



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE
CONCRETOS PERMEABLES CON
AGREGADOS ANDESÍTICOS**

T E S I S

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL-CONSTRUCCIÓN

P R E S E N T A :

ING. DANIEL PÉREZ RAMOS

TUTOR DE TESIS:

M.I. CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO

México, D. F. agosto de 2009



JURADO ASIGNADO:

Presidente: M.I. Miguel Ángel Rodríguez Vega

Secretario: Ing. Juan Luis Cottier Caviedes

Vocal: M.I. Carlos Javier Mendoza Escobedo

1er. Suplente: M.I. Marco Tulio Mendoza Rosas

2do. Suplente: Dr. Carlos Aire Untiveros

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

LABORATORIO DE ESTRUCTURAS Y MATERIALES DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA DE LA UNAM,
EDIFICIO 02.

TUTOR DE LA TESIS:

M.I.. CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

He tenido grandes batallas en mi vida y no las he ganado solo, he sabido ganarlas gracias a la ayuda de Dios, y al apoyo incondicional de mis queridos padres Francisco Pérez Lizárraga y Guadalupe Ramos Valdez, así como el de mis hermanos Francisco Javier y Diana Guadalupe.

Gracias a todos mis amigos que me ayudaron a levantarme en los momentos difíciles, para poder concluir satisfactoriamente mis estudios, principalmente a mis compañeros de maestría: Luis Demetrio, Ramón, Carlos, Jesús Manuel, Ludwig, Sergio, Ricardo, Estrella y Arturo.

Además quiero agradecer de una manera muy especial a las personas que laboran en el laboratorio de estructuras y materiales del Instituto de Ingeniería de la UNAM, a Raymundo, Salomón y Agustín; que siempre estuvieron ahí para ayudarme y apoyarme en la realización de todas mis pruebas de laboratorio y alcanzar la meta de concluir satisfactoriamente con mi tesis.

Finalmente agradezco a todos los catedráticos por sus enseñanzas y conocimientos que me transmitieron, de una manera muy particular al Dr. Carlos Aire Untiveros y al M.I. Carlos Javier Mendoza Escobedo, quienes tuvieron la dedicación y paciencia para llevar a buen término esta tesis. **A todos muchísimas gracias.**

Daniel Pérez Ramos

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1. CONCRETO PERMEABLE.....3

1.1 ANTECEDENTES.....	4
1.2 DEFINICIÓN.....	6
1.3 APLICACIONES.....	6
1.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS.....	8
1.4.1 Ventajas.....	8
1.4.2 Desventajas.....	13

CAPÍTULO 2. DISEÑO DE MEZCLAS.....16

2.1 INTRODUCCIÓN.....	17
2.2 MATERIALES.....	17
2.2.1 Materiales cementantes.....	18
2.2.2 Agregados.....	18
2.2.3 Agua.....	19
2.2.4 Aditivos.....	20
2.3 CRITERIOS DE DISEÑO DE MEZCLAS.....	21
2.3.1 Relación agua-cemento (a/c).....	21
2.3.2 Relación agregado-cemento	23
2.3.3 Contenido de agregado grueso.....	24
2.3.4 Procedimiento de proporcionamiento	25

CAPÍTULO 3. PROPIEDADES DEL CONCRETO PERMEABLE.....30

3.1 GENERALIDADES.....	31
3.2 PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO.....	31
3.2.1 Peso volumétrico.....	31
3.2.2 Revenimiento	31

3.2.3 Contenido de vacíos (Porosidad).....	32
3.3 PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO.....	33
3.3.1 Resistencia a compresión.....	33
3.3.2 Resistencia a flexión.....	35
3.3.3 Permeabilidad.....	37
3.3.4 Absorción acústica.....	41
3.3.5 Durabilidad.....	43
3.3.5.1 Resistencia a la congelación y deshielo.....	44
3.3.5.2 Resistencia a los sulfatos.....	45
3.3.5.3 Resistencia a la abrasión.....	46
CAPÍTULO 4. COLOCACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DEL CONCRETO PERMEABLE.....	48
4.1 GENERALIDADES	49
4.2 COLOCACIÓN DEL CONCRETO PERMEABLE.....	50
4.2.1 Preparación de la subrasante.....	51
4.2.2 Mezclado y transportación.....	53
4.2.3 Colocación.....	54
4.2.4 Cimbras.....	57
4.2.5 Equipo de enrasado.....	58
4.2.6 Compactación.....	59
4.2.7 Juntas.....	61
4.2.8 Curado	62
4.2.9 Protección en clima frío.....	65
4.2.10 Protección en clima caliente.....	65
4.2.11 Reparación de pavimentos de concreto permeable.....	65
4.2.11.1 Desbastado.....	65
4.2.11.2 Depresiones o puntos bajos.....	65
4.2.11.3 Cortes para instalaciones de servicio.....	66
4.2.12 Mantenimiento.....	66
4.2.13 Supervisión y control de calidad.....	68

4.2.13.1 Supervisión y pruebas previas a la construcción.....	68
4.2.13.2 Supervisión y pruebas durante la construcción.....	69
4.2.13.3 Supervisión y pruebas posteriores a la construcción.....	70
CAPÍTULO 5. PROGRAMA EXPERIMENTAL	72
5.1 FUNDAMENTOS PARA DEFINIR EL TRABAJO EN LABORATORIO.....	73
5.2 VARIABLES EXPERIMENTALES	73
5.3 MATERIALES.....	74
5.4 SISTEMA DE DOSIFICACIÓN.....	74
5.5 COMPACTACIÓN	88
5.6 ACTIVIDADES DESARROLLADAS EN LABORATORIO	90
CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	93
6.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.....	94
6.1.1 Granulometría.....	94
6.1.2 Absorción.....	98
6.1.3 Peso específico.....	100
6.1.4 Peso volumétrico.....	100
6.1.5 Pérdida por lavado.....	101
6.2 PROPIEDADES DEL CONCRETO.....	102
6.2.1 En estado fresco.....	102
6.2.1.1 Revenimiento.....	102
6.2.1.2 Contenido de aire.....	104
6.2.1.3 Peso volumétrico.....	105
6.2.2 En estado endurecido.....	107
6.2.2.1 Resistencia a compresión.....	107
6.2.2.2 Resistencia a tensión indirecta por compresión diametral.....	110
6.2.2.3 Resistencia a flexión	113

6.2.2.4 Módulo de elasticidad.....	115
6.2.2.5 Permeabilidad.....	118
6.3 ANÁLISIS DE COSTOS DEL CONCRETO PERMEABLE.....	121

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTURAS

INVESTIGACIONES.....	124
7.1 CONCLUSIONES	125
7.2 RECOMENDACIONES.....	126
7.3 FUTURAS INVESTIGACIONES.....	127
BIBLIOGRAFÍA.....	128
ANEXOS.....	131

INTRODUCCIÓN

Una de las principales tendencias de los seres humanos es la de radicar en lugares densamente poblados. Las ciudades están creciendo territorialmente cada año, requiriendo de infraestructura que permita satisfacer las necesidades de los nuevos habitantes. En la actualidad, cuando se habla de pavimentar lo primero que se piensa es en concreto asfáltico o concreto hidráulico; esta situación ha provocado que existan cada vez menos áreas permeables en nuestro planeta, impidiendo el paso libre del agua que permita la alimentación de los mantos acuíferos.

El proceso de urbanización tradicional tiene importantes efectos sobre las aguas pluviales en una ciudad, principalmente debido a la disminución de la capacidad de infiltración y de almacenamiento, así como eliminación de los cauces naturales de escurrimiento. También aparecen contaminantes asociados a la actividad urbana como hidrocarburos y metales, que son arrastrados por el agua, contribuyendo significativamente a aumentar la contaminación difusa.

Estos cambios producen un impacto negativo en la hidrología natural y el medio ambiente. Se dañan cauces naturales y ecosistemas, y las inundaciones son más frecuentes, rápidas y severas. Todo esto se intensifica si la ciudad sigue creciendo sin preocuparse del impacto que ella misma genera. Las soluciones necesarias para enfrentar estas consecuencias son caras y no siempre efectivas.

Una alternativa para manejar el agua de una tormenta consiste en infiltrarla directamente a través de un concreto permeable utilizado como pavimento. El concreto permeable en pavimentos es una práctica ideal del mejor manejo para lograr esto, permitiendo que el agua de lluvia pase directamente a través del pavimento y entre a la tierra, de modo que pueda penetrar directamente al suelo.

Con la utilización de pavimentos de concreto permeable se consigue recargar el acuífero, preservar los recursos hídricos, reducir el escurrimiento del agua pluvial o eliminarlo y remover algunos contaminantes, mejorando la calidad del agua. Además, esta práctica reduce o elimina en gran medida la necesidad

áreas de retención costosas y el costo de alcantarillas para la conducción del agua.

El concreto permeable, o concreto sin finos, es definido como un concreto con revenimiento cero con alto grado de porosidad, es decir, con una relación de vacíos alta que permite el paso del agua a través de su estructura. Está constituido de cemento Portland, agregado grueso, poco o nada de agregado fino, aditivos y agua. Este tipo de concreto se usa en áreas destinadas a estacionamientos, áreas de tránsito ligero, paso de peatones, en ciclopistas, entre otras aplicaciones. Su estructura porosa se aprovecha para permitir que el agua de las precipitaciones pluviales se filtre hacia el subsuelo, lo que reduce el escurrimiento de agua, por lo que es considerado como un material de construcción sustentable.

La elaboración de mezclas de concreto permeable con agregados andesíticos diseñadas para un 15% y 20% de vacíos, así como la realización de su estudio experimental permitiría evaluar si éstas cumplen con las propiedades mecánicas y de permeabilidad adecuadas para su utilización en pavimentos con tránsito ligero u otras aplicaciones.

Para alcanzar lo anterior, se ha propuesto los siguientes objetivos:

- Hacer una revisión bibliográfica de los principales aspectos relacionados al concreto permeable.
- Sentar las bases para la fabricación de concretos permeables con agregados andesíticos con un porcentaje de vacíos que cumplan los requisitos de permeabilidad y resistencia.
- Estudiar el comportamiento en estado fresco y endurecido de las mezclas de concreto permeable.

CAPÍTULO 1

CONCRETO PERMEABLE

1.1 ANTECEDENTES

Al contemplar la historia de la humanidad, es interesante constatar cómo los grandes cambios en la forma de construir se deben al descubrimiento de nuevos materiales estructurales y cómo el dominio del conocimiento sobre los materiales estructurales ha marcado el desarrollo de las naciones a lo largo de los años.

El concreto permeable se ha venido usando en la construcción de edificios desde a mediados del siglo XIX. El término concreto permeable se usa para describir el material, históricamente, puede haber sido descrito como un concreto sin finos o un concreto de granulometría discontinua. Los países europeos han usado concreto permeable en 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 en primer lugar en la construcción de dos casas en el Reino Unido. Este concepto consistía en unir solo grava y cemento (ACI 522, 2006). 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 permeable. 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, después de la guerra, se usó este

sistema debido a que la eliminación de grandes cantidades de escombros de ladrillos era un problema, llevando a la investigación de las propiedades del concreto permeable. En otros lugares, la demanda sin precedente de ladrillo, y la subsecuente 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. Asimismo, 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 a la ausencia de buenos ladrillos para fachadas. El primer reporte sobre el uso de concreto permeable en Australia fue a principios de 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 altura.

El concreto permeable se usó ampliamente para edificios industriales, públicos y domésticos en áreas al norte del Círculo Ártico debido a que el uso de los materiales de construcción tradicionales probó no ser práctico. Ejemplos de estos inconvenientes incluyen los altos costos de transporte del ladrillo, los riesgos de incendio de la madera, y las pobres propiedades aislantes térmicas del concreto simple.

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 muy 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 los últimos 20 años, el concreto permeable ha sido empleado en gran medida en los Estados Unidos, sobre todo en Florida, Uta, Nuevo México y algunos otros estados, principalmente en pavimentos.

1.2 DEFINICIÓN

El concreto permeable o concreto poroso, es definido como un concreto con revenimiento cero con alto grado de porosidad, y con una relación de vacíos alta; consiste de cemento Portland, agregado grueso, poco o nada de agregado fino, agua y aditivos. La combinación de estos ingredientes producirá un material endurecido con poros conectados, que varían en tamaño de 2 a 8 mm, lo cual permite que el agua pase fácilmente a través de ellos. El contenido de vacíos puede variar de 15% a 35%, y se pueden alcanzar resistencias a la compresión entre 28 a 280 kg/cm². La capacidad de drenaje de un pavimento de concreto permeable variará con el tamaño del agregado y la densidad de la mezcla, pero generalmente varía en el rango de 81 a 730 L/min/m². En la figura 1.1 se puede apreciar como el agua pasa fácilmente a través de una muestra de concreto permeable.

1.3 APLICACIONES

El concreto permeable se usa principalmente para pavimentar superficies de uso vehicular y peatonal, en donde se requiera tener áreas permeables que permita que el agua de lluvia se infiltre libremente al subsuelo, con lo cual es posible además la reducción o eliminación de los drenajes pluviales.

Los sitios apropiados para la colocación de concreto permeable son áreas de alta permeabilidad, suelo natural con una gran conductividad hidráulica de 7 mm/hr. Además, las áreas no deberán tener pendientes mayores al 5%.



Figura 1.1 Textura de una muestra de concreto permeable
(<http://www.nrmca.org/greenconcrete/default.asp>)

El concreto permeable tiene una amplia gama de aplicaciones, incluyendo:

- Vialidades con tráfico ligero;
- Áreas de estacionamiento;
- Andadores y banquetas;
- Ciclopistas;
- Patios y jardines;
- Capas rígidas de drenaje bajo áreas exteriores de grandes centros comerciales;
- Pisos de invernaderos para mantener al 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 en canchas de tenis, áreas de zoológicos, graneros y establos para animales;
- Terraplenes de puentes;
- Plataformas en torno de albercas;
- Estructuras de playas y muros marinos (escolleras, rompeolas, pisos para muelles);
- Lechos de sedimentos de plantas para el tratamiento de aguas negras;
- Sistemas para almacenamiento de energía solar;
- Revestimiento de muros para pozos de agua;
- Arrecifes artificiales en donde la estructura abierta de concreto permeable semeja la estructura de los arrecifes;
- Zonas de lavado de autos.

Generalmente, el concreto permeable sin refuerzo 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 la figura 1.2 se muestran algunos ejemplos del concreto permeable.

1.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS

1.4.1 Ventajas

El concreto permeable que es utilizado en pisos y pavimentos, además de las diversas aplicaciones ya mencionadas anteriormente, presenta grandes ventajas sobre el concreto convencional, sus beneficios no solo son económicos y estructurales ya que también ayuda al medio ambiente.



Figura 1.2 Principales usos del concreto permeable: a. Vialidades con tráfico ligero(<http://www.vma-engineers.com/>), b. Estacionamientos(<http://www.perviousconcrete.info/pictures.htm>), c. Andadores (http://www.alconcrete.org/concrete_products.aspx)

El concreto permeable tiene muchas ventajas a diferencia de otros materiales permeables que actualmente son utilizados para cubrir el área permeable en la construcción, por ejemplo, el adopasto; se deforma por tener bases con arenas, su uso para el tránsito vehicular es limitado. En andadores, resulta incómodo ya que en el caso de calzado con tacones éstos tienden a

incrustarse dañándolos o rompiéndolos, además que en una tormenta moderada alcanza a formarse una capa de agua. Los adoquines y adocretos por su sistema de bases con arena se deforman al contacto con el agua conjuntamente con las cargas que recibe.

Las ventajas que presenta el concreto permeable sobre el concreto convencional incluyen:

- Por su función permeable en los pavimentos, no interrumpe el Ciclo Hidráulico del Agua en las ciudades, permitiendo inyectar agua pluvial a los mantos acuíferos.
- El control de la contaminación de las aguas pluviales, impidiendo que ésta se vaya por el drenaje y se mezcle con aguas negras.
- Filtra los agentes contaminadores que pueden contaminar las aguas subterráneas y dañar ecosistemas.
- Eliminación o reducción de las dimensiones de las alcantarillas de aguas pluviales.
- Control del escurrimiento de aguas pluviales.
- Por utilizar un sistema de bases con material pétreo no existen deformaciones o baches.
- Por ser un material poroso es autodrenante y autoventilado.
- Por ser una estructura con el 15% al 35% de vacíos, no genera islas de calor como el asfalto y el concreto hidráulico.
- Creación de un impulso adicional de elevación a los aviones durante el despegue por el efecto de enfriamiento.
- Evita encharcamientos y ayuda a evitar saturación en los drenajes en época de lluvias.
- Disminuye las distancias de frenado de los vehículos, especialmente en condiciones de lluvia, evita el acuaplaneo.
- Mayores facilidades para estacionamientos al eliminar la necesidad de áreas de contención de agua.

- Por no retener agua en su superficie existe baja probabilidad de deslumbramiento por reflexión de la luz sobre película de agua superficial, particularmente por la noche cuando están mojadas.
- Reducción del ruido de interacción entre la llanta y el pavimento.
- Disminuye los gradientes térmicos y de humedad (reflexión mínima de la luz).
- 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.
- Aumenta la calidad de servicios para usuarios vehicular y peatonal, durante la lluvia, disminuyendo los riesgos de accidentes.
- Por ser un material granular, sin arena, las cargas transmitidas al pavimento se descomponen y distribuyen en forma heterogénea debido a la existencia de puntos de contacto aleatorios. Por ello la carga que llega al terreno es repartida en un área mucho mayor a la que resulta en el caso de los pavimentos con bases tradicionales.
- No es más caro que otros pavimentos de concreto y compite con el asfalto.
- Es compatible con otros materiales usados para pavimentos con el fin de que se logren superficies permeables al combinarlo con estos pisos.
- No requiere de mano de obra especializada, ni de maquinaria sofisticada para su instalación.
- Se puede hacer en varios colores y con distintos tipos de piedra.
- Su base y sistema constructivo es más barato que los tradicionales por lo que el costo final no es más caro que otros pavimentos.
- Se puede fabricar directamente en obra mediante el uso de trompos o revolvedoras para concreto o se contrata la mezcla en plantas de premezclados de concreto.
- Se puede instalar a mano mediante el método tradicional de colado, aplicando después una vibro compactación con placa, o se puede aplicar con una máquina "finisher" para pavimentos de asfalto, logrando colocar por día hasta 1,500 m² por turno.

- Por no utilizar acero de refuerzo ni arena, su peso volumétrico es un 20% a 25% más ligero que el concreto convencional.
- El índice de fisuras en el concreto permeable es 25% menor, debido a la baja retracción por el índice de vacíos contenidos en comparación a un concreto convencional.
- No lo afectan agentes externos como: hidrocarburos alifáticos, hidrocarburos aromáticos, solventes clorados, metil isobutil cetona, acetato de etilo, isoforona, alcoholes, aceites vegetales, aceites minerales. Es resistente a los rayos UV, a la salinidad y al álcalis.
- Su resistencia a la flexión es mejor que la del concreto hidráulico, por ello los espesores de los pisos permeables pueden ser mucho menores, con la consiguiente reducción en los costos.

El concreto permeable tiene la capacidad de manejar las aguas pluviales al mismo tiempo que provee una infraestructura durable necesaria para el desarrollo. El concreto permeable también es una solución económica a un problema costoso. En la figura 1.3 se muestra cómo actúa una nevada sobre dos superficies diferentes, una de asfalto y una de concreto permeable.

Los pavimentos permeables pueden generar un importante beneficio social, debido a la contribución de estos a mantener las condiciones naturales de una zona. La experiencia ha mostrado que, de ser así, el control de las inundaciones se consigue con mantener la red de drenaje natural, sin tener que construir grandes colectores. Si en el diseño de nuevas urbanizaciones se consideraran criterios de mínimo impacto, en el futuro tendríamos una ciudad atravesada por muchas quebradas naturales incorporadas armónicamente a la urbanización, en la que no sería necesario invertir en soluciones costosas como los grandes colectores, que no aseguran su efectividad en el tiempo, debido al constante crecimiento de las ciudades.



a. Superficie con asfalto



b. Superficie con concreto permeable

Figura 1.3 Comparativa entre una superficie de asfalto (a) y una superficie de concreto permeable (b) después de una nevada (<http://www.nrmca.org/greenconcrete/default.asp>)

1.4.2 Desventajas

El concreto permeable presenta algunas desventajas, como son:

- Puede perder permeabilidad con el paso del tiempo, al taparse los espacios vacíos con material fino, pigmentos y por la caída de las hojas de los árboles como se muestra en la figura 1.4, por lo que se

requiere de un mantenimiento a base de agua a presión y el uso de una aspiradora.

- Tiene una menor resistencia al desgaste que el concreto convencional, por lo que solo debe colocarse en zonas de tránsito ligero.



Figura 1.4 Acumulación de finos y material vegetal (<https://fp.auburn.edu/heinmic/PerviousConcrete/>).

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 que la especificada, y al diseño inapropiado según el sitio. Para que un pavimento de concreto permeable funcione exitosamente:

- Debe verificarse la permeabilidad de los suelos. Generalmente, se recomienda una capacidad de filtración de 13 mm/hr, y una capa de suelo de 1.2 m o más. Sin embargo, ahora existen instalaciones de concreto permeable y otros materiales porosos para pavimentación en las regiones arcillosas rojizas de Piedmont en las Carolinas y en Georgia, en donde la capacidad de la infiltración en la subrasante es mucho menor que 13 mm/h. Estos pavimentos facilitan la infiltración y filtración del agua y la recarga de

las aguas freáticas, aunque no infiltran toda el agua pluvial de las grandes y excepcionales tormentas.

- Debe evitarse que entren el agua pluvial y el equipo pesado de construcción al área de pavimento permeable. El pavimento de concreto permeable no debe ser puesto en servicio hasta que toda la tierra removida con pendiente hacia el pavimento permeable haya sido estabilizada por medio de vegetación. A fin de evitar la colmatación del sistema, son esenciales los controles estrictos de la erosión y de sedimentación durante las actividades de construcción o de formación de paisajes, y deben incorporarse al plan del manejo de las aguas pluviales en el sitio de la construcción.
- El tránsito de construcción (principalmente vehículos) debe ser dirigido hacia fuera del área del pavimento permeable durante su construcción para evitar la compactación de las capas del suelo subyacente y la pérdida de la capacidad de infiltración.
- El mantenimiento debe realizarse periódicamente.

CAPÍTULO 2

DISEÑO DE MEZCLAS

2.1 INTRODUCCIÓN

El concreto permeable, también conocido como concreto poroso, de granulometría discontinua, o de alta porosidad, consiste principalmente en cemento Portland normal, agregado grueso de tamaño uniforme, agua, aditivos, y en ocasiones un poco de finos. 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.

2.2 MATERIALES

El concreto permeable usa los mismos materiales que el concreto convencional, con las excepciones que el agregado fino normalmente se elimina casi por completo, y la distribución del tamaño del agregado grueso se mantiene uniforme.

El concreto permeable se considera un tipo especial de concreto y puede ser clasificado en dos tipos: uno en el cual la porosidad se presenta en el componente del agregado de la mezcla (concreto de agregado ligero), y otro en el cual la porosidad en la mezcla no es debida a los agregados (concreto permeable). El concreto de agregado ligero puede ser elaborado usando agregados naturales o sintéticos extremadamente porosos. El concreto permeable tiene poco, o nada de agregados finos en la mezcla. Otra distinción entre estos dos tipos de concreto poroso se basa principalmente en la estructura de huecos. Los concretos de agregado ligero contienen grandes porcentajes de huecos relativamente no conectados. El concreto permeable, sin embargo, contiene grandes porcentajes de huecos conectados entre sí, que permiten el paso rápido del agua a través de la masa de concreto.

2.2.1 Materiales cementantes

El cemento Portland que satisface las normas ASTM C150, C595, ó C1157, se usa como el 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 las normas ASTM C618, C989, y C1240, respectivamente (ACI 522, 2006).

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 (De Solminihac et al., 2002). Es recomendable utilizar una cantidad que fluctúe entre los 270 a 415 kg/m³, según requisitos de resistencia y permeabilidad (Tennis et al., 2004).

2.2.2 Agregados

El concreto permeable no contiene agregado fino, o tal vez muy poco; y el agregado grueso utilizado debe ser de tamaño uniforme. Comúnmente las granulometrías de agregado grueso utilizadas deben de cumplir con la norma ASTM C33, estas son: No. 67 (3/4" a No. 4), No. 8 (3/8" a No. 16), o No. 89 (3/8" a No. 50). La norma ASTM D448 también puede ser usada para definir las granulometrías. Los agregados grandes proporcionan una superficie más porosa.

Las granulometrías del agregado usadas en el concreto permeable generalmente son, ya sea de agregado grueso de un solo tamaño o granulometría de entre 3/4 y 3/8 de pulgada (19 y 9.5 mm). Los agregados redondeados y triturados, tanto los normales como los de peso ligero, han sido usados para hacer concreto permeable y deben satisfacer los requisitos de ASTM D448 y C33. En general, 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 poros.

Recientemente, el concreto permeable ha sido empleado en estacionamientos, pavimentos de tráfico ligero y andadores. Para estas

aplicaciones, generalmente se usan tamaños de agregados más pequeños por razones de estética. El agregado grueso de tamaño 89 (3/8" a No. 50) según la norma ASTM C33, ha sido usado principalmente en estacionamientos y andadores, por más de 20 años en Florida (Tennis et al., 2004).

Si se utiliza otras granulometrías o tamaños de agregados, éstos deben someterse a la aprobación del dueño dependiendo del material propuesto. La figura 2.1 muestra dos diferentes tamaños de agregados usados en concreto permeable para crear diferentes texturas.



Figura 2.1 El concreto que contiene la caja es del tamaño de 1/4" (6.5 mm), mientras el que está debajo de la caja es de un tamaño más grande, 3/4" (19 mm) (Tennis et al., 2004).

2.2.3 Agua

La calidad del agua para el concreto permeable está gobernada por los mismos requisitos que para el concreto convencional, en el ACI 301. Como una norma general, el agua que es potable es adecuada para usarla en el concreto.

Los concretos permeables deben ser proporcionados con una relación de agua-cemento (a/c) relativamente baja (0.30 a 0.40), ya que una cantidad excesiva de agua conducirá a drenar la pasta y el atascamiento de sistema de poros (ACI 522, 2006). La adición de agua, por lo tanto, tiene que ser vigilada cuidadosamente en el campo.

2.2.4 Aditivos

Los aditivos son usados en concretos permeables para obtener propiedades especiales, como en el concreto convencional.

Los aditivos deben de satisfacer los requisitos de la ASTM C494. Los aditivos reductores de agua (de mediano a alto rango) se usan dependiendo de la relación a/c. Los aditivos retardadores se usan para estabilizar y controlar la hidratación del cemento. Con frecuencia se prefieren los aditivos retardadores cuando se está 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 utilizarse cuando se están colocando concretos permeables en clima frío. Los aditivos inclusores de aire no se han usado comúnmente en concreto permeables, pero pueden utilizarse en ambientes susceptibles de congelación y deshielo. Sin embargo, no existe un método confiable para cuantificar el volumen de aire incluido en estos materiales.

El empleo de una gran cantidad de aditivo reductor de agua no tiene hasta la fecha resultados efectivos en el mejoramiento de la colocación del concreto permeable. Las investigaciones futuras deberán proveer más recomendaciones referentes a su uso. Habría que dar un mayor seguimiento en cuanto a las recomendaciones para la dosificación de aditivos y secuencias de carga.

2.3 CRITERIOS DE DISEÑO DE MEZCLAS

Para el concreto permeable, las relaciones agregado/cemento y a/c son las variables más importantes que afectan las propiedades mecánicas. Se ha encontrado como aceptable un amplio rango de valores de cemento, dependiendo de la aplicación específica. Los aditivos químicos, además de afectar la relación a/c, 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. La tabla 2.1 proporciona los rangos típicos del proporcionamiento de materiales en el concreto permeable, y son solo valores de referencia.

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

Tabla 2.1 Rangos típicos de las proporciones de materiales en el concreto permeable (Tennis et al., 2004).

El adecuado diseño de mezclas dependerá de las propiedades de los materiales usados y de los resultados de las pruebas con dichos materiales.

2.3.1 Relación agua-cemento (a/c)

La dosis de agua utilizada tiene una gran repercusión en las propiedades de la mezcla. Utilizando una cantidad insuficiente de agua dará como resultado una mezcla sin consistencia y con una baja resistencia. Una cantidad excesiva de agua, generará una pasta que sellará los vacíos de la mezcla y que, además,

lavará el cemento dejando expuesto al agregado, produciendo una baja resistencia al desgaste superficial.

Actualmente, existe consenso sobre el hecho de que la relación agua-cemento es en realidad una covariable, determinada por la cantidad y tipo de cemento y por la granulometría empleada. Se suele utilizar como criterio para determinar este valor, el encontrar la cantidad de agua con la cual la pasta adquiere un brillo metálico (FCPA, 2002). En la figura 2.2 se muestra tres muestras de concreto permeable con diferentes cantidades de agua, con apariencias diferentes.

En el concreto permeable, el contenido óptimo de agua produce una pasta de cemento muy húmeda con una alta viscosidad. Para una proporción de mezcla, y tamaño y tipo de agregado dados, existe un estrecho rango óptimo para la relación a/c . 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 de la relación a/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 relación a/c para obtener la trabajabilidad necesaria usualmente varía en el rango 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 a la mezcla una apariencia de un metal mojado. Al comprimir y soltar un puñado de 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.

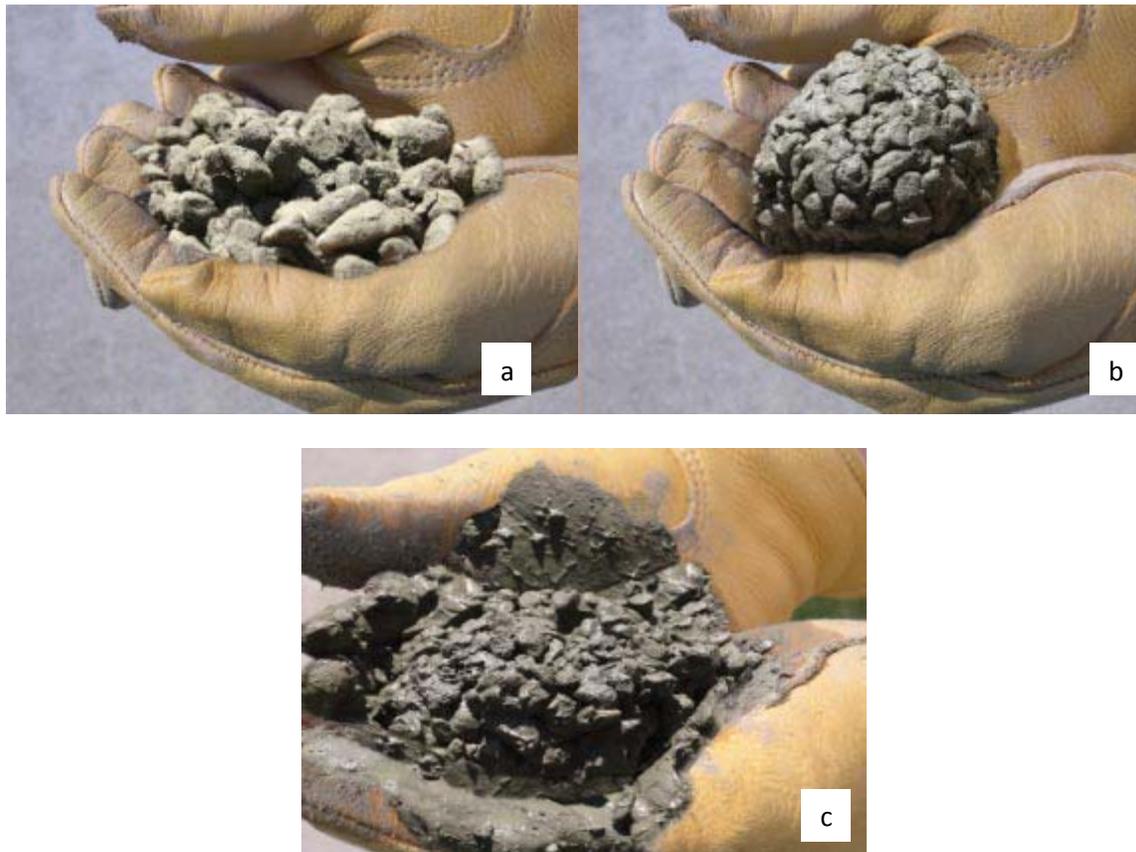


Figura 2.2 Muestras de concreto permeable con diferentes cantidades de agua: (a) con poca agua, (b) adecuada cantidad de agua, (c) con demasiada agua (Tennis et al., 2004).

La relación a/c es una consideración muy importante para el desarrollo de la resistencia y la estructura de vacíos del concreto.

2.3.2 Relación agregado-cemento

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

2.3.3 Contenido de agregado grueso

Las pruebas de peso unitario seco-compactado de agregado grueso (b/b_o) hecho por la National Aggregates Association – National Ready Mixed Concrete Association (NAA – NRMCA) muestra que el peso unitario seco-compactado del agregado grueso determinado de acuerdo con la norma ASTM C29 puede usarse en el proporcionamiento del concreto permeable.

Donde:

b/b_o = volumen seco compactado de agregado grueso por unidad de volumen de concreto.

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

b_o = volumen de agregado grueso por unidad de volumen de agregado grueso.

El valor b/b_o automáticamente se compensa por los efectos de las diferentes formas de las partículas de los agregados, la graduación o tamaño, y el peso específico. Además, para un rango de agregados de tamaño máximo nominal normalmente usados para concreto permeable ($3/8''$ a $3/4''$) los valores b/b_o son muy similares (ACI 211.3R, 1998). La tabla 2.2 muestra los valores de b/b_o para agregado grueso de tamaños No. 8 ($3/8''$) y No. 67 ($3/4''$) para un contenido de agregado fino de 0%, 10% y 20% del total de agregado.

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

Tabla 2.2 Valores efectivos de b/b_o (ACI 211.3R, 1998).

NOTA. Los valores de b/b_o , son para material bien compactado. Estos valores deben ser reducidos 0.07 para material ligeramente compactado. Además se debe reducir el volumen de pasta cuando se usan finos.

2.3.4 Procedimiento de proporcionamiento

El procedimiento de proporcionamiento para concreto permeable está basado en el volumen de pasta necesario para mantener unidas las partículas de agregado, mientras se mantiene la estructura de vacíos necesaria como se muestra en la figura 2.3. La cantidad de agregado depende del peso unitario seco-compactado y de los valores de b/b_0 seleccionados de la tabla 2.2 (ACI 211.3R, 1998). Una vez que se determina el volumen de pasta de la figura 2.3 se selecciona la relación a/c , se determinan los pesos del agua y el cemento por metro cúbico de acuerdo con las siguientes relaciones:

Volumen de pasta (V_p) = volumen de cemento + volumen de agua, o bien:

$$V_p = (c / \text{peso específico del cemento}) + (a / \text{peso específico del agua});$$

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

$$V_p = (c / (3.15 \times 1000)) + (a / 1000)$$

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

$$a = (a/c) c, \text{ y}$$

$$V_p = c / (3.15 \times 1000) + [(a/c) c / 1000]$$

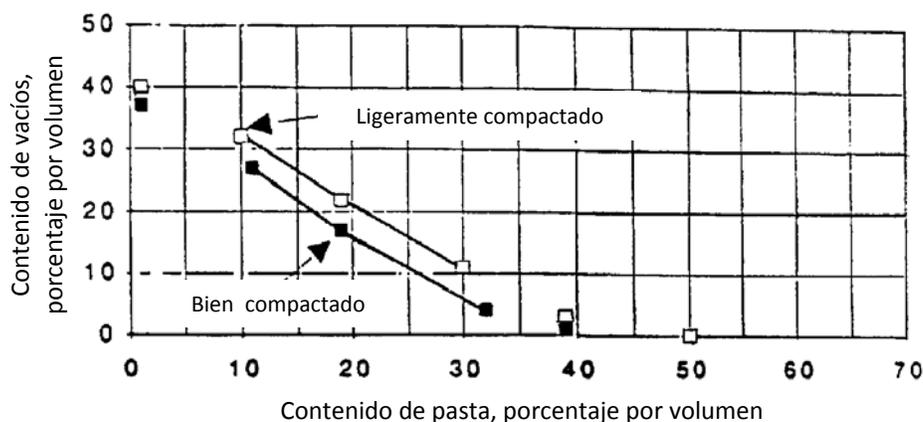


Figura 2.3 Relación entre el contenido de vacíos y el contenido de pasta para agregado No. 8 (3/8") (ACI 211.3R, 1998).

Por lo tanto, una vez que se determina el volumen de pasta de la figura 2.3, se pueden determinar el peso del cemento y el peso del agua. Cuando se usa agregado fino, el volumen de pasta debe ser reducido por cada 10% de agregado fino 2% del total de agregado para concreto permeable bien compactado, y por cada 10% de agregado fino 1% del total de agregado para concreto ligeramente compactado (ACI 211.3R, 1998). Estas reducciones son necesarias para mantener el mismo porcentaje de vacíos por volumen. A continuación se presenta un ejemplo sobre la aplicación del método de proporcionamiento (ACI 211.3R, 1998):

Ejemplo. Se requiere determinar el proporcionamiento para una mezcla de concreto permeable bien compactada, con agregado de 3/8" que tiene un peso volumétrico seco-compactado de 1741.21 kg/m^3 y una absorción de 1.2%. La mezcla debe tener un porcentaje de vacíos de 20% y una resistencia a la compresión de 140 kg/cm^2 a los 28 días. El concreto permeable debe ser proporcionado para una relación agua-cemento (a/c) de 0.38. La mezcla no contendrá agregado fino. El peso específico (SSS) del agregado grueso No. 8 es de 2.75.

Datos:

- Relación agua-cemento (a/c) = 0.38
- Porcentaje de vacíos = 20%
- Resistencia a la compresión = 140 kg/cm^2
- Cemento:
 - Peso específico = 3.15
- Grava (3/8"):
 - PVSC = 1741.21 kg/m^3
 - Peso específico = 2.75
 - Absorción = 1.2%
- Arena:
 - No contiene

Solución:

De la figura 3.3, se determina el volumen de pasta para un 20% de vacíos para una mezcla de concreto permeable bien compactada, dando como resultado 16.5%.

Por lo tanto,

$$\begin{aligned} \text{Volumen de pasta (Vp)} &= 0.165 \\ \text{Volumen de vacíos (Vv)} &= \underline{0.200} \\ \Sigma &= 0.365 \end{aligned}$$

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

$$0.635 = \frac{g}{2.75 \times 1000}$$

Donde:

g = peso del agregado, en kg

Por lo tanto,

$$g = 1746.25 \text{ kg}$$

Por otro lado:

$$\text{Volumen de pasta (Vp)} = \text{volumen de cemento (Vc)} + \text{volumen de agua (Va)}$$

Por lo tanto,

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

Donde:

c = peso del cemento, en kg

a/c = relación agua-cemento

Por lo tanto,

$$0.165 = \frac{c}{3.15 \times 1000} + \frac{0.38 c}{1000}$$

$$c = 236.57 \text{ kg}$$

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

$$V_c = \frac{c}{3.15 \times 1000}$$

$$V_c = \frac{236.57}{3.15 \times 1000}$$

$$V_c = 0.075 \text{ m}^3$$

Para determinar el contenido de agua,

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

$$a = 0.38 c$$

$$a = 0.38 (236.57)$$

$$a = 89.88 \text{ kg}$$

Para determinar el volumen de agua (V_a),

$$V_a = \frac{a}{1000}$$

$$V_a = \frac{89.88}{1000}$$

$$V_a = 0.090 \text{ m}^3$$

Finalmente, los pesos por m^3 son:

$$\begin{aligned}\text{Cemento (c)} &= 236.57 \text{ kg} \\ \text{Grava 3/8"} (g) &= 1746.25 \text{ kg} \\ \text{Agua (a)} &= \underline{89.88 \text{ kg}}\end{aligned}$$

$$\Sigma = 2072.70 \text{ kg}$$

Los volúmenes por m³ son:

$$\begin{aligned}\text{Cemento (Vc)} &= 0.075 \text{ m}^3 \\ \text{Grava 3/8"} (Vg) &= 0.635 \text{ m}^3 \\ \text{Agua (Va)} &= \underline{0.090 \text{ m}^3}\end{aligned}$$

$$\Sigma = 0.800 \text{ m}^3$$

Para confirmar el porcentaje de vacíos:

$$\% \text{ de vacíos} = (1 - 0.800) \times 100 = 20\%$$

Las proporciones de la mezcla calculadas deben ser verificadas en el laboratorio por un conjunto de pruebas y hacer los ajustes necesarios hasta encontrar las propiedades requeridas del concreto.

CAPÍTULO 3

PROPIEDADES DEL CONCRETO PERMEABLE

3.1 GENERALIDADES

Las propiedades de resistencia del concreto permeable dependen del contenido del material cementante (c), la relación agua-material cementante (a/c), el nivel de compactación, la granulometría y calidad del agregado. Aunque por más de 20 años se ha usado concreto permeable para pavimentar 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 reales de las instalaciones de campo. Actualmente, existen pocos procedimientos estándar para fabricar y ensayar especímenes de concreto permeable en el laboratorio o en el campo.

3.2 PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO

3.2.1 Peso volumétrico

El peso volumétrico de las mezclas de concreto permeable es aproximadamente 70% del peso volumétrico de las mezclas de concreto convencional. Se determina de acuerdo a la norma ASTM C29. El peso volumétrico del concreto permeable oscila entre 1,600 a 2,000 kg/m³, dependiendo del porcentaje de vacíos.

3.2.2 Revenimiento

El revenimiento (asentamiento) se usa para medir la consistencia del concreto. Para una proporción dada de cemento y agregado, sin aditivos, cuanto mayor sea el revenimiento, más húmeda es la mezcla. Se determina de acuerdo a la norma ASTM C143.

La mezcla de concreto permeable en estado plástico es rígida comparada con el concreto convencional. El revenimiento, cuando es medido, generalmente varía de 0 a 1 cm.

3.2.3 Contenido de vacíos (Porosidad)

El contenido de huecos de aire se calcula como un porcentaje de aire por el método gravimétrico (ASTM C138), y está relacionado directamente con el peso volumétrico de una mezcla dada de concreto permeable. El contenido de vacíos depende en gran medida de varios factores: granulometría del agregado, contenido de material cementante, relación a/c, y la energía de compactación. En la figura 3.1 se muestra el contenido de aire en función de la relación a/c, para dos tipos de compactación.

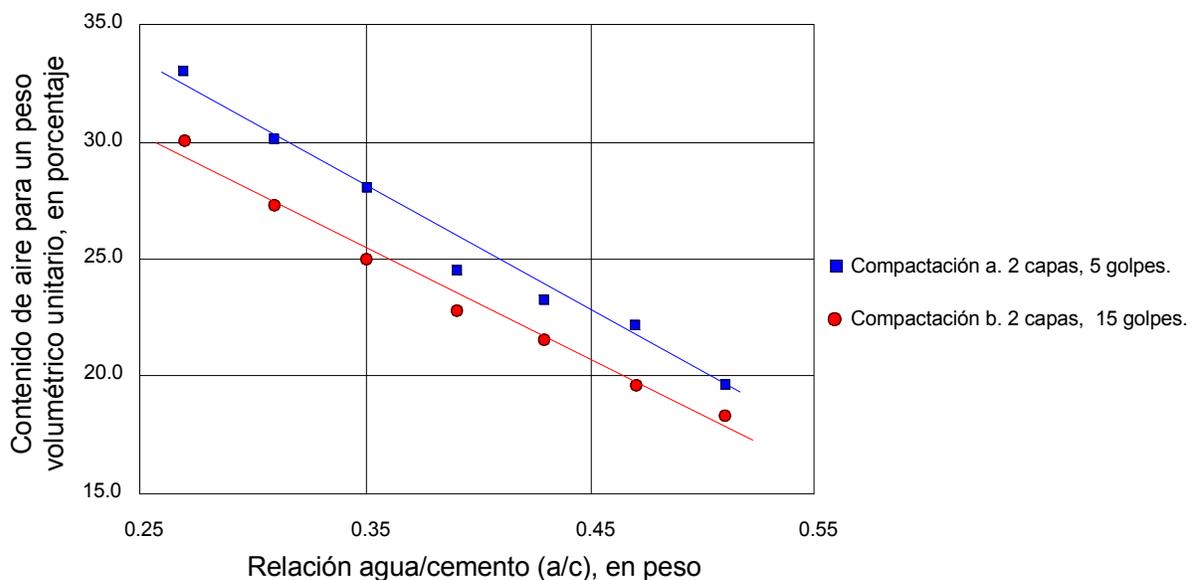


Figura 3.1 Relación entre el contenido de aire y la relación agua/cemento para el concreto permeable (Meininger, 1988).

A medida que la porosidad aumenta la resistencia disminuye, en cambio si la porosidad disminuye la resistencia aumenta. Estudios han demostrado, que el porcentaje de vacíos para concretos permeables debe estar en el rango de 14% a 31%. Por lo general, se utiliza un porcentaje de vacíos de 15% a 25%, para obtener resistencias mayores a 140 kg/cm². En la figura 3.2 se muestra la estructura interna de un concreto permeable, donde se pueden observar los vacíos.

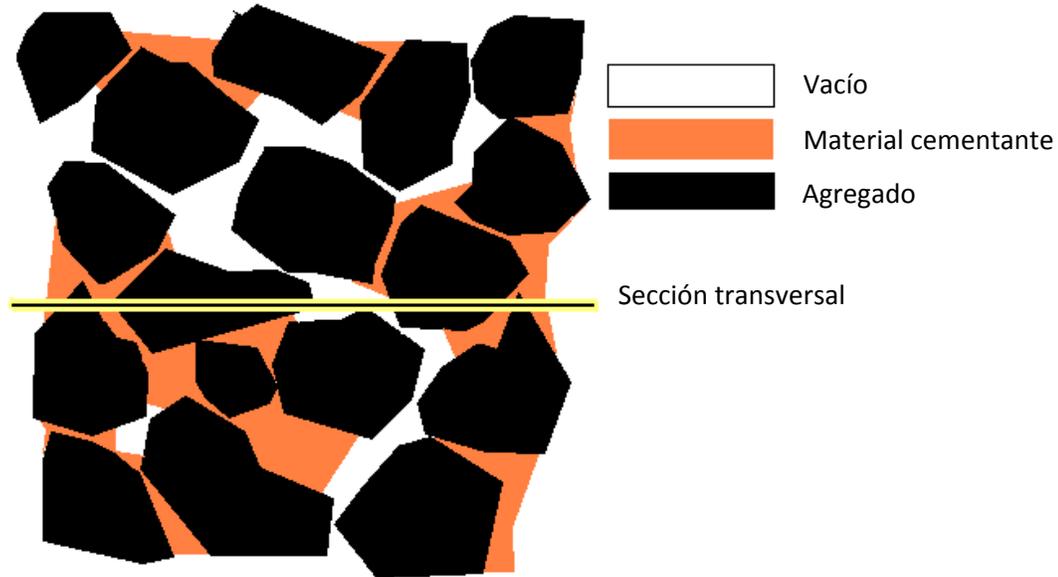


Figura 3.2 Estructura interna de un concreto permeable (Schaefer et al., 2006).

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, una misma mezcla de concreto permeable, compactada con ocho diferentes niveles de energía, produjo valores de peso volumétrico que variaban de 1680 a 1920 kg/m³. La 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 (ACI 522, 2006).

3.3 PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO

3.3.1 Resistencia a compresión

La resistencia a compresión se puede definir como la medida máxima de la resistencia a carga axial de especímenes de concreto. Se determina de acuerdo a la norma ASTM C39.

La resistencia a compresión del concreto permeable se ve afectada principalmente por la proporción de la matriz y el esfuerzo de compactación

durante la colocación. Depende primordialmente de las propiedades de la pasta y de la relación entre la pasta y el agregado. Para mejorar la resistencia del concreto permeable, se deben mejorar tres aspectos: la resistencia de la pasta, la pasta alrededor del agregado y la cohesión entre el agregado y la pasta. Esto se puede lograr usando tamaños de agregados más pequeños y/o usando aditivos. En la figura 3.3 se muestra la resistencia a compresión que puede ser alcanzada con diferentes porcentajes de vacíos, para dos diferentes tamaños de agregados (3/8" y 3/4").

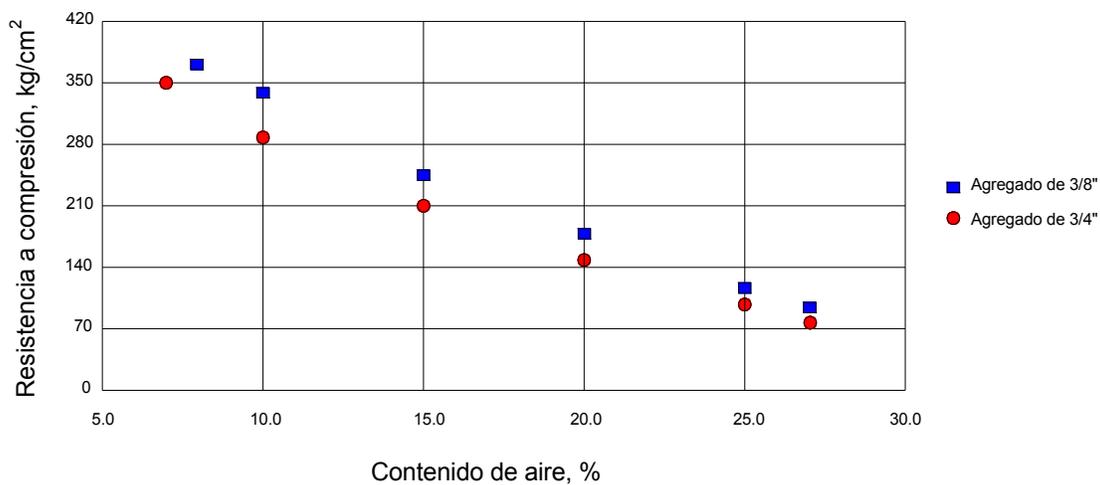


Figura 3.3 Relación entre la resistencia a compresión a 28 días y el contenido de aire para agregado de 3/8" y 3/4" (ACI 211.3R, 1998).

NOTA: Estas resistencias pueden variar dependiendo del tipo de agregado.

Aunque la relación a/c de una mezcla de concreto permeable es importante para el desarrollo de la resistencia a compresión y la estructura de huecos, la relación entre a/c y la resistencia a compresión del concreto convencional no es significativa (ACI 522, 2006). Una relación a/c alta puede dar como resultado que la pasta fluya desde el agregado y llene la estructura de huecos. Una baja relación a/c puede dar como resultado una adherencia reducida entre las partículas del agregado y problemas de colocación. La experiencia ha mostrado que una a/c entre 0.26 a 0.45 proporciona un buen recubrimiento del agregado y estabilidad de la pasta.

El contenido de material cementante total de una mezcla de concreto permeable es importante para el desarrollo de la resistencia a compresión y la estructura de huecos. Un contenido de pasta alto dará como resultado una estructura de huecos llena y, en consecuencia, menor porosidad. Un contenido de material cementante insuficiente puede dar como resultado una capa reducida de pasta envolvente del agregado y una menor resistencia a compresión. El contenido óptimo de material cementante depende principalmente del tamaño y la granulometría del agregado.

Las mezclas de concreto permeable pueden alcanzar resistencias a compresión en el rango de 35 a 280 kg/cm², que es apropiada para una amplia gama de aplicaciones (ACI 522, 2006). Los valores típicos son alrededor de 175 kg/cm². Como con cualquier tipo de concreto, las propiedades y la mezcla de materiales específicos, así como las técnicas de colocación y condiciones ambientales, dictarán la resistencia en el lugar.

3.3.2 Resistencia a flexión

La resistencia a flexión o el módulo de ruptura (rotura) se usa en el diseño de pavimentos u otras losas (pisos, placas) sobre el terreno. La resistencia a compresión, la cual es más fácil de medir que la resistencia a flexión, se puede usar como un índice de resistencia a flexión, una vez que la relación empírica entre ambas ha sido establecida para los materiales y los tamaños de los elementos involucrados. Se determina de acuerdo a la norma ASTM C78.

La resistencia a la flexión es una de las características técnicas más importantes que presenta el concreto permeable, debido a que su resistencia a la flexión es mejor que la del concreto hidráulico ordinario, comúnmente es 30% de la resistencia a la compresión, es decir, relativamente más alta que en el concreto ordinario (FCPA, 1990).

La figura 3.4 muestra la relación entre la resistencia a la flexión del concreto permeable y el contenido de huecos de aire basada en especímenes de vigas probadas en la misma serie de las pruebas de laboratorio.

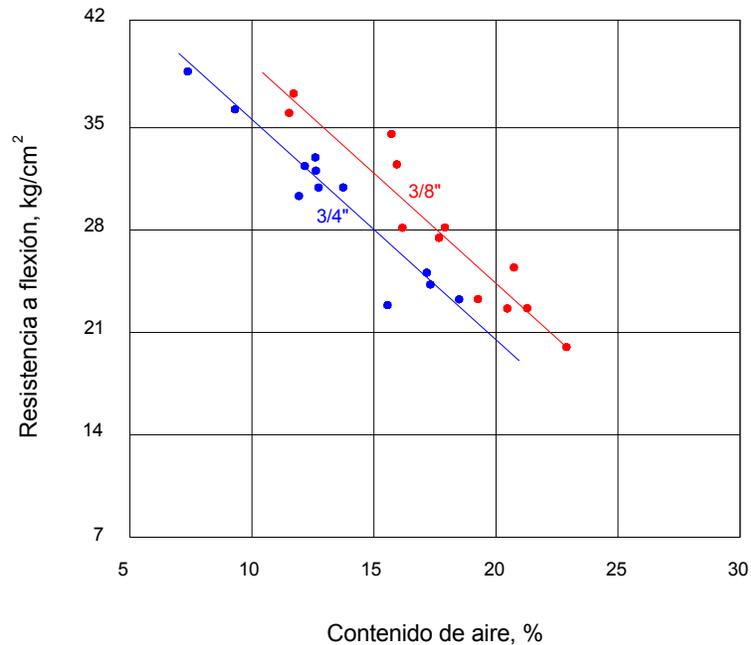


Figura 3.4 Relación entre la resistencia a flexión y el contenido de aire con agregados de 3/8" y 3/4" (Meininger, 1988).

La figura 3.5 muestra la relación entre las resistencias a compresión y a flexión del concreto permeable para una serie de pruebas de laboratorio.

La resistencia a la flexión en concretos permeables generalmente se encuentra en el rango de 10.5 kg/cm² y 40.0 kg/cm². Existen varios factores que influyen en la resistencia a la flexión, principalmente el grado de compactación, porosidad, y la proporción agregado-cemento. Sin embargo, la típica aplicación constructiva del concreto permeable no requiere la medida de resistencia a la flexión para el diseño.

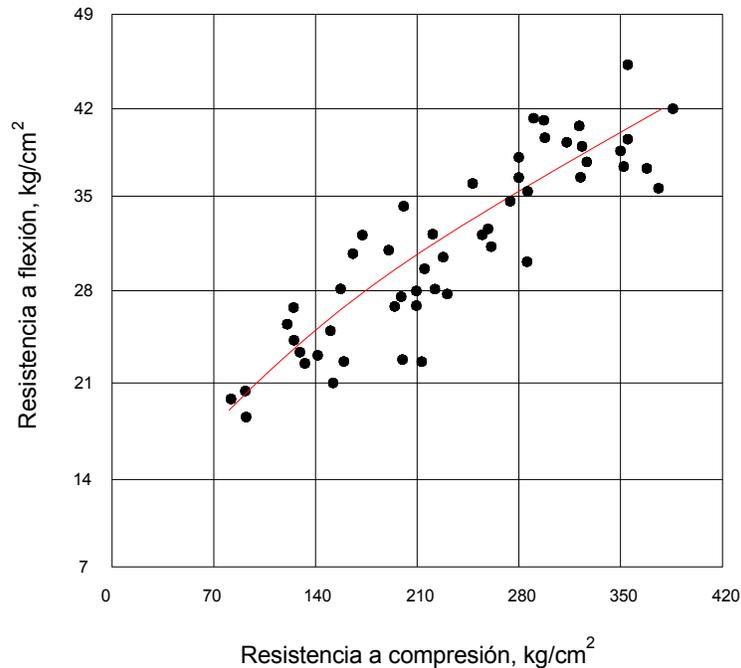


Figura 3.5 Relación entre la resistencia a flexión y la resistencia a compresión para el concreto permeable (Meininger, 1988).

3.3.3 Permeabilidad

La permeabilidad es una propiedad que permite la filtración de un fluido, a través de los espacios interconectados en el concreto.

El sistema de vacíos presente en la estructura del concreto es el que le da esta propiedad.

Una de las características más importantes del concreto permeable es su capacidad para filtrar el agua a través de la matriz. Un concreto, cuanto más poroso sea, será más permeable y tendrá una posibilidad de absorción capilar más importante. Por lo tanto, la capacidad de filtración del concreto permeable está directamente relacionada con el contenido de huecos de aire. Las pruebas han demostrado que se requiere un contenido mínimo de huecos de aire de aproximadamente 15% para lograr una filtración significativa (Meininger, 1988). Puesto que la capacidad de filtración se incrementa a medida que se incrementa el contenido de huecos de aire y, en consecuencia, disminuye la resistencia a la compresión, el reto en el proporcionamiento de una mezcla de concreto permeable

consiste en lograr un equilibrio entre la capacidad de filtración aceptable y una resistencia a la compresión también aceptable. La figura 3.6 muestra la capacidad que tiene el concreto permeable para filtrar el agua.



Figura 3.6 Capacidad de filtración del concreto permeable en un estacionamiento (<http://www.ourwater.org/econnection/connection26/tour.html>).

Además, la capacidad de filtración del concreto permeable depende de la selección de los materiales, así como de las proporciones a utilizar, preparación del concreto, proceso de colocación y su posterior curado. En la figura 3.7 se describen una serie de factores que influyen en la permeabilidad del concreto.

La capacidad de filtración del concreto permeable normalmente se encuentra en el rango de 120 a 320 L /m²/min (0.2 a 0.54 cm/s). Para que se pueda asegurar el flujo del agua se recomienda al menos 15% de contenido de vacíos (Meininger, 1988), como se muestra en la figura 3.8.

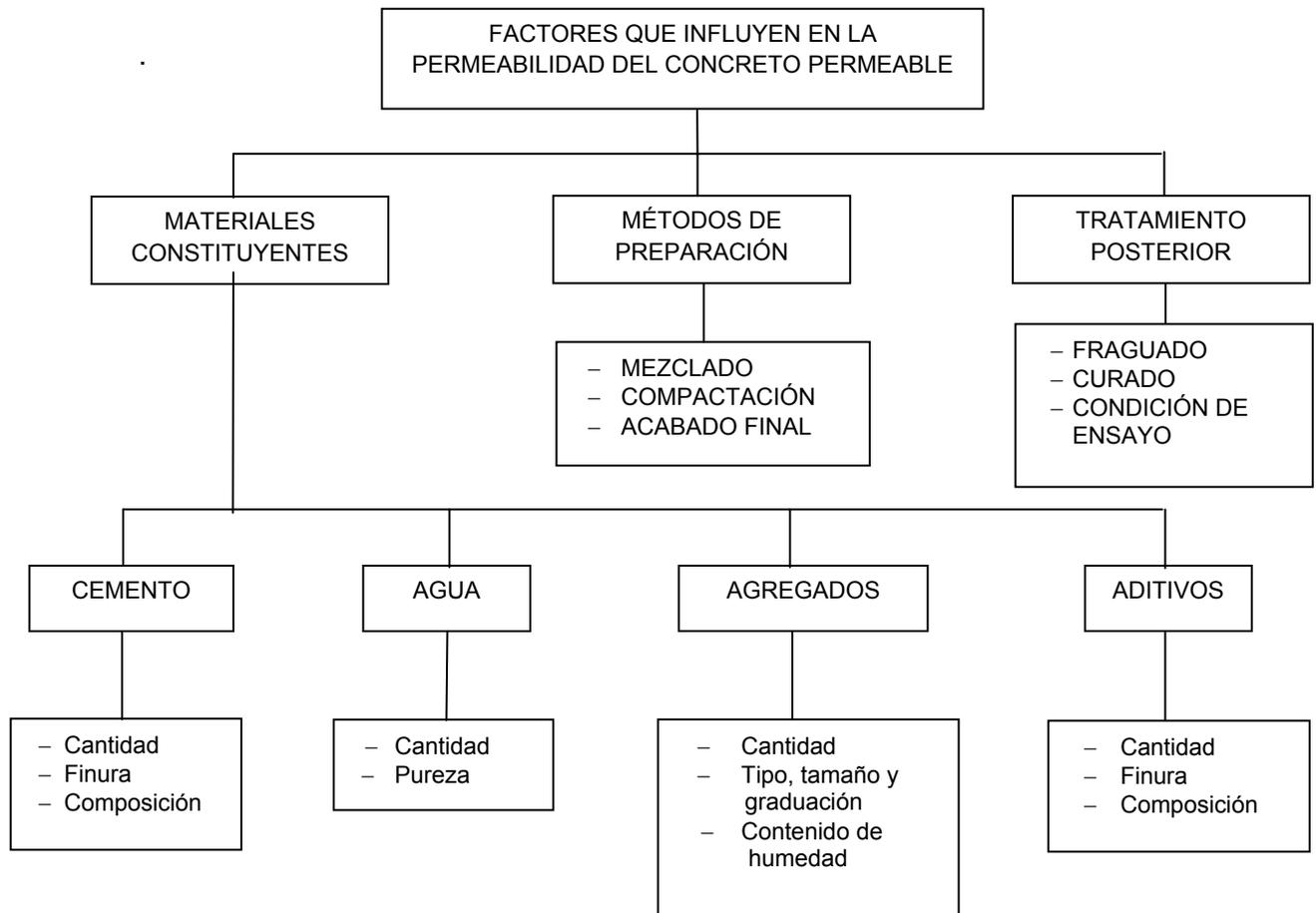


Figura 3.7 Factores que influyen en la permeabilidad del concreto

Para evaluar la capacidad de filtración del concreto permeable, el método normalmente utilizado en la mayor parte de los países del mundo, es el medir su permeabilidad mediante la utilización de permeámetros. Uno de los más utilizados y normalizado en varios países, es el permeámetro LCS (Leachate Collection System), que mide el tiempo que tarda en descender el nivel de agua entre dos marcas, evacuando el agua a través un pequeño orificio, como se muestra en la figura 3.9. A pesar de que el permeámetro LCS permite obtener resultados adecuados de permeabilidad para comparar distintos estados de permeabilidad de un pavimento, no es muy representativo de la forma real en que se presentan las lluvias.

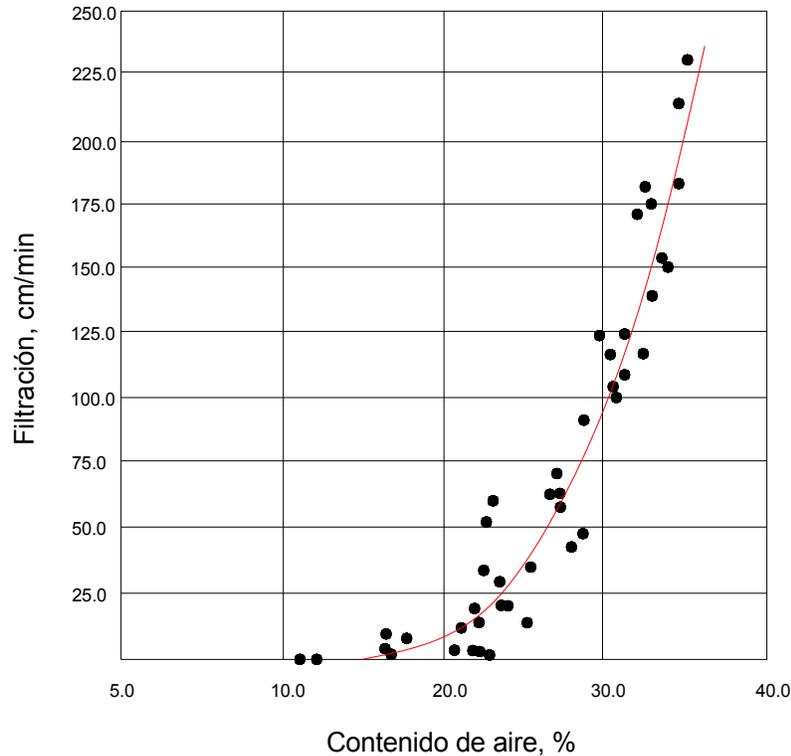


Figura 3.8 Relación entre la filtración y el contenido de aire para el concreto permeable. (Meininger, 1988).

Además, la experiencia ha mostrado que sus mediciones no son muy sensibles al estado del pavimento después de una limpieza, pudiendo los efectos parecer muy pequeños, nulos e incluso negativos; por ello se hizo necesario desarrollar sistemas de medición complementarios. Uno de estos dispositivos es el permeámetro de Zarauz, que a diferencia del LCS deja caer el agua al pavimento desde una cierta altura, filtrándose libremente sobre este, lo cual representa de mejor forma la realidad.

Con este método se toman dos tipos de medidas: tiempo total de la desaparición del agua de la superficie y la máxima distancia recorrida por el agua antes de su penetración (De Solminihac et al., 2002).

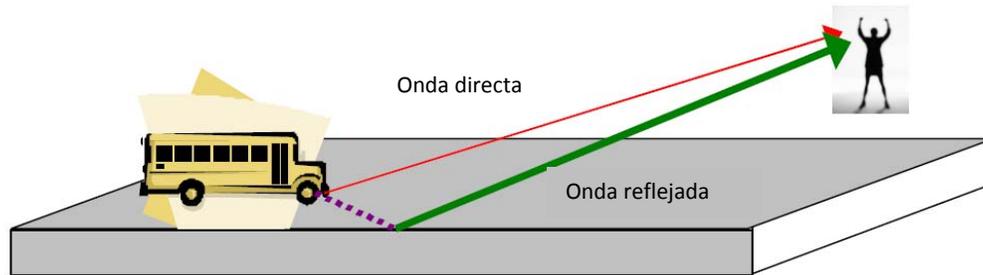


3.9 Permeámetro LCS (<http://www.mecacisa.com/catFirmes.htm>)

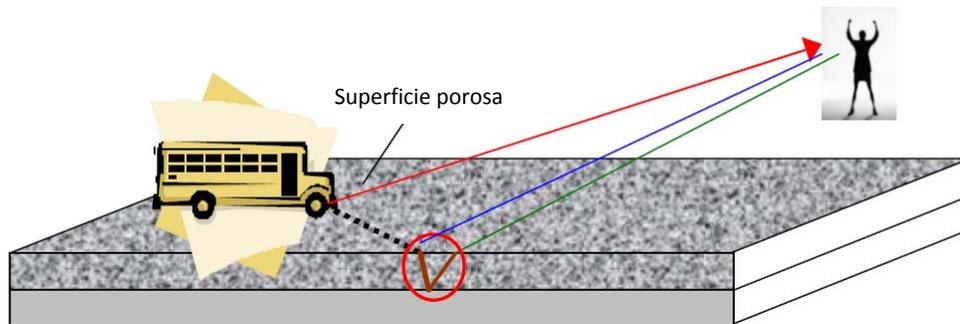
3.3.4 Absorción acústica

La estructura abierta del concreto permeable debido a la presencia de un gran volumen de poros interconectados de tamaños considerables en el material, permite que sea 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 (ACI 522, 2006).

La estructura abierta del pavimento permeable disminuye el nivel de intensidad del ruido, debido a que los pavimentos porosos absorben el sonido, tal como se muestra en la figura 3.10.



a) Reflexión del sonido en una superficie de concreto asfáltico.



b) Reflexión del sonido en una superficie de concreto permeable.

Figura 3.10 Reflexión del sonido debido al movimiento de vehículos (Schaefer et al., 2006).

Para evaluar las características de la absorción del sonido por el concreto permeable, debe emplearse un tubo de impedancia. Los especímenes cilíndricos con un diámetro de 95 mm pueden ser acomodados en el tubo de impedancia. La muestra se coloca en el interior de una camisa delgada 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 el sonido. Un material con un coeficiente de absorción de 1.0 indica

un material puramente absorbente, mientras que un material con un coeficiente de absorción de 0 indica que el material es puramente reflexivo. El concreto normal, por ejemplo, generalmente tiene un coeficiente de absorción del orden de 0.3 a 0.5 (Neithalath et al., 2005). El concreto permeable generalmente tiene un coeficiente de absorción que varía desde 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, generalmente de 800 a 1200 Hz, siendo este el rango más objetable para el oído humano (ACI 522, 2006).

3.3.5 Durabilidad

La durabilidad del concreto se puede definir como la capacidad del concreto para resistir a la acción del medio ambiente, al ataque químico y a la abrasión, manteniendo sus propiedades de ingeniería. Los efectos físicos que influyen adversamente en la durabilidad del concreto permeable 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 a los sulfatos o ácidos. La durabilidad del concreto permeable bajo condiciones de congelación y deshielo tampoco está documentada (ACI 522, 2006).

Los diferentes tipos de concreto necesitan de diferentes durabilidades, dependiendo de la exposición del ambiente y de las propiedades deseables. Los componentes del concreto, la proporción de éstos, la interacción entre los mismos y los métodos de colocación y curado determinan la durabilidad final y la vida útil del concreto (Kosmatka et al., 2004).

3.3.5.1 Resistencia a la congelación y deshielo

Se espera que el concreto permeable empleado en pavimentos tenga una vida larga y poco mantenimiento. El concreto debe tener una buena durabilidad para resistir a condiciones de exposición anticipadas. El factor de intemperismo potencialmente más destructivo es la congelación y deshielo (hielo-deshielo) mientras el concreto está húmedo, principalmente en la presencia de descongelantes.

El deterioro es causado por la congelación del agua y su posterior expansión en la pasta, agregado o ambos.

La resistencia a la congelación y deshielo del concreto permeable en el campo depende del nivel de saturación de los vacíos en el concreto en el tiempo muy frío. En el campo, parece que las características de rápido drenado del concreto permeable evita la saturación. Pocos pavimentos de concreto permeable han sido construidos en áreas más frías que las de Carolina del Norte o el área de Puget Sound y estos han estado en servicio por más de 10 años.

Cuando el agua se congela, se expande en aproximadamente 9%. Los cristales de hielo expandidos desplazan el agua. A bajos contenidos de agua, no se desarrolla presión hidrostática. Sin embargo, si los microporos en el aglomerante de concreto están saturados o casi saturados cuando empieza la congelación, entonces se acumula una presión hidrostática a medida que progresa la congelación (ACI 522, 2006).

Una porción de concreto permeable sin aire incluido y completamente saturado tuvo pobre resistencia a congelación y deshielo cuando se probó en el laboratorio, de acuerdo con el procedimiento A de ASTM C 666 (Neithalath et al., 2005), pero este método no es recomendable para evaluar la resistencia a la congelación y deshielo del concreto permeable, ya que no simula el desempeño en campo. Actualmente, no existe ningún método estándar para evaluar la resistencia a congelación y deshielo del concreto permeable. Un factor importante es la capacidad para drenar cualquier cantidad de agua que entra en su estructura en las condiciones de clima anticipadas.

Para que el concreto permeable mejore su resistencia a la congelación y deshielo, se recomienda lo siguiente:

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

El concreto permeable no es recomendado en ambientes de congelación y deshielo en donde el nivel freático se eleva a un nivel menor que 90 cm de la subrasante.

El concreto permeable que está parcialmente saturado debe tener suficientes huecos para el desplazamiento del agua, y así obtener una buena resistencia a la congelación y deshielo.

3.3.5.2 Resistencia a los sulfatos

Muchos sulfatos presentes en el suelo y en el agua pueden atacar y destruir un concreto permeable o convencional que no fue adecuadamente diseñado. Los sulfatos (por ejemplo sulfato de calcio, sulfato de sodio y sulfato de magnesio) pueden atacar un concreto pues reaccionan con los compuestos hidratados en la pasta de cemento hidratada. Estas reacciones pueden crear presiones suficientes para romper la pasta de cemento, resultando en desintegración del concreto (pérdida de cohesión de la pasta y de resistencia). El sulfato de calcio ataca el aluminato de calcio hidratado y forma etringita. El sulfato de sodio reacciona con el hidróxido de calcio y aluminato de calcio hidratado, formando etringita y yeso. El sulfato de magnesio ataca, de manera similar, al sulfato de sodio y forma etringita, yeso y también brucita (hidróxido de magnesio). La brucita se forma en primer lugar en la superficie del concreto, consume el hidróxido de calcio, baja el pH en la solución de los poros y entonces descompone el silicato de calcio hidratado (Kosmatka et al., 2004).

Los agentes agresivos químicos en el suelo o en el agua, como son ácidos y sulfatos, son una preocupación para el concreto convencional e igual para el concreto permeable, y los mecanismos de ataque son similares. Sin embargo, la estructura abierta del concreto permeable puede que haga más susceptible al ataque sobre una gran área. El concreto permeable puede ser usado en áreas de alto contenido de sulfatos y agua contaminada siempre y cuando el concreto esté aislado de estos.

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

3.3.5.3 Resistencia a la abrasión

Los pisos, pavimentos y estructuras hidráulicas son expuestos a abrasión o al desgaste, por lo que en estas aplicaciones el concreto permeable necesita tener alta resistencia a la abrasión. Resultados de pruebas indican que la resistencia a la abrasión está relacionada directamente con la resistencia a compresión del concreto. Un concreto con mayor resistencia a compresión tiene mayor resistencia a la abrasión que el concreto con menor resistencia a compresión (Kosmatka et al., 2004).

Como la resistencia a compresión depende de la relación agua-cemento y del curado, se requiere de una baja relación agua-cemento y un adecuado curado para mejorar la resistencia a la abrasión. El tipo de agregado y el acabado de la superficie o el tratamiento usado también tienen gran influencia sobre la resistencia a la abrasión. Un agregado duro es más resistente a la abrasión que un agregado más blando y una superficie acabada con llana de metal resiste mejor al desgaste que una superficie que no ha sido alisada.

Debido a la textura más áspera de la superficie y estructura abierta del concreto permeable, la abrasión y desintegración de las partículas de agregados puede ser un problema, particularmente en regiones donde se usa quitanieves para limpiar pavimentos. Esta es una razón del porqué el concreto permeable no

es adecuado para ser usado en autopistas. Sin embargo, existen evidencias que indican que los pavimentos de concreto permeable permiten que la nieve se derrita más rápido, requiriendo menos remoción de ésta (Tennis et al., 2004).

La mayoría de los pavimentos de concreto permeable tendrán menor cantidad de agregados sobre la superficie a las pocas semanas de haber abierto el tráfico. Estas partículas son desprendidas inicialmente de la superficie y son desalojadas hacia fuera por el tráfico pesado. Después de pocas semanas, la desintegración de la superficie se reduce considerablemente y la superficie del pavimento vuelve a ser más estable. Una compactación y técnicas de curado adecuadas pueden reducir la ocurrencia de la desintegración de la superficie.

CAPÍTULO 4

COLOCACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DEL CONCRETO PERMEABLE

4.1 GENERALIDADES

El concreto permeable se usa principalmente en pavimentos, con el fin de permitir la infiltración del agua a través de su superficie y el almacenamiento temporal de esta en la subbase, para su posterior disposición o infiltración en el terreno. Son utilizados principalmente en estacionamientos y calles de bajo tránsito, con el objeto de disminuir el escurrimiento superficial proveniente de las aguas de lluvia y la incidencia de éstas aguas abajo. En la figura 4.1 se muestran las diferentes capas que componen a un pavimento permeable típico.

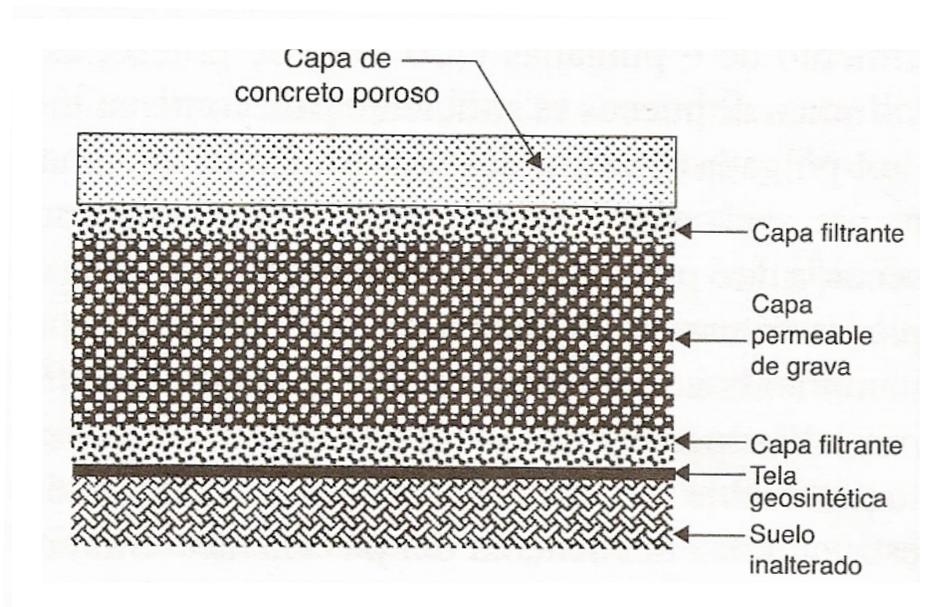


Figura 4.1 Estructura de un pavimento de concreto permeable (ACI 522, 2006).

La omisión o mínima cantidad de agregado fino es lo que da la porosidad del concreto permeable. Para proporcionar una superficie relativamente lisa se utiliza por lo general un agregado grueso de No. 8 (3/8") como máximo.

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

El procedimiento de colocación es ligeramente distinto al concreto convencional, principalmente porque utiliza un método de compactación especial y porque se debe prevenir el deterioro de la permeabilidad del suelo natural durante la construcción.

La principal ventaja que presentan los pavimentos de concreto permeable, es que reducen el flujo superficial proveniente de lluvias torrenciales mediante la infiltración, al evitar que la zona pavimentada sea totalmente impermeable. Esta capacidad de infiltración es más que suficiente para absorber toda la lluvia que cae sobre él. Una superficie de pavimento de concreto permeable podría captar el agua de una zona aledaña, aunque no es recomendable que ésta sea superior a 3 veces su tamaño. De este modo se minimiza la colmatación del pavimento, debido a los sedimentos arrastrados por el escurrimiento, que disminuyen la porosidad y por ende la infiltración. Además, pueden remover elementos contaminantes del agua, tales como metales, aceites, grasas y sólidos suspendidos, al filtrarlos a través de las capas de arena y grava, ubicadas bajo la carpeta de rodamiento.

El uso de estos pavimentos, está contraindicado en zonas o terrenos con suelos impermeables, regiones climáticas con ciclos permanentes hielo-deshielo, regiones áridas o con un alto grado de erosión eólica, zonas de alto tráfico, o donde exista alta posibilidad de colmatación (EPA, 1999).

Cuando la proporción y el colado sean los correctos, el pavimento de concreto permeable endurecido proporcionará una superficie lisa, conservando una textura abierta en la superficie (FCPA, 2002).

4.2 COLOCACIÓN DEL CONCRETO PERMEABLE

La elaboración 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 del concreto permeable tiene la calificación adecuada.

4.2.1 Preparación de la subrasante

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

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

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

expanden en condiciones húmedas. Éstas condiciones en los suelos pueden ser analizados individualmente para otros valores en los soportes y pueden ser modificados, reemplazados o bien colocar un material permeable adicional de al menos de 15 cm encima de un suelo inadecuado.

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

Dependiendo del tipo de suelo, la subrasante debería compactarse entre 90% y 95% de la densidad determinada por AASHTO T-9951 ó AASTHO T-18052. Antes de la colocación del pavimento, la subrasante o subbase debería ser compactada de acuerdo con las especificaciones y a las condiciones de humedad. El pavimento de concreto permeable tiene una humedad mínima libre y si la subrasante o sub-base está en condiciones secas, el tiempo de colocación se acelerará y se reducirá el desempeño del pavimento.

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

Es esencial una subrasante uniforme y bien preparada al nivel correcto para la construcción de un pavimento de calidad. Los 15 cm de la parte superior de la subrasante deben estar compuestos de material granular con abundante contenido de grava y una cantidad moderada de finos (10%). La subrasante no debe estar irregular, lodosa, saturada, o congelada cuando empieza 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 pavimento. 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.

4.2.2 Mezclado y transportación

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

Para producir una mezcla de consistencia adecuada, las proporciones deben ser correctamente ajustadas para la humedad de los agregados. El ingreso de los materiales en la mezcladora debe tener una secuencia tal que minimice los grumos del material de la mezcla.

Se recomienda inspeccionar las aspas de los camiones revolvedores dado el desgaste que sufren por el uso, además de que cada olla no debe tirar más de dos cargas antes de ser asignado a otro concreto. La mezcla de concreto permeable tiende a unirse fuertemente en las aspas por lo que es necesario que éstas se limpien adecuadamente y se inspeccionen. Una mezcla de concreto permeable debe ser descargada completamente una hora después de que se haya agregado el agua a la mezcla. El uso de aditivos retardantes o reductores de agua podrían extender el tiempo de colocación hasta 1 ½ horas o más, provocando que el fraguado inicial de mezcla sea más tardío cuando se manejen grandes tiempos en la colocación.

Si estas recomendaciones se siguen, después de una carga de concreto se deberá realizar una inspección visual para garantizar la adecuada consistencia y la relación agua/cemento (a/c). Durante la transportación el producto se mezclará a baja velocidad. Un ambiente con alta temperatura provocará un efecto directo en el fraguado inicial por lo que se deberá tener cierto cuidado. De acuerdo a la práctica, el concreto permeable no se recomienda para bombeo dado que no es práctico ni factible.

4.2.3 Colocación

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

Una disposición bien planeada del proyecto puede facilitar las operaciones de construcción, permitir el uso eficiente de equipo de colocación, y proporcionar acceso para los camiones de entrega del concreto. El contratista y el diseñador deben de 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 localización de todas las juntas y la secuencia de colocación antes de empezar la construcción. Deben establecerse las localizaciones de objetos fijos teniendo en mente el patrón de juntas y los métodos de construcción.

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

Previo a la colocación de la mezcla, se revisarán tanto la cimbra como la nivelación como en el caso de un concreto convencional. Se volverá a compactar la subrasante para dar un espesor y soporte uniforme. Antes de iniciar la descarga, se realizará una inspección visual a la mezcla la cual debe estar hecha de acuerdo con la relación agua-cemento óptima y la superficie de la mezcla deberá tener un aspecto metálico-brillante (Tennis et al., 2004). Si el material llega a presentar grumos se reportarán a la planta y éstos no se incorporarán en el pavimento. Si continúan estos grumos durante la colocación del material, entonces se deberá revisar la humedad y el estado de las espas de la olla.

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 como se muestra en la figura 4.2.



Figura 4.2 Colocación del concreto permeable por medio de un camión mezclador con descarga por atrás (Tennis et al., 2004)

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 normalmente son ásperas (cero revenimiento) no se recomienda el bombeo. Después de depositar el concreto, debe ser acomodado a una elevación aproximada con un rastrillo o con una herramienta manual similar, como se muestra en la figura 4.3.

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 mantenerse sobre la cimbra para asegurar que el concreto no sea compactado por debajo del nivel de la cimbra.



Figura 4.3 Rastrillado del concreto permeable a una elevación aproximada.
(http://www.stormwater.ucf.edu/research/previous_concrete_pavement_research_files/image005.jpg).

En general, se debe tener 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.

La colocación del concreto permeable necesita ser completada tan rápidamente como sea posible. El concreto permeable tiene un ligero exceso de agua en la mezcla. El tiempo en que se permita que el material fresco esté expuesto a los elementos es un tiempo en el que se está perdiendo el agua necesaria para el curado. El secado de la pasta de cemento puede llevar a una falla por desmoronamiento en los bordes de la superficie del pavimento. 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 pavimento.

4.2.4 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 resistentes y estables para soportar el equipo mecánico sin tener alguna deformación, desarrollando las operaciones de compactación y esparcimiento, como se muestra en la figura 4.4. La subrasante por debajo de las cimbras debe ser compactada de acuerdo con las recomendaciones del diseñador y niveladas, deberá soportar el equipo de rodillo y enrasadores usados.



Figura 4.4 La cimbra deberá tener el espesor del pavimento, además de ser lo suficientemente resistentes y estables (<http://www.pervious.com/images/unh.JPG>).

Deben usarse suficientes clavijas y estacas para resistir el movimiento lateral, como se muestra en la figura 4.5. Todas las cimbras deben ser limpiadas y aceitadas según sea necesario.



Figura 4.5 Cimbra de madera sujeta a base de clavijas.
(<http://curbspecialists.com/images/gallery/Pervious%20Concrete%205.jpg>).

4.2.5 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”, como se muestra en la figura 4.6. Es importante enrasar el concreto tan rápidamente como sea posible; así pues, no se recomienda el trabajo manual si la obra es muy grande debido a la insuficiente velocidad.



Figura 4.6 Enrasado del concreto permeable mediante el uso de una enrasadora vibratoria de marco con sección tipo “A” (www.perviousconcrete.com).

4.2.6 Compactación

La compactación del concreto permeable se realiza por medio de un rodillo, 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, como se muestra en la figura 4.7.



Figura 4.7 Compactación del concreto permeable mediante el uso de un rodillo (Tennis et al., 2004).

El rodillo debe ser de un ancho adecuado para desplazarse sobre las cimbras y debe de proporcionar una presión vertical mínima de 0.7 kg/cm^2 (ACI 522, 2006). El rodillo normal del tamaño necesario para cubrir una franja de 3.7 m pesa aproximadamente de 270 a 320 kg. Puede usarse un rodillo para jardinería más pequeño o una herramienta de rodillo construida a pedido especial en áreas estrechas y para áreas más pequeñas, como se muestra en la figura 4.8. No se recomiendan los rodillos para jardinería para colados más grandes debido al largo tiempo de rodillado necesario y que puede conducir a fallas por desmoronamiento en las orillas.

El paso del rodillo debe terminarse no más allá de 20 minutos después de la vibración de impactos. Debido a la textura abierta de la mezcla, la pérdida de humedad se produce a gran velocidad y el inicio del fraguado es muy rápido. Un

rodillado tardío va en detrimento de la terminación de la superficie. Si el concreto ha fraguado, el rodillo no compactará al nivel deseado. Además, un rodillado tardío produce agrietamiento superficial del mortero e incrementa la posibilidad de aparición futura de fallas, como desconches o grietas mayores. Usualmente no es necesario realizar operaciones de terminación después de la compactación, no siendo recomendables operaciones de pulido, pues puede obstruir o sellar los poros de la superficie disminuyendo su permeabilidad. No obstante, debe corregirse cualquier defecto superficial inmediatamente en forma manual.

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 cualesquier desviación vertical 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 acabado.



Figura 4.8 Rodillo pequeño usado para compactar una área pavimentada pequeña (http://www.perviousconcrete.com/images/build07/cert_pervious_roller.gif).

4.2.7 Juntas

Las juntas requeridas en los pavimentos porosos difieren a las convencionales, debido a que el pavimento poroso tiene menos de un tercio de la retracción de uno concreto convencional. Las juntas de contracción se colocan en intervalos de 6 m (GCPA, 2008). Deben de tener una profundidad de 1/3 a 1/4 del espesor del pavimento. En este caso, los equipos convencionales no son aplicables, debiendo utilizarse un rodillo especial con una hoja filosa. La experiencia ha mostrado que las juntas de dilatación térmica no son necesarias en estos pavimentos (Paine, 1992).

Las juntas longitudinales se colocan en el punto medio del ancho del carril si la construcción del ancho del carril excede los 4.50 m. Las juntas pueden ser construidas en el concreto fresco, con 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. No se pueden usar herramientas para construir las juntas del concreto convencional. Puede usarse un rodillo especialmente diseñado con una hoja que sea, al menos 1/4 (preferentemente 1/3) del espesor de la losa y con el suficiente peso para forzar a que la hoja corte limpiamente la junta, como se muestra en la figura 4.9. En situaciones con carriles muy anchos, puede cortarse una junta longitudinal con el rodillo de compactación.

Si se corta con sierra, el procedimiento debe empezar tan pronto como el pavimento se haya endurecido lo suficientemente para evitar daño a la superficie. Debe de removerse material de curado plástico del recubrimiento en el ancho suficiente para aserrar las áreas requeridas. Si no se usan sierras con sistemas de aspiradoras para recoger el polvo, después del aserrado, las áreas expuestas deben ser lavadas con agua, con lo cual se limpiarán los poros de los finos generados por el aserrado y se asegurará que haya suficiente presencia de agua para el curado apropiado. Es importante recubrir inmediatamente el área expuesta con el material plástico de curado tan pronto como se hayan hecho los cortes con sierra.



Figura 4.9 Construcción de una junta mediante la adaptación de una hoja en el rodillo de compactación (http://www.ctre.iastate.edu/Research/project_photos/pervious_joint.jpg).

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

La experiencia muestra que las juntas longitudinales son más susceptibles a desconche. Una compactación adicional en esta zona es necesaria para evitar la aparición de estas fallas.

4.2.8 Curado

El curado es uno de los elementos fundamentales para obtener un pavimento con las condiciones deseadas. La estructura porosa del concreto permeable hace que el curado sea particularmente importante, ya que el secado puede ocurrir más rápidamente. Este proceso requiere una mayor atención y cuidado que el que se tiene en los pavimentos de concreto convencional, debido a la gran superficie de contacto del concreto con el ambiente. Un proceso erróneo de curado en los primeros 7 días puede reducir la durabilidad de la superficie en

un 60% (ACI 522, 2006). El proceso de curado debe comenzar inmediatamente después de compactar y producir las juntas transversales.

El procedimiento de curado normalmente utilizado es el de cubrir la superficie expuesta con un material de polietileno claro de 0.15 mm o más grueso, en la dimensión suficiente para que pueda cubrir el ancho completo de un carril a lo largo de una distancia razonable, como se muestra en la figura 4.10. Los materiales tejidos, tales como yute o una tela geotextil, no deben usarse, ya que no retendrán la humedad en el concreto. Los componentes de curado a base de cera no producen resultados aceptables.

Las operaciones de enrasado, compactación y curado, deben 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 alta temperatura, mucho viento, o baja humedad, debe aplicarse una ligera pulverización de un retardante de evaporación sobre la superficie después de las operaciones de enrasado y antes de la 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 decoloración o de manchas rayadas en el concreto. Todas las orillas del pavimento deben ser cubiertas apropiadamente. Si no se hace esto, puede dar como resultado desmoronamiento en los bordes expuestos.



Figura 4.10 Material de polietileno utilizado para cubrir la superficie expuesta del concreto permeable (Tennis et al., 2004).

Para el curado apropiado, generalmente el pavimento debe permanecer cubierto durante 7 días para mezclas de concreto simple, y 10 días para mezclas que incorporan materiales cementantes suplementarios. Debe pintarse el señalamiento de piso hasta después de que haya terminado el periodo de curado. No debe permitirse el tránsito sobre el pavimento 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 de concreto permeable. Adicionalmente, el contratista no debe permitir el almacenamiento de materiales de construcción ni para jardinería sobre la superficie del pavimento, ya que estos materiales pueden obstruir los poros o dañar de alguna otra manera los pavimentos permeables.

4.2.9 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 son lo suficientemente eficaces para servir a ambos propósitos.

4.2.10 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 de evaporación a la superficie del concreto después del proceso 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 mojarse ligeramente por neblina o con un retardador de evaporación cuando la superficie parezca estar perdiendo su apariencia brillante.

4.2.11 Reparación de pavimentos de concreto permeable

4.2.11.1 Desbastado

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

4.2.11.2 Depresiones o puntos bajos

Las depresiones pequeñas (puntos bajos) 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 resane sea igual que el material original 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.

4.2.11.3 Cortes para instalaciones de servicio

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

4.2.12 Mantenimiento

Uno de los inconvenientes que se pueden presentar en los pavimentos permeables es que necesitan un mantenimiento desde la construcción que evite la llegada de sedimentos a la superficie, pues éstos pueden obstruir sus poros.

Existen dos métodos de mantenimiento que generalmente se usan: el método de 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 cuidado de no usar demasiada presión, ya que esto dañará el concreto permeable. Debe de lavarse a presión una sección pequeña de pavimento usando varias presiones de agua para determinar la presión apropiada para el pavimento dado. El uso de una aspiradora 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.

Para realizar estas operaciones de limpieza, varios son los modelos de máquinas que se utilizan, centrándose la mayor parte en máquinas autopropulsadas con un equipo de lavado-succión trasero con agua, de alta potencia y ancho de 2.5 metros, como se muestra en la figura 4.11. El agua es, en un gran porcentaje, recuperada y filtrada para continuar siendo utilizada en el proceso.

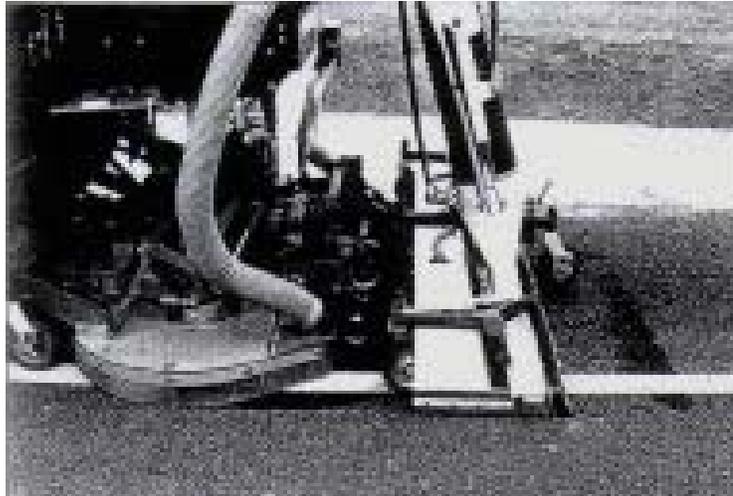


Figura 4.11 Máquina autopropulsada de limpieza con sistema presión-aspiración (De Solminihaç et al., 2002).

La presión de trabajo, la velocidad de circulación de la máquina y el número de pasadas adecuan la intensidad de la limpieza a la necesidad de limpieza del pavimento.

Valores experimentales muestran que en algunos casos la pérdida de permeabilidad que se puede producir en el primer año es recuperable en un 50% y que, manteniendo la frecuencia anual, las pérdidas del segundo año se pueden recuperar en un 70%.

En relación a la periodicidad con que debe realizarse la limpieza, parece razonable hacerlo una vez al año y después de las lluvias prolongadas, que hayan podido ablandar al máximo la suciedad depositada y así alcanzar los mejores resultados con el menor esfuerzo. En la tabla 4.1 se muestran algunas actividades de mantenimiento para el concreto permeable.

De forma general, a finales de invierno o principios de primavera suelen ser las épocas más recomendables.

En todo caso, la evolución de la permeabilidad debe marcar la pauta.

Actividad	Programa
<ul style="list-style-type: none"> - Asegúrese de que no haya tierra sobre el pavimento. - Asegúrese de que el área esté limpia de sedimentos. 	Mensualmente
<ul style="list-style-type: none"> - Siembre vegetación en el área de aguas arriba. - Limpie con aspiradora para mantener la superficie libre de sedimentos. 	Como sea necesario
<ul style="list-style-type: none"> - Inspeccione la superficie para localizar los deterioros o astillamientos. 	Anualmente

Tabla 4.1 Actividades típicas de mantenimiento para el concreto permeable (ACI 522, 2006).

4.2.13 Supervisión y control de calidad

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 el aseguramiento de 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 permeable.

4.2.13.1 Supervisión y pruebas previas a la construcción

La determinación de la permeabilidad de la 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 D422), clasificación del suelo (ASTM D2487), y peso volumétrico obtenido en pruebas Proctor estándar (ASTM D698). 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 al grado de compactación ya especificado como parte del análisis de suelo antes de completar el diseño del proyecto. Debe de usarse un infiltrómetro de anillo doble (ASTM D3385) u otra prueba apropiada para probar adecuadamente la permeabilidad. Para proyectos pequeños, estas pruebas pueden no ser necesarias, especialmente si el diseñador tiene experiencia previa 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 calidad.

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

Los criterios de aceptación deben tener dos aspectos distintos. El primer criterio se basa en la mezcla de cemento Portland 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 realizarse al menos una prueba para verificar el peso volumétrico del material. La prueba de la mezcla debe realizarse de acuerdo con el ASTM C172 y C29. La aceptación debe ser sobre un valor de $\pm 80 \text{ kg/m}^3$ del peso volumétrico de diseño. El segundo criterio se bosqueja en la siguiente sección.

4.2.13.3 Supervisión y pruebas posteriores a la construcción

El segundo criterio de aceptación debe estar basado en el pavimento terminado. El grado de compactación de la mezcla fresca puede tener un impacto en la vida y la permeabilidad del producto terminado. La obtención de tres muestras de núcleo del pavimento dará como resultado muestras de aceptación para el espesor, el contenido de huecos, y el peso volumétrico. Los corazones deben obtenerse de acuerdo con el ASTM C42 y ser probados en una edad de 28 días. No existen todavía métodos de prueba estandarizados para determinar el peso volumétrico. Además, la supervisión visual de los corazones tomará en cuenta la verificación del volumen necesario de huecos abiertos para facilitar el drenaje. Una supervisión visual que muestre una estructura de poros completamente cerrada o severamente restringida 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 qué 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 amplio rango de resistencias que

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

CAPÍTULO 5

PROGRAMA EXPERIMENTAL

5.1 FUNDAMENTOS PARA DEFINIR EL TRABAJO EN LABORATORIO

La principal característica de una mezcla permeable es su capacidad de infiltración. La permeabilidad de estas mezclas se obtiene usando agregados con un volumen significativo de huecos entre las partículas y con ausencia casi total de finos, y una cantidad reducida de pasta de cemento. La resistencia del material se obtiene mediante el efecto combinado de la delgada capa de pasta de cemento y la transmisión de esfuerzos por contacto entre los agregados.

La pasta de cemento adicionada puede tener diferentes propiedades (diferente relación a/c), y puede ser agregada en diferentes proporciones. Las propiedades mecánicas e hidráulicas del concreto endurecido, dado un sistema de compactación, dependerán de las características de la pasta y del porcentaje de huecos reales interconectados en la mezcla que se logra con cada dosificación.

5.2 VARIABLES EXPERIMENTALES

Las variables independientes consideradas fueron el porcentaje de vacíos y la relación agua/cemento (a/c) de la mezcla. Según la literatura existente, las mezclas permeables deben tener como mínimo un 15% de vacíos. Sin embargo, también es muy importante la tasa de infiltración de las mezclas. Las mismas investigaciones permiten establecer que asociado a un 15% de huecos se encuentra una tasa de infiltración cercana a 0.35 cm/s (Meininger, 1988). Este valor, será considerado en este trabajo como la mínima tasa de infiltración aceptable para considerar como permeable a una mezcla.

Adicionalmente, las mezclas con un contenido de huecos entre 15 y 20% permiten obtener mezclas con una adecuada resistencia y permeabilidad (Meininger, 1988).

Por esta razón, se escogió utilizar concretos con 15% y 20% de vacíos, con el fin de analizar el efecto de esta variable sobre la resistencia y permeabilidad de las mezclas.

La variable a/c se fijó en 0.35 para todas las mezclas de concreto permeable. Este valor fue escogido ya que una cantidad excesiva de agua conduciría a drenar la pasta y al atascamiento del sistema de poros.

5.3 MATERIALES

Agregado grueso. Se usarán agregados gruesos andesíticos con dos granulometrías diferentes, según norma ASTM C33:

- No. 8 (3/8"), con peso específico de 2.26, absorción de 3.47% y peso volumétrico seco compactado de 1426.89 kg/m^3 .
- No. 67 (3/4"), con peso específico de 2.30, absorción de 4.88% y peso volumétrico seco compactado de 1451.05 kg/m^3 .

Agregado fino. En caso necesario, se usarán agregados finos andesíticos con peso específico de 2.33, absorción de 7.34% y peso volumétrico seco compactado de 1784.07 kg/m^3 .

Material cementante. Se usará cemento Portland compuesto (CPC, NMX o NOM o ASTM XXX) de alta resistencia inicial con densidad 3.15 gr/cm^3 .

Aditivos. Para una mezcla permeable con agregado de No. 67 (3/4") y 20% de vacíos se usará un aditivo agente viscoso con una dosis de 5.25 ml/kg de cemento. Por otra parte, para lograr un contenido de aire en un rango de 15% a 20% en la mezcla de concreto convencional (concreto de referencia) se usará un aditivo agente espumante con una dosificación de 2.20 lt/m^3 de concreto.

5.4 SISTEMA DE DOSIFICACIÓN

Se fabricarán seis mezclas de concreto, distribuidas de la siguiente manera:

- *Cuatro concretos permeables:*
 - Concreto permeable con agregado No. 8 (3/8"), 15% de vacíos.
 - Concreto permeable con agregado No. 8 (3/8"), 20% de vacíos.
 - Concreto permeable con agregado No. 67 (3/4"), 15% de vacíos.

- Concreto permeable con agregado No. 67 (3/4"), 20% de vacíos.
- *Dos concretos de referencia*
 - Concreto permeable con agregado No. 67 (3/4"), 20% de vacíos, aditivo agente viscoso.
 - Concreto convencional con agregado No. 67 (3/4"), $f'c=200$ kg/cm², 10 cm de revenimiento. Aditivo agente espumante, para alcanzar un porcentaje de vacíos de 15% a 20%.

A continuación se describen detalladamente los proporcionamientos de cada una de las mezclas descritas anteriormente, las cuales se basaron en el procedimiento descrito en ACI 211.3R-97.

- **Concreto permeable con agregado No. 8 (3/8"), 15% de vacíos.**

De la figura 2.3, se determina el volumen de pasta para un 15% de vacíos para una mezcla de concreto permeable bien compactada, dando como resultado 21%.

Datos:

- Relación agua-cemento (a/c) = 0.35
- Porcentaje de vacíos = 15%
- Cemento:
 - Peso específico = 3.15 gr/cm³
- Grava (3/8"):
 - PVSC = 1426.89 kg/m³
 - Peso específico = 2.26 gr/cm³
 - Absorción = 3.47%
- Arena:
 - No contiene

Por lo tanto,

$$\begin{aligned} \text{Volumen de pasta } (V_p) &= 0.210 \\ \text{Volumen de vacíos } (V_v) &= \frac{0.150}{\Sigma} \\ \Sigma &= 0.360 \end{aligned}$$

$$\text{Volumen de grava } (V_g) = 1 - 0.360 = 0.640 \text{ m}^3$$

$$0.640 = \frac{g}{2.26 \times 1000}$$

Donde:

g = peso del agregado, en kg

Por lo tanto,

$$g = 1446.40 \text{ kg}$$

Volumen de pasta (V_p) = volumen de cemento (V_c) + volumen de agua (V_a)

Por lo tanto,

$$0.21 = \frac{c}{3.15 \times 1000} + \frac{(a/c)c}{1000}$$

Donde:

c = peso del cemento, en kg
 a/c = relación agua-cemento

Por lo tanto,

$$0.21 = \frac{c}{3.15 \times 1000} + \frac{0.35c}{1000}$$

$$c = 314.63 \text{ kg}$$

Para determinar el volumen de cemento (V_c),

$$V_c = \frac{c}{3.15 \times 1000}$$

$$V_c = \frac{314.63}{3.15 \times 1000}$$

$$V_c = 0.100 \text{ m}^3$$

Para determinar el contenido de agua,

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

Donde:

a = peso del agua, en kg
 c = peso del cemento, en kg
 a/c = relación agua-cemento

$$a = 0.35 c$$

$$a = 0.35 (314.63)$$

$$a = 110.12 \text{ kg}$$

Para determinar el volumen de agua (V_a),

$$V_a = \frac{a}{1000}$$

$$V_a = \frac{110.12}{1000}$$

$$V_a = 0.110 \text{ m}^3$$

Los pesos por m^3 son:

Cemento (c)	=	314.63 kg
Grava 3/8" (g)	=	1446.40 kg
Agua (a)	=	<u>110.12 kg</u>
Σ	=	1871.15 kg

Los volúmenes por m^3 son:

Cemento (V_c)	=	0.100 m^3
Grava 3/8" (V_g)	=	0.640 m^3
Agua (V_a)	=	<u>0.110 m^3</u>
Σ	=	0.850 m^3

Para confirmar el porcentaje de vacíos:

$$\% \text{ de vacíos} = (1 - 0.850) \times 100 = 15\%$$

Al realizar las pruebas preliminares en laboratorio, se pudo observar que la mezcla no

presentaba cohesión al momento de realizar el revenimiento, razón por la cual se decidió aumentar el volumen de pasta, aumentando el cemento a la cantidad de 350 kg/m³, manteniendo la relación *a/c*, quedando de la siguiente manera:

$$c = 350.00 \text{ kg}$$

$$a/c = 0.35$$

Por lo tanto, la cantidad de agua es:

$$a = 0.35 c$$

$$a = 0.35 (350.00)$$

$$a = 122.50 \text{ kg}$$

En base al porcentaje de vacíos (15%), se iguala la relación,

$$0.85 = \frac{350.00}{3150} + \frac{g}{2260} + \frac{122.50}{1000}$$

$$g = 1393.04 \text{ kg}$$

Los pesos por m³ son:

$$\begin{array}{rcl} \text{Cemento (c)} & = & 350.00 \text{ kg} \\ \text{Grava 3/8'' (g)} & = & 1393.04 \text{ kg} \\ \text{Agua (a)} & = & \underline{122.50 \text{ kg}} \\ \Sigma & = & 1865.54 \text{ kg} \end{array}$$

Los volúmenes por m³ son:

$$\begin{array}{rcl} \text{Cemento (Vc)} & = & 0.111 \text{ m}^3 \\ \text{Grava 3/8'' (Vg)} & = & 0.616 \text{ m}^3 \\ \text{Agua (Va)} & = & \underline{0.123 \text{ m}^3} \\ \Sigma & = & 0.850 \text{ m}^3 \end{array}$$

$$\text{Volumen de pasta} = 23.4\%$$

Para confirmar el porcentaje de vacíos:

$$\% \text{ de vacíos} = (1 - 0.850) \times 100 = 15\%$$

- **Concreto permeable con agregado No. 8 (3/8''), 20% de vacíos.**

Datos:

- Relación agua-cemento (*a/c*) = 0.35
- Porcentaje de vacíos = 20%
- Cemento:
 - Peso específico = 3.15 gr/cm³
- Grava (3/8''):
 - PVSC = 1426.89 kg/m³
 - Peso específico = 2.26 gr/cm³
 - Absorción = 3.47%
- Arena:
 - No contiene

De la figura 2.3, se determina el volumen de pasta para un 20% de vacíos para una mezcla de concreto permeable bien compactada, dando como resultado 16.5%.

Por lo tanto,

$$\begin{aligned} \text{Volumen de pasta } (V_p) &= 0.165 \\ \text{Volumen de vacíos } (V_v) &= \frac{0.200}{\Sigma} = 0.365 \end{aligned}$$

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

$$0.635 = \frac{g}{2.26 \times 1000}$$

Donde:

g = peso del agregado, en kg

Por lo tanto,

$$g = 1435.10 \text{ kg}$$

Volumen de pasta (V_p) = volumen de cemento (V_c) + volumen de agua (V_a)

Por lo tanto,

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

Donde:

c = peso del cemento, en kg
 a/c = relación agua-cemento

Por lo tanto,

$$0.165 = \frac{c}{3.15 \times 1000} + \frac{(0.35)c}{1000}$$

$$c = 247.21 \text{ kg}$$

Para determinar el volumen de cemento (V_c),

$$V_c = \frac{c}{3.15 \times 1000}$$

$$V_c = \frac{247.21}{3.15 \times 1000}$$

$$V_c = 0.078 \text{ m}^3$$

Para determinar el contenido de agua,

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

Donde:

a = peso del agua, en kg

c = peso del cemento, en kg

a/c = relación agua-cemento

$$a = 0.35 c$$

$$a = 0.35 (247.21)$$

$$a = 86.52 \text{ kg}$$

Para determinar el volumen de agua (V_a),

$$V_a = \frac{a}{1000}$$

$$V_a = \frac{86.52}{1000}$$

$$V_a = 0.087 \text{ m}^3$$

Los pesos por m^3 son:

Cemento (c)	=	247.21 kg
Grava 3/8" (g)	=	1435.10 kg
Agua (a)	=	<u>86.52 kg</u>
Σ	=	1768.83 kg

Los volúmenes por m³ son:

$$\begin{aligned} \text{Cemento } (V_c) &= 0.078 \text{ m}^3 \\ \text{Grava } 3/8'' (V_g) &= 0.635 \text{ m}^3 \\ \text{Agua } (V_a) &= \frac{0.087 \text{ m}^3}{0.800 \text{ m}^3} \\ \Sigma &= 0.800 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Para confirmar el porcentaje de vacíos:

$$\% \text{ de vacíos} = (1 - 0.800) \times 100 = 20\%$$

Al realizar las pruebas preliminares en laboratorio, se pudo observar que la mezcla no presentaba cohesión al momento de realizar el revenimiento, razón por la cual se decidió aumentar el volumen de pasta, aumentando el cemento a la cantidad de 320 kg/m³. Se volvió a realizar la mezcla preliminar y la mezcla aún no presentaba cohesión, por lo que se decidió agregar un 5% de material fino (en ambos casos se mantuvo la relación a/c), quedando de la siguiente manera:

$$c = 320.00 \text{ kg}$$

$$a/c = 0.35$$

Por lo tanto, la cantidad de agua es:

$$a = 0.35 c$$

$$a = 0.35 (320.00)$$

$$a = 112.00 \text{ kg}$$

En base al porcentaje de vacíos (20%), se iguala la relación,

$$0.80 = \frac{320.00}{3150} + V_{\text{agregados}} + \frac{112.00}{1000}$$

$$V_{\text{agregados}} = 0.586 \text{ m}^3$$

Por lo tanto, considerando 5% de agregado fino, se tiene:

95% grava

5% arena (ar)

$$V_g = 0.586 \times 0.95 = 0.557$$

$$g = 0.557 \times 2.26 \times 1000 = 1259.00$$

$$V_{ar} = 0.586 \times 0.05 = 0.029$$

$$ar = 0.029 \times 2.33 \times 1000 = 68.00$$

Los pesos por m³ son:

$$\begin{aligned} \text{Cemento } (c) &= 320.00 \text{ kg} \\ \text{Grava } 3/8'' (g) &= 1259.00 \text{ kg} \\ \text{Arena } (ar) &= 68.00 \text{ kg} \\ \text{Agua } (a) &= \frac{112.00 \text{ kg}}{1759.00 \text{ kg}} \\ \Sigma &= 1759.00 \text{ kg} \end{aligned}$$

Los volúmenes por m³ son:

$$\begin{aligned} \text{Cemento } (V_c) &= 0.102 \text{ m}^3 \\ \text{Grava } 3/8'' (V_g) &= 0.557 \text{ m}^3 \\ \text{Arena } (V_{ar}) &= 0.029 \text{ m}^3 \\ \text{Agua } (V_a) &= \frac{0.112 \text{ m}^3}{0.800 \text{ m}^3} \\ \Sigma &= 0.800 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Volumen de pasta = 21.4%

Para confirmar el porcentaje de vacíos:

$$\% \text{ de vacíos} = (1 - 0.800) \times 100 = 20\%$$

- **Concreto permeable con agregado No. 67 (3/4"), 15% de vacíos.**

Datos:

- Relación agua-cemento (a/c) = 0.35
- Porcentaje de vacíos = 15%
- Cemento:
 - Peso específico = 3.15 gr/cm³
- Grava (3/4"):
 - PVSC = 1451.05 kg/m³
 - Peso específico = 2.30 gr/cm³
 - Absorción = 4.88%
- Arena:
 - No contiene

Debido a que no se cuenta con una referencia para determinar el volumen de pasta para agregado de 3/4", se decide utilizar la figura 2.3 para agregado de 3/8", sólo que reduciendo en un 5% el volumen de pasta obtenido, ya que el agregado de 3/4" ocupa más volumen dentro de

la mezcla, y por tanto es menos volumen de pasta. De acuerdo a la figura 2.3 el volumen de pasta para 15% de vacíos es 21%, por lo tanto, el volumen de pasta será de 20%.

$$\begin{aligned} \text{Volumen de pasta (Vp)} &= 0.200 \\ \text{Volumen de vacíos (Vv)} &= \frac{0.150}{\Sigma} \\ &= 0.350 \end{aligned}$$

$$\text{Volumen de grava (Vg)} = 1 - 0.350 = 0.650 \text{ m}^3$$

$$0.650 = \frac{g}{2.30 \times 1000}$$

Donde:

g = peso del agregado, en kg

Por lo tanto,

$$g = 1495.00 \text{ kg}$$

Volumen de pasta (Vp) = volumen de cemento (Vc) + volumen de agua (Va)

Por lo tanto,

$$0.20 = \frac{c}{3.15 \times 1000} + \frac{(a/c)c}{1000}$$

Donde:

c = peso del cemento, en kg

a/c = relación agua-cemento

Por lo tanto,

$$0.20 = \frac{c}{3.15 \times 1000} + \frac{(0.35)c}{1000}$$

$$c = 299.64 \text{ kg}$$

Para determinar el volumen de cemento (V_c),

$$V_c = \frac{c}{3.15 \times 1000}$$

$$V_c = \frac{299.64}{3.15 \times 1000}$$

$$V_c = 0.095 \text{ m}^3$$

Para determinar el contenido de agua,

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

Donde:

a = peso del agua, en kg

c = peso del cemento, en kg

a/c = relación agua-cemento

$$a = 0.35 c$$

$$a = 0.35 (299.64)$$

$$a = 104.87 \text{ kg}$$

Para determinar el volumen de agua (V_a),

$$V_a = \frac{a}{1000}$$

$$V_a = \frac{104.87}{1000}$$

$$V_a = 0.105 \text{ m}^3$$

Los pesos por m^3 son:

$$\begin{array}{l} \text{Cemento } (c) = 299.64 \text{ kg} \\ \text{Grava } 3/4'' (g) = 1495.00 \text{ kg} \\ \text{Agua } (a) = \underline{104.87 \text{ kg}} \\ \Sigma = 1899.51 \text{ kg} \end{array}$$

Los volúmenes por m^3 son:

$$\begin{array}{l} \text{Cemento } (V_c) = 0.095 \text{ m}^3 \\ \text{Grava } 3/4'' (V_g) = 0.650 \text{ m}^3 \\ \text{Agua } (V_a) = \underline{0.105 \text{ m}^3} \\ \Sigma = 0.850 \text{ m}^3 \end{array}$$

Para confirmar el porcentaje de vacíos:

$$\% \text{ de vacíos} = (1 - 0.850) \times 100 = 15\%$$

Al realizar las pruebas preliminares en laboratorio, se pudo observar que la mezcla presentaba muy mala cohesión al momento de realizar el revenimiento, razón por la cual se decidió aumentar el volumen de pasta, aumentando el cemento a la cantidad de 350 kg/m^3 . Se volvió a realizar la mezcla preliminar y la mezcla aún no presentaba cohesión, por lo que se decidió agregar un 10% de material fino, quedando de la siguiente manera:

$$c = 350.00 \text{ kg}$$

$$a/c = 0.35$$

Por lo tanto, la cantidad de agua es:

$$a = 0.35 c$$

$$a = 0.35 (350.00)$$

$$a = 122.50 \text{ kg}$$

En base al porcentaje de vacíos (15%), se iguala la relación,

$$0.85 = \frac{350.00}{3150} + V_{\text{agregados}} + \frac{122.50}{1000}$$

$$V_{\text{agregados}} = 0.616 \text{ m}^3$$

Por lo tanto, considerando 10% de agregado fino, se tiene:

90% grava

10% arena

$$V_g = 0.616 \times 0.90 = 0.554$$

$$g = 0.554 \times 2.30 \times 1000 = 1274.00$$

$$V_{ar} = 0.616 \times 0.10 = 0.062$$

$$ar = 0.062 \times 2.33 \times 1000 = 144.00$$

Los pesos por m^3 son:

Cemento (c)	=	350.00 kg
Grava 3/4" (g)	=	1274.00 kg
Arena (ar)	=	144.00 kg
Agua (a)	=	<u>122.50 kg</u>
Σ	=	1890.50 kg

Los volúmenes por m^3 son:

Cemento (Vc)	=	0.111 m^3
Grava 3/4" (Vg)	=	0.554 m^3
Arena (Var)	=	0.062 m^3
Agua (Va)	=	<u>0.123 m^3</u>
Σ	=	0.850 m^3

Volumen de pasta = 23.4%

Para confirmar el porcentaje de vacíos:

$$\% \text{ de vacíos} = (1 - 0.850) \times 100 = 15\%$$

- **Concreto permeable con agregado No. 67 (3/4"), 20% de vacíos.**

Datos:

- Relación agua-cemento (a/c) = 0.35
- Porcentaje de vacíos = 20%
- Cemento:
 - Peso específico = 3.15 gr/cm^3
- Grava (3/4"):
 - PVSC = 1451.05 kg/m^3
 - Peso específico = 2.30 gr/cm^3
 - Absorción = 4.88%
- Arena:
 - No contiene

Al observar que la mezcla anterior no tuvo la suficiente cohesión con el volumen de pasta calculado a partir de la gráfica, se decide incrementar el cemento a la cantidad de 320 kg. Además se adiciona un 10% de arena.

$$c = 320.00 \text{ kg}$$

$$a/c = 0.35$$

Por lo tanto, la cantidad de agua es:

$$a = 0.35 c$$

$$a = 0.35 (320.00)$$

$$a = 112.00 \text{ kg}$$

En base al porcentaje de vacíos (20%), se iguala la relación,

$$0.80 = \frac{320.00}{3150} + V_{\text{agregados}} + \frac{112.00}{1000}$$

$$V_{\text{agregados}} = 0.586 \text{ m}^3$$

Por lo tanto, considerando 10% de agregado fino, se tiene:

90% grava

10% arena

$$V_g = 0.586 \times 0.90 = 0.527$$

$$g = 0.527 \times 2.30 \times 1000 = 1212.00$$

$$V_{ar} = 0.586 \times 0.10 = 0.059$$

$$ar = 0.059 \times 2.33 = 0.137 \times 1000 = 137.00$$

Los pesos por m^3 son:

$$\begin{array}{rcl} \text{Cemento (c)} & = & 320.00 \text{ kg} \\ \text{Grava 3/4'' (g)} & = & 1212.00 \text{ kg} \\ \text{Arena (ar)} & = & 137.00 \text{ kg} \\ \text{Agua (a)} & = & \underline{112.00 \text{ kg}} \\ \Sigma & = & 1781.00 \text{ kg} \end{array}$$

Los volúmenes por m^3 son:

$$\begin{array}{rcl} \text{Cemento (Vc)} & = & 0.102 \text{ m}^3 \\ \text{Grava 3/4'' (Vg)} & = & 0.527 \text{ m}^3 \\ \text{Arena (Var)} & = & 0.059 \text{ m}^3 \\ \text{Agua (Va)} & = & \underline{0.112 \text{ m}^3} \\ \Sigma & = & 0.800 \text{ m}^3 \end{array}$$

Volumen de pasta = 21.4%

Para confirmar el porcentaje de vacíos:

$$\% \text{ de vacíos} = (1 - 0.800) \times 100 = 20\%$$

Al realizar las pruebas preliminares en laboratorio, se pudo observar que aun la mezcla no presentaba cohesión al momento de realizar el revenimiento, razón por la cual se decidió aumentar de nuevo el volumen de pasta, aumentando el cemento a la cantidad de 350 kg/m^3 y de igual manera un 10% de material fino, manteniendo la misma relación a/c , quedando de la siguiente manera:

$$c = 350.00 \text{ kg}$$

$$a/c = 0.35$$

Por lo tanto, la cantidad de agua es:

$$a = 0.35 c$$

$$a = 0.35 (350.00)$$

$$a = 122.50 \text{ kg}$$

En base al porcentaje de vacíos (15%), se iguala la relación,

$$0.80 = \frac{350.00}{3150} + V_{\text{agregados}} + \frac{122.50}{1000}$$

$$V_{\text{agregados}} = 0.566 \text{ m}^3$$

Por lo tanto, considerando 10% de agregado fino, se tiene:

90% grava

10% arena

$$V_g = 0.566 \times 0.90 = 0.509$$

$$g = 0.509 \times 2.30 = 1.171 \times 1000 = 1171.00$$

$$V_{ar} = 0.566 \times 0.10 = 0.057$$

$$ar = 0.057 \times 2.33 = 0.133 \times 1000 = 133.00$$

Los pesos por m³ son:

$$\begin{aligned} \text{Cemento (c)} &= 350.00 \text{ kg} \\ \text{Grava 3/4'' (g)} &= 1171.00 \text{ kg} \\ \text{Arena (ar)} &= 133.00 \text{ kg} \\ \text{Agua (a)} &= \underline{122.50 \text{ kg}} \\ \Sigma &= 1776.50 \text{ kg} \end{aligned}$$

Los volúmenes por m³ son:

$$\begin{aligned} \text{Cemento (Vc)} &= 0.111 \text{ m}^3 \\ \text{Grava 3/4'' (Vg)} &= 0.509 \text{ m}^3 \\ \text{Arena (Var)} &= 0.057 \text{ m}^3 \\ \text{Agua (Va)} &= 0.123 \text{ m}^3 \\ \Sigma &= \underline{0.800 \text{ m}^3} \end{aligned}$$

Volumen de pasta = 23.4%

Para confirmar el porcentaje de vacíos:

$$\% \text{ de vacíos} = (1 - 0.800) \times 100 = 20\%$$

- **Concreto permeable con agregado No. 67 (3/4''), 20% de vacíos, aditivo agente viscoso.**

En esta mezcla, la proporción de materiales es exactamente la misma que la mezcla anterior, sólo que aquí se agrega el aditivo agente viscoso con una dosis de 5.25 ml/kg de cemento, quedando una cantidad de 1837.50 ml/m³.

- **Concreto convencional con agregado No. 67 (3/4”), $f'c=200 \text{ kg/cm}^2$, 10 cm de revenimiento. Aditivo agente espumante, para alcanzar un porcentaje de vacíos de 15% a 20%.**

En este caso el concreto convencional se diseña para una resistencia de 200 kg/cm^2 y un revenimiento de 10 cm, de acuerdo con el ACI 211.1.

Datos:

- $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$
- Revenimiento = 10 cm
- Cemento:
 - Peso específico = 3.15 gr/cm^3
- Grava (3/4”):

- PVSC = 1451.05 kg/m^3
- Peso específico = 2.30 gr/cm^3
- Absorción = 4.88%

- Arena:

- PVSC = 1784.07 kg/m^3
- Peso específico = 2.33 gr/cm^3
- Absorción = 7.34%
- M.F. = 2.74

De acuerdo a la tabla 5.1 se determina la cantidad de agua por m^3 y el contenido de aire.

	Agua, kilogramos por metro cúbico de concreto, para los tamaños de agregado indicados							
Revenimiento, mm	9.5 mm	12.5 mm	19 mm	25 mm	37.5 mm	50 mm	75 mm	150 mm
25 a 50	181	175	168	160	150	142	122	107
75 a 100	202	193	184	175	165	157	133	119
150 a 175	216	205	197	184	174	166	154	-
Promedio del contenido de aire total recomendado, para el nivel de exposición, porcentaje								
Exposición leve	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
Exposición moderada	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0
Exposición severa	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

Tabla 5.1 Demanda de agua y aire para diferentes revenimientos y tamaños de agregado (Kosmatka et al., 2004).

Para un revenimiento de 10 cm y un agregado de 3/4"(19 mm), la cantidad de agua por m³ es: 184 kg/m³.

Para una exposición moderada, el contenido de aire es: 5%

De acuerdo a la tabla 5.2 se determina la relación agua-cemento para una resistencia de 200 kg/cm².

Resistencia a compresión a los 28 días, kg/cm ² (MPa)	Relación agua-material cementante en masa	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
450 (45)	0.38	0.31
400 (40)	0.43	0.34
350 (35)	0.48	0.40
300 (30)	0.55	0.46
250 (25)	0.62	0.53
200 (20)	0.70	0.61
150 (15)	0.80	0.72

Tabla 5.2 Dependencia entre la relación agua-material cementante y la resistencia a compresión del concreto (Kosmatka et al., 2004)

La relación agua-cemento para una resistencia de 200 kg/cm² con aire incluido es: 0.61.

De acuerdo al módulo de finura de la arena y el tamaño máximo del

agregado se determina el volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto con la tabla 5.3.

Tamaño max del agregado,		Módulo de finura de la arena			
mm	(pulg.)	2.4	2.6	2.8	3.0
9.5	(3/8)	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	(1/2)	0.59	0.57	0.55	0.53
19	(3/4)	0.66	0.64	0.62	0.60
25	(1)	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5	(1 1/2)	0.75	0.73	0.71	0.69
50	(2)	0.78	0.76	0.74	0.72
75	(3)	0.82	0.80	0.78	0.76

150	(6)	0.87	0.85	0.83	0.81
-----	-----	------	------	------	------

Tabla 5.3 Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto (Kosmatka et al., 2004).

Para un tamaño máximo de agregado de 19 mm (3/4") y un módulo de finura de 2.74, el volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto (b/b_0) es: 0.62.

Como el agregado pesa 1451.05 kg/m³, la masa del agregado grueso será:

$$g = 1451.05 \times 0.62 = 899.55 \text{ kg}$$

El contenido de cemento se basa en la relación agua-cemento y el contenido de agua. Por lo tanto,

$$c = \frac{184}{0.61} = 301.64$$

Los volúmenes por m³ son:

$$\begin{aligned} \text{Cemento (Vc)} &= 0.096 \text{ m}^3 \\ \text{Grava 3/4'' (Vg)} &= 0.391 \text{ m}^3 \\ \text{Agua (Var)} &= 0.184 \text{ m}^3 \\ \text{Aire (Vaire)} &= \frac{0.050 \text{ m}^3}{\Sigma} \\ \Sigma &= 0.721 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

El volumen absoluto calculado del agregado fino es:

$$Var = 1 - 0.721 = 0.279 \text{ m}^3$$

La masa del agregado fino es:

$$ar = 0.279 \times 2.33 \times 1000 = 650.28 \text{ kg}$$

Los pesos por m³ son:

$$\begin{aligned} \text{Cemento (c)} &= 301.64 \text{ kg} \\ \text{Grava 3/4'' (g)} &= 899.65 \text{ kg} \\ \text{Arena (ar)} &= 650.28 \text{ kg} \\ \text{Agua (a)} &= \frac{184.00 \text{ kg}}{\Sigma} \\ \Sigma &= 2035.57 \text{ kg} \end{aligned}$$

Los volúmenes por m³ son:

$$\begin{aligned} \text{Cemento (Vc)} &= 0.096 \text{ m}^3 \\ \text{Grava 3/4'' (Vg)} &= 0.391 \text{ m}^3 \\ \text{Arena (Var)} &= 0.279 \text{ m}^3 \\ \text{Agua (Va)} &= 0.184 \text{ m}^3 \\ \text{Aire (Vaire)} &= \frac{0.050 \text{ m}^3}{\Sigma} \\ \Sigma &= 1.000 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Volumen de pasta = 28.0%

En la tabla 5.4 se muestra un resumen de todas las mezclas definitivas con sus respectivas proporciones de cada material por metro cúbico.

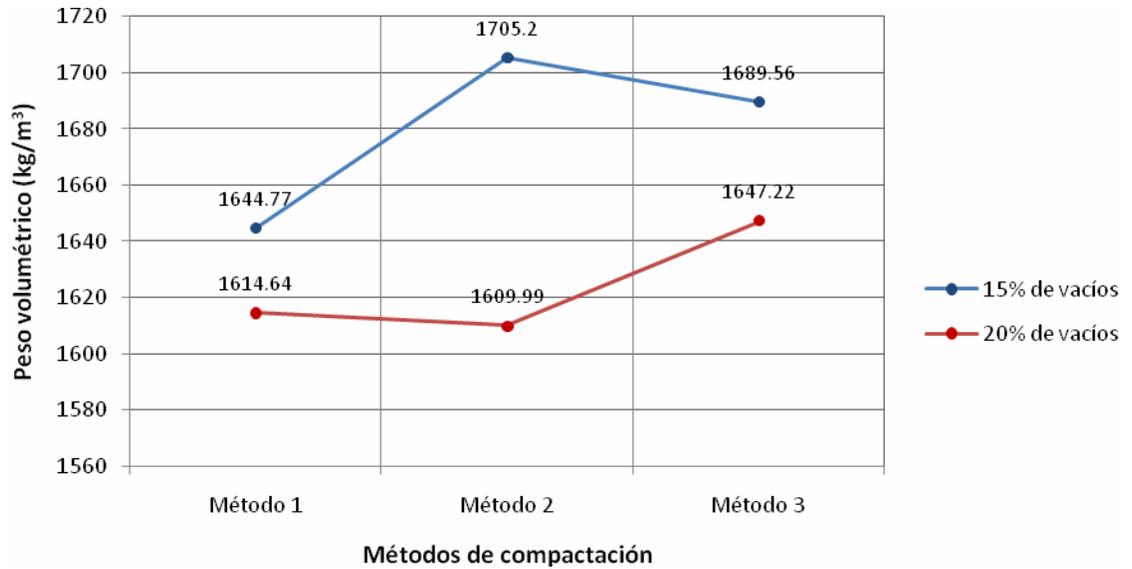
Mezcla	Cantidad por m ³				
	Cemento (kg)	Agua (kg)	Grava (kg)	Arena (kg)	Aditivo (ml)
Concreto permeable de 3/8", 15% de vacíos	350.00	122.50	1393.04		
Concreto permeable de 3/8", 20% de vacíos, 5% arena	320.00	112.00	1259.00	68.00	
Concreto permeable de 3/4", 15% de vacíos, 10% arena	350.00	122.50	1274.00	144.00	
Concreto permeable de 3/4", 20% de vacíos, 10% arena	350.00	122.50	1171.00	133.00	
Concreto permeable de 3/4", 20% de vacíos, 10% arena, aditivo agente viscoso	350.00	122.50	1171.00	133.00	1837.50
Concreto convencional de 3/4", f'c=200 kg/cm ² , 10 cm rev., aditivo espumante	301.64	184.00	899.65	650.28	2200.00

Tabla 5.4 Proporcionamientos de las mezclas definitivas.

5.5 COMPACTACIÓN

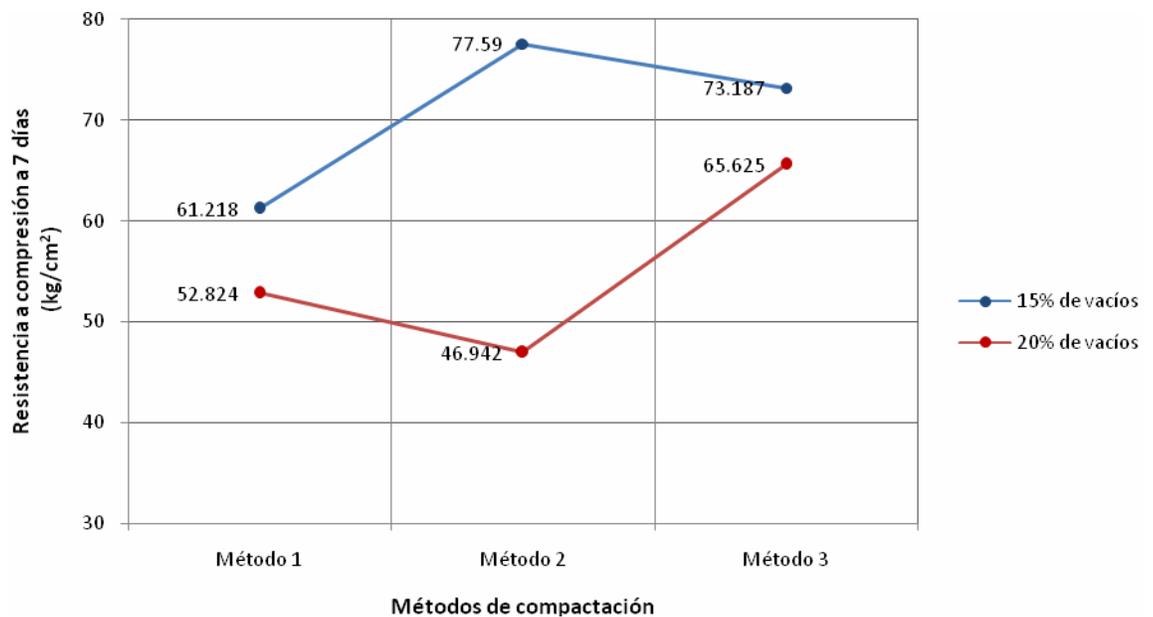
De acuerdo con la experiencia internacional, las mezclas de concreto permeable deben ser compactadas con un rodillo pesado de ancho mayor que el de la losa por hacer. Para este estudio experimental, se analizaron tres métodos de compactación hasta llegar a obtener el más aproximado al método utilizado con rodillo pesado. En la figura 5.1 se muestran los resultados de los pesos volumétricos obtenidos por los métodos de compactación utilizados.

En la figura 5.2 se muestra la relación entre los tres métodos de compactación y la resistencia a la compresión a 7 días, en muestras de 15% y 20% de vacíos.



Método 1. Compactado con varilla a 25 golpes en dos capas
Método 2. Compactado con pisón a 15 golpes en dos capas
Método 3. Compactado con martillo compactador por 30 segundos

Figura 5.1 Relación entre los pesos volumétricos y los métodos de compactación utilizados en las mezclas preliminares para 15% y 20% de vacíos.



Método 1. Compactado con varilla a 25 golpes en dos capas
Método 2. Compactado con pisón a 15 golpes en dos capas
Método 3. Compactado con martillo compactador por 30 segundos

Figura 5.2 Relación entre la resistencia a compresión a 7 días y los métodos de compactación utilizados en las mezclas preliminares para 15% y 20% de vacíos.

Nota: Las resistencias a compresión de la figura 5.2 fueron obtenidas de las primeras mezclas de prueba, las cuales dieron muy bajas, razón por la cual los proporcionamientos fueron modificados, como fue descrito en el apartado 5.4.

El método que dio mejores resultados fue con el martillo compactador por 30 segundos, logrando un mejor acomodo de la pasta con los agregados y asegurando una compactación uniforme. El martillo utilizado en este estudio fue de la marca Makita de 120 volts -13 Amp 50/60 Hz, 1450 gpm (golpes por minuto).

5.6 ACTIVIDADES DESARROLLADAS EN LABORATORIO

A continuación se mencionan las actividades generales que comprende el estudio, las cuales fueron desarrolladas en el laboratorio de estructuras y materiales del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

- a) *Caracterización de los agregados.* Determinación de las siguientes propiedades:
 - Granulometría (Incluye la determinación del tamaño máximo y módulo de finura).
 - Peso unitario
 - Peso específico y absorción
- b) *Diseño de mezclas.* Los diseños se harán de acuerdo con las recomendaciones del ACI-211.3R aplicable a concreto permeable y ACI 211.1 a concreto convencional.
- c) *Fabricación de mezclas de concreto.* Todas las mezclas se fabricarán de acuerdo con las recomendaciones que se estipulan en las normas ASTM correspondientes, tales como la C31 sobre procedimiento de mezclado y otras.
- d) *Pruebas en estado fresco.* En estado fresco se realizarán las siguientes pruebas de laboratorio:
 - Peso unitario (ASTM C138)
 - Revenimiento (ASTM C143)

- Contenido de aire (ASTM C231)
- e) *Pruebas en estado endurecido.* En estado endurecido se realizarán las siguientes pruebas de laboratorio:
- Resistencia a compresión a 7 y 28 días (cilindros de 15 cm de diámetro x 30 cm de largo) (ASTM C39)
 - Módulo de elasticidad a 7 y 28 días (cilindros de 15 cm de diámetro x 30 cm de largo) (ASTM C469)
 - Resistencia a tensión a 7 y 28 días (compresión diametral) (cilindros de 15 cm de diámetro x 30 cm de largo) (ASTM C496)
 - Resistencia a flexión a 7 y 28 días (vigas de 15 x 15 x 60 cm) (ASTM C78)
 - Paso del agua a través de la superficie a 28 días (permeabilidad)

En la figura 5.3 se pueden observar los cilindros y vigas a ensayar para determinar las propiedades en estado endurecido.



Figura 5.3 Cilindros y vigas de concreto permeable.

Para la prueba de permeabilidad se realizaron cilindros de 10 cm de diámetro x 20 cm de largo, los cuales fueron cortados en muestras de 5 cm de altura.

En la tabla 5.4 se muestra el número de especímenes a preparar y el número de pruebas en estado endurecido para cada una de las mezclas de concreto.

MEZCLA	Edad (días)	No. de especímenes por ensaye				
		Resistencia a compresión (cilindros)	Módulo de elasticidad (cilindros)	Resistencia a tensión (cilindros)	Resistencia a flexión (vigas)	Permeabilidad
a) 3/8", 15% de vacíos.	7	3	3	3		
	28	3	3	3	3	3
b) 3/8", 20% de vacíos.	7	3	3	3		
	28	3	3	3	3	3
c) 3/4", 15% de vacíos.	7	3	3	3		
	28	3	3	3	3	3
d) 3/4", 20% de vacíos.	7	3	3	3		
	28	3	3	3	3	3
e) 3/4", 20% de vacíos, aditivo agente viscoso.	7	3	3	3		
	28	3	3	3	3	3
f) Concreto convencional, aditivo espumante.	7	3	3	3		
	28	3	3	3	3	

Tabla 5.4 Número de especímenes a ensayar en estado endurecido.

CAPÍTULO 6

EVALUACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

6.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

6.1.1 Granulometría

La granulometría es la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado tal como se determina por análisis de tamices. El tamaño de partícula del agregado se determina por medio de tamices de malla de alambre.

La granulometría se determina de acuerdo con la norma ASTM C136. Los tamaños de agregados que se utilizaron para la realización de las mezclas fueron de No. 8 (3/8") y No. 67 (3/4").

Los agregados gruesos fueron procesados eliminando los finos. La malla No. 16 fue eliminada en el agregado de 3/8" y la malla No. 8 en el agregado de 3/4" , ya que los concretos permeables no llevan o tal vez muy pocos, y un exceso de "polvo" en agregado puede afectar la adherencia entre la pasta de cemento y las partículas de agregado. En la tabla 6.1 y 6.2 se muestran los resultados de la prueba de granulometría para los agregados de 3/8" y 3/4" respectivamente; de igual manera las figuras 6.1 y 6.2 muestran las curvas granulométricas y los límites establecidos en la norma ASTM C33.

Tamiz	Malla (mm)	Peso retenido (gr)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Acumulado que pasa (%)	ASTM C33	
3/8"	9.5	140.7	7.04	7.04	92.96	85%	100%
No. 4	4.75	1438.3	71.95	78.99	21.01	10%	30%
No. 8	5.75	420	21.01	100.00	0.00	0%	10%

Total	1999	100.00
Pérdida	0.05%	
T.M.A.	3/8"	

Tabla 6.1 Granulometría del agregado grueso de 3/8", utilizando un peso total de la muestra de 2000 gr.

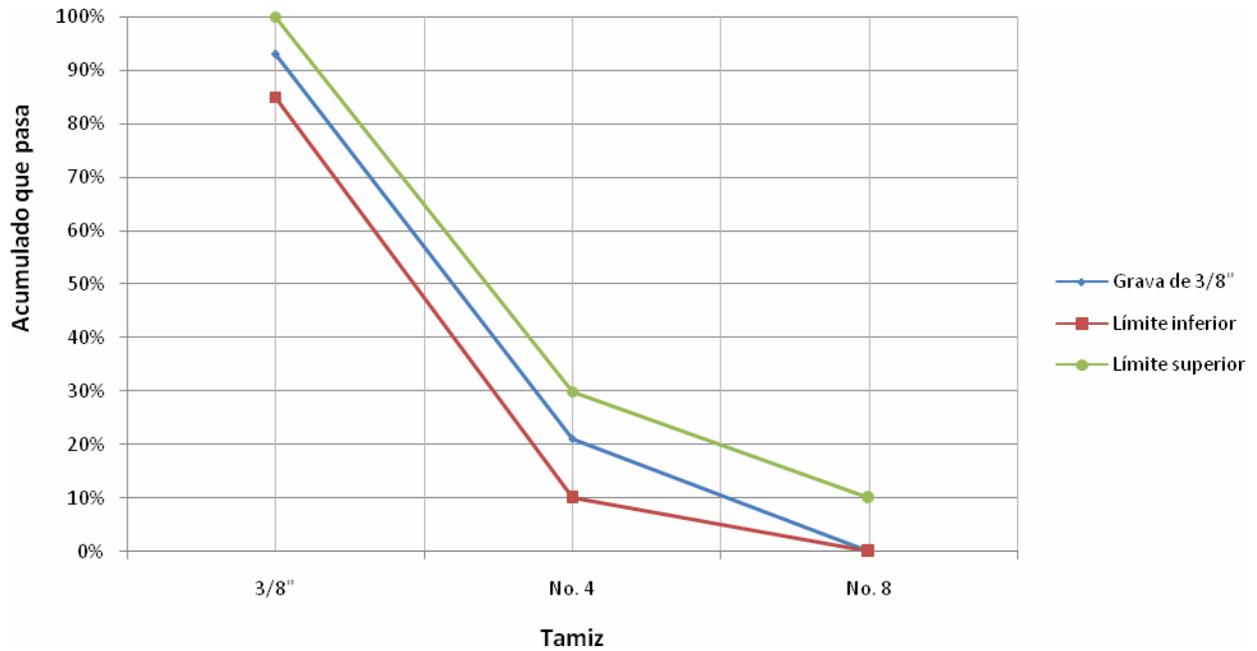


Figura 6.1 Distribución de la curva granulométrica del agregado de 3/8" de acuerdo a los límites superior e inferior de la norma ASTM C33.

Tamiz	Malla (mm)	Peso retenido (gr)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Acumulado que pasa (%)	ASTM C33	
3/4"	19	116.7	5.84	5.84	94.16	90%	100%
3/8"	9.5	1034.1	51.75	57.59	42.41	20%	55%
No. 4	4.75	847.4	42.41	100.00	0.00	0%	10%

Total	1998.2	100.00
Pérdida	0.09%	
T.M.A.	3/4"	

Tabla 6.2 Granulometría del agregado grueso de 3/4", utilizando un peso total de la muestra de 2000 gr.

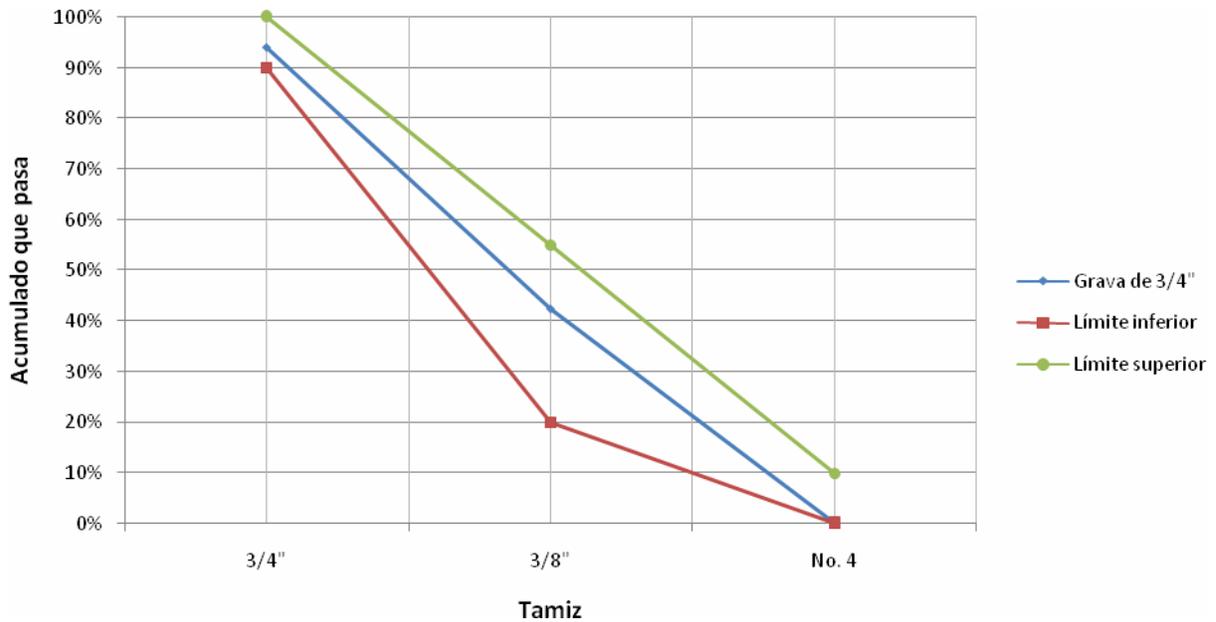


Figura 6.2 Distribución de la curva granulométrica del agregado de 3/4" de acuerdo a los límites superior e inferior de la norma ASTM C33.

Como se muestra en la figura 6.1 y 6.2, la curva granulométrica de la grava de 3/8" y 3/4" respectivamente, se encuentra dentro de los límites especificados por la norma ASTM C33, por lo cual la grava se encuentra bien graduada y se producirán concretos trabajables.

En la tabla 6.3 se muestran los tamices utilizados para obtener las granulometrías en laboratorio para los agregados finos, de igual manera la figura 6.3 muestra los límites superior e inferior de acuerdo a la norma ASTM C33.

Tamiz	Malla (mm)	Peso retenido (gr)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Acumulado que pasa (%)	ASTM C33	
3/8"	9.5	0	0.00%	0.00%	100.00%	100%	100%
1/4"	6.35	21.73	1.99%	1.99%	98.01%		
No. 4	4.75	97.07	8.87%	10.85%	89.15%	95%	100%
No. 8	2.36	152.3	13.91%	24.77%	75.23%	80%	100%
No. 16	1.18	167.73	15.32%	40.09%	59.91%	50%	85%
No. 30	0.59	141.53	12.93%	53.02%	46.98%	25%	60%
No. 50	0.3	136.5	12.47%	65.49%	34.51%	5%	30%
No. 100	0.15	157.5	14.39%	79.88%	20.12%	0%	10%
F		220.3	20.12%	100.00%	0.00%		

Total	1094.67	100.00%
Pérdida	0.48%	
Módulo de finura	2.74	

Tabla 6.3 Granulometría del agregado fino, utilizando un peso total de la muestra de 1100 gr.

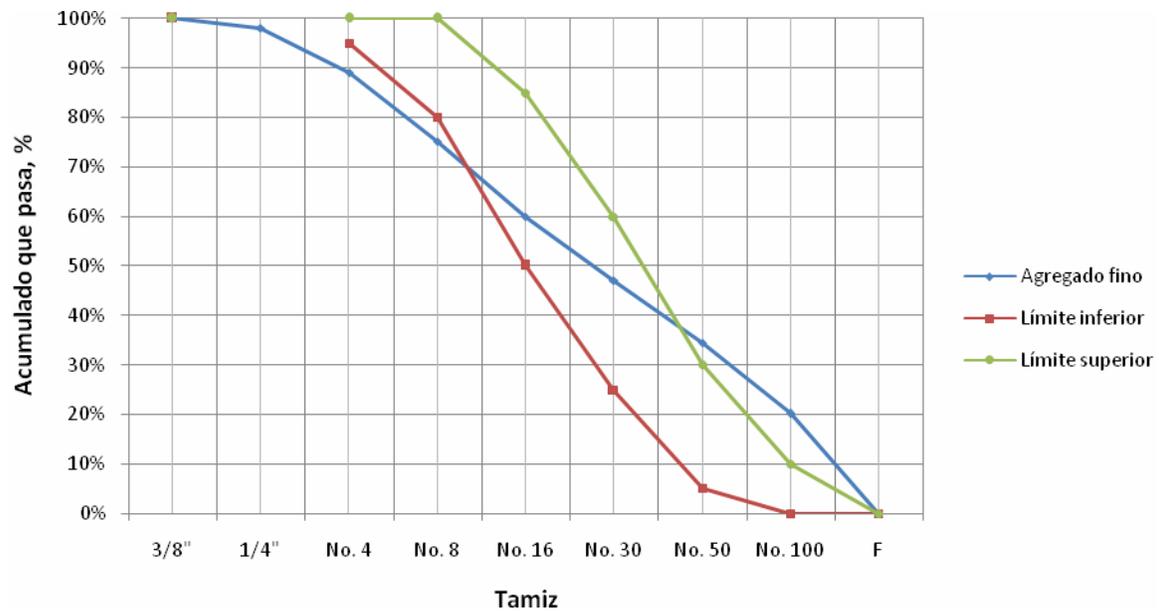


Figura 6.3 Distribución de la curva granulométrica del agregado fino de acuerdo a los límites superior e inferior de la norma ASTM C33.

El módulo de finura debe ser mayor que 2.3 y menor que 3.1, y no debe variar más que 0.2 del valor típico de la fuente del agregado. Si se excede este valor, el agregado se debe rechazar, a menos que se hagan ajustes adecuados en la proporción entre los agregados fino y grueso (ASTM C33). En nuestro análisis, el módulo de finura resultó con un valor de 2.74 (ver tabla 6.3), por lo cual se encuentra dentro del rango especificado en la norma ASTM C33.

Las cantidades de agregado fino que pasan a través de los tamices No. 50 y No. 100 afectan la trabajabilidad, la textura superficial, el contenido de aire y el sangrado (exudación) del concreto. La mayoría de las especificaciones permite un porcentaje que pasa en el tamiz No. 50 del 5% al 30% y un 3% o más en el tamiz No. 100 (ASTM C33). En el presente estudio, los valores obtenidos fueron de 34.51% para el tamiz No. 50 y de 20.12% para el tamiz No. 100 (ver tabla 6.3), dichos valores no se encuentran dentro del rango descrito por la norma, lo cual significa que la arena contiene gran cantidad de finos (arcilla y limo) y podría provocar un incremento en el requerimiento de agua y en los cambios volumétricos del concreto.

La granulometría y el tamaño máximo de agregado afectan las proporciones relativas de los agregados así como los requisitos de agua y cemento, la trabajabilidad, capacidad de bombeo, economía, porosidad, contracción y durabilidad del concreto.

6.1.2 Absorción

La absorción es la cantidad de agua que es capaz de absorber un material inicialmente seco, después de estar sumergida en ella durante 24 hrs. Se determina de acuerdo con las normas ASTM C127 y ASTM C128 para agregado grueso y fino, respectivamente. La absorción se expresa en porcentaje y depende directamente de la porosidad del material y de la intercomunicación de sus poros. Determinar la absorción en los agregados es de suma importancia, pues fija la cantidad de agua en la dosificación de los concretos y morteros, ya que además del agua necesaria para la hidratación de los aglomerantes hay que agregar la que

absorberán los agregados, de lo contrario, faltará agua para la reacción de hidratación y fraguado.

El porcentaje de absorción también sirve para orientar al constructor sobre la estabilidad que presentarán los concretos y morteros; ya que el agua contenida en los agregados puede provocar variaciones en sus volúmenes y ocasionar serios daños en los elementos estructurales. Los materiales que presentan menor porcentaje de absorción garantizan mayor seguridad, mejor control del agua en el proporcionamiento, menor ligereza y más resistencia en los concretos. La tabla 6.4 muestra los porcentajes de absorción de los agregados. Los resultados corresponden al promedio de tres pruebas, los cuales se muestran a continuación:

Agregado	Absorción (%)
3/8"	3.47
3/4"	4.88
Fino	7.34

Tabla 6.4 Porcentajes de absorción de los distintos tamaños de agregados.

Los agregados grueso y fino generalmente tienen niveles de absorción (contenido de humedad a SSS) que varían del 0.2% al 4% y del 0.2% al 2%, respectivamente. Los contenidos de agua libre generalmente varían del 0.5% al 2% para el agregado grueso y del 2% al 6% para el agregado fino. El contenido máximo de humedad del agregado grueso drenado es normalmente menor que aquél del agregado fino. La mayoría de los agregados finos puede mantener un contenido máximo de humedad drenada de cerca del 3% al 8%, mientras que el agregado grueso puede mantener del 1% al 6% (Kosmatka et al., 2004). La tabla 6.4 muestra resultados muy altos, lo cual significa que la andesita es un material muy absorbente y presenta una gran ligereza, lo cual puede repercutir en la resistencia del concreto a realizar. El efecto de una elevada absorción se produce en la contracción por secado, presentando mayores valores.

6.1.3 Peso específico

El peso específico o densidad de un cuerpo es la relación que existe entre su peso y el peso de un volumen igual de agua. Se determina de acuerdo a las normas ASTM C127 y ASTM C128 para agregado grueso y fino, respectivamente.

El peso específico de los agregados es de gran importancia cuando las condiciones estructurales y propias de un proyecto exigen que el concreto tenga un peso mínimo o máximo. Si se desea un concreto ligero, se emplean agregados naturales o artificiales con bajo peso específico. En la tabla 6.5 se muestra los pesos específicos de los agregados, los resultados corresponden al promedio de tres pruebas, los cuales se muestran a continuación:

Agregado	Peso específico
3/8"	2.26
3/4"	2.30
Fino	2.33

Tabla 6.5 Resultados del peso específico de los distintos tamaños de agregados.

La mayoría de los agregados naturales tienen un peso específico que varía de 2.4 a 2.9 (Kosmatka et al., 2004). Como se observa en la tabla 6.5, el peso específico de los agregados resultó muy bajo, por lo cual se puede confirmar que la andesita es un material poroso, débil y absorbente.

6.1.4 Peso volumétrico

El peso volumétrico se determina comúnmente a los materiales heterogéneos o discontinuos como el concreto, arena, grava, mercancías, etc., con el propósito de conocer el peso del material necesario para llenar un volumen de 1.00 m³. Se determina de acuerdo con la norma ASTM C29. En la tabla 6.6 se muestra los resultados obtenidos de los pesos volumétricos de los agregados

gruesos y finos, en ambos casos, los resultados corresponden al promedio de tres pruebas.

La masa volumétrica aproximada del agregado comúnmente usado en el concreto de peso normal varía de 1200 a 1750 kg/m³ (Kosmatka et al., 2004).

Agregado	Peso volumétrico suelto (kg/m ³)	Peso volumétrico compactado (kg/m ³)
3/8"	1,264	1,427
3/4"	1,272	1,451
Fino	1,605	1,784

Tabla 6.6 Pesos volumétricos de los distintos tamaños de agregados.

Como se observa en la tabla 6.6, los valores obtenidos se encuentran dentro del rango comúnmente usado, con resultados generalmente bajos, debido al tipo de material en estudio (andesita).

El peso volumétrico se usa frecuentemente en la construcción porque se trata del volumen ocupado por el agregado y los huecos. Para el ingeniero o constructor es importante poder hacer comparaciones entre los pesos de los materiales heterogéneos o discontinuos por los tipos de problemas que se le presentan en la obra.

6.1.5 Pérdida por lavado

La prueba de pérdida por lavado se utiliza para determinar el porcentaje de finos (arcilla y limo) contenidos en la arena. Se determina de acuerdo con la norma ASTM C117. En nuestro estudio, se obtuvo un resultado de 17.88%, lo cual indica que la arena contiene una gran cantidad de material fino.

6.2 PROPIEDADES DEL CONCRETO

6.2.1 En estado fresco

6.2.1.1 Revenimiento

Como era de esperarse, las mezclas de concreto permeable resultaron con revenimiento cero, por lo cual tienen una consistencia rígida o seca, como se muestra en las figuras 6.4 y 6.5.



Figura 6.4 Consistencia de mezcla de concreto permeable de 3/8" con 15% de vacíos.



Figura 6.5 Revenimiento cero de la mezcla de concreto permeable de 3/8" con 15% de vacíos.

El concreto convencional resultó con un revenimiento de 9.50 cm antes de la inclusión del aditivo agente espumante. Una vez incluido el aditivo en la mezcla, el revenimiento alcanzó 18.00 cm, como se muestra en la figura 6.6.



Figura 6.6 Revenimiento de la mezcla de concreto convencional con aditivo agente espumante con un promedio de 18 cm.

El concreto convencional con aditivo agente espumante, dio como resultado una mezcla con una consistencia muy plástica y viscosa, como se muestra en la figura 6.7.



Figura 6.7 Consistencia de la mezcla de concreto convencional con aditivo agente espumante.

6.2.1.2 Contenido de aire

El contenido de aire solo fue determinado para el concreto convencional con aditivo agente espumante, ya que para el concreto permeable no sería factible la prueba debido a la gran cantidad de vacíos. Se determina de acuerdo con la norma ASTM C231. Se pueden utilizar varios métodos para medir el contenido de aire del concreto fresco; para este estudio se utilizó el método por presión, el cual se basa en la ley de Boyle, la cual relaciona presión y volumen, ver figura 6.8. Muchos medidores de aire comercialmente disponibles están calibrados para leer contenido de aire directamente cuando se aplica una presión predeterminada. La presión aplicada comprime el aire dentro de la muestra de concreto, incluyendo el aire en los poros de los agregados. Por esta razón, las pruebas por este método no son adecuadas para medir el contenido de aire de concretos producidos con algunos agregados ligeros (livianos) u otros materiales muy porosos.



Figura 6.8 Medidor del tipo de presión para la determinación del contenido de aire.

Al incorporar el aditivo agente espumante, se logró que la mezcla de concreto adquiriera una cantidad de aire muy alta, convirtiéndolo en un material muy ligero. Al realizar la prueba, la mezcla resultó con un contenido de aire de 16%, como se muestra en la figura 6.9.



Figura 6.9 Resultado de la prueba de contenido de aire del concreto convencional con aditivo agente espumante (16%).

Es necesario señalar, que el aire incluido no es para hacer que la mezcla sea permeable, sino para simular las características de las mezclas de concreto permeable, las cuales poseen 15 y 20% de vacíos.

6.2.1.3 Peso volumétrico

El peso volumétrico del concreto fresco se determina de acuerdo con la norma ASTM C138. Para el presente estudio se utilizó una balanza o una báscula con precisión de 0.3% de la masa prevista de la muestra y un recipiente. El tamaño del recipiente empleado en la determinación del peso volumétrico varía con el tamaño del agregado. Por ejemplo, si está en buenas condiciones, el recipiente del medidor de aire con capacidad para 7 litros se puede utilizar con agregados de hasta 25 mm (1 pulg.), mientras que el recipiente de 14 litros se usa con agregados de hasta 50 mm (2 pulg.).

Para nuestras mezclas de concreto se utilizó el recipiente de medidor de aire con capacidad de 7.068 litros, como se ilustra en la figura 6.10, que muestra además la báscula empleada.



Figura 6.10 Equipo para la determinación del peso volumétrico.

Los resultados de los pesos volumétricos de las mezclas de concreto se muestran en la tabla 6.7.

MEZCLA	Peso volumétrico (kg/m ³)
M1- 3/8", 15% de vacíos	1918
M2- 3/8", 20% de vacíos, 5% arena	1850
M3- 3/4", 15% de vacíos, 10% arena	1970
M4- 3/4", 20% de vacíos, 10% arena	1926
M4A- aditivo agente viscoso	1921
MR-Convencional, aditivo espumante	1675

Tabla 6.7 Pesos volumétricos de la mezclas.

Como se observa en la tabla 6.7, los resultados se encuentran dentro del rango esperado (1,600 a 2,000 kg/m³) encontrado en las referencias bibliográficas. Los pesos volumétricos de las mezclas de concreto permeable de 15% de vacíos

son mayores a las mezclas de 20% de vacíos, para el mismo tamaño de agregado, debido a la cantidad de huecos dentro de la mezcla. La mezcla de concreto convencional resultó con un peso volumétrico muy bajo debido al aditivo agente espumante, ya que éste incorpora aire en la mezcla, haciendo un concreto más ligero.

6.2.2 En estado endurecido

6.2.2.1 Resistencia a compresión

La determinación de la resistencia a compresión de todas las mezclas de concreto se realizó de acuerdo con la norma ASTM C39. Por cada mezcla de concreto se ensayaron tres especímenes. La velocidad de carga aplicada para todas las mezclas fue de 25 ton/min. En la figura 6.11 se muestra un ensaye de resistencia a compresión de un espécimen de concreto permeable.



Figura 6.11 Ensaye de resistencia a compresión.

En la tabla 6.8 se muestran los resultados de las resistencias a compresión promedio de todas las mezclas para 7 y 28 días, así como la relación de sus edades en porcentaje.

MEZCLA	fc a 7 días (kg/cm ²)	fc a 28 días (kg/cm ²)	fc 7/fc28 días (%)	P.V. (kg/m ³)
M1- 3/8", 15% de vacíos	144	176	82	1927
M2- 3/8", 20% de vacíos, 5% arena	138	145	95	1834
M3- 3/4", 15% de vacíos, 10% arena	178	215	83	1996
M4- 3/4", 20% de vacíos, 10% arena	158	176	89	1903
M4A- aditivo agente viscoso	153	173	88	1867
MR-Convencional, aditivo espumante	21	34	62	1752

Tabla 6.8 Resultados de las pruebas de resistencia a compresión de las mezclas de concreto.

Como se puede observar, el porcentaje de vacíos tiene amplia relación con la resistencia a compresión, ya que un porcentaje mayor de vacíos ocasiona una menor resistencia, con un mismo tamaño de agregado. Los resultados obtenidos se encuentran dentro del rango esperado de 140 a 180 kg/cm² (ACI 522, 2006), los cuales son apropiados para una amplia gama de aplicaciones, con un promedio de 177 kg/cm².

Determinando los coeficientes de variación a los resultados, se obtuvo cierta variación en estos, la cual puede deberse al cabeceo de los cilindros, ya que algunos presentaron complicaciones debido a la irregularidad ocasionada por los huecos en la superficie de sus extremos.

Los resultados de la mezcla de concreto convencional, resultaron muy bajos en comparación con las mezclas de concreto permeable debido a la acción del aditivo agente espumante, el cual incorporó un porcentaje de aire similar a las mezclas permeables.

Además, se puede observar que el peso volumétrico en estado endurecido por lo general se mantuvo en comparación con el peso volumétrico en estado

fresco, en algunas mezclas se incrementó un poco y en otras resultó un poco más bajo.

La figura 6.12 muestra la relación entre la resistencia a compresión a 28 días y el porcentaje de vacíos de las mezclas de concreto permeable con los dos tamaños de agregado utilizados.

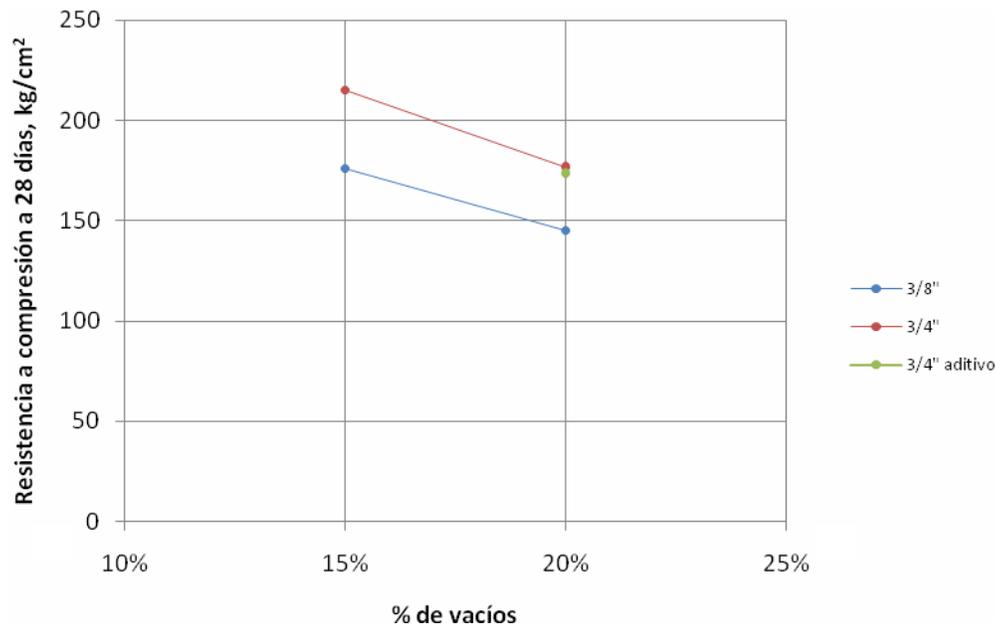


Figura 6.12 Relación entre la resistencia a compresión a 28 días y el porcentaje de vacíos.

En la figura 6.12, se puede observar claramente cómo afecta considerablemente el porcentaje de vacíos en la resistencia del concreto. Las mezclas de concreto permeable con 15% de vacíos, tienen un incremento de 20% en la resistencia en comparación con las mezclas de 20% de vacíos, para los dos tipos de agregados. La mezcla de concreto permeable de 3/4", 20% de vacíos y aditivo agente viscoso, se mantuvo prácticamente igual a la mezcla similar sin aditivo, en cuanto a la resistencia a compresión.

La figura 6.13 muestra la relación entre el peso volumétrico y la resistencia a compresión a 28 días, donde se puede observar que a mayor peso volumétrico mayor resistencia a compresión.

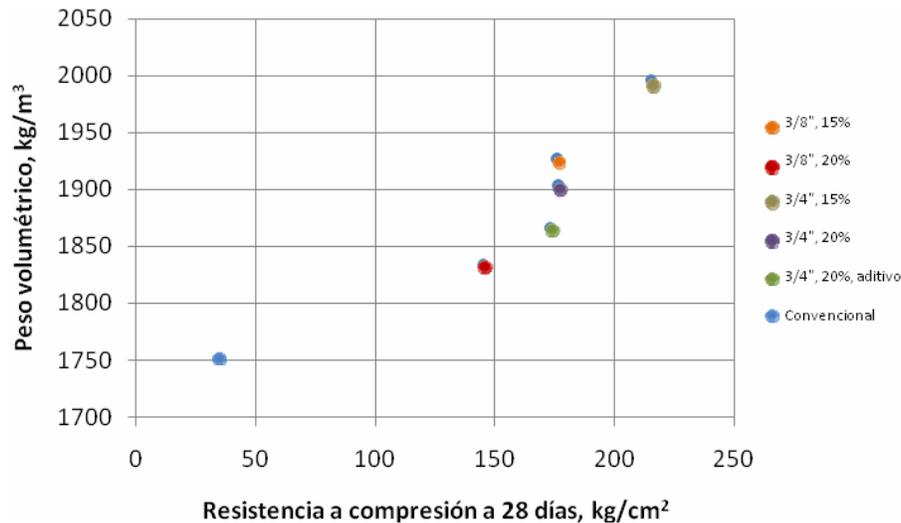


Figura 6.13 Relación entre el peso volumétrico y la resistencia a compresión a 28 días.

6.2.2.2 Resistencia a tensión indirecta por compresión diametral

La determinación de la resistencia a tensión indirecta por compresión diametral de todas las mezclas de concreto está basada en la norma ASTM C496. Por cada mezcla de concreto se realizaron tres especímenes para ensayar. La velocidad de carga aplicada para las mezclas permeables fue de 7 ton/min y para la mezcla convencional fue de 2.5 ton/min. En la figura 6.14 se muestra un ensaye de resistencia tensión indirecta por compresión diametral de un espécimen de concreto permeable y su respectiva falla.



Figura 6.14 Ensayo de resistencia a tensión indirecta por compresión diametral.

En la tabla 6.9 se muestran los resultados de la resistencia a tensión indirecta por compresión diametral de todas las mezclas de concreto.

MEZCLA	ft a 7 días (kg/cm ²)	ft a 28 días (kg/cm ²)	ft7/ft28 días (%)	ft/fc a 28 días
M1- 3/8", 15% de vacíos	15	19	80	11
M2- 3/8", 20% de vacíos, 5% arena	14	14	99	10
M3- 3/4", 15% de vacíos, 10% arena	16	20	82	9
M4- 3/4", 20% de vacíos, 10% arena	16	17	94	10
M4A- aditivo agente viscoso	14	15	93	9
MR-convencional, aditivo espumante	3	5	58	15

Tabla 6.9 Resultados de las pruebas de resistencia a tensión indirecta por compresión diametral.

En la tabla, se puede observar que los resultados de las mezclas de concreto permeable de 15% de vacíos, tienen un mayor incremento en la relación 7/28 días de edad, es decir, que la resistencia a tensión indirecta por compresión diametral a 7 días en las mezclas con 20% de vacíos no tiene una variación significativa a los 28 días (4%), en cambio en las mezclas con 15 % de vacíos, la resistencia se incrementa en un 19%.

La relación entre la resistencia a tensión por compresión diametral y la resistencia a compresión a 28 días, en promedio, es del 9.64%, el cual se encuentra dentro del rango de los concretos convencionales (8% a 10%).

La figura 6.15 muestra la relación entre resistencia a tensión indirecta por compresión diametral a 28 días y el porcentaje de vacíos de todas las mezclas permeables.

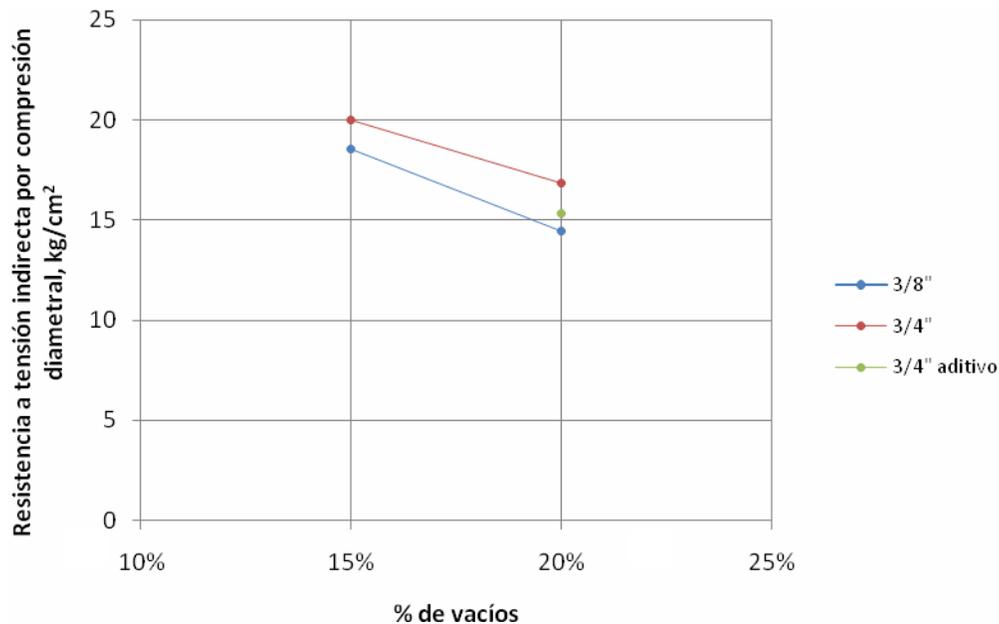


Figura 6.15 Relación entre resistencia a tensión indirecta por compresión diametral a 28 días y el porcentaje de vacíos.

6.2.2.3 Resistencia a flexión

La determinación de la resistencia a flexión de todas las mezclas de concreto está basada en la norma ASTM C78. Por cada mezcla de concreto se realizaron tres especímenes para ensayar a una edad de 28 días. La velocidad de carga aplicada para todas las mezclas fue de 700 kg/min. Los especímenes que se utilizaron para esta prueba fueron vigas de 15 x 15 x 60 cm. En la figura 6.16 se muestra un ensaye de resistencia a flexión de un espécimen de concreto permeable, y su respectiva falla.

Existen varios factores que influyen en la resistencia a flexión, particularmente el grado de compactación, porosidad, y la proporción agregado-cemento.



Figura 6.16 Ensaye de resistencia a flexión en base a la norma ASTM C78.

En la tabla 6.10 se muestran los resultados de los ensayos de resistencia a flexión de todas las mezclas de concreto.

La figura 6.17 muestra la relación entre la resistencia a flexión a 28 días y el porcentaje de vacíos de todas las mezclas permeables.

MEZCLA	Resistencia a flexión(ff) a 28 días (kg/cm ²)	ff/fc a 28 días
M1- 3/8", 15% de vacíos	35	0.20
M2- 3/8", 20% de vacíos, 5% arena	32	0.22
M3- 3/4", 15% de vacíos, 10% arena	46	0.21
M4- 3/4", 20% de vacíos, 10% arena	40	0.23
M4A- aditivo agente viscoso	39	0.23
MR-convencional, aditivo espumante	11	0.32

Tabla 6.10 Resultados de las pruebas de resistencia a flexión.

La resistencia a la flexión en concretos permeables generalmente se encuentra en el rango de 10.5 kg/cm² y 40.0 kg/cm². Los resultados obtenidos en el presente estudio se encuentran dentro del rango antes mencionado, con un promedio de 38.47 kg/cm².

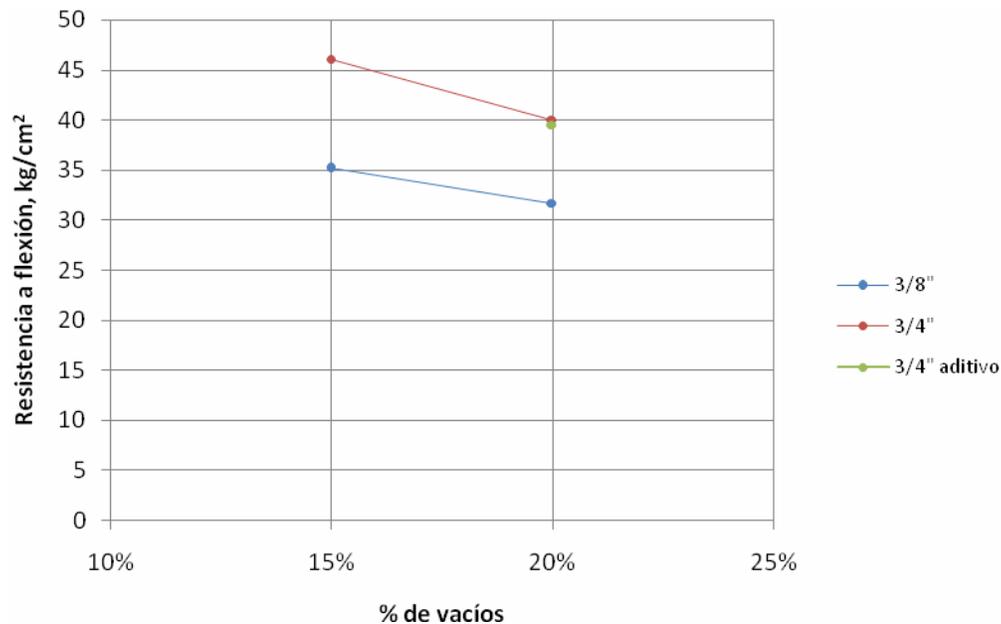


Figura 6.17 Relación entre la resistencia a flexión a 28 días y el porcentaje de vacíos.

Para un concreto convencional se puede esperar que la resistencia a tensión por flexión este comprendida entre un 12% y 18% de la resistencia a compresión, siendo menor la proporción a medida que mayor es la resistencia a compresión. En nuestro estudio, se obtuvieron resultados entre un 20% y 23% de la resistencia a la compresión, por lo que la relación entre la resistencia a flexión y resistencia a compresión encontrada en este estudio es mayor a la relación f_f/f_c comúnmente encontrada en los concretos convencionales. La figura 6.18 muestra la relación entre la resistencia a flexión a 28 días y la resistencia a compresión a 28 días, que en promedio, es del 22%. A mayor resistencia a compresión mayor resistencia a flexión.

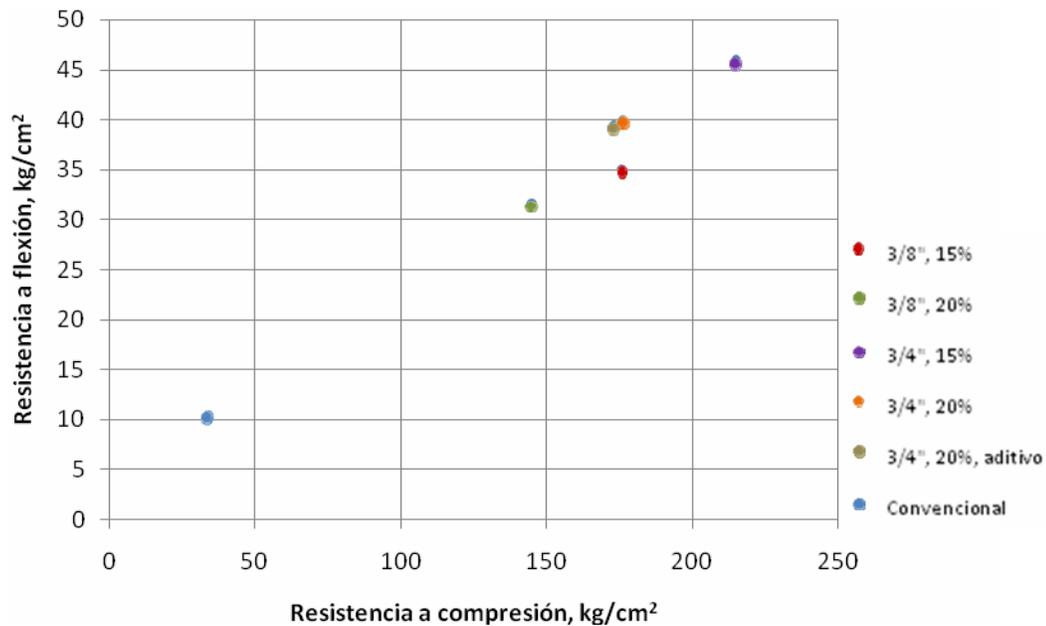


Figura 6.18 Relación entre la resistencia a flexión y la resistencia a compresión.

6.2.2.4 Módulo de elasticidad

La determinación del módulo de elasticidad de todas las mezclas de concreto está basada en la norma ASTM C469. Por cada mezcla de concreto se realizaron tres especímenes para ensayar a una edad de 7 y 28 días. La velocidad

de carga aplicada para todas las mezclas es de 10 ton/min. En la figura 6.19 se muestra un ensaye de módulo de elasticidad de un espécimen de concreto permeable. Los cilindros fueron instrumentados con transductores de desplazamiento de 200 mm de rango los cuales registran los desplazamientos longitudinales y transversales, a partir del cual se realiza el cálculo de las deformaciones unitarias. Además, las pruebas se realizaron usando una prensa SATEC de 250 ton de capacidad y además un sistema de adquisición de datos TDS 203 para el registro de las cargas y desplazamientos.



Figura 6.19 Ensaye de módulo de elasticidad.

En la tabla 6.11 se muestran los resultados de los ensayos de módulo de elasticidad de todas las mezclas de concreto a la edad de 28 días.

En la figura 6.20 se muestra la curva de esfuerzo-deformación de la prueba de módulo de elasticidad de un espécimen de concreto permeable de 3/4" con

15% de vacíos, la cual resultó con el esfuerzo máximo mayor con 216 kg/cm^2 y un módulo de elasticidad (E) de $126,630 \text{ kg/cm}^2$.

MEZCLA	Esfuerzo máximo (kg)	Módulo de elasticidad kg/cm^2	Relación de Poisson
M1- 3/8", 15% de vacíos	160	122,006	0.21
M2- 3/8", 20% de vacíos, 5% arena	136	91,665	0.11
M3- 3/4", 15% de vacíos, 10% arena	213	113,530	0.18
M4- 3/4", 20% de vacíos, 10% arena	191	113,902	0.20
M4A- aditivo agente viscoso	176	110,565	0.19
MR-Convencional, aditivo espumante	27	65,535	0.28

Tabla 6.11 Resultados promedio de las pruebas de módulo de elasticidad a 28 días.

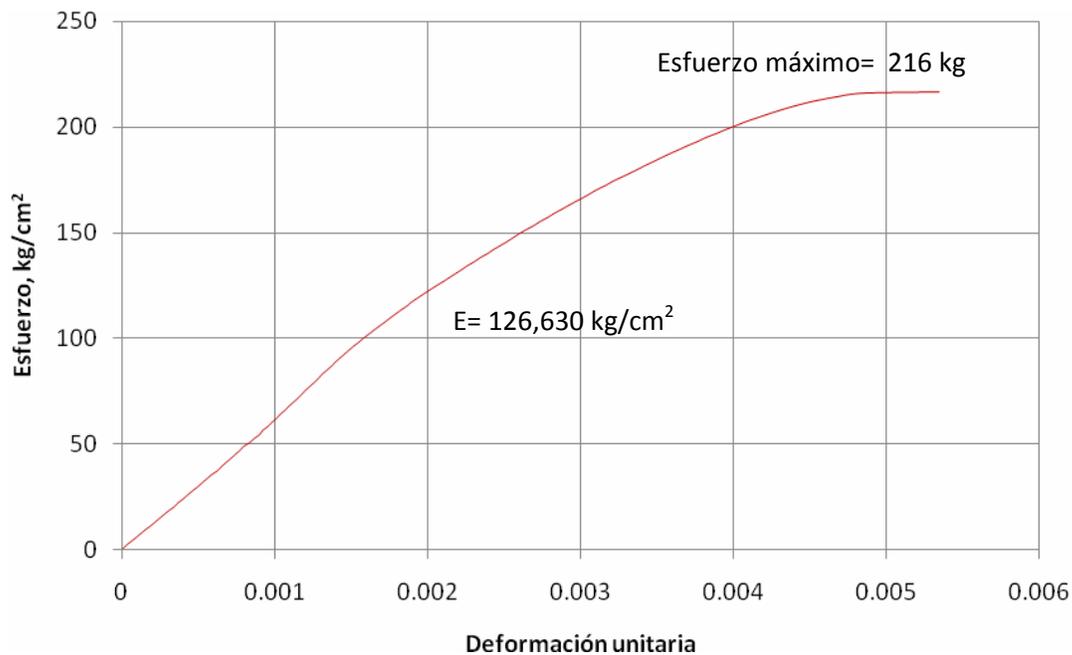


Figura 6.20 Curva de esfuerzo-deformación unitaria de la prueba de módulo de elasticidad de una probeta de concreto permeable de 3/8" y 15% de vacíos.

6.2.2.5 Permeabilidad

Una de las características más importantes del concreto permeable es su capacidad para filtrar el agua a través de la matriz. Para llevar a cabo la prueba de permeabilidad, se diseñó un permeámetro de carga variable, tomando como base el descrito en el ACI 522, como se muestra en la figura 6.21, el cual consiste en un cilindro vertical de sección de área A , donde se aloja la muestra a la que se le determinará el coeficiente de permeabilidad. El cilindro está unido a un tubo cilíndrico de diámetro constante, cuya sección es a , el cual debe estar graduado. La muestra de concreto permeable se coloca envuelta 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. Cuando la muestra está saturada y el flujo es establecido, se toma una lectura de altura de columna de agua en el tubo transparente, h_1 . Se marca la altura de inicio y se abre la válvula que conecta a la muestra al tiempo de que se inicia el conteo en el tiempo, t_1 , hasta que el nivel de agua llega a la altura h_2 , en el tiempo final t_2 (ver figura 6.22).

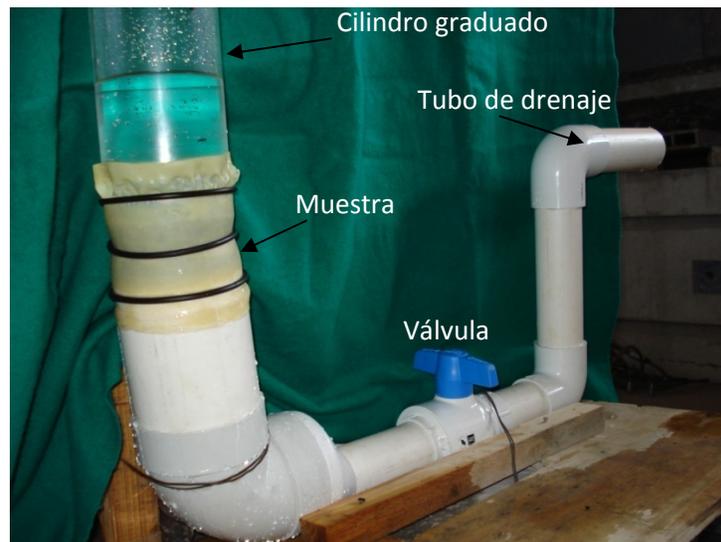


Figura 6.21 Permeámetro de carga variable para medir la permeabilidad.



Figura 6.22 Prueba de permeabilidad.

Para realizar la prueba se propuso tomar el tiempo para tres diferentes alturas de columnas de agua: 30, 20 y 10 cm. El tamaño de las muestras a utilizar fue de 9.7 cm de diámetro y de 5.0 cm de altura, como se muestran en la figura 6.23.



Figura 6.23 Muestras utilizadas para la prueba de permeabilidad.

Para determinar el coeficiente de permeabilidad se utiliza la siguiente fórmula:

$$k = \frac{L}{(t_2 - t_1)} \frac{a}{A} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right)$$

En donde:

k = coeficiente de permeabilidad, cm/s

L = altura de la muestra, cm

a = área del tubo cilíndrico graduado, cm²

A = área de la muestra, cm^2

t_1 = tiempo inicial, s

t_2 = tiempo final, s

h_1 = altura de la columna de agua en el tubo graduado al inicio de la prueba, cm

h_2 = altura de la columna de agua en el tubo graduado al final de la prueba, cm

En la tabla 6.12 se presentan los resultados de la prueba de permeabilidad.

MEZCLA	Coficiente de permeabilidad k (cm/s)
M1- 3/8", 15% de vacíos	0.413
M2- 3/8", 20% de vacíos, 5% arena	0.492
M3- 3/4", 15% de vacíos, 10% arena	0.462
M4- 3/4", 20% de vacíos, 10% arena	0.525
M4A- aditivo agente viscoso	0.518

Tabla 6.12 Resultados de las pruebas de permeabilidad.

El coeficiente de permeabilidad del concreto permeable normalmente se encuentra en el rango de 0.2 a 0.54 cm/s. Los resultados obtenidos en el presente estudio se encuentran dentro del rango anteriormente descrito, por lo cual, se puede afirmar que las muestras de concreto cumplen con los requerimientos de permeabilidad. En la figura 6.24 se muestra la permeabilidad de una muestra de concreto permeable, se observa como el agua fluye rápidamente a través de la matriz.



Figura 6.24 Capacidad de filtración de una muestra de concreto permeable.

6.3 ANÁLISIS DE COSTOS DEL CONCRETO PERMEABLE

Un aspecto importante en el desarrollo de cualquier construcción es el relacionado con lo económico. Si una solución en particular de un proyecto requiere costos excesivos, se buscará una solución que proporcione costos no tan elevados.

En el caso del concreto permeable, es importante considerar el beneficio ecológico que proporciona, y considerarlo al momento de analizar económicamente un proyecto en donde sea utilizado este material.

En la tabla 6.13 se muestra el costo directo de un concreto convencional con una resistencia similar a la obtenida en los ensayos de compresión, con el fin de hacer una comparativa con los concretos permeables elaborados.

Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe
Cemento	Ton	0.302	2,050.00	619.10
Arena	m ³	0.279	150.00	41.85
Grava	m ³	0.391	150.00	58.65
Agua	m ³	0.184	3.00	0.55
Costo directo de 1 m ³ de concreto =				\$ 720.15

Tabla 6.13 Costo directo de 1 m³ de concreto convencional de f'c= 200 kg/cm², revenimiento 8-10 cm y agregado máximo 3/4".

En las tablas 6.14 a 6.19 se muestran los costos directos de cada uno de los concretos permeables elaborados en nuestro estudio.

Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe
Cemento	Ton	0.350	2,050.00	717.50
Arena	m ³		150.00	0.00
Grava	m ³	0.616	150.00	92.40
Agua	m ³	0.123	3.00	0.37
Costo directo de 1 m ³ de concreto =				\$ 810.27

Tabla 6.14 Costo directo de 1 m³ de concreto permeable de 3/8", 15% de vacíos.

Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe
Cemento	Ton	0.320	2,050.00	656.00
Arena	m ³	0.029	150.00	4.35
Grava	m ³	0.557	150.00	83.55
Agua	m ³	0.112	3.00	0.34
Costo directo de 1 m ³ de concreto =				\$ 744.24

Tabla 6.15 Costo directo de 1 m³ de concreto permeable de 3/8", 20% de vacíos, 5% arena.

Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe
Cemento	Ton	0.350	2,050.00	717.50
Arena	m ³	0.062	150.00	9.30
Grava	m ³	0.554	150.00	83.10
Agua	m ³	0.123	3.00	0.37
Costo directo de 1 m ³ de concreto =				\$ 810.27

Tabla 6.16 Costo directo de 1 m³ de concreto permeable de 3/4", 15% de vacíos, 5% arena.

Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe
Cemento	Ton	0.350	2,050.00	717.50
Arena	m ³	0.057	150.00	8.55
Grava	m ³	0.509	150.00	76.35
Agua	m ³	0.123	3.00	0.37
Costo directo de 1 m ³ de concreto =				\$ 802.77

Tabla 6.17 Costo directo de 1 m³ de concreto permeable de 3/4", 20% de vacíos, 10% arena.

Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe
Cemento	Ton	0.350	2,050.00	717.50
Arena	m ³	0.057	150.00	8.55
Grava	m ³	0.509	150.00	76.35
Agua	m ³	0.123	3.00	0.37
Aditivo agente viscoso	lt	1.838	38.00	69.84
Costo directo de 1 m ³ de concreto =				\$ 872.61

Tabla 6.18 Costo directo de 1 m³ de concreto permeable de 3/4", 20% de vacíos, 10% arena, aditivo agente viscoso.

Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe
Cemento	Ton	0.302	2,050.00	619.10
Arena	m ³	0.279	150.00	41.85
Grava	m ³	0.391	150.00	58.65
Agua	m ³	0.184	3.00	0.55
Aditivo agente espumante	lt	2.200	31.75	69.85
Costo directo de 1 m ³ de concreto =				\$ 790.00

Tabla 6.19 Costo directo de 1 m³ de concreto convencional con aditivo agente espumante.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES

7.1 CONCLUSIONES

Los resultados de los estudios realizados a las mezclas de concreto permeables diseñadas con 15% y 20% de vacíos elaboradas con agregados andesíticos, permiten concluir que si cumplen con las propiedades mecánicas y de permeabilidad adecuadas para su utilización en pavimentos con tránsito ligero u otras aplicaciones.

Las mezclas de concreto permeable en estado fresco resultaron con una consistencia rígida, es decir, con un revenimiento de 0 cm. El peso volumétrico de las mezclas con 15% de vacíos resultó con un promedio de 1944 kg/cm^3 , y las mezclas con 20% de vacíos con un promedio de 1899 kg/cm^3 , quedando dentro del rango esperado.

Las propiedades en estado endurecido de las mezclas de concreto permeable resultaron con los valores encontrados en las referencias bibliográficas.

Las mezclas con 15% de vacíos resultaron con un promedio de 196 kg/cm^2 en resistencia a compresión, 20 kg/cm^2 en resistencia a tensión indirecta por compresión diametral, 41 kg/cm^2 en resistencia a flexión y $117,768 \text{ kg/cm}^2$ en módulo de elasticidad. Las mezclas con 20% de vacíos resultaron con un promedio de 165 kg/cm^2 en resistencia a compresión, 15 kg/cm^2 en resistencia a tensión indirecta por compresión diametral, 37 kg/cm^2 en resistencia a flexión y $105,378 \text{ kg/cm}^2$ en módulo de elasticidad.

La mezcla de concreto permeable más resistente se obtuvo utilizando una razón a/c de 0.35, utilizando agregado de 3/4", una dosis de cemento de 350 kg/m^3 , adicionando un 10% de arena y un porcentaje de vacíos de 15%. Esta dosificación permite obtener resistencias compresión en promedio cercanas a 215 kg/cm^2 y resistencias a flexión en promedio cercanas a 46 kg/cm^2 . Aunque las mezclas de concreto permeable con agregado de 3/8" presentan menores resistencias, estas resultan con una textura más estética que la obtenida con agregado de 3/4" debido al tamaño de agregado.

En base a los resultados obtenidos, se puede concluir que a menor porcentaje de vacíos, aumentan tanto la resistencia como el peso volumétrico,

pero a la vez disminuye la permeabilidad. El porcentaje de vacíos influye de manera muy significativa en todas las propiedades de las mezclas de concreto permeable.

Para que un concreto sea considerado como permeable su coeficiente de permeabilidad debe estar entre 0.20 y 0.54 cm/s. Los resultados de las pruebas de permeabilidad de esta investigación con un promedio de 0.482 cm/s, permiten concluir que las mezclas con porcentajes de vacíos mayores a 15% satisfacen los valores de infiltración requeridos para que las mezclas sean consideradas como permeables.

Como la mayoría de materiales especiales, el concreto permeable tiene muchas ventajas tecnológicas, sin embargo, para impulsar su uso es necesario continuar con investigaciones futuras, con el fin de ampliar sus aplicaciones y no ser limitadas solamente a áreas de estacionamientos de zonas comerciales o urbanas, zonas de tránsito ligero o sólo en caminos peatonales. El futuro del concreto permeable dependerá en gran medida de las investigaciones de laboratorio utilizando nuevos materiales y nuevas tecnologías, de la capacitación en el empleo de este concreto y en el impulso, seguimiento y desarrollo de normativas de diseño y especificación existentes.

7.2 RECOMENDACIONES

El concreto permeable, como ya se ha dicho en capítulos anteriores, está formado por cemento, grava, poco o nada de arena, y agua. Es importante señalar, que cuando se utilicen finos en las mezclas, no se deben abusar de ellos, ya que ocasionaría el taponamiento de los poros interconectados en la estructura del concreto.

La compactación en el concreto permeable es uno de los aspectos que más se deben de cuidar, ya que puede afectar considerablemente en la permeabilidad. Es importante no sobrepasar el nivel de compactación, ya que una elevada compactación puede reducir el contenido de vacíos y obstruir los canales de conducción del agua dentro de la matriz y una baja compactación puede ocasionar

que la estructura del concreto obtenga un alto contenido de vacíos y reducir considerablemente la resistencia.

El curado es también uno de los elementos fundamentales para obtener un concreto permeable con las condiciones deseadas. El proceso de curado debe comenzar inmediatamente después de compactar y producir las juntas.

Para conservar la permeabilidad de este tipo de concreto, se debe diseñar con un alto contenido de vacíos, pavimentar los accesos inmediatos de vehículos y las zonas aledañas y realizar el mantenimiento con máquinas adecuadas, debiendo iniciar ésta a más tardar al año de la construcción.

7.3 FUTURAS INVESTIGACIONES

Las mayores aplicaciones del 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 templados, hay preocupación acerca del desempeño a bajas temperaturas, y problemas de durabilidad bajo congelación y deshielo. Un desarrollo novedoso es el uso del 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 trasminación, las excavaciones inestables de cimientos, los cortes de carreteras, y los deslizamientos en taludes.

Se necesita una mayor investigación para mejorar la resistencia y durabilidad del concreto permeable para soportar cargas de vehículos pesados y poder obtener resistencias cercanas a las del concreto convencional, lo cual mejoraría su uso en un amplio rango de aplicaciones.

BIBLIOGRAFÍA

ACI Committee 522 (2006), Pervious Concrete, 522R-06, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

ACI 211.3R-97 (1998), Guide for selecting proportions for no-slump concrete, Appendix 7—Pervious concrete mix proportioning, p. 211.3R-21. American Concrete Institute.

De Solminihac , Hernán; Castro, Javier (2002). Pavimentos Porosos de Hormigón: Una opción para mitigar los Efectos de las Aguas Lluvias, Revista BIT.

EPA (1999), Storm Water Technology Fact Sheet, Porous Pavement, EPA 832-F-99-023 Washington, D.C., Estados Unidos.

FCPA (2002), Florida Concrete and Products Association, Construction of Portland Cement Pervious Pavement, Florida, Estados Unidos.

FCPA (1990), Florida Concrete and Products Association, Pervious Pavement Manual, Orlando, Florida.

GCPA (2008), "Recommended Specifications for Portland Cement Pervious Pavement," Georgia Concrete and Products Association, Tucker, Georgia. <http://www.gcpa.org/specification.htm>.

Georgia Concrete and Products Association. Specification (2008). www.gcpa.org/specification.htm. Copiado el 5 de septiembre de 2008.

<http://curbspecialists.com/images/gallery/Pervious%20Concrete%205.jpg>, obtenido el 12 de septiembre de 2008.

http://www.alconcrete.org/concrete_products.aspx, obtenido el 5 de noviembre de 2008.

http://www.ctre.iastate.edu/Research/project_photos/pervious_joint.jpg, obtenido el 10 de noviembre de 2008.

<http://www.mecacisa.com/catFirmes.htm>, obtenido el 26 de noviembre de 2008.

<http://www.nrmca.org/greenconcrete/default.asp>, obtenido el 9 de diciembre de 2008.

<http://www.ourwater.org/econnection/connection26/tour.html>, obtenido el 14 de octubre de 2008.

<http://www.perviousconcrete.com>, obtenido el 26 de octubre de 2008.

http://www.perviousconcrete.com/images/build07/cert_pervious_roller.gif, obtenido el 12 de octubre de 2008.

<http://www.perviousconcrete.info/pictures.htm>, obtenido el 17 de noviembre de 2008.

<http://www.pervious.com/images/unh.JPG>, obtenido el 21 de noviembre de 2008.

http://www.stormwater.ucf.edu/research/previous_concrete_pavement_research_files/image005.jpg, obtenido el 24 de septiembre de 2008.

<http://www.vma-engineers.com/>, obtenido el 15 de octubre de 2008.

Kosmatka, Steven H.; Kerkhoff, Beatrix; Panarese, William C.; y Tanesi, Jussara (2004), *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, EE.UU.

Meininger (1988), R.C., "No-Fines Pervious Concrete for Paving," *Concrete International*, Vol. 10, No. 8.

MINVU (1996), *Técnicas alternativas para soluciones de aguas de lluvias en sectores urbanos, guía de diseño*, Chile.

N. Neithalath, J. Weiss and J. Olek (2005), "Modeling the effects of pore structure on the acoustic absorption of Enhanced Porosity Concrete," *Journal of Advanced Concrete Technology*, Japan Concrete Institute, Vol.3, No.1.

Normas ASTM (Sociedad Americana de Pruebas y Materiales)

- C 29 Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate
- C 31 Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field
- C 33 Standard Specification for Concrete Aggregates
- C 39 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens
- C 78 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete
- C 117 Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing
- C 127 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate
- C 128 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate
- C 138 Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of concrete
- C 143 Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete

- C 231 Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method
- C 469 Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression
- C 496 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens

NRMCA (2004), "What, Why, and How? Pervious Concrete," Concrete in Practice series, CIP 38, Silver Spring, Maryland.

Paine J (1992), Portland Cement Pervious Pavement Construction. Concrete Construction Journal. Estados Unidos.

Tennis, P., Leming. M.L., and Akers, D.J. (2004), "Pervious Concrete Pavements," EB 302, Portland Cement Association (PCA), Skokie, Illinois.

V. Schaefer, K. Wang, M. Suleiman, and J. Kevern (2006), Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates, National Concrete Pavement Technology Center, Iowa State University.

ANEXOS

ANEXO A

Cálculo del porcentaje de absorción de acuerdo con la norma ASTM C127 para agregado grueso y ASTM C128 para agregado fino.

A.1 Agregado de 3/8"

Número de muestra		M1	M2	M3
Peso de la muestra SSS (gr)	B	3000.00	3000.00	3000.00
Peso de la muestra secada al horno (gr)	A	2908.00	2890.00	2900.00
Peso de la muestra saturada dentro del agua + peso de la canastilla (gr)		1948.00	1946.00	1947.00
Peso de la canastilla (gr)		277.00	277.00	277.00
Peso de la muestra saturada dentro del agua (gr)	C	1671.00	1669.00	1670.00
Porcentaje de absorción	$((B-A)/A) \times 100 =$	3.16%	3.81%	3.45%
Porcentaje de absorción promedio		3.47%		

A.2 Agregado de 3/4"

Número de muestra		M1	M2	M3
Peso de la muestra SSS (gr)	B	3000.00	3000.00	3000.00
Peso de la muestra secada al horno (gr)	A	2865.00	2856.00	2860.00
Peso de la muestra saturada dentro del agua + peso de la canastilla (gr)		1977.00	1967.00	1972.00
Peso de la canastilla (gr)		277.00	277.00	277.00
Peso de la muestra saturada dentro del agua (gr)	C	1700.00	1690.00	1695.00
Porcentaje de absorción	$((B-A)/A) \times 100 =$	4.71%	5.04%	4.88%
Porcentaje de absorción promedio		4.88%		

A.3 Agregado fino

Número de muestra		M1	M2	M3
Peso de la arena SSS (gr)	S	500.00	500.00	500.00
Peso de la arena SSS + Peso Picnómetro + Peso del agua (gr)	C	961.35	970.60	952.10
Peso de la arena SSS + Peso Picnómetro (gr)	B	675.15	683.90	666.40
Peso del agua (gr)		286.20	286.70	285.70
Peso de la arena secada al horno + Peso Picnómetro (gr)		641.00	646.70	635.30
Peso Picnómetro (gr)		175.15	183.90	166.40
Peso de la arena secada al horno (gr)	A	465.85	462.80	468.90
Porcentaje de absorción	$((B-A)/A) \times 100 =$	7.33%	8.03%	6.65%
Porcentaje de absorción promedio		7.34%		

ANEXO B

Cálculo del peso específico de acuerdo con la norma ASTM C127 para agregado grueso y ASTM C128 para agregado fino.

B.1 Agregado de 3/8"

Número de muestra		M1	M2	M3
Peso de la muestra SSS (gr)	B	3000.00	3000.00	3000.00
Peso de la muestra secada al horno (gr)	A	2908.00	2890.00	2900.00
Peso de la muestra saturada dentro del agua + peso de la canastilla (gr)		1948.00	1946.00	1947.00
Peso de la canastilla (gr)		277.00	277.00	277.00
Peso de la muestra saturada dentro del agua (gr)	C	1671.00	1669.00	1670.00
Peso específico (gr/cm³)	B/(B-C)=	2.26	2.25	2.26
Peso específico promedio		2.26 gr/cm³		

B.2 Agregado de 3/4"

Número de muestra		M1	M2	M3
Peso de la muestra SSS (gr)	B	3000.00	3000.00	3000.00
Peso de la muestra secada al horno (gr)	A	2865.00	2856.00	2860.00
Peso de la muestra saturada dentro del agua + peso de la canastilla (gr)		1977.00	1967.00	1972.00
Peso de la canastilla (gr)		277.00	277.00	277.00
Peso de la muestra saturada dentro del agua (gr)	C	1700.00	1690.00	1695.00
Peso específico (gr/cm³)	B/(B-C)=	2.31	2.29	2.30
Peso específico promedio		2.30 gr/cm³		

B.3 Agregado fino

Número de muestra		M1	M2	M3
Peso de la arena SSS (gr)	S	500.00	500.00	500.00
Peso de la arena SSS + Peso Picnómetro + Peso del agua (gr)	C	961.35	970.60	952.10
Peso de la arena SSS + Peso Picnómetro (gr)	B	675.15	683.90	666.40
Peso del agua (gr)		286.20	286.70	285.70
Peso de la arena secada al horno + Peso Picnómetro (gr)		641.00	646.70	635.30
Peso Picnómetro (gr)		175.15	183.90	166.40
Peso de la arena secada al horno (gr)	A	465.85	462.80	468.90
Peso específico (gr/cm³)	S/(B+S-C)=	2.34	2.33	2.33
Peso específico promedio		2.33 gr/cm³		

ANEXO C

Cálculo del peso volumétrico de los agregados de acuerdo con la norma ASTM C29.

C.1 Agregado de 3/8"

	UNIDAD	M1	M2	M3
Peso del material suelto + la olla	gr	17,517.00	17,488.00	17,510.00
Peso del material compacto + la olla	gr	18,604.00	18,590.00	18,597.00
Peso de la olla	gr	9,060.00	9,060.00	9,060.00
Volumen de la olla	l	6.68378	6.68378	6.68378
Peso volumétrico suelto	kg/m ³	1,267.55	1,275.63	1,274.28
Peso volumétrico suelto promedio	kg/m³	1,263.51		
Peso Volumétrico compactado	kg/m ³	1,440.35	1,458.90	1453.97
Peso volumétrico compactado promedio	kg/m³	1,426.89		

C.2 Agregado de 3/4"

	UNIDAD	M1	M2	M3
Peso del material suelto + la olla	gr	17,534.00	17,596.00	17,577.00
Peso del material compacto + la olla	gr	18,693.00	18,824.00	18,778.00
Peso de la olla	gr	9,060.00	9,060.00	9,060.00
Volumen de la olla	l	6.68378	6.68378	6.68378
Peso volumétrico suelto	kg/m ³	1,267.55	1,275.63	1,274.28
Peso volumétrico suelto promedio	kg/m³	1,272.48		
Peso Volumétrico compactado	kg/m ³	1,440.35	1,458.90	1453.97
Peso volumétrico compactado promedio	kg/m³	1,451.05		

C.3 Agregado fino

	UNIDAD	M1	M2	M3
Peso del material suelto + la olla	gr	20,007.00	19,661.00	19,694.00
Peso del material compacto + la olla	gr	21,000.00	20,958.00	20,995.00
Peso de la olla	gr	9,060.00	9,060.00	9,060.00
Volumen de la olla	l	6.68378	6.68378	6.68378
Peso volumétrico suelto	kg/m ³	1,637.85	1,586.08	1,591.02
Peso volumétrico suelto promedio	kg/m³	1,604.98		
Peso Volumétrico compactado	kg/m ³	1,786.41	1,780.13	1,785.67
Peso volumétrico compactado promedio	kg/m³	1,784.07		

ANEXO D

Cálculo de la pérdida por lavado de la arena de acuerdo con la norma ASTM C117.

PÉRDIDA POR LAVADO	Agregado fino				
	Unidad	M1	M2	M3	Promedio
Peso del material seco antes del lavado	gr	500	500	500	500
Peso del material seco después del lavado	gr	412.2	415.4	404.2	410.6
Pérdida por lavado	gr	17.56%	16.92%	19.16%	17.88%

ANEXO E

Resultados de las pruebas de resistencia a compresión.

E.1 Concreto permeable de 3/8", 15% de vacíos.

Edad: 7 días		C.V.= 19.27%					
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga aplicada (kg)	fc a 7 días (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
C1	10.21	15.262	30.553	182.942	26700	145.95	144.01
C2	10.46	15.106	30.626	179.221	30600	170.74	
C3	9.97	15.153	30.539	180.338	20800	115.34	
Edad: 28 días		C.V.= 8.48%					
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga aplicada (kg)	fc a 28 días (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
C1	10.64	15.225	30.691	182.056	35070	192.63	175.96
C2	10.50	15.087	30.606	178.77	30650	171.45	
C3	10.54	15.140	30.608	180.029	29490	163.81	

E.2 Concreto permeable de 3/8", 20% de vacíos, 5% de arena.

Edad: 7 días		C.V.= 7.50%					
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga aplicada (kg)	fc a 7 días (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
C1	9.95	15.152	30.961	180.314	25600	141.97	137.93
C2	9.61	15.168	30.374	180.695	22800	126.18	
C3	9.60	14.931	30.131	175.093	25500	145.64	
Edad: 28 días		C.V.= 4.99%					
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga aplicada (kg)	fc a 28 días (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
C1	9.38	14.974	30.091	176.103	24060	136.62	145.03
C2	10.04	15.105	30.646	179.197	26670	148.83	
C3	9.82	14.977	30.485	176.173	26360	149.63	

E.3 Concreto permeable de 3/4", 15% de vacíos, 10% de arena.

Edad: 7 días C.V.= 0.87%							
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga aplicada (kg)	fc a 7 días (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
C1	10.48	15.016	30.743	177.092	31800	179.57	178.07
C2	10.51	15.094	30.716	178.936	31860	178.05	
C3	10.91	15.373	30.622	185.612	32780	176.60	
Edad: 28 días C.V.= 4.84%							
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga aplicada (kg)	fc a 28 días (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
C1	10.90	15.151	30.885	180.290	39490	219.04	215.19
C2	10.52	15.188	30.817	181.172	36850	203.40	
C3	10.15	14.887	30.322	174.062	38840	223.14	

E.4 Concreto permeable de 3/4", 20% de vacíos, 10% de arena.

Edad: 7 días C.V.= 1.74%							
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga aplicada (kg)	fc a 7 días (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
C1	9.95	15.102	30.022	179.126	28720	160.33	157.75
C2	10.37	15.152	30.734	180.314	28500	158.06	
C3	9.77	14.965	30.300	175.891	27240	154.87	
Edad: 28 días C.V.= 6.25%							
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga aplicada (kg)	fc a 28 días (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
C1	10.29	15.156	30.928	180.409	34070	188.85	176.43
C2	10.32	15.203	30.685	181.53	30460	167.80	
C3	9.83	15.113	30.102	179.387	30970	172.64	

E.5 Concreto permeable de 3/4", 20% de vacíos, 10% de arena, aditivo agente viscoso.

Edad: 7 días C.V.= 8.88%							
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga aplicada (kg)	fc a 7 días (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
C1	9.85	15.224	30.729	182.032	26700	146.68	152.64
C2	10.15	15.097	30.786	179.007	30100	168.15	
C3	9.78	14.986	30.201	176.385	25240	143.10	
Edad: 28 días C.V.= 13.31%							
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga aplicada (kg)	fc a 28 días (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
C1	9.76	15.07	30.224	178.368	28230	158.27	173.20
C2	9.81	15.117	30.634	179.482	29000	161.58	
C3	10.01	15.043	30.264	177.729	35500	199.74	

E.6 Concreto convencional, aditivo agente espumante.

Edad: 7 días C.V.= 9.86%							
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga aplicada (kg)	fc a 7 días (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
C1	9.41	15.397	30.595	186.192	3950	21.21	21.32
C2	9.24	15.180	30.632	180.981	3490	19.28	
C3	9.28	15.199	30.791	181.435	4260	23.48	
Edad: 28 días C.V.= 10.59%							
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga aplicada (kg)	fc a 28 días (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
C1	9.25	15.138	30.733	179.981	5500	30.56	34.25
C2	9.45	15.248	30.718	182.606	6280	34.39	
C3	9.07	15.031	30.388	177.446	6710	37.81	

ANEXO F

**Resultados de las pruebas de resistencia a tensión indirecta por compresión
diametral.**

F.1 Concreto permeable de 3/8", 15% de vacíos.
C.V.= 7.40%

Edad: 7 días							
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga aplicada (kg)	ft a 7 días (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
C1	10.12	15.125	30.623	179.672	11480	15.78	14.85
C2	10.56	15.390	30.600	186.023	11200	15.14	
C3	9.65	14.950	30.008	175.538	9610	13.64	
Edad: 28 días C.V.= 17.43%							
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga aplicada (kg)	ft a 28 días (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
C1	10.180	15.08	30.260	178.605	13510	18.85	18.54
C2	10.800	15.463	30.935	187.792	11390	15.16	
C3	10.150	14.981	30.025	176.267	15260	21.60	

F.2 Concreto permeable de 3/8", 20% de vacíos, 5% de arena.

Edad: 7 días C.V.= 7.40%							
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga aplicada (kg)	ft a 7 días (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
C1	9.91	15.120	30.583	179.553	9720	13.38	14.36
C2	10.23	15.360	30.721	185.299	11770	15.88	
C3	9.44	14.984	30.166	176.338	9820	13.83	
Edad: 28 días C.V.= 17.43%							
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga aplicada (kg)	ft a 28 días (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
C1	9.91	15.157	30.828	180.433	10300	14.03	14.44
C2	9.36	14.823	29.997	172.569	9580	13.72	
C3	9.86	15.147	30.742	180.195	11390	15.57	

F.3 Concreto permeable de 3/4", 15% de vacíos, 10% de arena.

Edad: 7 días C.V.= 14.66%							
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga aplicada (kg)	ft a 7 días (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
C1	10.44	14.961	30.294	175.797	13630	19.15	16.41
C2	10.69	15.221	30.828	181.96	11360	15.41	
C3	10.25	15.193	30.755	181.291	10760	14.66	
Edad: 28 días							
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga aplicada (kg)	ft a 28 días (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
C1	11.00	15.307	30.954	184.022	14690	19.74	19.99
C2	10.58	15.163	31.114	180.576	15140	20.43	
C3	10.95	15.141	30.894	180.052	14540	19.79	

F.4 Concreto permeable de 3/4", 20% de vacíos, 10% de arena.

Edad: 7 días C.V.= 9.41%							
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga aplicada (kg)	ft a 7 días (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
C1	9.86	14.870	30.113	173.665	10280	14.62	15.91
C2	10.37	15.016	30.776	177.092	12740	17.55	
C3	9.89	14.994	30.194	176.573	11060	15.55	
Edad: 28 días C.V.= 7.94%							
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga aplicada (kg)	ft a 28 días (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
C1	9.61	14.982	29.959	176.291	11220	15.91	16.87
C2	10.22	15.098	30.697	179.031	11870	16.30	
C3	10.33	15.138	30.759	179.981	13460	18.40	

F.5 Concreto permeable de 3/4", 20% de vacíos, 10% de arena, aditivo agente viscoso.

Edad: 7 días C.V.= 5.04%							
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga aplicada (kg)	ft a 7 días (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
C1	10.12	15.243	30.847	182.487	10800	14.62	14.29
C2	9.94	14.929	30.331	175.046	10510	14.78	
C3	9.85	15.210	30.66	181.697	9860	13.46	
Edad: 28 días C.V.= 5.60%							
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga aplicada (kg)	ft a 28 días (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
C1	10.05	15.145	30.667	180.148	11280	15.46	15.36
C2	10.16	14.911	30.151	174.624	11410	16.16	
C3	9.89	15.467	30.616	187.889	10750	14.45	

F.6 Concreto convencional, aditivo agente espumante.

Edad: 7 días C.V.= 4.32%							
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga aplicada (kg)	ft a 7 días (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
C1	8.48	15.033	29.992	177.493	2150	3.04	3.16
C2	8.78	14.886	30.119	174.039	2330	3.31	
C3	8.98	15.153	30.13	180.338	2250	3.14	
Edad: 28 días C.V.= 7.76%							
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga aplicada (kg)	ft a 28 días (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
C1	9.1	15.118	30.227	179.506	3510	4.89	5.29
C2	8.97	15.087	30.242	178.77	4090	5.71	
C3	9.45	15.217	30.716	181.865	3870	5.27	

ANEXO G

Resultados de las pruebas de resistencia a flexión.

G.1 Concreto permeable de 3/8", 15% de vacíos.

Edad: 28 días		C.V.= 2.05%					
Muestra	Peso (kg)	Longitud (cm)	Espesor (cm)	Profundidad (cm ²)	Carga aplicada (kg)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
V1	25.74	60.00	15.00	15.00	2000	35.56	35.14
V2	25.99	60.00	15.00	15.00	2000	35.56	
V3	26.17	60.00	15.00	15.00	1930	34.31	

G.2 Concreto permeable de 3/8", 20% de vacíos.

Edad: 28 días		C.V.= 7.31%					
Muestra	Peso (kg)	Longitud (cm)	Espesor (cm)	Profundidad (cm ²)	Carga aplicada (kg)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
V1	25.65	60.00	15.00	15.00	1770	31.47	31.70
V2	25.53	60.00	15.00	15.00	1660	29.51	
V3	25.83	60.00	15.00	15.00	1920	34.13	

G.3 Concreto permeable de 3/4", 15% de vacíos.

Edad: 28 días		C.V.= 3.54%					
Muestra	Peso (kg)	Longitud (cm)	Espesor (cm)	Profundidad (cm ²)	Carga aplicada (kg)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
V1	28.48	60.00	15.00	15.00	2670	47.47	46.05
V2	27.76	60.00	15.00	15.00	2610	46.40	
V3	27.59	60.00	15.00	15.00	2490	44.27	

G.4 Concreto permeable de 3/4", 20% de vacíos.

Edad: 28 días C.V.= 2.31%							
Muestra	Peso (kg)	Longitud (cm)	Espesor (cm)	Profundidad (cm ²)	Carga aplicada (kg)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
V1	27.38	60.00	15.00	15.00	2280	40.53	40.00
V2	26.91	60.00	15.00	15.00	2280	40.53	
V3	26.99	60.00	15.00	15.00	2190	38.93	

G.5 Concreto permeable de 3/4", 20% de vacíos y aditivo agente viscoso.

Edad: 28 días C.V.= 6.31%							
Muestra	Peso (kg)	Longitud (cm)	Espesor (cm)	Profundidad (cm ²)	Carga aplicada (kg)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
V1	26.95	60.00	15.00	15.00	2220	39.47	39.47
V2	27.04	60.00	15.00	15.00	2360	41.96	
V3	27.16	60.00	15.00	15.00	2080	36.98	

G.6 Concreto convencional y aditivo agente espumante.

Edad: 28 días C.V.= 14.32%							
Muestra	Peso (kg)	Longitud (cm)	Espesor (cm)	Profundidad (cm ²)	Carga aplicada (kg)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
V1	23.55	60.00	15.00	15.00	680	12.09	10.55
V2	22.82	60.00	15.00	15.00	590	10.49	
V3	22.78	60.00	15.00	15.00	510	9.07	

ANEXO H

Resultados de las pruebas de módulo de elasticidad.

H.1 Concreto permeable de 3/8", 15% de vacíos.

Edad: 7 días C.V.= 12.97%								
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga máxima (kg)	Esfuerzo máximo (kg)	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)	Relación de Poisson
C1	9.72	15.016	30.187	177.092	24,150	136.370	94,160.22	0.11
C2	10.45	15.244	30.501	182.510	29,556	161.942	113,894.39	0.23
C3	10.00	15.134	30.796	179.886	24,861	138.204	89,704.56	0.10
Promedio=							99,253.06	0.15
Edad: 28 días C.V.= 7.03%								
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga máxima (kg)	Esfuerzo máximo (kg)	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)	Relación de Poisson
C1	9.58	14.866	29.900	173.571	26,010	149.852	127,043.52	0.24
C2	10.24	15.230	30.623	182.175	27,797	152.584	112,108.75	0.10
C3	10.46	15.116	30.660	179.458	31,651	176.370	126,866.63	0.28
Promedio=							122,006.30	0.21

H.2 Concreto permeable de 3/8", 20% de vacíos.

Edad: 7 días C.V.= 13.69%								
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga máxima (kg)	Esfuerzo máximo (kg)	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)	Relación de Poisson
C1	10.17	15.143	30.708	180.100	25,853	143.548	105,937.41	0.17
C2	9.68	15.164	30.137	180.600	25,119	139.086	95,655.97	0.11
C3	10.01	15.144	30.569	180.124	25,906	143.823	80,359.85	0.14
Promedio=							93,984.41	0.14
Edad: 28 días C.V.= 4.26%								
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga máxima (kg)	Esfuerzo máximo (kg)	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)	Relación de Poisson
C1	9.33	14.994	30.140	176.573	23,555	133.401	91,888.34	0.15
C2	9.83	15.144	30.573	180.124	25,107	139.387	95,457.98	0.09
C3	9.58	15.078	30.245	178.557	24,339	136.309	87,649.60	0.09
Promedio=							91,665.31	0.11

H.3 Concreto permeable de 3/4", 15% de vacíos.

Edad: 7 días C.V.= 1.61%								
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga máxima (kg)	Esfuerzo máximo (kg)	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)	Relación de Poisson
C1	10.17	14.879	30.298	173.875	31,688	182.246	110,478.36	0.18
C2	10.35	14.884	30.181	173.992	36,518	209.883	114,083.27	0.21
C3	10.28	15.002	30.356	176.762	34,289	193.984	112,212.17	0.20
Promedio=							112,257.93	0.20
Edad: 28 días C.V.= 10.36%								
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga máxima (kg)	Esfuerzo máximo (kg)	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)	Relación de Poisson
C1	10.74	15.086	30.753	178.747	38,675	216.367	126,630.89	0.21
C2	10.65	15.133	30.860	179.862	38,740	215.387	110,094.05	0.17
C3	10.74	15.389	30.849	185.999	38,569	207.361	103,863.71	0.16
Promedio=							113,529.55	0.18

H.4 Concreto permeable de 3/4", 20% de vacíos.

Edad: 7 días C.V.= 2.87%								
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga máxima (kg)	Esfuerzo máximo (kg)	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)	Relación de Poisson
C1	10.07	15.099	30.782	179.055	27,459	153.355	97,708.06	0.17
C2	10.30	15.137	30.908	179.957	29,233	162.444	99,597.76	0.17
C3	10.01	15.155	30.730	180.386	26,945	149.374	94,112.78	0.24
Promedio=							97,139.54	0.19
Edad: 28 días C.V.= 4.63%								
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga máxima (kg)	Esfuerzo máximo (kg)	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)	Relación de Poisson
C1	9.83	14.969	30.179	175.985	32,452	184.402	114,285.15	0.29
C2	9.84	14.999	30.239	176.691	31,507	178.317	108,445.65	0.15
C3	10.26	15.060	30.123	178.131	37,503	210.536	118,975.09	0.15
Promedio=							113,901.97	0.20

H.5 Concreto permeable de 3/4", 20% de vacíos, aditivo agente viscoso.

Edad: 7 días C.V.= 2.87%								
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga máxima (kg)	Esfuerzo máximo (kg)	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)	Relación de Poisson
C1	9.87	15.261	30.672	182.918	27,479	150.226	97,980.75	0.18
C2	9.92	14.840	30.232	172.965	24,987	144.463	101,106.97	0.17
C3	9.94	15.166	30.590	180.648	25,830	142.985	95,484.16	0.18
Promedio=							98,190.63	0.18
Edad: 28 días C.V.= 7.32%								
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga máxima (kg)	Esfuerzo máximo (kg)	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)	Relación de Poisson
C1	9.80	14.979	30.120	176.22	36,003	204.307	119,158.08	0.14
C2	9.99	15.229	30.700	182.151	30,180	165.687	109,448.48	0.29
C3	9.98	15.319	30.720	184.311	29,302	158.981	103,089.91	0.15
Promedio=							110,565.49	0.19

H.6 Concreto convencional y aditivo agente espumante.

Edad: 7 días C.V.= 10.31%								
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga máxima (kg)	Esfuerzo máximo (kg)	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)	Relación de Poisson
C1	9.38	15.226	30.734	182.080	4,222	23.188	55,973.57	0.18
C2	9.14	15.120	30.543	179.553	3,641	20.278	52,306.35	0.35
C3	9.17	15.267	30.564	183.062	3,563	19.463	44,697.52	0.04
Promedio=							50,992.48	0.19
Edad: 28 días C.V.= 10.66%								
Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga máxima (kg)	Esfuerzo máximo (kg)	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)	Relación de Poisson
C1	9.16	15.195	30.690	181.339	5,201	28.681	71,385.02	0.24
C2	8.90	15.019	30.112	177.163	4,592	25.920	63,089.48	0.47
C3	9.22	15.155	30.800	180.386	4,902	27.175	62,131.88	0.13
Promedio=							65,535.46	0.28

ANEXO I

Resultados de las pruebas de permeabilidad.

I.1 Concreto permeable de 3/8", 15% de vacíos.

Muestra	d cm	D cm	a cm ²	A cm ²	h ₁ cm	h ₂ cm	t ₂ -t ₁ seg	L cm	k cm/s
1	9.300	9.700	67.929	73.898	36.600	6.600	21.000	5.000	0.3749
	9.300	9.700	67.929	73.898	26.600	6.600	17.000	5.000	0.3768
	9.300	9.700	67.929	73.898	16.600	6.600	11.000	5.000	0.3853
Promedio=									0.379
Muestra	d cm	D cm	a cm ²	A cm ²	h ₁ cm	h ₂ cm	t ₂ -t ₁ seg	L cm	k cm/s
2	9.300	9.700	67.929	73.898	36.600	6.600	18.000	5.000	0.4373
	9.300	9.700	67.929	73.898	26.600	6.600	14.000	5.000	0.4575
	9.300	9.700	67.929	73.898	16.600	6.600	10.000	5.000	0.4239
Promedio=									0.440
Muestra	d cm	D cm	a cm ²	A cm ²	h ₁ cm	h ₂ cm	t ₂ -t ₁ seg	L cm	k cm/s
3	9.300	9.700	67.929	73.898	36.600	6.600	19.000	5.000	0.4143
	9.300	9.700	67.929	73.898	26.600	6.600	15.000	5.000	0.4270
	9.300	9.700	67.929	73.898	16.600	6.600	10.000	5.000	0.4239
Promedio=									0.422
Permeabilidad = 0.413 cm/s									C.V.= 7.58%

I.2 Concreto permeable de 3/8", 20% de vacíos.

Muestra	d cm	D cm	a cm ²	A cm ²	h ₁ cm	h ₂ cm	t ₂ -t ₁ seg	L cm	k cm/s
1	9.300	9.700	67.929	73.898	36.600	6.600	17.000	5.000	0.4631
	9.300	9.700	67.929	73.898	26.600	6.600	13.000	5.000	0.4927
	9.300	9.700	67.929	73.898	16.600	6.600	9.000	5.000	0.4710
Promedio=									0.476
Muestra	d cm	D cm	a cm ²	A cm ²	h ₁ cm	h ₂ cm	t ₂ -t ₁ seg	L cm	k cm/s
2	9.300	9.700	67.929	73.898	36.600	6.600	18.000	5.000	0.4373
	9.300	9.700	67.929	73.898	26.600	6.600	14.000	5.000	0.4575
	9.300	9.700	67.929	73.898	16.600	6.600	9.000	5.000	0.4710
Promedio=									0.455
Muestra	d cm	D cm	a cm ²	A cm ²	h ₁ cm	h ₂ cm	t ₂ -t ₁ seg	L cm	k cm/s
3	9.300	9.700	67.929	73.898	36.600	6.600	16.000	5.000	0.4920
	9.300	9.700	67.929	73.898	26.600	6.600	12.000	5.000	0.5338
	9.300	9.700	67.929	73.898	16.600	6.600	7.000	5.000	0.6055
Promedio=									0.544
Permeabilidad = 0.492 cm/s									C.V.= 9.46%

I.3 Concreto permeable de 3/4", 15% de vacíos.

Muestra	d cm	D cm	a cm ²	A cm ²	h ₁ cm	h ₂ cm	t ₂ -t ₁ seg	L cm	k cm/s
1	9.300	9.700	67.929	73.898	36.600	6.600	19.000	5.000	0.4143
	9.300	9.700	67.929	73.898	26.600	6.600	15.000	5.000	0.4270
	9.300	9.700	67.929	73.898	16.600	6.600	9.000	5.000	0.4710
Promedio=									0.437
Muestra	d cm	D cm	a cm ²	A cm ²	h ₁ cm	h ₂ cm	t ₂ -t ₁ seg	L cm	k cm/s
2	9.300	9.700	67.929	73.898	36.600	6.600	15.000	5.000	0.5248
	9.300	9.700	67.929	73.898	26.600	6.600	12.000	5.000	0.5338
	9.300	9.700	67.929	73.898	16.600	6.600	7.000	5.000	0.6055
Promedio=									0.555
Muestra	d cm	D cm	a cm ²	A cm ²	h ₁ cm	h ₂ cm	t ₂ -t ₁ seg	L cm	k cm/s
3	9.300	9.700	67.929	73.898	36.600	6.600	20.000	5.000	0.3936
	9.300	9.700	67.929	73.898	26.600	6.600	16.000	5.000	0.4003
	9.300	9.700	67.929	73.898	16.600	6.600	11.000	5.000	0.3853
Promedio=									0.393
Permeabilidad = 0.462 cm/s									C.V.= 18.15%

I.4 Concreto permeable de 3/4", 20% de vacíos.

Muestra	d cm	D cm	a cm ²	A cm ²	h ₁ cm	h ₂ cm	t ₂ -t ₁ seg	L cm	k cm/s
1	9.300	9.700	67.929	73.898	36.600	6.600	15.000	5.000	0.5248
	9.300	9.700	67.929	73.898	26.600	6.600	11.000	5.000	0.5823
	9.300	9.700	67.929	73.898	16.600	6.600	7.000	5.000	0.6055

Promedio= 0.571

Muestra	d cm	D cm	a cm ²	A cm ²	h ₁ cm	h ₂ cm	t ₂ -t ₁ seg	L cm	k cm/s
2	9.300	9.700	67.929	73.898	36.600	6.600	16.000	5.000	0.4920
	9.300	9.700	67.929	73.898	26.600	6.600	12.000	5.000	0.5338
	9.300	9.700	67.929	73.898	16.600	6.600	8.000	5.000	0.5298

Promedio= 0.519

Muestra	d cm	D cm	a cm ²	A cm ²	h ₁ cm	h ₂ cm	t ₂ -t ₁ seg	L cm	k cm/s
3	9.300	9.700	67.929	73.898	36.600	6.600	16.000	5.000	0.4920
	9.300	9.700	67.929	73.898	26.600	6.600	13.000	5.000	0.4927
	9.300	9.700	67.929	73.898	16.600	6.600	9.000	5.000	0.4710

Promedio= 0.485

Permeabilidad = 0.525 cm/s

C.V.= 8.25%

I.5 Concreto permeable de 3/4", 20% de vacíos, aditivo agente viscoso.

Muestra	d cm	D cm	a cm ²	A cm ²	h ₁ cm	h ₂ cm	t ₂ -t ₁ seg	L cm	k cm/s
1	9.300	9.700	67.929	73.898	36.600	6.600	16.000	5.000	0.4920
	9.300	9.700	67.929	73.898	26.600	6.600	11.000	5.000	0.5823
	9.300	9.700	67.929	73.898	16.600	6.600	7.000	5.000	0.6055

Promedio= 0.560

Muestra	d cm	D cm	a cm ²	A cm ²	h ₁ cm	h ₂ cm	t ₂ -t ₁ seg	L cm	k cm/s
2	9.300	9.700	67.929	73.898	36.600	6.600	16.000	5.000	0.4920
	9.300	9.700	67.929	73.898	26.600	6.600	12.000	5.000	0.5338
	9.300	9.700	67.929	73.898	16.600	6.600	8.000	5.000	0.5298

Promedio= 0.519

Muestra	d cm	D cm	a cm ²	A cm ²	h ₁ cm	h ₂ cm	t ₂ -t ₁ seg	L cm	k cm/s
3	9.300	9.700	67.929	73.898	36.600	6.600	17.000	5.000	0.4631
	9.300	9.700	67.929	73.898	26.600	6.600	13.000	5.000	0.4927
	9.300	9.700	67.929	73.898	16.600	6.600	9.000	5.000	0.4710

Promedio= 0.476

Permeabilidad = 0.518 cm/s

C.V.= 8.10%

