión del concreto permeable para una serie de pruebas de laboratorio.



Fig. 4.4- Relación entre el contenido de aire y la resistencia a flexión para el concreto permeable ($1 \text{ psi} = 0.006895 \text{ MPa}$).

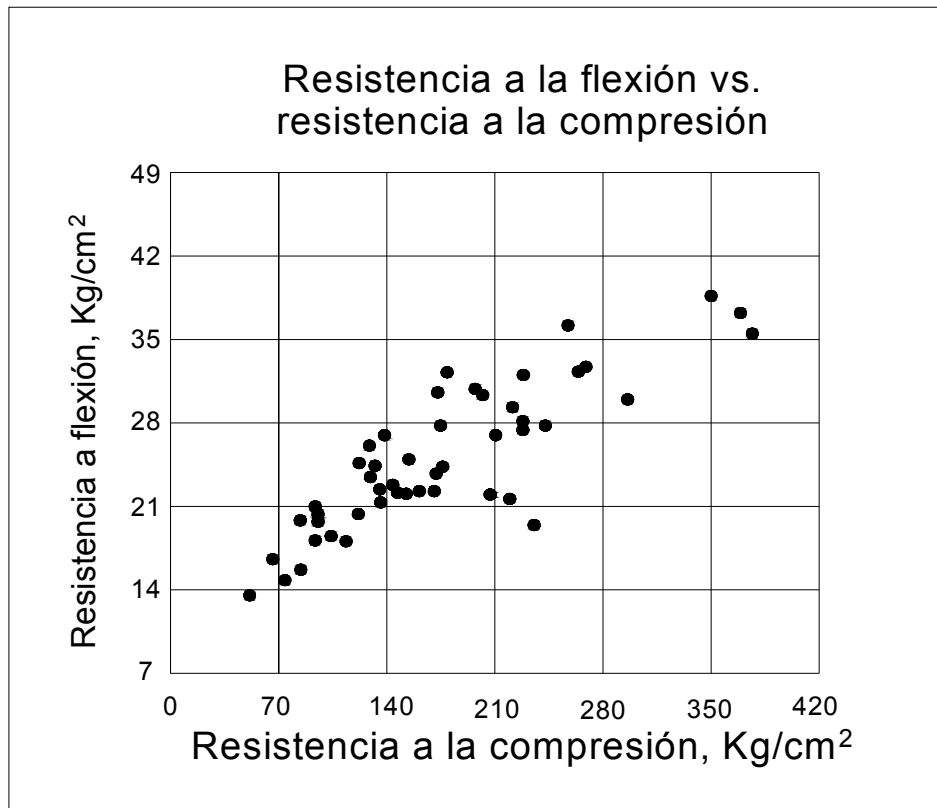


Fig. 4.5-Relación entre la resistencia a flexión y la resistencia a compresión para el concreto permeable (Meininger 1988)(1 *psi* = 0.006895 MPa).

3.3.3 Contenido de huecos aire/ peso volumétrico

El contenido de huecos de aire se calcula como un porcentaje de aire por el método gravimétrico (ASTM c 138), y está relacionado directamente con el peso volumétrico de una mezcla dada de concreto permeable. El contenido de huecos de aire depende en gran medida de varios factores: granulometría del agregado, contenido de material cementante, w/cm , y la energía de compactación.

La energía de compactación tiene una influencia en el contenido de huecos de aire (y el peso volumétrico correspondiente), de una mezcla dada de concreto permeable. En una serie de pruebas de laboratorio (Meininger 1988), una sola mezcla de concreto permeable, compactada con ocho diferentes niveles de energía, produjo valores de peso volumétrico que varían de 105 a 120 lb/pie³ (1680/1920 kg/m³). La figura 4.2 muestra que esta variación de los pesos

volumétricos (y el contenido de huecos de aire correspondiente) puede tener un efecto importante en la resistencia a la compresión del concreto permeable.

3.3.4 Capacidad de filtración

Una de las características más importantes del concreto permeable es su capacidad para filtrar el agua a través de la matriz. La capacidad de filtración del concreto permeable está directamente relacionada con el contenido de huecos de aire. Las pruebas han demostrado (Meininger 1988) que se requiere un contenido mínimo de huecos de aire aproximadamente el 15% para lograr una filtración significativa. La figura 4.6 (Meininger 1988) muestra la relación entre el contenido de huecos de aire y la capacidad de filtración de una mezcla de concreto permeable. Puesto que la capacidad de filtración se incrementa a medida que se incrementa el contenido de huecos de aire y, consecuentemente disminuye la resistencia a la compresión, el reto en el proporcionamiento de una mezcla de concreto permeable consiste en lograr un equilibrio entre una capacidad de filtración aceptable y una resistencia a la compresión también aceptable.

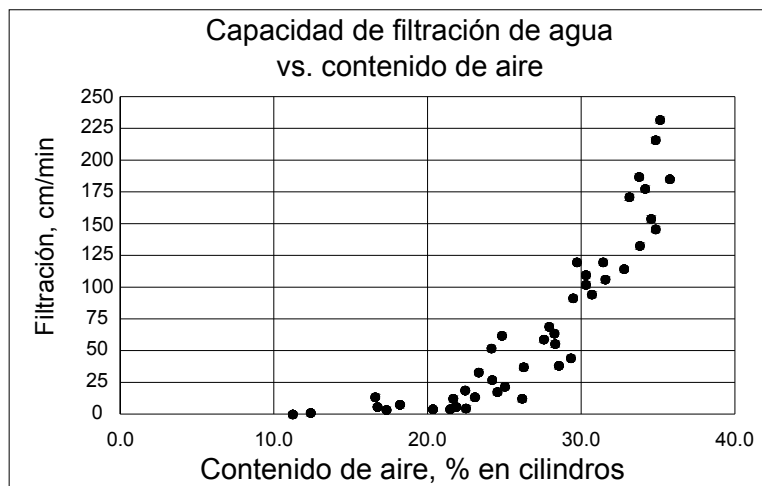


Fig. 4.6-Relación entre el contenido de aire y la filtración para el concreto permeable (Meininger 1988) (1 psi = 0.006895 MPa).



La permeabilidad del concreto puede medirse por medio de un simple parámetro de carga variable, como se muestra en la figura 4.7 (Neithalath et al. 2003). Usando un enfoque, la muestra se envuelve en una membrana de látex para evitar que el agua fluya por los lados del espécimen. Se agrega agua al cilindro graduado para llenar la celda del espécimen y el tubo de drenaje. El espécimen es previamente condicionado para permitir que el agua fluya a través del tubo hasta que el nivel del cilindro graduado sea el mismo que en la parte superior del tubo de drenaje. Esto minimiza cualquier bolsa de aire en el espécimen y asegura que el mismo quede completamente saturado. Con la válvula cerrada, el cilindro graduado se llena con agua. Después la válvula de cierra, y se mide el tiempo t en segundos que se requiere para que el agua caiga desde una carga inicial h_1 hasta una carga final h_2 . El equipo es calibrado para una carga inicial de 11.6 pulgadas (290 mm) y una carga final de 2.8 pulgadas (70mm). El coeficiente de permeabilidad k (pls/s [m/s]) puede expresarse como:

$$K = \frac{A}{t}$$

En donde $A = 0.35$ plg (0.084 m)

3.3.5 Durabilidad

La durabilidad del concreto permeable se refiere a la vida de servicio bajo condiciones ambientales dadas. Los aspectos físicos que influyen adversamente en la durabilidad del concreto incluyen exposición a temperaturas extremas y a químicos tales como sulfatos y ácidos. No se ha llevado a cabo ninguna investigación sobre la resistencia del concreto permeable al ataque agresivo por agua conteniendo sulfatos o ácidos. La durabilidad del concreto permeable bajo condiciones de congelación y deshielo tampoco está bien documentada.

Las pruebas limitadas en condiciones de congelación y deshielo indican pobre durabilidad si toda la estructura porosa se llena con agua (NRMCA 204). Sin embargo, otras pruebas han demostrado que cuando la estructura porosa se llena de agua, tiene una correlación parcial con los resultados totales. Una condición



más lenta de congelación (un ciclo por día en comparación con cuatro o cinco según ASTM C 666, Procedimiento A) puede permitir que el agua drene desde el concreto permeable, mejorando la durabilidad. Existen pocos datos de campo sobre la durabilidad. Existen pocos datos de campo sobre la durabilidad a largo plazo del concreto permeable en climas de norte. Debe de tenerse mucha precaución al usar concreto permeable en una situación en donde pueda ocurrir saturación completa antes de una congelación muy intensa.

Las pruebas indican que el incluir aire en la pasta de cemento puede mejorar la durabilidad a congelación y deshielo. En el laboratorio y bajo las condiciones de prueba ASTM C 666, el concreto permeable sin aire incluido falla (el modulo dinámico relativo cae a menos de 60%) en aproximadamente 100 ciclos de congelación y deshielo en la cámara (el ASTM C 666 exige un estándar de 300 ciclos para la prueba). Sin embargo, el módulo relativo permanece muy por encima de 60% para especímenes que tienen la porción de pasta protegida por aire incluido. Además, los especímenes de concreto permeables sometidos a una lenta congelación y deshielo (un ciclo por día) sufrieron menos daño que aquellos sometidos pruebas del Procedimiento A del ASTM C 666 (Neithalath et al. 2005) (5 a 12 ciclos por día). La determinación de la dosis apropiada del aditivo inductor de aire factor de cemento (relación agregado-cemento), y peso volumétrico de la mezcla de producción, puede lograrse a través de dosificaciones de prueba en el laboratorio.

Pueden emplearse fibras sintéticas para incrementar la tenacidad, definida como la absorción de energía del concreto después del agrietamiento. La tenacidad puede ser cuantificada en uno de los varios métodos de pruebas, tal como el ASTM 399. Esta prueba produce un valor de agrietamiento posterior en PSI que está relacionado con la resistencia a flexión de la matriz del concreto. Los resultados de pruebas con fibras sintéticas en especímenes de vigas de concreto permeable de acuerdo con el ASTM C 1399 demostraron que las fibras de 1.5 a 2.0 pulgadas (38 a 51 mm) de longitud fueron las más efectivas para dar tenacidad al concreto (SI Concrete Systems 2002).



3.3.6 Absorción Acústica

Debido a la presencia de un gran volumen de poros interconectados de tamaños considerables en el material, el concreto permeable es altamente efectivo en la absorción acústica. El material puede ser empleado como un medio para reducir el ruido generado por la interacción de las llantas y el pavimento de concreto. La reducción de ruido ocurre debido a la combinación de la menor generación de éste y el incremento en la absorción del sonido. Los pavimentos permeables alteran la generación del ruido, minimizando el bombeo del aire entre la superficie de la llanta y la superficie de la carretera. Además, los poros absorben el sonido a través de la fricción interna entre las moléculas de aire en movimiento y las paredes de los poros.

Para evaluar las características de la absorción del sonido por el concreto permeable, debe emplearse un tubo de impedancia, tal como se muestra en la figura 4.8 (Neithalath 2004, Marlof et al. 2004). Los especímenes cilíndricos con un diámetro de 3.5 pulgadas (95 mm) pueden ser acomodados en el tubo de impedancia. La muestra es colocada en el interior de una delgada camisa cilíndrica de Teflón, dentro de la cual se coloca ajustadamente. La muestra se coloca contra un respaldo rígido en un extremo del tubo de impedancia, que está equipado con una fuente de sonido. Se genera una onda acústica plana por la fuente de sonido y se propaga a lo largo del eje del tubo. Los micrófonos colocados a lo largo del tubo se usan para detectar la presión de la onda de sonido transmitida a la muestra y la porción de la onda que es reflejada (ASTM E 1050). El coeficiente de reflexión de la presión R es la relación de la presión de la onda reflejada con la de la onda de entrada, a una frecuencia particular.

El coeficiente de absorción α es una medida de la capacidad de un material para absorber sonido. Un material con un coeficiente de absorción 1.0 indica un material puramente absorbente, mientras que un material con coeficiente de absorción 0 indica que el material es puramente reflexivo. El concreto normal, por ejemplo, típicamente tiene un coeficiente de 0.3 a 0.5 (Neithalath 2004). El



concreto permeable típicamente tiene un rango de absorción 0.1 (para mezclas que se desempeñan pobremente) hasta casi 1 (para mezclas con un volumen de poros y tamaños óptimos). El coeficiente de absorción depende de la frecuencia de las ondas de sonido que golpean con fuerza, y por eso, es importante seleccionar un grosor apropiado del concreto permeable a fin de minimizar los sonidos de la frecuencia deseada (800 a 1200 Hz es el más objetable al oído humano).

3.4 Proporcionamiento de Mezclas

3.4.1 Generalidades

Para el concreto permeable, el factor de cemento (relación agua-cemento) y la w/cm son las variables más importantes que afectan las características mecánicas. Se ha encontrado como aceptable un amplio rango de factores de cemento, dependiendo de la aplicación específica. Los aditivos químicos, además de afectar la w/cm , se usan para influir en la trabajabilidad y los tiempos de fraguado, para mejorar las varias características del concreto permeable, y para mejorar la durabilidad a largo plazo.

3.4.2 Criterios para el Proporcionamiento

En el caso de concreto permeable, el contenido óptimo de agua produce una pasta de cemento muy húmeda con una alta viscosidad. Esta mezcla tendrá la apariencia o el brillo de un metal mojado o brillante. Para una proporción de mezcla, y tamaño y tipo de agregado dados, existe un estrecho rango óptimo w/cm . La pasta de cemento de esta mezcla óptima creará una adherencia suficiente entre las partículas del agregado sin escurrir hacia abajo a través de la red de poros y cerrando la estructura de huecos deseada.



La definición w/c óptima 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 w/cm para obtener la trabajabilidad necesaria usualmente cae dentro de 0.26 a 0.45.

Se supone que la trabajabilidad del concreto permeable es satisfactoria si se usa suficiente agua de mezclado para impartir una apariencia de un metal mojado a la mezcla. Al comprimir y soltar un puñado a la mezcla, se deberá tener como resultado una mezcla que no se desmorona, ni presenta huecos, y no debe fluir la pasta de cemento separándose de las partículas del agregado. La consistencia correcta usualmente se obtiene a través de un proceso de prueba e inspección, lo que asegura que cada mezcla contenga la pasta de cemento suficiente para cubrir las partículas gruesas con una delgada capa brillante, dándole un resplandor metálico.

CAPITULO 4

ASPECTOS HIDROLÓGICOS Y CONTAMINACIÓN DE ESCURRIMIENTOS PLUVIALES

Introducción Capitular 4

Para poder integrar al concreto permeable a un sistema de drenaje pluvial se deben conocer los problemas de contaminación de agua pluvial en las cuencas, debido a que tienen un área definida donde de capta la precipitación siendo posteriormente lavada y conducida a los sistemas de drenaje. En áreas urbanas estos sistemas están diseñados para alojar flujos o caudales en un intervalo de recurrencia definido. Dando cabida a estudios preliminares sobre captación y escurrimiento pluviales, así como de permeabilidad e infiltración de escurrimientos en suelos.

También se hace referencia a los tipos de contaminantes su origen y transportación.

4.1 Cuencas y Drenajes

La respuesta a los problemas de contaminación de agua pluvial de cuencas específicas tiene una solución concerniente a las características propias de cada cuenca. Cada cuenca o vaso a drenar, tiene un área definida que contribuye a canales o arroyos, drenes, o sistemas de alcantarillado y/o drenaje. El origen de esta agua es la precipitación la cual alcanza estos canales drenantes pasando por diferentes superficies. Una cuenca tiene su límite en la cresta la cual divide la cuenca y que a su vez es el punto más alto topográficamente. El área detrás de la división de la cuenca tiene contribuciones de agua a otro cuerpo de agua o cuenca. En áreas urbanas y rurales un sistema de cuencas o ecosistema de arroyos es un corredor bien definido, estos corredores o canales tienen diversas características que varían longitudinal y lateralmente. Una vez que estas descargas llegan al canal principal, el cual está bien definido, con corriente perenne, el flujo contiene grava y sedimento que se deposita en porciones del canal. En un sistema rural se pudieran conocer como bancos.

En áreas urbanas los sistemas de drenaje y/o alcantarillado están compuestos de dos sistemas. El primero es el sistema menor que tiene componentes para alojar las precipitaciones más pequeñas. Este sistema incluye alcantarillas, sistemas combinados o individuales y sus pozos de visita, tomas, rejillas, canaletas, etc. Estos sistemas están diseñados para alojar flujos con un intervalo de recurrencia de 5 a 10 años, sin inundar calles y estacionamientos.

El sistema mayor de drenaje, o de prevención de inundaciones tiene un diseño considerado atípico o para eventos mayores de escurrimientos pluviales, típicamente una tormenta de más de cien años de recurrencia.

El control de calidad de escurrimientos urbanos aunque es diseñado para pequeños y más frecuentes escurrimientos puede ser parte de los sistemas mayor y menor (Capítulo 2.1). El funcionamiento de ambos sistemas tiene el beneficio de que puede controlar inundaciones en áreas urbanas.



Los sistemas de drenaje urbano han evolucionado durante los pasados cientos de años. Ahora, se pueden separar en dos distintas metodologías. La primera, la más común, utilizada por conveniencia por la mayoría de los ingenieros y desarrolladores, diseñado solo para desalojar las precipitaciones de áreas urbanas. Este sistema, usualmente resulta en daños mayores en las áreas donde se descarga el flujo, ya que debido al mayor flujo que se transporta por conductos saturados, las corrientes son de altas velocidades, principal componente de riesgo de pérdida de vidas humanas (Capítulo 2.1.2 y 2.1.3). La segunda metodología es potencialmente más efectiva para el control de contaminantes y este sistema está orientado hacia el almacenamiento o retardo de los flujos producto de captación de escurrimientos pluviales (Capítulo 2.2). Estos sistemas proveen de retardadores o almacenamientos temporales en grandes cantidades a través del sistema, empezando por las obras de almacenamiento y captación, con su subsiguiente desalojo hacia los sistemas de drenaje. La contaminación puede ser atenuada de manera más efectiva cuando las velocidades del flujo son bajas y almacenadas temporalmente.

4.2 Permeabilidad e Infiltración en Suelos

La permeabilidad de los suelos depende de características como la textura, compactación y composición orgánica y química. En cuanto al potencial de la permeabilidad y escurrimiento superficial, los suelos han sido clasificados en los estados unidos en cuatro grupos hidrológicos:

- Grupo A es de suelos con bajo potencial de escurrimiento superficial total debido a una alta proporción de infiltración aun cuando está saturado. Estos suelos consisten mayormente de capas grandes de arenas y gravas.
- Grupo B es de suelos con bajo a moderado potencial de escurrimiento superficial que tiene proporción de infiltración moderada y tienen agregados de fino moderado a grueso moderado.



- Grupo C es de suelos que tienen de alto a moderado potencial de escurrimiento superficial y baja proporción de infiltración y consiste mayormente de suelos con una capa que impide el movimiento vertical hacia abajo del agua, o suelos con textura de fino moderado a fino.
- Grupo D tiene un potencial alto de escurrimiento superficial y proporciones bajas de infiltración y consiste mayormente de suelos arcillosos con alto potencial de encharcamiento, suelos con un nivel de agua permanente, suelos con sedimentos arcillosos o capa arcillosa cerca de la superficie, suelos cercanos a materiales impermeables.

La tabla 4.1 muestra los rangos de permeabilidad para los grupos hidrológicos de suelo reconocidos por la Soil Conservation Service.

Clase de permeabilidad	in/hr	cm/hr	m/día
A muy rápido	>10	>25	<6.2
+ B Rápido	3.00-10.00	12.5-25.0	3.1-6.2
B Moderadamente rápido	2.5-5.0	6.3-12.5	1.5-3.1
+C Moderado	0.8-2.5	2.0-6.3	0.5-1.5
C moderadamente lento	0.8-0.8	0.5-2.0	0.12-0.5
+D Lento	0.05-0.2	0.12-0.5	0.03-0.12
D muy lento	<0.05	<0.12	<0.03

Tabla 4.1 Rangos de permeabilidad

4.3 Tipos de Contaminantes y Transportación

La contaminación se origina desde el aire, superficies terrestres, construcciones y por sistemas de drenaje. Las diferentes cargas de contaminantes de los puntos de generación que se transportan a los cuerpos de agua, ya sea superficialmente o por infiltraciones. Las fuentes de contaminantes se pueden dividir como:



- Deposición de contaminantes por medio de aire o precipitaciones (atmosféricos).
- Contaminantes acumulados en superficies impermeables y lavados por flujos superficiales.
- Erosión de partículas de suelo y contaminantes relacionados de áreas permeables por lluvias y escurrimientos por medio de flujos superficiales.
- Contaminantes de suelos lavados por flujos superficiales.
- Compuestos químicos relacionados con la descomposición de productos aplicados al suelo, acarreados por escurrimientos e infiltrados al suelo.
- Infiltración de agua de mantos acuíferos hacia sistemas combinados de drenaje.
- Fugas de contaminantes de tanques de almacenamiento y rellenos sanitarios y su posterior infiltración a los mantos acuíferos.
- Acumulación de sólidos en tuberías de drenaje.
- Erosión de tuberías de drenaje y canales.
- Liberación de químicos de contaminantes sedimentados bajo el agua.

La mayoría de la composición química del escurrimiento superficial se debe a sedimentos erosionados de superficies terrestres y el lavado y acarreo de sólidos acumulados sobre superficies impermeables como carreteras, calles, estacionamientos y techos. La calidad del agua y sedimentos de las cuencas con baja impermeabilidad puede ser parecida, más no idéntica, al suelo y a la suspensión de agua y sólidos dentro de la cuenca. La erosión es el proceso de desintegración de partículas de suelo y su transportación y depósito de una porción de estas partículas al sistema de alcantarillado. Materia orgánica, metales y otros cationes y aniones naturales pueden ser transportados y depositados con el suelo desintegrado en cualquiera de sus dos fases, disuelto o sólido. Algunos materiales son transportados en ambas fases.

Las cargas contaminantes de calles impermeables se acumulan a lo largo de la superficie de la calle y son movidos a una franja del camino cercano a la



guarnición, durante la temporada de estiaje. Mas del 90% de la carga de sólidos se deposita en aproximadamente una franja de 1 m. de ancho desde la guarnición. De ahí que, la carga de sólidos y contaminantes es expresado en gramos de sólidos (contaminantes) por unidad de longitud de la calle. Entonces para calcular la carga contaminante, se usa la relación siguiente:

Carga sólidos por escurrimiento = carga de sólidos X densidad de calle X coeficiente de lavado

$$(gr / ha / lluvia) = (gr / m) \times (m / ha) \times Coef (lavado)$$

Donde:

gr = gramo

ha = hectárea

m = metro

El coeficiente de lavado es una fracción de la cantidad de sólidos lavados por la lluvia de su depósito en la calle dividido entre la cantidad de sólidos presentes en la calle antes de la lluvia. La cantidad acumulada de sólidos es relativamente constante, sin importar la longitud, sin importar el periodo de acumulación.

Algunos contaminantes como nitratos, existen en forma disuelta predominantemente. En este caso la contaminación es a través de mantos acuíferos. A diferencia de los contaminantes superficiales que ocurren principalmente durante lluvias y que afectan a los grandes flujos, la contaminación a través de mantos acuíferos es continua y su mayor impacto es durante flujos lentos.

Existe una tecnología emergente sobre el uso de obras de almacenamiento para remover los contaminantes que se encuentran en los escurrimientos urbanos. Aunque la cantidad de compuestos en los escurrimientos es bastante, se puede hacer énfasis en los más representativos.

El reporte final de la agencia norteamericana reflejó que hay poca, si es que la hay, diferencias estadísticas significativas en las variadas regiones geográficas,



en diferentes ciudades, o entre eventos de escurrimientos pluviales en cualquier lugar.

La tabla 4.1 muestra los compuestos en mg/lt. Los resultados parecen ser relativamente uniformes a lo largo de los Estados Unidos¹.

La Environmental Protection Agency de Estados Unidos adoptó un “estandar característico de contaminantes de escurrimientos urbanos”²:

TSS	Total de sólidos suspendidos
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
PT	Fósforo total
PS	Fósforo soluble
NKT	Nitrógeno Kjeldahl total
NO _{2&3}	Nitrito y nitrato
Cu	Cobre
Pb	Plomo
Zn	Zinc

Sin embargo, si existe un amplio rango de variación en cuanto a la media de concentraciones. Estos resultados apoyan la necesidad de recolectar datos locales antes de tomar decisiones sobre su manejo.

¹ Ibid., pág. 278.

² STAHRE Peter, URBONAS Ben, Storm-Water Detention, Prentice-Hall, 1990, pg. 275. Traducción personal.



Compuesto	Coeficiente de variación De evento a evento	MEDIANA URBANA (en mg/l)	
		Mediana <i>in situ</i>	Al 90vo. percentual
		TSS	1.0-2.0
DBO	0.5-1.0	9.000	15.000
DQO	0.5-1.0	65.000	450.000
PT	0.5-1.0	0.330	0.700
PS	0.5-1.0	0.120	0.210
NKT	0.5-1.0	1.500	3.300
NO _{2&3}	0.5-1.0	0.680	1.750
Cu	0.5-1.0	0.034	0.093
Pb	0.5-1.0	0.140	0.350
Zn	0.5-1.0	0.160	0.500

Tabla 4.1 Características sobre calidad del agua en escurrimientos urbanos.

Existe una relación entre las cantidades de contaminantes y el uso del suelo, la tabla 4.2 muestra los compuestos para cada categoría.

Componente (mg/l)	RESIDENCIAL		MIXTO		COMERCIAL		RURAL	
	Media	CV	Media	CV	Media	CV	Media	CV
DBO	10.000	0.41	7.800	0.52	9.300	0.31	--	--
DQO	73.000	0.55	65.000	0.58	57.000	0.39	400.000	0.78
TSS	101.000	0.96	76.000	1.10	69.000	0.85	70.000	2.90
Pb	0.144	0.75	0.114	1.40	0.104	0.68	0.030	1.50
Cu	0.033	0.99	0.027	1.30	0.029	0.81	--	--
Zn	0.135	0.84	0.154	0.78	0.226	1.10	0.195	0.66
NKT	1.900	0.73	1.290	0.50	1.180	0.43	0.965	1.00
NO _{2&3}	0.736	0.83	0.558	0.67	0.572	0.48	0.543	0.91
PT	0.383	0.69	0.263	0.75	0.201	0.67	0.121	1.70
PS	0.143	0.46	0.056	0.75	0.080	0.71	0.026	2.10

Tabla 4.2 Media según el uso del suelo para calidad del agua en escurrimientos urbanos³.³ *Ibíd.*, pág. 279.

4.4 Relación entre precipitación y escurrimiento

La ocurrencia y magnitud de la contaminación de escurrimientos están relacionados con el ciclo hidrológico. Así, la carga contaminante tiene un componente de rango impredecible debido a eventos meteorológicos. Esto distingue a la contaminación de escurrimientos pluviales sobre los sistemas tradicionales de aguas negras, los cuales tienen muy poca relación con la hidrología de cuencas y subcuencas.

Además, las modificaciones hidrológicas pueden aumentar o disminuir las cargas de contaminantes. Para controlar y entender la generación y transporte de contaminantes, se tiene que estudiar el proceso hidrológico que causa la contaminación y considerar los diferentes recorridos hidrológicos por los cuales entran los contaminantes a los escurrimientos.

La primera etapa de la formación de los escurrimientos es la condensación de la humedad en la atmósfera, lo cual crea las gotas de lluvia. Durante este proceso, el agua entra en contacto con contaminantes atmosféricos, que pueden alcanzar altos niveles de contenido contaminante.

El escurrimiento generado por ésta precipitación tiene tres componentes:

1. El escurrimiento pluvial es un residuo de la precipitación después de haber satisfecho todas las pérdidas. La resta numérica de éstas pérdidas resultará en el escurrimiento del mismo evento pluvial, o exceso de lluvia. Las pérdidas incluyen la intercepción de la capa vegetativa, charcos y almacenamiento por asentamientos topográficos y depresiones, infiltración al subsuelo, evaporación de superficies de agua y suelos saturados, así como la transpiración de la vegetación. Los contaminantes son disueltos y transportados por el escurrimiento superficial.
2. El interflujo es aquella porción de suelo y agua en proceso de infiltración, la cual se mueve en dirección horizontal debido a la baja permeabilidad del



subsuelo. Típicamente, la cantidad de interflujo en el balance hidrológico es pequeño y sólo se hace significativo durante la primavera.

3. Corriente o escurrimiento de mantos freáticos, se define así a la parte de ojos de agua y manantiales o emanaciones de agua del subsuelo, que contribuye al escurrimiento. En sistemas de drenaje en áreas urbanas, se puede incluir también la infiltración por fugas de drenaje sanitario, lo que puede ser sustancial. Durante periodos de sequía largos, la mayoría del flujo puede ser caracterizado como escurrimiento de mantos freáticos. En algunas regiones áridas y semiáridas, el escurrimiento de mantos freáticos puede ser cero en algunas épocas del año (corrientes efímeras).

La calidad de los escurrimientos superficiales puede ser relacionada a la intensidad de la erosión producida por las precipitaciones y a la cantidad de los contaminantes acumulados en la superficie. Un diagrama del proceso de transformación de precipitación a escurrimiento se muestra en la figura 4.1. Los siguientes componentes y procesos determinan la magnitud del escurrimiento superficial:

- Intercepción. Una parte del volumen de precipitación es interceptada y adherida a la superficie de vegetación hasta que se forma una capa suficientemente gruesa, entonces la gravedad empieza a hacerla avanzar. El almacenamiento por intercepción es esa parte de la precipitación que moja y se adhiere a la superficie de los objetos y vegetación, y posteriormente se evapora. La cantidad que es interceptada depende del tipo y cantidad de la vegetación, intensidad y volumen de lluvia, rugosidad de la superficie, estación del año, etc.

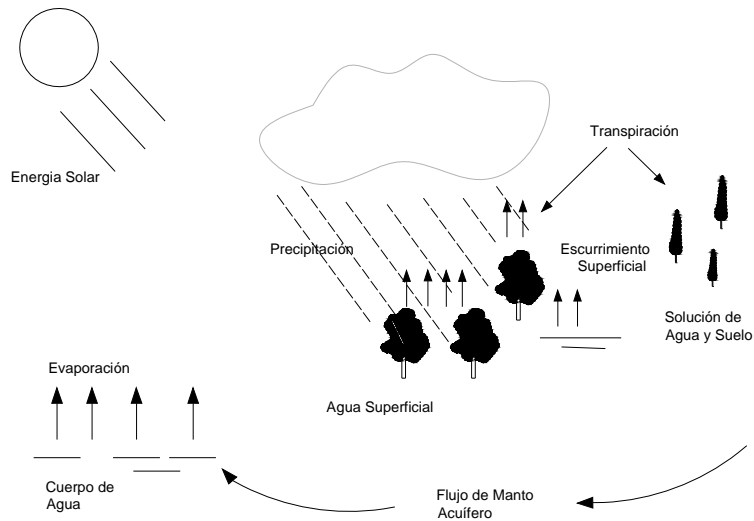


Figura 4.1 Proceso de transportación del escurrimiento pluvial

- Generalmente, cerca de 0.5-1.2 mm de lluvia pueden ser retenidos en el follaje antes de que pueda formarse un escurrimiento. La interceptación total por una planta individual está directamente relacionada con la cantidad de follaje, el tipo y su orientación. Alrededor de 1.2-1.8 mm de precipitación pueden ser interceptados por césped y arbustos tupidos.
- Almacenamiento por depresiones. Los escurrimientos deben primero llenar las depresiones superficiales, formando pequeños charcos y en general humedeciendo el área. El agua almacenada en la depresión puede evaporarse o infiltrarse al subsuelo. Solo cuando la razón de precipitación excede a la de filtración y el almacenamiento superficial (por depresión e interceptación) resultará en un escurrimiento superficial.

CAPITULO 5

DISEÑO, CÁLCULO Y CONSTRUCCIÓN DE LA SUPERFICIE DE CONCRETO PERMEABLE.

Introducción Capitular 5

El capítulo 5 trata de dar una idea sobre el diseño de las dimensiones de las superficies de pavimento de concreto permeable, la estimación de los volúmenes de almacenamiento, el cálculo del volumen de agua que se quiere infiltrar o retardar previo alojamiento a los sistemas de drenaje, los estudios sobre precipitación necesarios para la estimación de volúmenes de almacenamiento y su caudal.

La selección del lugar es uno de los aspectos más importantes en el diseño de la superficie de pavimento permeable, ya que de esta opción depende el éxito de la funcionalidad del concreto permeable. Aquí se mencionan los aspectos más importantes a considerar.

También se abordan los cuidados que se deben tener en la construcción del sistema de pavimento permeable para obtener las características de diseño necesarias de manera que el concreto permeable brinde un adecuado funcionamiento.

5.1 Diseño de Pavimentos Permeables.

En la determinación del espesor de una sección de pavimento permeable, deben de llevarse a cabo dos análisis distintos, uno para las características estructurales y otro para las características hidráulicas. Para el diseño estructural de pavimentos de concreto permeable, consulte el ACI 330R para estacionamientos, y el ACI 325, 12R para calles y carreteras. Si la resistencia del concreto permeable producido no cae dentro de los parámetros de diseño de cualquiera de estos dos métodos, pueden ser necesarios otros procedimientos de diseño, incluyendo la experiencia local. Entonces deben analizarse los criterios del espesor del pavimento y de la subrasante requeridos para la capacidad de almacenamiento y permeabilidad. En muchos casos la estructura de huecos del pavimento ha de usarse como un almacenamiento para el escurrimiento de las aguas pluviales, de modo que el espesor también debe tomar en consideración los volúmenes de almacenamiento anticipados. Debe de especificar el mayor espesor de los dos análisis, el estructural o el de almacenamiento. El rango práctico de los espesores de diseño para el concreto permeable es de 5 a 10 pulgadas (125 a 250 mm) para pavimentos convencionales. Sin embargo, las capas superpuestas adheridas han llegado a ser tan delgadas como de 2 pulgadas (50 mm). En este subcapítulo se examina el diseño estructural; una discusión completa sobre el diseño hidrológico puede encontrarse en el Subcapítulo 5.4.

La determinación del espesor estructural puede hacerse, bien sea por el método de diseño de la AASHTO o de la PCA para pavimentos de concreto simple si la resistencia del concreto permeable cae dentro de los límites de cada procedimiento de diseño. Para este diseño los coeficientes de transferencia de carga deben ser para condiciones de trabazón del agregado. Pueden o no existir apoyos de orilla, dependiendo del uso de guarniciones en el diseño del drenaje. El módulo de la reacción de la subrasante usado en el diseño debe tomar en consideración los niveles más bajos de compactación usados con pavimentos de



concreto permeable. Las pruebas en el campo de los suelos del sitio proporcionan los valores exactos del módulo de reacción de la subrasante. Las cargas del tránsito pueden estar limitadas a aquellas descritas en el AI 330R como B(ADTT = 25) para mezclas de concreto que no tengan una experiencia exitosa local con cargas de tránsito pesado (tales como para mezclas con piedra caliza de Florida). Si la experiencia local demuestra que pueden soportarse cargas de tránsito más pesadas como los agregados de granito en Georgia, entonces las cargas de diseño pueden reflejar la experiencia citada.

La estructura de huecos de la mezcla de concreto poroso no solamente permite la conducción vertical del agua, sino que también permitirá el flujo horizontal. Debe de considerarse esta habilidad al establecer los perfiles de drenaje. La cantidad de flujo vertical depende de la permeabilidad de la subrasante, así como de la relación del espesor y relación de vacíos del pavimento.

En la mayor medida posible, las rasantes de estacionamiento deben ser diseñadas sin pendiente. Esto permitirá un mayor tiempo para que la subrasante absorba y transmita el agua a los estratos inferiores y reducirá el flujo horizontal.

En donde las condiciones no permitan superficies horizontales el diseñador puede considerar proveer barreras impermeables transversales a la dirección del flujo horizontal. Estas barreras pueden ser construidas incrementando la compactación de la franja del pavimento a lo largo de la orilla de las juntas de construcción transversales.

La compactación mayor cierra la estructura de huecos en esta área. Al construir franjas transversales en el concreto permeable normal, se reduce el flujo lateral en la dirección de la pendiente hacia abajo. Las guarniciones alrededor del perímetro del área pavimentada también ayudan en la reducción del flujo lateral así como también ayudan a satisfacer los requisitos de retención de las aguas pluviales.



5.2 Estimación de Volúmenes de Almacenamiento.

El termino obra de almacenamiento es usado aquí para describir varios tipos de construcciones para el retardo o separación de agua pluvial o sistemas de drenaje combinados. La configuración técnica de estas construcciones esta subordinada a su función, las cuales pueden ser de tres tipos básicos.

- Obras de filtración,
- Obras de detención,
- Obras de retención.

Como se describió en el Capitulo 2, el volumen de almacenamiento para una obra de infiltración depende de la superficie que se quiere filtrar hacia el subsuelo. El volumen de almacenamiento en este tipo de obra consiste en el volumen de poros o vacíos que contiene la capa de grava de la subrasante. Este tipo de almacenamientos se vacía ya sea por infiltración a las capas subyacentes de suelo o por tuberías filtrantes especialmente diseñadas. Debido a que el presente trabajo se concentra en la filtración a través de concreto permeable y posteriormente al subsuelo, las obras de detención y retención no serán abordadas.

Las condiciones geohidrológicas del lugar tienen que ser conocidas y comprendidas para poder diseñar una obra de filtración. Estudios sobre la porosidad y permeabilidad del suelo, nivel de aguas freáticas y sus fluctuaciones, perfiles estratigráficos del subsuelo, etc., son necesarios para un diseño apropiado.



5.3 Estudios Pluviales Necesarios para la Estimación de Volúmenes de Almacenamiento.

Cuando se diseña un sistema de drenaje pluvial o canales a superficie libre, la principal preocupación es la proporción de escurrimiento pluvial (caudal punta) que el sistema tiene que manejar. Los escurrimientos pluviales con intensidades menores de agua para la que fue diseñada, son absorbidas con facilidad sin riesgo de inundar las calles, estacionamientos, etc. El volumen de escurrimiento es de interés secundario.

Las obras de almacenamiento son usadas en los sistemas de drenaje pluvial para extender sus capacidades, para proveer un balance uniforme al flujo ó para reforzar la calidad del agua. Sin embargo, el diseño del almacenamiento requiere conocimiento sobre volúmenes de agua pluvial y escurrimiento. La intensidad de la lluvia, por si sola, no es información suficiente. Como resultado, la información sobre la intensidad de lluvia que es adecuada para el diseño de drenaje pluvial no es adecuada para el diseño de obras de almacenamiento.

Los tipos de información necesarios para el diseño de obras de almacenamiento o retraso se clasifican en los siguientes grupos:

- Datos sobre intensidad-duración-frecuencia;
- Diseño de tormenta estandarizado;
- Registros cronológicos sobre lluvias;
- Registros cronológicos sobre series de flujos.

Los primeros dos grupos actualmente forman la base para el diseño de la mayoría de los drenajes en los Estados Unidos y Europa. Aunque frecuentemente criticados por algunos, están bien arraigados en la práctica ingenieril, ya que ofrece resultados rápidos y son relativamente simples de usar.

Mientras el diseño se hace más complejo y orientado hacia sistemas de operación, se hace más necesario cambiar al uso de los registros cronológicos de lluvia. Desafortunadamente esto no es posible para muchas comunidades, ya que

la información meteorológicamente similar de otros lugares no puede ser utilizada debido a que no sería confiable la aplicabilidad en el lugar de diseño.

También, el análisis o la operación de grandes sistemas, requiere además de conocer como varía la precipitación en el tiempo, como se distribuye sobre la subcuenca en cualquier momento. Los datos sobre precipitación de esta magnitud son prácticamente inexistentes y por lo tanto, el diseño de almacenamientos de escurrimientos pluviales y su posterior descarga a sistemas de drenaje están frecuentemente basados en información incompleta. Lo que es importante es que reconozcamos las limitaciones de la información y utilizarla lo mejor posible.

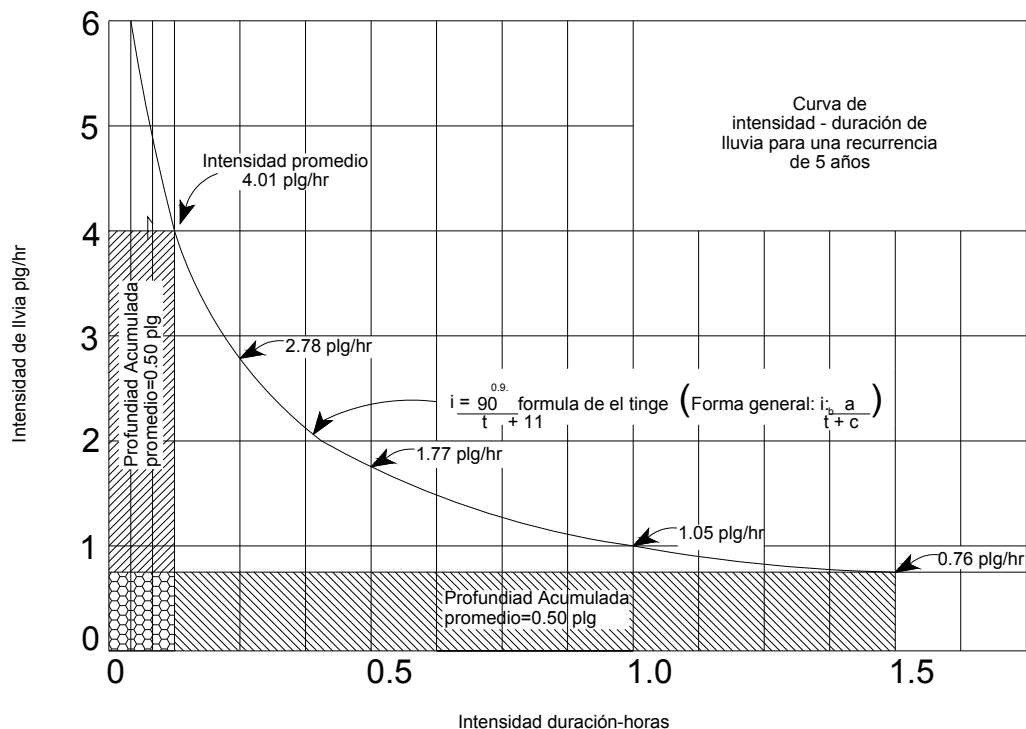


Figura 5.1 Curva de intensidad-duración de lluvia para una recurrencia de 5 años.¹

¹ STAHERE Peter, URBONAS Ben, Storm-Water Detention, Prentice-Hall, 1990, pg. 198. Traducción personal

5.3.1 Datos sobre Intensidad-duración-frecuencia

El uso de datos sobre intensidad duración frecuencia de lluvia se hizo parte del diseño de sistemas de drenaje cuando fue introducida la formula racional. Mientras la formula racionales usada principalmente para el dimensionamiento de sistemas de drenaje pluvial también esta siendo usada para el diseño de obras de infiltración, detención y retención. La formula racional asume que la intensidad de lluvia efectiva sobre la totalidad de la cuenca es igual a la intensidad encontrada al momento de la concentración la figura 5.1 ilustra este principio para una tormenta de diseño de cinco años.

5.3.2 Diseño de Tormenta Estandarizado

Otra forma popular para dimensionar obras de almacenamiento es utilizando diseños de tormenta estandarizados. En la práctica el diseño de tormentas es desarrollado en diversas maneras. Algunas son derivadas del uso de la información de intensidad-duración-frecuencia, mientras otros son derivados de la utilización de otro tipo de datos sobre lluvia. Un diseño de tormenta, en teoría debe ser representativo de muchas lluvias registradas y puede también reflejar la intensidad, volumen y duración de una lluvia que tiene una frecuencia recurrente (5 años, 50 años, etc.).

Cuando es utilizado un diseño de tormenta estandarizado para una obra de almacenamiento, se asume que la construcción operará a su capacidad, en promedio, a la misma frecuencia de recurrencia que el diseño de tormenta. Esto presupone muchas cosas.

Primero, asume que el diseño de tormenta tiene un volumen de lluvia equivalente a la lluvia real, teniendo la misma frecuencia estadística. Segundo, asume que la distribución temporal del agua de lluvia dentro de la tormenta es representativa de una tormenta que ocurre en la naturaleza. Tercero, asume que

la obra de almacenamiento esta vacía lista para recibir todo el escurrimiento de la tormenta de diseño.

El diseño de tormenta estandarizado tiene un uso extensivo en la práctica. De hecho por razones prácticas su uso puede ser la única alternativa posible en muchas localidades. La mayoría de las críticas sobre este tipo de diseño se centran en el argumento de que el uso de diseños de tormenta no puede reproducir adecuadamente la distribución de frecuencia del volumen de escurrimiento.

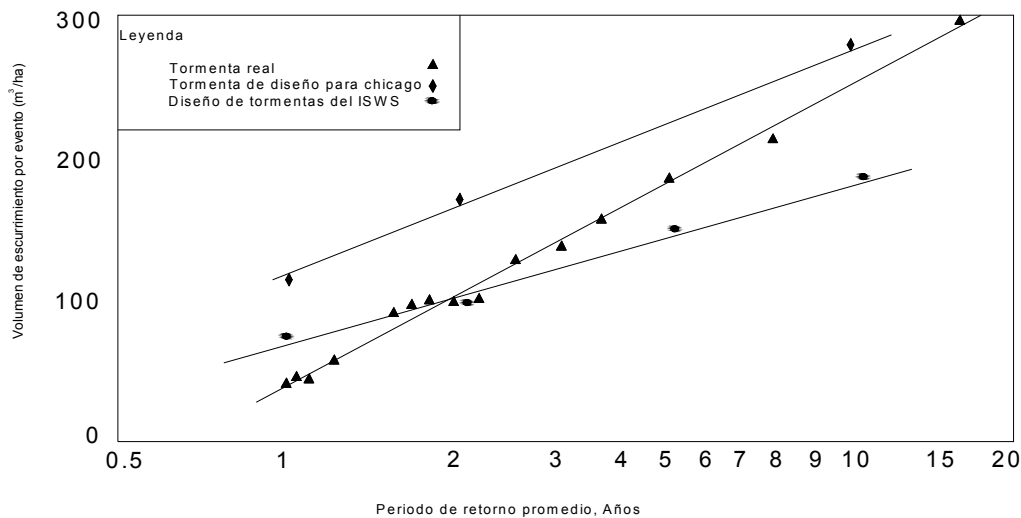


Figura 5.2 Volumen de escurrimiento resultante de tormenta real y dos tormentas de diseño².

5.3.3 Registros Cronológicos sobre Lluvias

Debido a que la ocurrencia de precipitación es un proceso estocástico, la ocurrencia del escurrimiento resultante también es un proceso estocástico. Además de la precipitación, el escurrimiento es afectado por las características de la cuenca y la configuración del sistema de almacenamiento. Como resultado, la distribución estadística para lluvias no puede ser la misma que para el escurrimiento resultante.

² *Ibíd.*, pág. 200.

Si un registro cronológico de lluvia es usado para dimensionar obras de almacenamiento debe primero ser transformado a un registro de escurrimiento. Esto puede ser hecho con la ayuda de modelos computarizados de simulación de escurrimientos, y después los resultados pueden ser analizados estadísticamente.

Dejando a un lado las presunciones sobre la cantidad, intensidad y volumen de lluvia, como en el caso de los diseños de tormenta. Esto es una ventaja ya que la diferencia entre los sistemas de drenaje y sistemas de almacenamiento tienen mucha influencia en el proceso de escurrimiento.

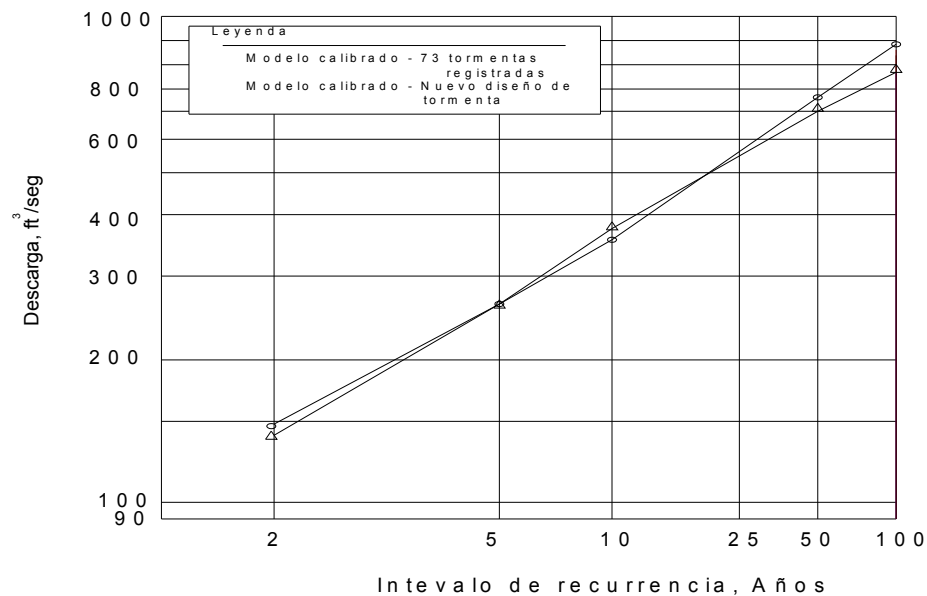


Figura 5.3 Estimación de escurrimiento usando el diseño de tormenta de Colorado vs. Tormentas registradas.³

5.3.4 Registros Cronológicos sobre Series de Flujos

El método mas directo para el dimensionamiento de obras de almacenamiento utiliza una serie cronológica de flujos medidos en el lugar de almacenamiento. Desafortunadamente estos estudios son muy raros, y cuando existen, es limitado a las mediciones hechas en plantas de tratamiento de aguas negras.

³ *Ibíd.*, pág. 207.



Como resultado por razones prácticas esta técnica es utilizada generalmente para el diseño de almacenamiento en, o cerca de plantas de tratamiento y sistemas combinados de drenaje. Las variaciones de flujo en un sistema combinado de drenaje puede ser clasificado en los siguientes grupos:

- Variaciones cíclicas diarias debido al ritmo diario de la actividad humana;
- Cargas de contaminantes temporales debidas a las descargas de industrias, piscinas, plantas de tratamiento de agua, etc.;
- Cargas temporales debidas a la operación discontinua de los sistemas de drenaje;
- Cargas temporales debido a los escurrimientos pluviales;
- Variaciones estacionales debido a las discontinuidades en el uso de agua en escuelas, restaurantes, industria, etc.; y
- Variaciones cíclicas por infiltración de agua de mantos freáticos.

Estos tipos de variaciones en flujos pueden acumularse. Este concepto se ilustra en la figura 5.4, donde el escurrimiento de una lluvia es superpuesto al ciclo diario de variaciones de flujo en clima seco.

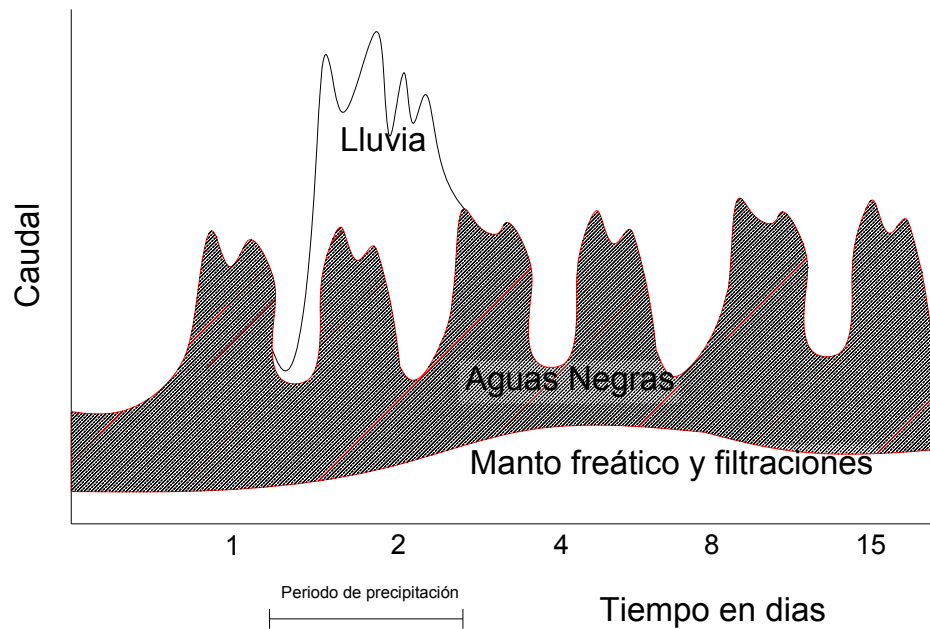


Figura 5.4 Diferentes tipos de variación de caudal.⁴

5.4 Cálculo para Obras de Infiltración.

El diseño de obras de infiltración es similar al diseño de otro tipo de construcciones. El propósito es diseñar una instalación de manera que pueda contener el flujo de diseño sin desbordarse. En estas instalaciones, el agua se infiltra hacia el subsuelo desde la superficie. Si el flujo hacia la superficie de infiltración excede su capacidad de infiltración, el exceso de agua se acumulará en la superficie.

Este tipo de construcciones funcionan de manera excelente para concentraciones de escurrimientos pluviales muy pequeños, como aquellos provenientes de lotes individuales de terrenos. Cabe mencionar que su diseño se debe hacer conservadoramente, utilizando bajas proporciones de carga hidráulica en la superficie de infiltración. También se debe saber que, estas instalaciones

⁴ *Ibíd.*, pág. 210.

deben “descansar” entre escurrimientos para permitir el alivio de los poros de los suelos a los que se infiltra el escurrimiento.

5.4.1 Caudal de Diseño

El volumen de escurrimiento que se puede recibir en una losa de infiltración depende de varios factores. Estos incluyen el tamaño de la cuenca tributaria, el grado de desarrollo en la cuenca (cantidad de superficie impermeable) y las características pluviales en el área.

Escurrecimiento pluvial

Debido a que las obras de infiltración son utilizadas para infiltrar escurrimientos de cuencas pequeñas, el cálculo de estos escurrimientos se puede basar en la Formula Racional;

$$Q_t = C \cdot \frac{I_T}{1000} \cdot A \quad (5.1)$$

En donde:

Q_t = Proporción de escurrimiento para una tormenta de años T , m^3/seg .

C = Coeficiente de escurrimiento, adimensional .

I_T = Intensidad de lluvia para una tormenta de años T y una duración t , en $lt/seg/ha$.

A = Área de la cuenca tributaria, en ha.

Multiplicando la proporción promedio de escurrimiento, Q_t , por la duración de tormenta de diseño, t , obtenemos el volumen acumulado por la duración de la tormenta, dígase:

$$V_T = 3600 \cdot C \cdot \frac{I_T}{1000} \cdot t \cdot A \quad (5.2)$$

En donde:

V_T = Volumen total de escurrimiento en el tiempo t para una tormenta de T -años en m^3

t = Duración de la tormenta en horas.

De esta manera el cálculo del volumen se puede desarrollar utilizando la curva de intensidad-duración-frecuencia para cualquier diseño de tormenta teniendo un periodo de retorno de T -años. Si nos decidimos sobre una duración de diseño de tormenta, el volumen de precipitación puede ser calculado, siendo simplificado el ajuste para pequeñas cuencas urbanas. Este procedimiento se ilustra en la figura 5.5 para tres duraciones de tormenta⁵.

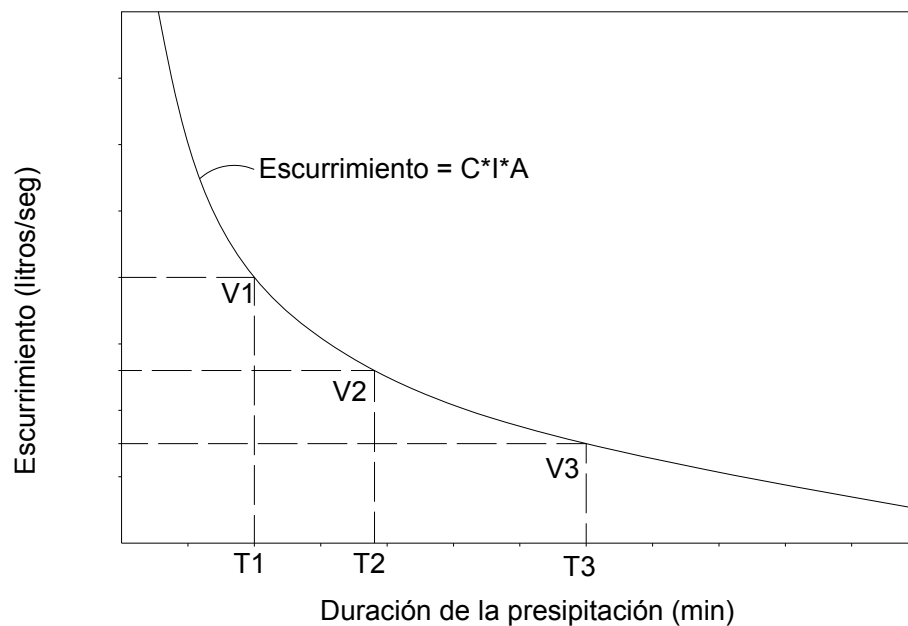


Figura 5.5 Hidrograma del caudal derivado de las gráficas de precipitación.

Un diagrama de barras sobre precipitación representa solo la intensidad promedio de la porción más intensa de una precipitación. La lluvia que cae antes y después de este periodo no se incluye en la curva de intensidad-duración-

⁵ *Ibíd.*, pág. 215.



frecuencia y consecuentemente no se refleja en los cálculos de la gráfica. Debido a que el diseño de un cuerpo de infiltración depende mayormente del volumen de escurrimiento, es necesario de alguna manera tomar en cuenta esa parte de la precipitación que no se incluye en la gráfica.

Sjober y Martensson estudiaron como difería la gráfica de escurrimiento de los resultados obtenidos utilizando simulación continua con registros cronológicos de precipitación. Ellos también proporcionaron estimaciones más exactas de escurrimiento, concluyeron que aumentando la gráfica del volumen de precipitación en un 25%, las estimaciones de volumen de escurrimiento con la formula racional puede ser casi exacta. Esta modificación no afecta la simplicidad de los cálculos. De esta manera, el volumen de escurrimiento que llega a una obra de infiltración puede ser estimado utilizando la siguiente ecuación, la cual es una versión levemente modificada de la formula racional:

$$V_T = 1.25 \left(3600 \cdot C \cdot \frac{I_T}{1000} \cdot t \cdot A \right) \quad (5.3)$$

En la cual todos los términos han sido definidos anteriormente.

Cuando se dimensiona una obra de infiltración, es práctico asumir que los escurrimientos provienen solamente de superficies impermeables, teniendo coeficientes de escurrimiento de entre 0.85 y 0.95. No es común el diseño de una superficie de infiltración para el volumen promedio de escurrimiento de todos los eventos que pueden ocurrir en un periodo específico de años. El evento promedio de escurrimiento es considerablemente más pequeño que un escurrimiento de un diseño de tormenta de dos años estos es porque los datos del evento incluyen todos los eventos que producen escurrimientos y no solamente los más intensos de cada año. Lo cual es el caso para las curvas típicas de intensidad-duración-frecuencia.

5.5 Selección y Diseño de las Superficies de Infiltración

5.5.1 Selección del Lugar.

Muchos factores afectan la elección de un lugar para construir una superficie de infiltración para agua pluvial. Dentro de estos, los siguientes son los más importantes:

- La profundidad del manto freático.
- La profundidad hasta el manto rocoso.
- El tipo de suelo superficial.
- El tipo de subsuelo.
- La cubierta vegetativa de la superficie de infiltración.
- Los usos de la superficie de infiltración.
- La proporción tributaria de superficies impermeables a la superficie de infiltración.

Hay ciertas condiciones que descartarían una obra de infiltración si algunas de las siguientes condiciones son descubiertas, la disposición de escurrimientos pluviales por infiltración no es recomendable donde:

- El nivel de aguas freáticas en su nivel más alto está a menos de 1.2 metros por debajo de la superficie de infiltración.
- El manto rocoso está a menos de 1.2 metros de la superficie de infiltración.
- La superficie de infiltración se encuentra llena o saturada (a menos que el relleno sea grava o arenas limpias).
- La superficie y el subsuelo se clasifican hidrológicamente en el grupo D (capítulo 4.3), o la proporción de infiltración una vez saturada es menos de 7.5 cm por hora.

Si las condiciones anteriores no descartan el lugar, este debe ser evaluado utilizando el método de la Swedish Association for Water and Sewer Works (Tabla

5.1). Este procedimiento se basa en la evaluación de series de condiciones de lugar asignándole puntos a cada uno de ellos. Si un lugar obtiene menos de 20 puntos, no debería ser considerado para infiltración.

Por otro lado un lugar con más de 30 puntos es considerado excelente. Los lugares que reciben entre 20 y 30 puntos son considerados buenos candidatos para una superficie de infiltración.

La figura 5.6 fue preparada para resumir este proceso y asistir al lector en la evaluación de la elección de lugares para superficies de infiltración. Los puntos que son asignados para las características de cada lugar están tabulados en la tabla 5.1 los puntos son asignados para cada condición del lugar y son sumados para determinar el total de puntos por lugar. Este sistema de evaluación debería ser usado preliminarmente solo para lugares potenciales. No sustituye un buen diseño, evaluación y estudios de ingeniería en lugares específicos.

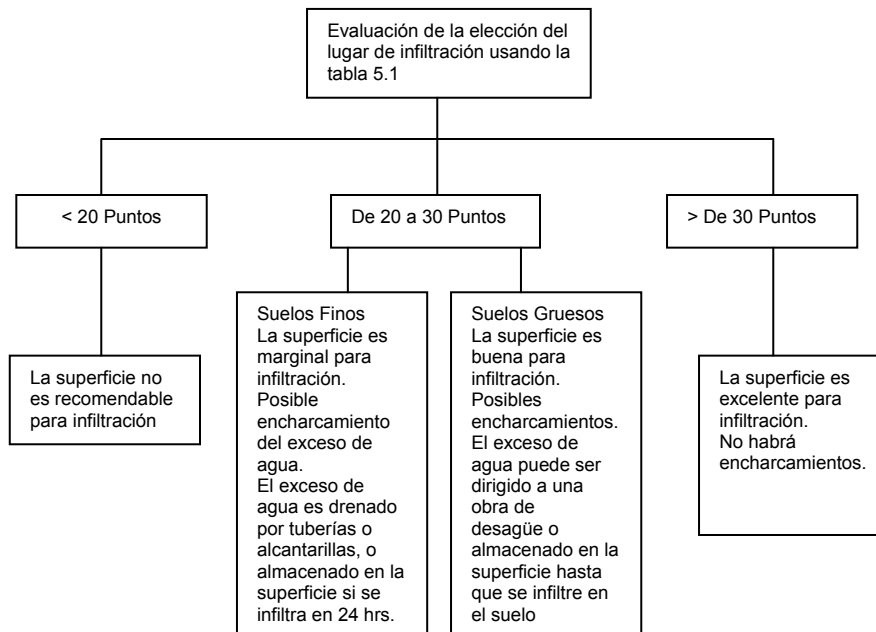


Figura 5.6 Evaluación de la elección del lugar para infiltraciones.⁶

5.5.2 Diseño de la Superficie de Infiltración

Cuando se ha juzgado que un lugar es un candidato aceptable para una superficie de infiltración, el siguiente paso es encontrar el área requerida de superficie y el volumen de almacenamiento para infiltración. La tabla 5.1 indica que el área de superficie de infiltración no debe ser más pequeña que la mitad de la superficie impermeable tributaria.

Este requisito regula el límite inferior para el dimensionamiento de la superficie de infiltración. No hay un límite superior, y la dimensión de la superficie de infiltración será detenida solamente por el derecho de vía disponible.

⁶ *Ibíd.*, pág. 218.



1. Proporción de áreas impermeables tributarias conectadas (A_{IMP}) y el area de infiltración (A_{INF})	
• $A_{INF} > 2 A_{IMP}$	20 puntos
• $A_{IMP} \leq A_{INF} \leq 2 A_{IMP}$	10 puntos
• $0.5 A_{IMP} \leq A_{INF} < A_{IMP}$	5 puntos
La superficie permeable menor que $0.5 A_{IMP}$ no debe ser usada para infiltración	
2. La naturaleza de la capa de suelo superficial:	
• Suelos gruesos con bajo contenido de material orgánico	7 puntos
• Suelo de humus normal	5 puntos
• Suelos de agregado fino con alto contenido de material orgánico	0 puntos
3. Suelos subyacentes:	
• Si el suelo subyacente es más grueso que la superficie, se le asigna el mismo número de puntos que a la capa de suelo superficial que el No. 2.	
• Si los suelos subyacentes son más finos que la superficie se utilizan los siguientes puntos:	
• Arenas y gravas	7 puntos
• Limos arenosos o arenas limosas	5 puntos
• Limos finos o arcillas	0 puntos
4. Pendiente (S) de la superficie de infiltración:	
• $S < 7\%$	5 puntos
• $7 \leq S \leq 20\%$	3 puntos
• $S > 20\%$	0 puntos
5. Cubierta vegetativa:	
• Natural y sana	5 puntos
• Césped	3 puntos
• Césped-Nuevo	0 puntos
• Sin vegetación-Suelo raso	-5 puntos
6. Trafico sobre la superficie de infiltraciones:	
• Tráfico peatonal ligero	5 puntos
• Tráfico peatonal promedio (parque, patios)	3 puntos
• Tráfico peatonal pesado	0 puntos

Tabla 5.1 Sistema de puntos para evaluación de sitios de infiltración.⁷

Las dimensiones de la superficie de infiltración también estarán gobernadas por la proporción de infiltración del agua almacenada sobre la superficie de infiltración. El valor exacto de la proporción de infiltración es uno de los parámetros más difíciles de determinar. Entre los factores que tienen influencia sobre la permeabilidad:

⁷ *Ibíd.*, pág. 219.

- La estructura de la superficie del suelo,
- El tipo y condición de la capa vegetativa,
- Humedad del suelo,
- La naturaleza de los suelos subyacentes, incluyendo permeabilidad, y
- La profundidad del manto freático.

Grupos y Tipos	Proporción de infiltración (pulgadas por hora)
A. Arena	8.0
A. Arena limosa	2.0
B. Limo Arenoso	1.0
B. Limo	0.5
C. Limo fino	0.25*
C. Arena arcillosa	0.15
D. Arcilla limosa	<0.09
D. Arcilla	<0.05

Tabla 5.2 Proporción de infiltración típica.

* Proporción mínima; suelos con proporciones menores no deben ser considerados como candidatos para superficies de infiltración.

No es posible generalizar sobre la permeabilidad o proporción de infiltración. La figura 5.6 contiene datos que ilustran la diversidad existente entre varios tipos de suelo. Claramente, la única recomendación práctica que se puede hacer es realizar varias pruebas de infiltración en cada lugar y luego utilizar la proporción más baja en el diseño de superficie de infiltración.

Cuando se conoce la curva del caudal envolvente (ecuación 5.3) y la proporción de infiltración, el volumen de almacenamiento puede ser calculado gráficamente. Como se ilustra en la figura 5.7, el volumen de almacenamiento requerido puede ser encontrado midiendo la diferencia vertical entre la función de caudal envolvente, $V(t)$, y la función de infiltración acumulada, $F(t)$. Este procedimiento gráfico puede ser fácilmente hecho en cualquier hoja de papel.

Esta figura tiene dos regiones distintas. Para precipitaciones que tienen duración de escurrimiento igual o menores a t_b , no todo el escurrimiento puede ser infiltrado hacia el subsuelo. Cuando la duración de la precipitación es mayor, la capacidad de infiltración se ve excedida.

Estos cálculos hidráulicos nos dicen que cantidad de escurrimiento no es infiltrado al suelo dadas las condiciones de intensidad-duración-frecuencia. Este exceso puede hacerse escurrimiento o permanecer en la superficie.

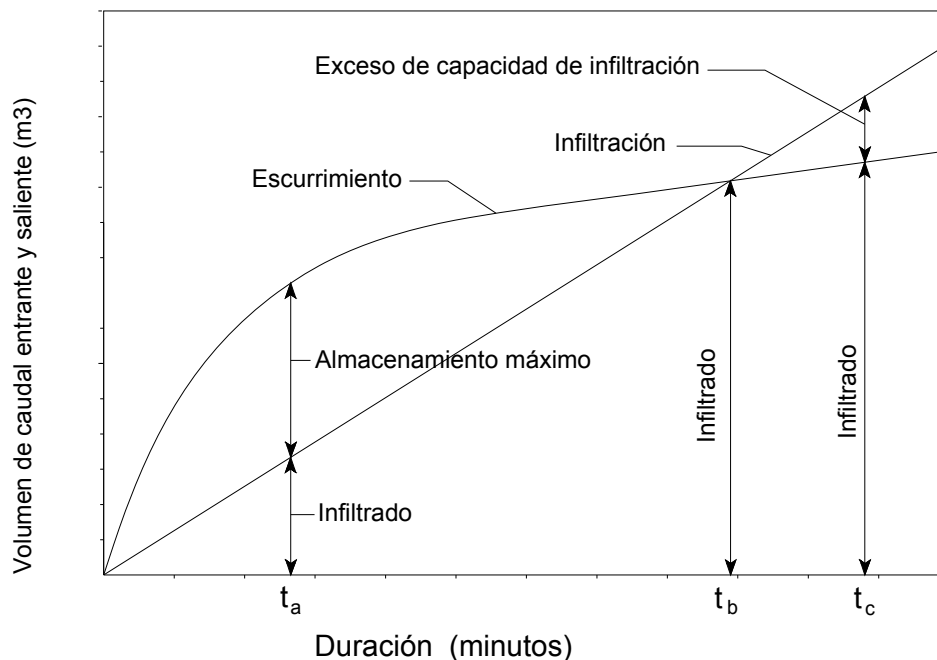


Figura 5.7 Dimensionamiento de volumen de almacenamiento en una superficie de infiltración.⁸

Como alternativa, el área de infiltración puede ser aumentada para que el escurrimiento $V(t)$ no exceda la línea de infiltración acumulada. El diseñador puede intentar con diferentes dimensiones hasta que encuentre la adecuada, esto es, que permita un balance satisfactorio entre el volumen de almacenamiento y las dimensiones de la superficie de infiltración. Si existen áreas verdes disponibles, no se deben escatimar recursos y agrandar las dimensiones del diseño, tomando ventaja del lugar para reducir las proporciones de recarga de la superficie de

⁸ *Ibíd.*, pág. 221.



infiltración, aumentando así su periodo de vida y reduciendo el periodo de condiciones húmedas.

5.6 Construcción de Pavimentos Permeables.

La construcción de concreto permeable debe de realizarse de acuerdo con los planes y especificaciones del proyecto para proveer un producto terminado que satisfaga las necesidades del propietario y los reglamentos locales. La construcción empieza con la planeación cuidadosa. Se recomienda una reunión previa a la construcción así como la construcción de tramos de prueba para definir asuntos tales como:

- Determinación de la secuencia de construcción;
- Determinar el ritmo de entrega realista del concreto;
- Adecuación del acceso al sitio del proyecto para los camiones de concreto;
- Selección del equipo óptimo para el tamaño del proyecto;
- Coordinación de pruebas y supervisión;
- Demostración de que las proporciones de la mezcla propuesta se desempeñan según lo esperado; y
- Verificación de que el contratista el concreto permeable tiene la calificación adecuada.

5.6.1 Preparación y Disposición de la Subrasante

Es esencial una subrasante uniforme y bien preparada al nivel concreto para la construcción de un pavimento de calidad. Las 6 pulgadas (150 mm) de la parte superior de la subrasante deben estar compuestas de material granular con abundante contenido de grava y una cantidad moderada (10%) de finos. La subrasante no debe estar irregular, lodosa, saturada, o congelada cuando empiece la colocación. Los suelos de la subrasante deben ser humedecidos antes



de la colocación del concreto. El descuido en proporcionar una sub-base húmeda dará como resultado una reducción en la resistencia del pavimento y puede conducir a una falla prematura del pavimento⁹. Para asegurar la compactación uniforme, deben de rastrillarse y recompactarse las deformaciones causadas por las rodadas de los vehículos antes de las operaciones de colocación del concreto. Si 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.

5.6.2 Colocación

Una disposición bien planeada del proyecto puede facilitar las operaciones de construcción, permitir el uso eficiente equipo de colocación y proporcionar acceso para los camiones de entrega del concreto. El contratista y el diseñador deben de estar de acuerdo sobre las disposiciones de las juntas y los métodos de construcción antes de empezar la construcción. Debe de haber disponible un plano que muestre la colocación de todas las juntas y la secuencia de colocación antes de empezar la construcción.

La colocación del concreto permeable necesita ser completada tan rápidamente como sea posible ya que el concreto permeable tiene un ligero exceso de agua en la mezcla. El tiempo en que se permita que el material fresco este 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. Todas las operaciones y el equipo de colocación deben ser diseñados y seleccionados teniendo esto en mente, y programadas para la colocación rápida y el curado inmediato del pavimento¹⁰.

⁹ Concreto Permeable, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 2008, pág. 21.

¹⁰ *Ibíd.*, pág. 21.

5.6.2.1 Cimbras

Las cimbras pueden ser hechas de madera, plástico, o acero y deben de tener el mismo espesor del pavimento. Las cimbras deben ser lo suficientemente fuertes y estables para soportar el equipo mecánico. La subrasante por debajo de las cimbras debe ser compactada de acuerdo con las recomendaciones del diseñador y niveladas para soportar el equipo de rodillo y enrasadores usados. Deben usarse suficientes clavijas y estacas para resistir el movimiento lateral. Todas las cimbras deben ser limpiadas y aceitadas según sea necesaria.

5.6.2.2. Colocación del Concreto

El concreto debe ser depositado 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. Para la colocación en lugares que no puedan alcanzarse con las mezcladoras o en donde tenga que minimizarse la alteración de la subrasante puede usarse una banda transportadora. Puesto que las mezclas de concreto permeable típicamente son ásperas (cero revenimiento) no se recomienda el bombeo. Después de depositar el concreto debe ser cortado a una elevación aproximada con un rastrillo o con una herramienta manual similar.

El concreto permeable a lo largo de las cimbras debe ser compactado por apisonamiento manual para asegurar que las orillas mantengan la integridad estructural después de que las cimbras sean removidas y el concreto sea puesto en servicio. Durante la compactación del concreto, el borde exterior del pisón debe ser mantenido sobre la cimbra para asegurar que el concreto no sea compactado por debajo del nivel de la cimbra.

En general, debe de tenerse mucho cuidado en minimizar:

- 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.

5.6.2.3 Tiras Niveladoras

Deben ser colocadas en la parte superior de las cimbras para el enrase inicial. Estas tiras varían de 3/8" a 3/4 de pulgada de grueso de (9 a 19 mm); el espeso necesario dependerá de la sección del pavimento el agregado usado en el concreto permeable, y los métodos de colocación del contratista.

5.6.2.4 Equipo de Enrasado

Los métodos de enrasado variarán dependiendo del tamaño del colado. Para trabajos pequeños tales como caminos particulares o para áreas estrechas es aceptable el uso de reglas rectas manuales o bailarinas. Para trabajos más grandes se recomienda el uso de una enrasadora vibratoria de marco con sección tipo (A). Es importante enrasar el concreto tan rápidamente como sea posible; así pues no se recomienda el trabajo manual debido a la insuficiente velocidad.

5.6.2.5 Herramientas Varias

Las herramientas tradicionales para le acabado del concreto tales como las canteadoras y las jaladoras (herramienta que tiene el aspecto de un azadón y tiene una larga hoja recta afilada) puede usarse para facilitar la colocación apropiada del concreto permeable. No deben usarse llanas con mango largo para dos hombres.

5.6.2.6 Usando el Concreto Adyacente como una Cimbra

Debe de tenerse un cuidado especial cuando se coloque una sección de concreto permeable junto a un sección previamente construida para evitar dañarla. Aunque este procedimiento típicamente no es recomendado, puede ser necesario en algunas aplicaciones.

1. Despegue cuidadosamente la lámina de curado que cubre el colado previo, a la distancia justa para descubrir la orilla interior de la cimbra. Debe tenerse mucho cuidado en mantener completamente cubierto el concreto permeable colocado anteriormente;
2. Coloque hojas de triplay o láminas de hilos orientados (3/8 de pulgada[10mm] o más grueso, según se requiera) en la parte superior de la lámina de curado, a lo largo del borde de colado del concreto permeable adyacente;
3. Remueva la cimbra exponiendo el borde fresco del colado anterior;
4. Coloque concreto permeable hasta alcanzar esta orilla;
5. Enrase el concreto permeable recién colocado con la enrasadora apoyada sobre el triplay;
6. Continúe con la compactación de la manera usual; y
7. Cubra el concreto permeable tan pronto como sea posible

5.6.3 Compactación

Inmediatamente después del enrase, se remueven las primeras tiras elevadoras en cada cimbra y el concreto es compactado al nivel de la cimbra con rodillo pesado.

Puede usarse un pisón manual a lo largo de los bordes para facilitar la compactación a lo largo de las cimbras. El rodillo se usa para compactar el concreto, a fin de crear una fuerte adherencia de la pasta de cemento entre las partículas del agregado y para proveer una lisura aceptable de superficie. El



rodillo debe ser de un ancho adecuado para desplazarse sobre las cimbras debe proporcionar una presión vertical mínima de 10 psi (0.07 MPa). El rodillo normal del tamaño necesario para cubrir una franja de 12 pies (3.7 m) pesa aproximadamente de 600 a 700 libras (270 a 320 kg). Puede usarse un rodillo para jardinería más pequeño o una herramienta e rodillo construido a pedido especial para áreas estrechas y para áreas más pequeñas. No se recomiendan los rodillos para jardinería para colados mas grandes debido al largo tiempo de rodillado necesario y que puede conducir a fallas por desmoronamiento en las orillas.

En algunos casos se requiere de esfuerzo adicional para asegurar un pavimento de calidad. En áreas en donde la calidad de rodamiento sea un requisito especial, el pavimento debe ser rodillado en cruz para emparejar cualesquiera desviaciones verticales en la elevación de la superficie. Junto a las aceras y en los bordes de pavimento expuesto, el concreto debe ser acabado con herramienta adecuada para proporcionar una esquina lisa y suave. Después del enrasado, la compactación y el canteado, no debe de realizarse ninguna otra operación de acabado¹¹.

5.6.4 Juntas

Las juntas de contracción deben ser construidas tal como se indique en los planos. Deben de tener una profundidad de $1/3$ a $1/4$ del espesor de pavimento. Estas pueden ser construidas en el concreto fresco con las herramientas adecuadas o una sierra cortadora, después de que el concreto se haya endurecido. Sin embargo, las juntas hechas con herramientas adecuadas producen los mejores resultados. Puede usarse un rodillo especialmente diseñado con una hoja que sea, al menos, $1/4$ del espesor de la losa y con el suficiente peso para forzar que la hoja corte limpiamente la junta. En situaciones con carriles muy anchos puede cortarse una junta longitudinal con el rodillo de compactación¹².

¹¹ Ibíd., pág. 24.

¹² Ibíd.

5.6.5 Curado y Protección

La estructura porosa del concreto permeable hace que el curado sea particularmente importante, ya que el secado puede ocurrir más rápidamente. El material de recubrimiento debe ser una hoja de polietileno claro de 6 mil (milipulgadas) (0.15 mm) o más grueso, en la dimensión suficiente para que pueda cubrir el ancho completo de un carril a lo largo e una distancia razonable. El yute o una tela geotextil no deben ser usados ya que no retiene la humedad del concreto. Los compuestos de curado a base de será no producen resultados aceptables. Las operaciones de enrasado, compactación y curado deben de realizarse en una secuencia continua como sea posible para evitar el secado de la superficie exterior del concreto permeable. Después del proceso de colocación, tan pronto como la operación de enrasado se haya desplazado a una nueva tira niveladora, la tira anterior debe ser retirada y deben empezar las operaciones de compactación. Cuando existan condiciones adversas del clima, tales como altas temperaturas, mucho viento o baja humedad, debe de aplicarse una ligera pulverización de un retardante de evaporación sobre la superficie después de las operaciones de enrasado y antes de la compactación. El curado debe empezar a los 20 minutos después de las operaciones de compactación. Antes de esto, si el concreto ha perdido su brillo debe ser ligeramente rociado con agua

El recubrimiento con hojas de polietileno debe de traslaparse en todas las superficies expuestas de modo que pueda quedar fijo en el lugar. Pueden usarse varillas de refuerzo, madera, o bloques de concreto para fijar el recubrimiento de polietileno a fin de evitar que sea levantado por el viento. No deben usarse tierra, arena u otro material granular, ya que puede ser lavado, o penetrar en los poros del concreto al momento de la remoción. Si se usan cimbras de madera, las tiras niveladoras pueden ser usadas para fijar las hojas en su lugar. Las hojas primero deben fijarse a la parte superior de la cimbra a un lado de la franja, volviendo a fijar las tiras niveladoras a la parte superior de las cimbras con clavos con cabeza de botón, con la hoja de plástico quedando aprisionada en medio entre la cimbra y la tira niveladora. Luego la hoja debe ser jalada y estirada



tanto como sea posible para eliminar los pliegues y minimizar la posibilidad de coloración de manchas rayadas en el concreto. Todas las orillas del pavimento deben ser cubiertas apropiadamente. Si no se hace esto, puede dar como resultado el desmoronamiento de los bordes expuestos.

El curado apropiado, generalmente el concreto debe permanecer cubierto durante 7 días para mezclas de concreto simple y 10 días para mezcla de concreto que incorporen cementantes complementarios. Debe pintarse el señalamiento de piso hasta después de que haya terminado el periodo de curado. No debe permitirse el tránsito durante el curado. El contratista debe tomar las medidas necesarias para evitar daño al pavimento debido al abuso de las operaciones de construcción. Específicamente, el contratista debe prohibir la remoción del material de curado y evitar toda forma de tránsito sobre el pavimento. 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 permeables¹³.

5.6.6 Protección en Clima Frío

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

5.6.7 Protección en Clima Caliente

En el clima cálido, la transportación. La colocación y la compactación deben hacerse tan rápidamente como sea posible. Puede aplicarse un retardador a la

¹³ *Ibíd.*, pág. 25.



superficie del concreto después del concreto de enrasado para retardar la pérdida de humedad en la superficie. Después de la compactación y antes de la colocación del polietileno, la superficie puede ser mojada ligeramente por neblina o con un retardador de evaporación cuando la superficie parezca estar perdiendo su apariencia brillante.



CAPÍTULO 6

USOS Y RECOMENDACIONES



Introducción Capitular 6

En este capítulo se hace referencia a la supervisión del desempeño del concreto permeable y a las pruebas de laboratorio aplicables antes, durante y después de su construcción.

También se mencionan las operaciones de medición de desempeño, reparación y mantenimiento para que el sistema de pavimento permeable siga efectuando la función de disminución de escurrimientos pluviales mediante la infiltración local de las aguas pluviales captadas.



6.1 Supervisión y Pruebas de Control

6.1.1 Generalidades

Al igual que con cualquier material ingenieril, es importante verificar la calidad de un pavimento de concreto permeable. Se realizan pruebas de la condición de la subrasante para asegurar el grado de compactación, el valor de soporte y la permeabilidad adecuados. Las pruebas de la mezcla deben ser realizadas con el objeto de investigar las propiedades del concreto tanto fresco como endurecido para asegurar la calidad del peso volumétrico, el espesor y el volumen de huecos. Muchos de los métodos de prueba actuales de la ASTM y AASHTO son aplicables a la construcción de pavimentos de concreto permeable; sin embargo, debido a las características físicas del material, no todas las pruebas del concreto simple son apropiadas para el concreto permeable¹.

6.1.2 Supervisión y Pruebas Previas a la Construcción

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

La prueba de infiltración usada para diseñar fosas sépticas no es una prueba apropiada para determinar la permeabilidad de la subrasante para los pavimentos permeables, debe de compactarse una sección de prueba de la subrasante ya especificada generalmente al grado e compactación como parte del análisis de suelo antes de completar el diseño del proyecto. Debe de usarse un

¹ Concreto permeable, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 2008, pág. 29.



infiltrómetro de anillo doble (ASTM D 3385) u otra prueba apropiada para probar adecuadamente la permeabilidad. Para proyectos pequeños estas pruebas pueden no ser necesarias especialmente si el diseñador tiene experiencia con suelos locales similares.

Deben de llevarse a cabo procedimientos de prueba normales para control (compactación) de acuerdo con el procedimiento estandarizado de pruebas ASTM sin modificaciones Antes de colocar el concreto, como parte de un plan normal de control de calidad².

6.1.3 Supervisión y Pruebas Durante la Construcción.

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

Los criterios de aceptación deben tener dos aspectos distintos el primer criterio de se basa en la mezcla de cemento pórtland tal como es entregada y se basa 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 de realizarse al menos una prueba para verificar el peso volumétrico del material. La prueba de la mezcla debe de realizarse de acuerdo con el (ASTM C 172 y C 29). La aceptación debe ser sobre una valor de +/- 80 kg/m³ del peso volumétrico de diseño. El segundo criterio se bosqueja en la siguiente sección³.

² Ibíd.

³ Ibíd., pág. 30.



6.1.4 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 del núcleo del pavimento dará como resultado muestras de aceptación para el espesor, el contenido de huecos, y el peso volumétrico. Los corazones deben de obtenerse de acuerdo con el ASTM C 42 y ser aprobados a una edad de 28 días no existen todavía métodos de prueba estandarizados para determinar el peso volumétrico. El instituto japonés del concreto tiene un método de prueba en borrador y el ASTM D 1188 puede ser útil, pero la precisión y el sesgo de estas pruebas no ha sido determinados para el concreto permeable. La aceptación del pavimento debe basarse en que el peso volumétrico promedio de los núcleos obtenidos estén dentro de +/- 80 Kg/m³ del peso volumétrico de diseño. 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 cerrado o severamente restringida puede indicar un pavimento que no funcionará apropiadamente, y esas secciones que se hayan demostrado que son esencialmente impermeables deben ser removidas y reemplazadas. Debe de lograrse un acuerdo sobre que es esencialmente lo impermeable y sobre el método de medición antes de iniciar la colocación.

Se están desarrollando pruebas para determinar la permeabilidad en el sitio de los pavimentos. Adicionalmente, los métodos de prueba que están siendo desarrollados para pavimentos de asfalto pueden también servir para concreto permeable.

En ningún momento la aceptación debe basarse en la resistencia a compresión del concreto permeable ya sea como es entregado, o tal como es muestreado por núcleos del pavimento. Debido a la relación entre la compactación y la resistencia a la compresión, existe un alto 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 de 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 diseño⁴.

6.2 Desempeño

6.2.1 Generalidades

Existe información limitada disponible sobre estudios controlados concernientes al desempeño a largo plazo de los pavimentos de concreto permeable. Las dos áreas más importantes de interés son la reducción en la capacidad de filtración debido a la colmatación y al deterioro estructural debido al desgaste. Sin embargo, pavimentos permeables que tienen más de 20 años de edad todavía están en servicio.

6.2.2 Colmatación

La colmatación ocurre cuando materiales extraños restringen la capacidad del agua para fluir a través de los pavimentos permeables. Estos materiales pueden ser finos que entran a la matriz del concreto permeable o materia vegetal que se acumula en la superficie o en los poros del concreto permeable. Los finos son transportados por el agua, por el viento, o son transportados por los vehículos. La materia vegetal proviene de los árboles o las plantas adyacentes al pavimento de concreto permeable.

⁴ *Ibíd.*



Los finos son transportados por el agua del escurrimiento de las aguas pluviales que se inicia fuera de los límites del pavimento de concreto permeable y transporta el material hacia el pavimento. Un diseño geométrico del pavimento de concreto permeable que no permita que el agua pluvial introduzca finos en el pavimento minimizara la colmatación. Por ejemplo, los pavimentos de concreto permeable deben ser proyectados con rasantes por encima del terreno adyacente y proporcionando a este una pendiente que se aleje del pavimento. Los finos transportados por el viento, generalmente son de un volumen limitado en muchas áreas, pero podrían generar preocupación en áreas áridas. La materia vegetal rutinariamente será depositada en la superficie de los pavimentos de concreto permeable, requiriendo una limpieza periódica.

En 1989 en Florida se llevo a cabo una investigación sobre el desempeño en el campo de los pavimentos de concreto permeable de hasta 13 años de edad. El estudio concluyó que los pavimentos de concreto permeable apropiadamente diseñados, construidos y mantenidos, mostraban pequeños montes de colmatación después de muchos años de servicio. El estudio también incluía la medición de la capacidad de filtración en el pavimento de concreto permeable colmatado. La capacidad de filtración del pavimento de concreto permeable colmatado era todavía igual a la del terreno empastado adyacente⁵.

6.2.3 Deterioro estructural

El deterioro estructural en pavimentos de concreto permeable generalmente toma dos formas: agrietamiento o subsidencia debido a la pérdida del soporte de la subrasante o desintegración de la superficie. El deterioro estructural puede ser causado por cargas pesadas (más allá de la capacidad estructural del pavimento), materiales débiles de la subrasante, o flujo horizontal del agua a través del pavimento de concreto permeable que erosiona el material

⁵ *Ibíd.*, pág. 31.



de la subrasante. Las altas presiones de contacto o una débil superficie de concreto permeable puede causar la desintegración de la superficie.

La investigación sobre el desempeño en el campo llevada a cabo en florida indicaba que en los pavimentos de concreto permeable la desintegración se debía a una inadecuada relación agua-cemento o compactación⁶.

6.3 Mantenimiento

Los dos métodos de mantenimiento comúnmente aceptados 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, esto es efectivo, pero debe tenerse el cuidado de que exista demasiada presión, ya que esto dañará al concreto permeable. Debe de lavarse a presión una pequeña porción usando varias presiones de agua para determinar la presión apropiada para el pavimento dado. El uso de una aspiradora eléctrica 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 del lavado a presión.

Actividad	Programa
<ul style="list-style-type: none"> Asegurarse de que no haya tierra sobre el pavimento. 	
<ul style="list-style-type: none"> Asegurarse de que el área esté limpia de sedimentos. 	Mensualmente
<ul style="list-style-type: none"> Sembrar vegetación en el área de aguas arriba. 	
<ul style="list-style-type: none"> Limpiar con aspiradora para mantener la superficie libre de sedimentos. 	Como sea necesario

⁶ Ibíd., pág. 32.



-
- | | |
|---|------------|
| • Inspeccionar la superficie para
localizar deterioros o astillamientos. | Anualmente |
|---|------------|
-

Tabla 6.1 Actividades típicas de mantenimiento para el concreto permeable⁷.

6.4 Reparación de Pavimentos de Concreto Permeable.

6.4.1 Desbastado.

Los puntos altos pueden ser rebajados con un desbastador pesado. Sin embargo, este cortará y expondrá el agregado en áreas desbastadas, cambiando la apariencia del pavimento.

6.4.2 Depresiones o Puntos Bajos.

Las depresiones pequeñas deben ser resanadas con una mezcla epóxica con 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, es muy poco probable que el color del material sea igual que el de la superficie. Deben usarse agentes epóxicos para asegurar la adherencia apropiada entre la superficie nueva y la anterior. Se han usado pinturas acrílicas para igualar el color del área del resane con un éxito variable.

⁷ *Ibíd.*, pág. 27.



6.4.3 Cortes para Instalaciones de Servicio.

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

6.5 Manejo de las Aguas Pluviales

Los problemas de la calidad del agua para las cuencas colectoras son cada vez más importantes. Gran parte del material que se erosiona y se arrastra hacia los arroyos, ríos, y eventualmente a las aguas subterráneas vienen de los escurrimientos superficiales contaminados con materiales aplicados, ya sea artificialmente, accidentalmente o naturalmente a la superficie del suelo. Los contaminantes pueden ser exceso de fertilizantes y nutrientes, pesticidas, sales y otros materiales intencionalmente aplicados, desde derrames o desechos, tales como productos de gasolina y petróleo provenientes de derrames de aceite, y la abrasión de las llantas y otros residuos como basura esparcida, goteos de aceite, desechos de animales, y polvo fino. Algunos materiales son rápidamente recogidos o disueltos y llevados por el escurrimiento. Otros, incluyendo grasas insolubles y aceites con contenido bajo de volátiles, pueden no ser disueltos.

Otra fuente de contaminantes en el escurrimiento ha sido el control deficiente o no obligatorio del escurrimiento en terrenos baldíos, con frecuencia desde sitios que están en desarrollo. La falta de controles efectivos ha dado como resultado cargas de sedimentos significativamente incrementadas en algunas áreas. Controlando el excesivo escurrimiento superficial, usando, por ejemplo, un sistema de pavimento de concreto permeable apropiadamente diseñado, es posible una reducción en la velocidad del escurrimiento. Se reduce la erosión del



lecho de los ríos, y por lo tanto también se reduce la carga de sedimentos transportada por la corriente.

El lavado de grandes cantidades de nutrientes (compuestos con alto contenido de nitrógeno y fósforo) en la cuenca colectora tiene numerosas consecuencias. Se incrementa el crecimiento de plantas, particularmente la microbiana, tal como fitoplancton y gérmenes de algas. Aunque las plantas producen oxígeno mientras están vivas, cuando mueren se descomponen, consumiendo el oxígeno disponible disuelto e incrementando la demanda del oxígeno bioquímico (DBO). El crecimiento de plantas en sistemas de concreto permeable debe ser mínimo debido a la falta de luz solar.

En muchos casos, pero no en todos, el escurrimiento inicial del agua pluvial llevará una concentración más alta de contaminantes que el escurrimiento posterior. La lluvia inicial lavará en algo la superficie. A la parte de escurrimiento con una concentración más alta de contaminantes se le ha llamado la primera descarga. En áreas áridas con grandes periodos entre las lluvias, puede también ocurrir una primera descarga de la temporada. Uno de los objetivos comunes del control del escurrimiento es capturar la primera descarga. Esto es particularmente cierto cuando se trata de pequeñas áreas de captación (drenaje).

La primera descarga puede no ocurrir en algunos de los siguientes casos:

- Grandes áreas de captación raramente muestran una primera descarga como flujo establecido, de la primera descarga de áreas que están más y más alejadas;
- Puede no haber una primera descarga si los contaminantes no son fácilmente lavados o disueltos; y
- Las diferencias en la carga de contaminantes a través del tiempo pueden ser difíciles de detectar si la aportación de contaminantes es esencialmente continua. Un ejemplo es la aportación de sedimento desde un terreno baldío fácilmente erosionado.



Con frecuencia se han usado reglas prácticas relativamente simples para seleccionar o para aprobar diseños y características de control, debido a la falta de suficientes datos locales combinados con variaciones o efectos estacionales y antecedentes de eventos de precipitaciones pluviales. Como una tosca regla práctica, la primera descarga ocurre durante los primeros treinta minutos a una hora para pequeñas áreas como estacionamientos. Cuando se usa concreto permeable, la primera hora de lluvia generalmente será capturada como mínimo. Es razonable suponer que por lo menos, la parte del escurrimiento con la carga más alta de contaminación también será capturada. Los pavimentos de concreto permeable llevarán la primera descarga dentro de los poros del concreto, y la lluvia adicional llevará a los contaminantes posteriormente dentro del sistema sin regresarlos a la corriente del escurrimiento. Los efectos de la limpieza natural del suelo pueden entonces limpiar aún más el escurrimiento.

La adopción de tipos específicos de dispositivos y características de mitigación depende del uso del sitio, los tipos y cantidades de contaminantes anticipados, el escurrimiento estimado, y las características del sitio. Aunque con frecuencia es deseable la captura de la primera descarga de un área, la eliminación de la primera descarga y la limpieza de la cuenca de captación después de remover la primera descarga puede ser técnicamente desafiante y costosa.

Se necesita más investigación para establecer o confirmar muchas de las observaciones y suposiciones respecto a la contaminación atrapado por los pavimentos de concreto permeable. Varias de las suposiciones relacionadas con la calidad del agua que necesitan ser confirmadas con:

- Las grasas y aceites con bajo contenido de volátiles que ocurren rutinariamente en áreas de estacionamiento, tales como goteos de los vehículos, probablemente serán absorbidos en la superficie del concreto permeable o, en el peor de los casos, dentro de los poros del concreto permeable, y no serán transferidos al agua del subsuelo o al agua



superficial en ninguna cantidad significativamente diferente que en los estanques de captación;

- El agua que lleva sólidos y nutrientes disueltos en el suelo desde el concreto permeable experimentará una filtración y purificación naturales de modo que el agua que alcance el nivel freático será aproximadamente de la misma calidad que el escurrimiento de saturación, empapando directamente desde la superficie; y
- El tiempo máximo del descenso del nivel de abatimiento para un sistema de concreto permeable debe ser de 3 a 5 días, lo que es consistente en el diseño de los estanques de captación, y puede ocurrir en pavimentos de concreto permeable construidos sobre suelos arcillosos. Puesto que no se dispone de mucha luz que traspase la superficie, el crecimiento y la subsiguiente descomposición de la biomasa debido a altas cargas de nutrientes en el escurrimiento serán menos. Puesto que el concreto permeable no está saturado mucho tiempo de su vida de servicio los poros son relativamente pequeños pero, no de un tamaño capilar, hay aire disponible para una gran área superficial en comparación con el volumen, y existe una pequeña diferencia en la descomposición del material orgánico biodegradable en comparación con la descomposición en la superficie.

Existe un cierto número de suposiciones actuales respecto a la sedimentación, que necesitan ser confirmadas por la investigación, tales como:

- Solamente pequeñas cargas de sedimentos pueden ser manejadas proporcionando una capacidad de almacenamiento adicional, típicamente en la capa de la base, que sea suficiente para tomar en cuenta la pérdida de la capacidad de almacenamiento debido a la sedimentación a través del tiempo. Claramente, existe un límite a la cantidad de sedimento que puede ser manejado de esta manera, y en áreas en donde se anticipan grandes cargas de sedimentos, ya sea durante la construcción o en servicio, los



pavimentos pueden ser diseñados con características adicionales de control, tales como barreras de sedimentos;

- Cuando los sedimentos estén compuestos de arena, el material muy probablemente será mantenido cerca de la superficie y no afectará adversamente la permeabilidad, pero debe mantenerse la porosidad, y entonces es necesario limpiar con aspiradora o con agua a baja presión los sitios en donde este tipo de carga de sedimentos no puede ser evitado;
- Cuando los sedimentos están compuestos de materiales arcillosos, el material es lo suficientemente pequeño que probablemente será llevado al fondo del sistema del concreto permeable. Con el tiempo, podría colmatar el sistema, reduciendo la capacidad de almacenamiento y, concebiblemente, reducirá la capacidad de filtración del agua pluvial en el suelo subyacente. Puesto que es muy probable que la sedimentación venga de los suelos que ocurren naturalmente en el área, y que se espera sean similares a la subrasante del pavimento del concreto permeable, probablemente los efectos serán mínimos, suponiendo que el diseño incorporó inicialmente una capacidad de infiltración realista; y
- Debido a la alta permeabilidad del concreto permeable en comparación con la tasa de infiltración de la mayoría de las subrasantes, la colmatación local no afectará el desempeño general del sistema del pavimento de concreto permeable, excepto por una simple reducción en la capacidad de almacenamiento (porosidad).

6.6 Necesidades de investigación

Las aplicaciones más extendidas de concreto permeable incluyen pavimentación y tratamientos superficiales para permitir el drenaje. Se requiere de mayor investigación para extender su uso en otras aplicaciones y para verificar su desempeño en varios ambientes. Aunque se usa ampliamente en climas más



templados, hay preocupación acerca del desempeño a bajas temperaturas y problemas de durabilidad bajo congelación y deshielo. Un desarrollo novedoso es el uso de concreto permeable como una capa permeable subyacente. En esta aplicación el concreto permeable puede ser usado como un material para rellenar huecos por debajo de la superficie, lo que combinaría el beneficio de su resistencia con el alivio de la presión de poro. Esto es de particular interés para mitigar la humedad, las excavaciones inestables de cimientos, los cortes de carreteras, y los deslizamientos en taludes.



Conclusiones

El concreto permeable es un concreto no convencional con propiedades de excelente permeabilidad que permite su utilización como una superficie de infiltración de escurrimientos, al mismo tiempo que cumple con la función de pavimento para uso ligero, por lo que es una excelente herramienta para la reducción de los escurrimientos superficiales en áreas urbanas.

Este tipo de concreto tiene un alto contenido de huecos, debido a que tiene poco o nada de agregado fino en la mezcla, lo que permite el paso de agua pluvial captada y los escurrimientos superficiales de áreas pequeñas a través de él.

Las granulometrías del agregado grueso usado en el concreto son típicamente de un solo tamaño, de entre $\frac{3}{4}$ y $\frac{3}{8}$ de pulgada, redondeado o triturado satisfaciendo los requisitos de ASTM D448 y C33. La capa de concreto resultante tiene una alta permeabilidad, con frecuencia es muchas veces más permeable que el suelo que lo soporta, permitiendo la rápida filtración de las precipitaciones a través de la superficie hacia las capas subyacentes.

Existen estudios que indican un alto porcentaje de falla en las superficies de pavimentos hechas con este tipo de concreto. La mayoría de las veces se atribuye a un inadecuado diseño, uso o construcción. Este estudio puso mayor énfasis en los estudios preliminares adecuados sobre hidrología y geotecnia; en una adecuada elección del lugar para alojar pavimentos permeables; una correcta elaboración, colocación y cuidados pertinentes, así como un mantenimiento ideal para que el sistema permeable cumpla con su función de infiltración y reducción de escurrimientos superficiales.

Es importante tener en cuenta que para que el concreto cumpla con su función de permeabilidad, se debe cuidar que sus propiedades sean las



adecuadas y que no sufran cambios antes, durante y después de su construcción, respetando las características de sus componentes, el procedimiento del diseño de mezcla, además de los cuidados adecuados desde los estudios preliminares, planeación, elaboración, colocación y sobre todo un correcto mantenimiento preventivo.

Se ha previsto que en un futuro cercano el agua de lluvia, particularmente la captada por los pavimentos, será el agua residual del siglo veintiuno. Por lo que el uso de pavimentos permeables en áreas urbanas es una opción que permitiría una adecuada disposición de las precipitaciones pluviales, además si se tiene una adecuada integración de estos pavimentos a los sistemas de drenaje pluvial, las necesidades de ampliación y la contaminación de aguas residuales serían reducidas.

A medida que la reutilización del agua por medio de su tratamiento se percibe más necesaria, el agua que se capta y se conduce al drenaje pluvial será eventualmente vista como una mercancía valiosa, o inclusive como un recurso renovable. Esto hace al concreto permeable, con su potencial para revolucionar la administración de aguas pluviales, una importante tecnología para el futuro.



Recomendaciones

Lo primero que debe de tenerse presente cuando se quiera utilizar superficies de pavimento a base de concreto permeable es que debe de hacerse de manera muy cuidadosa desde su planeación, diseño, elaboración, colocación y hasta su mantenimiento; ya que de esto depende su adecuada funcionalidad y durabilidad.

La evaluación de las propiedades del concreto del concreto en estado fresco y endurecido es otro de los puntos que se deben de cuidar. Ya que un alto porcentaje de las fallas se atribuye a diseños de mezclas inadecuados.

Otro de los estudios preliminares más importantes es la elección del lugar, ya que involucra la determinación de la permeabilidad del suelo y su velocidad de infiltración, por lo que debe de tenerse un criterio muy conservador en cuanto a la carga de infiltración del suelo natural para una correcta funcionalidad de la obra de infiltración.

Otro punto es el cuidado durante la colocación del concreto, no debe transitarse sobre la superficie recién colada, se debe recubrir con una película de polietileno inmediatamente después de su colocación para evitar la pérdida de agua de la mezcla y obtener un adecuado curado.

La capacidad de infiltración de un pavimento permeable depende de los cuidados anteriormente mencionados, sin embargo debe de tenerse en cuenta que el mantenimiento es, a su vez, de mucha importancia debido a la porosidad del concreto y su susceptibilidad a la colmatación.

En el caso de que existan inquietudes sobre la continuación de estudios e investigaciones sobre la utilización de pavimentos permeables como una



herramienta de disminución de escurrimientos permeables, se hace la recomendación de realizar los estudios de campo pertinentes.

Los estudios previos a la construcción de pavimentos permeables son de gran importancia, pero son de mayor importancia, para futuras investigaciones, los estudios sobre el comportamiento y desempeño de los pavimentos permeables en servicio. Existe inconsistencia en la bibliografía sobre los efectos que puede desencadenar los residuos captados en los vacíos del sistema de infiltración a base de concreto permeable, sobretodo de materia inorgánica. Por lo que sería interesante hacer estudios sobre la captación y comportamiento de estos residuos.

No debe pensarse en el concreto permeable como la sustitución ideal de las redes de drenaje pluvial, sino como un complemento del sistema de drenaje. Su integración al sistema mencionado dependerá de los factores de permeabilidad e infiltración. Así como se mencionan las ventajas y desventajas del concreto permeable, existen otros elementos de infiltración que proporcionan las mismas características de reducción de escurrimientos superficiales, incluso a un menos costo, su inutilidad reside en la necesidad de grandes áreas para acumulación de escurrimientos pluviales, por lo que su utilización en áreas urbanas es inviable.



Bibliografía

- ADAMS Barry, PAPA Fabian, Urban Stormwater Management Planning with Analytical Probabilistic Models, ed. John Wiley & Sons Inc., 2000.
- Concreto Permeable, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C., 2008.
- DEBO Thomas, REESE Andrew, Municipal Stormwater Management, Lewis Publishers, 2003.
- NOVOTNY Vladimir, Nonpoint Pollution and Urban Stormwater Management, Technomic Publishing Company, 1995.
- NOVOTNY Vladimir, Water Quality, Diffuse Pollution and Watershed Management, Second Edition, John Wiley & Sons Inc., 2003.
- STAHERE Peter, URBONAS Ben, Storm-Water Detention for Drainage, Water Quality, and CSO Management, Prentice-Hall, 1990.
- TCHOBANOGLOUS George, Ingeniería de Aguas Residuales, Redes de Alcantarillado y Bombeo, traducción de Juan De Dios Trillo Montsoriu, McGraw-Hill, 1996
- URBONAS Ben, STAHERE Meter, Stormwater Best Management Practices and Detention, Prentice-Hall, 1993.
- Manual de Pavimentos, Jesús Moncayo V., Editorial Continental



- INTERNET

Stormwater, The Journal for Surface Water Quality Professionals, Advances in Porous Pavements, Bruce Ferguson, professor y director de la Escuela de Diseño Ambiental de la Universidad de Georgia en Atenas, Grecia.