

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE CIVIL

DISERTACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

“FABRICACIÓN DE HORMIGÓN PERMEABLE PARA CANCHAS DE USO MÚLTIPLE
CON LA UTILIZACIÓN DE AGREGADOS DE LA PROVINCIA DE PICHINCHA”

FRANCISCO JAVIER NÚÑEZ HERBOZO

DIRECTOR: ING. LAURO LARA

QUITO, 2015

Índice

	Pag
Índice.....	2
Índice de Tablas	6
Índice de Imágenes	7
Índice de Gráficos	8
Introducción	9
Alcance	10
1. CAPÍTULO I: HÓRMIGÓN PERMEABLE	12
1.1. Historia.....	13
1.2. Ventajas y Desventajas	15
1.2.1. Ventajas.....	15
1.2.1.1. Ecológicas	15
1.2.1.2. Urbanas	16
1.2.2. Desventajas	18
1.3. Usos y Aplicaciones.....	19
1.4. Propiedades	22
1.4.1. Consistencia o Trabajabilidad.....	23
1.4.2. Masa Unitario.....	23
1.4.3. Porcentaje de Vacíos.....	24
1.4.4. Resistencia a la Compresión	25
1.4.5. Resistencia a la Flexión	26

1.4.6. Permeabilidad	26
1.4.7. Absorción Acústica.....	27
1.4.8. Durabilidad	27
2. CAPÍTULO II: MATERIALES.....	29
Origen de Agregados	30
Muestreo / Obtención de los Agregados.....	30
Ensayos	31
2.1. Agregados	31
2.1.1. Especificaciones de los agregados.....	32
2.1.2. Gravedad Específica y Porcentaje de Absorción.....	33
2.1.3. Masa Unitaria y Porcentaje de Vacíos	36
2.1.4. Resistencia a la Abrasión	37
2.1.5. Durabilidad de los agregados.....	39
2.1.6. Terrones de Arcilla	41
2.2. Cemento	42
2.3. Agua.....	43
3. CAPÍTULO III: FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN PERMEABLE	45
3.1. Factores necesarios para Dosificar.....	45
3.2. Parámetros de dosificación	46
3.2.1. Agregado Grueso	46
3.2.2. Agregado Fino	47
3.2.3. Cemento	48
3.2.4. Agua.....	48

3.2.5. Porcentaje de Vacíos.....	49
3.2.6. Pasta Cementante	49
3.2.7. Relación A/C.....	49
3.2.8. Relación F/G	51
3.3. Cálculo	51
3.3.1. Sin Agregado Fino	52
3.3.2. Con Agregado Fino.....	55
3.3.3. Cálculo de porcentaje de vacíos y densidad de la mezcla	60
3.4. Dosificaciones.....	62
3.4.1. Primera.....	64
3.4.2. Segunda.....	65
3.4.3. Tercera	66
3.4.4. Cuarta.....	67
3.5. Preparación del terreno	68
3.6. Colocación	69
3.7. Vibrado y compactado	70
3.8. Acabado y curado	71
3.9. Mantenimiento	72
4. CAPÍTULO IV: ENSAYOS DE LABORATORIO	73
4.1. Ensayo de Compresión	74
4.2. Resistencia a la Flexión	79
4.3. Ensayo de Permeabilidad.....	84

4.4. Ensayo para determinar la Densidad y el Porcentaje de Vacíos	88
5. CAPÍTULO V: RESULTADOS.....	94
5.1. Resistencia a la compresión a los 7 días	94
5.2. Resistencia a la compresión a los 28 días	96
5.3. Resistencia a la Flexión	98
5.4. Permeabilidad	100
5.5. Porcentaje de Vacíos y Masa Unitaria	102
5.6. Gráficos Con Resultados.....	104
5.7. Método de Dosificación de Hormigones Permeables como Aplicación del Estudio Realizado.....	109
6. CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	111
6.1. Conclusiones	111
6.2. Recomendaciones	114
6.3. Comentarios	116

Índice de Tablas

	Pag
Tabla 2.1: Granulometría del Agregado Grueso.....	32
Tabla 2.2: Granulometría del Agregado Fino.....	33
Tabla 2.3: Gravedad Específica y % Absorción del Agregado Grueso.....	34
Tabla 2.4: Gravedad Específica y % Absorción del Agregado Grueso.....	35
Tabla 2.5: Masa Unitaria y % de Vacíos.....	37
Tabla 2.6: Resistencia a la Abrasión.....	39
Tabla 2.7: Durabilidad de los Agregados.....	40
Tabla 2.8: Terrones de Arcilla de Agregado Fino.....	42
Tabla 2.9: Terrones de Arcilla de Agregado Grueso.....	42
Tabla 3.1: Dosificaciones.....	63

Índice de Imágenes

	Pag
Imagen 3.1: Bola de Hormigón permeable con Relación A/C Apropriada	50
Imagen 4.1: Probeta Cilíndrica de Hormigón Permeable	76
Imagen 4.2: Probeta Cilíndrica de Hormigón Permeable Capeadas	77
Imagen 4.3: Máquina de Compresión	78
Imagen 4.4: Vigüeta de Hormigón Permeable.....	81

Índice de Gráficos

	Pag
Gráfico 5.1: Permeabilidad Vs $f'c$	104
Gráfico 5.2: Módulo de Rotura Vs $f'c$	105
Gráfico 5.3: % Pasta Cementante Vs $f'c$	105
Gráfico 5.4: % Finos Total Vs $f'c$	106
Gráfico 5.5: Masa Unitaria Vs $f'c$	106
Gráfico 5.6: % Vacíos Vs $f'c$	107
Gráfico 5.7: Relación Fino Total/Grueso Vs $f'c$	107
Gráfico 5.8: Permeabilidad Vs % Vacíos	108
Gráfico 5.9: % Finos Total Vs %Pasta Cementante	108

Introducción

El hormigón permeable es un tipo de hormigón que se caracteriza por la casi total carencia de agregado fino, lo que le permite tener características permeables. Es un hormigón relativamente nuevo del que no se tiene mucho estudio y conocimiento en nuestro medio.

El clima en la ciudad de Quito como se conoce, es muy variable, cuando llueve las calles se inundan, lo que provoca accidentes que pueden culminar incluso con la pérdida de vidas; las plazas, veredas, parques, áreas recreativas, canchas de uso múltiple, entre otras, se llenan de agua, causando molestias a los peatones. Adicionalmente a esto y es un punto que no se suele tomar en cuenta, es el hecho de que toda esa agua limpia es recogida y llevada junto a las aguas servidas hasta ser desalojada en ríos, esto debido a la manera en que se construyen las redes de alcantarillado en el país.

En la ciudad de Quito, el hormigón permeable nos permitiría evacuar esa agua limpia producto de las precipitaciones y enviarla directamente al suelo y posteriormente a las fuentes de agua subterráneas, disminuyendo así las alteraciones que realizamos en los ecosistemas naturales con la construcción de obras civiles. Otra alternativa que debe ser considerada, es la de dirigir esa agua a ríos u otras fuentes acuíferas por medio de obras de recolección.

En los parques, conjuntos residenciales y complejos deportivos es muy común la utilización de hormigón para la construcción de canchas de uso múltiple con la finalidad de practicar deportes como el fútbol, basketball, tenis, ecuavóley, etc. Generalmente, para delimitar las zonas

importantes dependiendo del deporte se usa pintura, que al ser utilizada en grandes cantidades y en conjunto con las precipitaciones puede resultar peligrosa debido a la poca fricción que se genera entre la pintura y la suela de los zapatos de los deportistas, provocando caídas y accidentes entre ellos.

Estas canchas deberían ser totalmente planas, pero debido a las precipitaciones deben ser construidas con una pendiente mínima que permita evacuar el agua. El problema que se origina en algunas canchas radica en que la pendiente es muy alta, lo cual causa problemas a los deportistas, mientras que al utilizar una pendiente muy baja, el agua se quedará estancada provocando molestias y accidentes.

Con la utilización del hormigón permeable el agua va a pasar a través de él, va a ser desalojada por medio de drenes o cunetas que se encuentren a los costados de la capa de hormigón o bien va a pasar a través del estrato de suelo y llegar a aguas subterráneas, todo depende de la permeabilidad que presente el suelo. La gran ventaja que se va a obtener, es evitar que el agua se empoce y los usuarios van a poder utilizar las canchas sin correr el riesgo de resbalar debido al estancamiento del agua y a la rugosidad que presenta este material.

Alcance

Este estudio busca dejar un precedente y una base para futuros estudios acerca del hormigón permeable. Si bien este material no es nuevo, aunque sí es novedoso en el país, a nivel mundial no se tiene completo conocimiento acerca del mismo.

Mediante varias dosificaciones realizadas variando la cantidad de pasta cementante y el porcentaje de agregado fino se busca alcanzar un hormigón que cumpla con la resistencia necesaria para ser utilizado en la construcción de canchas de uso múltiple en parques.

El material seleccionado para este estudio, fue el agregado de la cantera de Holcim en Pifo, agregado grueso N°67 de tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ ". Este material se escogió debido a que su granulometría cumple con lo especificado en las normas ACI 522 y además, porque se conoce de ensayos realizados en el laboratorio de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador que es un material de muy buena calidad y resistencia. Los datos de las pruebas del agregado, serán corroborados durante la realización de la presente disertación de grado.

Los datos de este estudio están limitados a la calificación de los agregados, dosificación y elaboración del hormigón permeable en el laboratorio, para la generación de tablas que permitan elaborar este hormigón basado en ellas. El rendimiento de este hormigón fuera del laboratorio, y en condiciones ambientales y de trabajo no controladas, está fuera del alcance de esta disertación.

1. CAPÍTULO I: HORMIGÓN PERMEABLE

El hormigón permeable, como su nombre lo explica, es un tipo de hormigón que permite el paso del agua a través de él, característica que lo hace diferente al hormigón convencional, el cual puede llegar a ser totalmente impermeable, evitando de esa manera que el agua entre y afecte a su estructura, así como a su resistencia.

La ACI (American Concrete Institute por sus siglas en inglés) lo define como una mezcla con revenimiento muy cercano a cero, es decir un concreto de consistencia seca, compuesto de cemento Portland o cementos modificados, agregado grueso, poco o nada de agregado fino, agua y eventualmente aditivos especiales. Esta combinación produce una mezcla resistente con poros conectados entre sí que permiten el paso del agua. (Report on Pervious Concrete, 2010, pág. 2)

Como para cualquier tipo de hormigón, no existe una fórmula totalmente precisa e infalible que permita su elaboración. La dosificación del hormigón permeable varía dependiendo del tipo de agregado que se utilice, de la resistencia que se espera obtener, de la permeabilidad requerida y de otros factores con los que se puede “jugar” durante su elaboración.

Valores cercanos a los que se plantean en el objetivo de esta disertación, son posibles de obtener utilizando el “Report on Pervious Concrete” (Reporte del Hormigón Permeable) o “ACI 522R-10” escrito por el comité de la ACI (“American Concrete Institute” o Instituto Americano del Concreto). Esta norma si bien no brinda la fórmula exacta, proporciona información adaptable a nuestro medio.

La característica de permeabilidad permite el paso de líquidos como el agua a través de su estructura, esta propiedad podría ser en ciertos casos beneficiosa, como cuando se quiere evitar que el agua de las precipitaciones se empoce. Por otro lado, el hormigón convencional debe evitar que cualquier líquido lo atraviese, con la finalidad de evitar procesos abrasivos y agresivos, cuando líquidos como el agua, aceite o sales quedan atrapados dentro de su estructura, esto se debe a que la mezcla no es totalmente impermeable.

En el caso del hormigón armado, algunos elementos estructurales pueden estar sometidos a condiciones agresivas por humedad, sales o sulfatos, los cuales afectarían al acero de refuerzo, corroyéndole, y provocando que el elemento estructural pueda fallar.

1.1. Historia

Los primeros registros acerca del hormigón permeable datan del año 1852, cuando en el Reino Unido se construyeron 2 casas con solamente grava y cemento (Meneses & Bravo, 2007, pág. 1). Es muy probable que lo que se tenía en mente, era la elaboración de un hormigón poroso, es decir que cuente con vacíos en su interior, para lograr una menor masa y por ende menor densidad; esto se explica, por cuanto no se espera construir una casa que permita el paso del agua lluvia a su interior.

Durante más de 70 años no se tienen registros acerca del hormigón permeable, hasta que en el año de 1923 se construyen 52 casas en Edinburgo, Escocia. Tiempo después, en ese mismo país se adoptaría este hormigón para la construcción residencial, permitiendo que para el año de 1942

se hayan construido más de 900 casas repartidas en Lanarkshire, Rosyth y Dufemline. Debido a la Segunda Guerra Mundial los siguientes años fueron difíciles para los países europeos, la crisis llegó con fuerza y los materiales de construcción escaseaban. Estos factores obligaron a las personas a optar por métodos más económicos de construcción, como lo es el construir un hormigón más liviano utilizando menores cantidades de material, es ahí donde este hormigón se popularizó mucho. (American Concrete Institute Committee 522, 2010, pág. 3)

En la década de los 50s, los estudios para la construcción de capas de rodadura con hormigón permeable empezaron, los expertos notaron que el permitir que el agua pase a través de su estructura, brindaba seguridad a los usuarios de los vehículos evitando que sufran accidentes. Los principales problemas que el pavimento o el hormigón convencional presentan en la construcción de vías y carreteras son el “Hydroplaning” (hidroplaneo) y el “Salpicado” (Revista Cemento Año 5, s.f.).

El Hidroplaneo es el efecto por el cual un vehículo que atraviesa una vía cubierta de agua a cierta velocidad pierde totalmente la tracción entre sus neumáticos y la superficie de la vía, provocando que el conductor no tenga el control y que el vehículo se deslice como si estuviera sobre hielo. El salpicado por otro lado, ocurre cuando el agua estancada sobre la vía es lanzada a un vehículo cuando otro la atraviesa, quitando en ciertas ocasiones pérdida total de la visibilidad del conductor, esto debido a la gran cantidad de agua que cae sobre el parabrisas y a la niebla provocada por la fuerza con la cual el vehículo golpea el agua.

1.2. Ventajas y Desventajas

Aunque es una mezcla en cierta forma novedosa debido al poco estudio que se tiene, este hormigón no solamente presenta un gran número de ventajas por sobre el hormigón convencional, también tiene ciertas desventajas que se deben tomar en cuenta al momento de utilizarlo.

1.2.1. Ventajas

Las ventajas del hormigón permeable se pueden clasificar en ecológicas y urbanas (Hormigón Express, s.f.).

1.2.1.1. Ecológicas

Las ventajas ecológicas se refieren a aquellas que buscan minimizar al máximo los daños en el medioambiente. Debido a la gran cantidad de obras civiles que hay en la actualidad, las plazas, vías, parqueaderos, forman lo que se puede llamar un “mar de hormigón”, el cual elimina las áreas verdes, especialmente en las zonas urbanas.

La idea es, no afectar al medio ambiente al construir cualquier clase de obra civil, pero si los daños son inevitables y necesarios, se busca disminuirlos al máximo. Las principales ventajas ecológicas se describen a continuación:

- a) Recarga de las aguas subterráneas: su permeabilidad evita que el ciclo del agua se interrumpa. Los mantos acuíferos se pueden recargar y no desaparecen (Hormigón Express, s.f.).
- b) Absorción de calor: los espacios vacíos del hormigón permiten que el calor se disipe en ellos evitando así el efecto invernadero. Un claro ejemplo se da en las vías, estas no estarán tan calientes como sucede lo estarían al usar hormigón convencional o asfalto (Hormigón Express, s.f.).
- c) Absorción del sonido: los espacios vacíos existentes en el hormigón permiten que el sonido, principalmente de los vehículos, se disperse en ellos y no rebote como sucede con el hormigón convencional (American Concrete Institute Committee 522, 2010, pág. 4).
- d) Mejora de la calidad del agua debido a la percolación: la percolación, definida como el paso de líquidos a través de un material poroso, permite que el agua mejore su calidad al dejar sólidos u otras partículas en la superficie del hormigón (López Palacios, 2010, pág. 13).

1.2.1.2. Urbanas

Las ventajas urbanas nos describen los beneficios que obtienen las personas que habitan estas zonas. Las plazas, los parques, las vías, los parqueaderos, las veredas, las canchas, entre un sin número de obras civiles son utilizadas a diario por miles de personas en la provincia de

Pichincha y especialmente en la ciudad de Quito. Brindar comodidad y seguridad a las personas con un material novedoso en el país son grandes ventajas que se puede conseguir. No se habla de ventajas rurales, debido a que éstas no están atestadas de hormigón como las zonas urbanas.

- a) Reducción de espacios de agua empozada: el agua empozada es el principal enemigo de los vehículos por la cantidad de accidentes que ocasiona y también de los peatones, ya que estos no se salvan de sufrir caídas, especialmente si están practicando algún deporte o corriendo en una cancha construida con hormigón (Hormigón Express, s.f.).
- b) Decremento de las posibilidades de inundación: la permeabilidad del hormigón permite al agua ser desalojada evitando o disminuyendo en un gran porcentaje las posibilidades de inundaciones (Hormigón Express, s.f.).
- c) Reducción de cantidad de drenajes: su característica permeable permite que la cantidad de drenajes pluviales disminuya, lo cual significa menor tiempo de construcción y mayor ahorro económico (Hormigón Express, s.f.).
- d) Mayor fricción: la poca cantidad, y en ciertos casos carencia de agregados finos hacen que este material no sea liso y genere cierta fricción. En el caso de las vías, los vehículos tendrían mayor fricción entre neumáticos y la superficie de la vía, por lo que las distancias de frenado a una misma velocidad van a disminuir si se compara con una vía construida con hormigón convencional. Por otro lado una cancha de hormigón permeable

va a generar fricción entre los zapatos de los deportistas y la superficie de la cancha disminuyendo la posibilidad de que los usuarios sufran caídas (Hormigón Express, s.f.).

- e) Reducción de deslumbramiento: al no retener agua en su superficie, no se crea una película de agua superficial, por lo que la posibilidad de deslumbramiento por refracción de la luz sobre la misma disminuye (Hormigón Express, s.f.).
- f) Buen comportamiento a cambios de temperatura: los vacíos permiten que el hormigón reaccione de mejor manera a los cambios de temperatura, debido a que estos le permiten tener cierta flexibilidad, lo cual ayudará a que el hormigón no se agriete por cambios climáticos (López Palacios, 2010, pág. 11).

1.2.2. Desventajas

La desventaja más notoria en el hormigón permeable recae en su resistencia. Para poder alcanzar sus bondades permeables, su resistencia se verá afectada, siendo un gran problema ya que el hormigón siempre se ha caracterizado por ser muy resistente a la compresión.

- a) Baja resistencia: mientras mayor sea la permeabilidad del hormigón, mayor será la porosidad y por ende la cantidad de vacíos en él. Mientras mayor cantidad de vacíos exista, menor será la resistencia que el hormigón pueda alcanzar (American Concrete Institute Committee 522, 2010, págs. 7, 8, 9).

- b) Tiempos de curado prolongados: los primeros días de curado son muy importantes y se recomienda alargarlo durante mínimo 7 días (American Concrete Institute Committee 522, 2010, págs. 4, 25).

- c) Sensibilidad al contenido de agua: su principal problema al ser construido es el estricto control del contenido de agua ya que es muy sensible a la cantidad que se utilice (American Concrete Institute Committee 522, 2010, pág. 4).

- d) Mayor frecuencia de mantenimiento: es necesario realizar mantenimiento periódico para evitar que los vacíos del hormigón se tapen y la permeabilidad del mismo se pierda (Aoki, 2009, pág. 5).

1.3. Usos y Aplicaciones

Al hablar de todos los posibles usos que se le puede dar al hormigón permeable, hay que tomar en cuenta también el factor económico. Si bien la elaboración del mismo y puesta en obra conlleva gastos menores debido a la disminución de agregado fino, el mantenimiento puede ser un factor muy importante al momento de decidir el lugar donde se colocará y la función que cumplirá (Meneses & Bravo, 2007, pág. 13).

Previo a elegir el uso que se le va a brindar, es importante tomar en cuenta la permeabilidad que se quiere alcanzar y con ello determinar si la resistencia a obtener es la óptima. Como se explicó

con anterioridad, a mayor permeabilidad menor resistencia, es debido a estas características que se debe buscar un equilibrio en ambos puntos para obtener el fin deseado.

Otro factor importante a tomar en cuenta es la vida útil del hormigón permeable. Si bien no existen los estudios necesarios para confirmar que su vida útil es menor que la del hormigón convencional, podemos deducir que se verá afectada debido a la menor capacidad alcanzada y su granulometría mucho más abierta (Meneses & Bravo, 2007, pág. 13).

Según la ACI 522 y debido a la restricción de no usar acero por la corrosión, las aplicaciones más destacadas son las siguientes:

- a) Pavimento permeable para parqueaderos: Los parqueaderos son sitios que tanto vehículos como peatones usan. Evitar el agua empozada ayuda a brindar comodidad a los peatones al no ser empapados cuando un vehículo pasa sobre un charco de agua (American Concrete Institute Committee 522, 2010, pág. 5).
- b) Pisos de invernaderos: Este material evitará que el agua que reciben las plantas que se empoce en el piso del invernadero, y será de gran ayuda en el caso de una fuga o falla en las tuberías (American Concrete Institute Committee 522, 2010, pág. 5).
- c) Estructuras con gran absorción acústica: Diferentes estructuras que permitan eliminar el ruido pueden ser construidas. Pavimentos, paredes, pisos son algunos ejemplos que podemos nombrar. Son importantes especialmente al disminuir el ruido que originan los

vehículos, en un hormigón normal éste rebota, pero en un hormigón permeable se atenúa (American Concrete Institute Committee 522, 2010, pág. 5).

- d) Base para vías: Se puede utilizar hormigón permeable como una base sobre la cual se construirán calles, vías, autopistas o incluso, con una mayor investigación, aeropuertos. La idea es brindar una base resistente y permeable (American Concrete Institute Committee 522, 2010, pág. 5).
- e) Parques y canchas: El hormigón en parques al igual que en canchas no necesita de resistencias muy altas para funcionar. El hormigón permeable es una gran solución para evitar las molestias a los usuarios. Con la dosificación adecuada se debe conseguir una superficie lo suficientemente permeable para permitir el buen uso de las canchas (BASF, s.f.).
- f) Pisos en zoológicos: Los líquidos de los animales, el agua que beben y usan para su aseo se riega en todas partes y una superficie que permita el paso de ellos va a ser de gran ayuda (BASF, s.f.).
- g) Cubiertas de piscinas: Las piscinas suelen ser lugares de muchos accidentes entre los usuarios debido al piso resbaladizo. El hormigón permeable evitará que el agua sea un problema (BASF, s.f.).

- h) Rutas de carros de golf: Los golfistas deben desplazarse mucho en carros de golf. Las vías por donde transitan pueden ser construidas de hormigón permeable y de esa manera brindar la comodidad necesaria a los usuarios (BASF, s.f.).

- i) Cunetas de carreteras: Al contar con cunetas de hormigón permeable se puede conseguir que durante lluvias muy intensas el agua sea llevada a sistemas de alcantarillado o al suelo rápidamente (BASF, s.f.).

- j) Lechos de sedimentos de plantas para el tratamiento de aguas negras: Su estructura puede semejar a la de una coladora, la cual permitirá el paso del agua y retendrá a los sedimentos que las aguas negras traen (López Palacios, 2010, pág. 9).

1.4. Propiedades

Su principal característica de permeabilidad hace que las propiedades del hormigón permeable se vean afectadas en relación al hormigón convencional. Estas varían principalmente debido al porcentaje de vacíos, el cual se ve afectado por la relación A/C, porcentaje de pasta cementante, tipo de agregado, porcentaje de agregados finos (si los hubiera) y nivel de compactación (American Concrete Institute Committee 522, 2010, pág. 7).

Al alterar su permeabilidad se va alterar de gran manera su resistencia, objetivo importante en esta investigación; sus principales propiedades se describen a continuación:

1.4.1. Consistencia o Trabajabilidad

Es la facilidad que brinda el hormigón durante la mezcla, transporte y vaciado del mismo directamente en su posición final con alteraciones mínimas de su homogeneidad. Esta propiedad va a depender del tamaño máximo del agregado, de la complejidad del encofrado y del tamaño y espaciado del acero de refuerzo (Waddell & Dobrowolski, 1996, pág. 5.3).

El ensayo estándar de asentamiento conocido como “Cono de Abrams” no puede ser utilizado con este tipo de hormigón (Aoki, 2009, pág. 6). Debido a la falta de agregado fino, el hormigón permeable tiende a tener un aspecto de un material seco y poco moldeable. Éste es un factor que debe tomarse muy en cuenta al momento de su transporte, colocación en obra y cuando se cuenta con encofrados con formas especiales.

1.4.2. Masa Unitaria

“Es la masa del material necesario para llenar un volumen unitario” (Montejo Fonseca, 2008, pág. 24). Se lo puede entender con mayor facilidad si hablamos de su densidad que es la razón de la masa de un cuerpo y el volumen que ocupa, en este caso el volumen va a ser un volumen unitario o normalizado.

Debido a sus altos porcentajes de vacíos, el hormigón permeable es considerado un hormigón liviano y su masa volumétrica es de aproximadamente el 70% del de un hormigón convencional. Sus valores varían entre 1600 y 2200 kg/m³ (López Palacios, 2010, pág. 34).

1.4.3. Porcentaje de Vacíos

La mezcla de hormigón va a contar con espacios vacíos en su interior, esto se debe a la forma de las partículas de los agregados. Estos, aunque posean diferente granulometría, no van a encajar de manera perfecta, dejando un porcentaje de vacíos, el cual en el hormigón permeable va a ser mucho mayor (Muñoz Salinas & Sastre Sastre, 2010, pág. 51).

El porcentaje de vacíos va a influenciar directamente la permeabilidad del material y especialmente la absorción acústica que este material tendrá. Un porcentaje de vacíos bajo, puede incrementar las posibilidades de obstruir los poros de la mezcla, problema que puede ser evitado utilizando agregados de tamaños grandes (American Concrete Institute Committee 522, 2010, pág. 9).

Existen 2 tipos de porosidad, que es la propiedad de un material para albergar vacíos en su interior, la abierta y la cerrada. La primera nos dice que todos los vacíos o poros se encuentran conectados entre sí, que viene a ser el caso del hormigón ensayado en esta disertación.

La cerrada, por otro lado habla de poros independientes, caso en el cual se estaría hablando del hormigón convencional (Muñoz Salinas & Sastre Sastre, 2010, pág. 51). Se recomienda que los valores de porcentajes de vacíos en los que se maneja el hormigón permeable varíen entre 15 y 30% (Aoki, 2009, pág. 7).

1.4.4. Resistencia a la Compresión

La principal cualidad de todo hormigón es su resistencia a la compresión, propiedad que se define como el esfuerzo máximo que un material o una mezcla puede soportar bajo una carga de aplastamiento.

La resistencia que pueda llegar a alcanzar el hormigón va a depender de la cantidad de agua que se emplee en su elaboración. Una cantidad elevada de agua va a ocasionar que el cemento se escurra ocasionando una mala o insuficiente adherencia entre las partículas de los agregados. Por otro lado una cantidad insuficiente de agua ocasionará falta de cohesión entre las mismas partículas. En ambos casos el resultado final va a dar una mezcla con poca resistencia (Short & Kinniburgh, 1967).

Dependiendo de la cantidad mínima o nula de agregados finos, de la granulometría del agregado grueso, de la relación A/C, de la cantidad de pasta cementante y de la potencia de la compactación, la resistencia del hormigón va a variar. A mayor cantidad de vacíos, se tendrá menor resistencia y viceversa (López Palacios, 2010, pág. 37).

La resistencia del hormigón permeable debería variar entre 70 y 280 kg/cm² (American Concrete Institute Committee 522, 2010, pág. 7). Otros estudios afirman que la resistencia a la compresión del hormigón permeable varía entre 25 y 345 kg/cm² (Aoki, 2009, pág. 8). Estos valores pueden variar considerablemente si se realiza una mayor cantidad de ensayos con aditivos y con diferentes tipos de agregados.

1.4.5. Resistencia a la Flexión

Para el cálculo de estructuras la resistencia a la flexión del hormigón es considerada como nula, ya que el acero de refuerzo es el encargado de soportar esos esfuerzos, pero nos permite probar la calidad de la mezcla. Esta resistencia es definida como el esfuerzo máximo desarrollado en la fibra más externa en una probeta, un momento antes de que ésta falle.

La resistencia a la flexión es expresada por medio del módulo de rotura y sus valores varían entre el 10 y 20% de la resistencia a la compresión. En el hormigón permeable se tiene resistencias que oscilan entre 10 y 38 kg/cm² (López Palacios, 2010, pág. 38)

1.4.6. Permeabilidad

La permeabilidad es la capacidad que tiene la mezcla para permitir el paso del agua a través de sí misma sin alterar su estructura, y sus valores según varios estudios, varían entre 81 a 730 litros/min/m² o 0,14 a 1,22 cm/s. (BASF, s.f.).

La velocidad del paso del fluido a través de la estructura tiene incidencia directa con la porosidad y la presión ejercida sobre el mismo (López Palacios, 2010, pág. 39). Esta propiedad es muy importante en esta disertación de grado, se debe tener un equilibrio entre resistencia a la compresión y permeabilidad, ya que mientras una aumenta la otra disminuye

1.4.7. Absorción Acústica

Es la propiedad que poseen ciertos materiales para absorber el sonido, cuando éste golpea la superficie del mismo. La cantidad de sonido que absorban va a depender del material, ya que algunos solo lo reflejan.

Los vacíos presentes en esta mezcla permiten absorber el ruido generado por el roce entre los neumáticos de los vehículos y la superficie del pavimento. Esta característica brinda gran comodidad a las personas que viven cerca de carreteras muy transitadas (American Concrete Institute Committee 522, 2010, pág. 6).

1.4.8. Durabilidad

Contempla la resistencia del hormigón a 3 factores principales, abrasión, congelamiento-deshielo y sulfatos. El primero es una característica que se debe tener muy en cuenta cuando se construye vías debido a las fuerzas horizontales que ejercen los vehículos al arrancar y frenar. La resistencia a los sulfatos es una característica importante en todos los hormigones ya que siempre existirán químicos que pueden afectar a la estructura (López Palacios, 2010, pág. 44).

El tercer factor no es común en nuestro país. Los cambios de temperatura son bruscos y muy constantes pero el clima no llega a temperaturas bajo cero que permitan el congelamiento de los líquidos que se encuentran en el interior de la estructura. El agua al congelarse puede expandirse hasta un 9% en volumen, provocando cargas internas hidrostáticas que pueden lastimar a la

estructura (López Palacios, 2010, pág. 45). El hormigón permeable permite que el agua se evacúe completamente evitando la expansión de la misma por congelamiento dentro de la estructura. En nuestro país, durante la construcción de hormigón convencional, los cambios de temperatura se controlan utilizando mallas electro soldadas.

2. CAPÍTULO II: MATERIALES

El hormigón permeable no deja de tener la base de materiales de un hormigón convencional, el cual consta de agregado grueso, agregado fino, cemento, agua, aire (vacíos), aditivos (si se tiene una necesidad especial). La diferencia de la mezcla realizada en esta disertación de grado con el hormigón convencional, radica en las cantidades, es decir, es elaborado con muy pocos o incluso nada de agregados finos, por ende tiene mayor cantidad de vacíos (aire), la cantidad de agregado grueso en comparación al del agregado fino es muy alto, entre otras.

La resistencia de la mezcla final de hormigón, además de realizar una buena dosificación, utilizar métodos de compactación y de curado apropiados, va a verse afectada principalmente por la calidad, tamaño de partículas y resistencia individual de cada uno de los elementos que componen la mezcla.

Si las partículas de agregado grueso no son lo suficientemente resistentes, si tanto el agregado grueso como el fino constan de grandes cantidades de material fino (que pase el tamiz #200) que no permite la correcta unión entre partículas y pasta cementante, entonces la estructura va a fallar antes de lo planificado.

Debido a estos y otros factores, es necesario realizar estudios de laboratorio que nos permitan de manera segura saber si estamos trabajando con materiales de calidad y resistentes. Para ello es necesario escoger varias minas de agregados y realizar las respectivas pruebas de calidad para identificar una mina que nos brinde confianza al momento de realizar nuestra mezcla.

Origen de Agregados

Para esta disertación se usó los agregados, tanto fino como grueso, de la cantera de Holcim Ecuador S.A. ubicada en Pifo, provincia de Pichincha. La decisión fue tomada en conjunto con el Ing. Lauro Lara, director de esta investigación, una vez que se realizaron los respectivos ensayos de calidad, obteniendo resultados muy favorables.

La idea desde un inicio, fue utilizar materiales de muy buena calidad que permitan realizar una mezcla resistente, basándonos en que los materiales cumplen con las condiciones de granulometría, contenido orgánico, durabilidad a la acción de los sulfatos, desgaste por abrasión, material fino que pasa el tamiz #200, entre otras características.

El material cementante proviene de la empresa Grupo Empresarial DC (Diacelec) y cuyo nombre conocido en el país es Selvalegre. La idea de utilizar este cemento en particular, fue la de incluir en la mezcla un producto que se comercializa mucho en el medio y que demuestre que el hormigón permeable es una gran idea que puede ser realizada con materiales comunes.

Muestreo / Obtención de los Agregados

El muestreo es la obtención de, como lo indica su nombre, muestras representativas de un lote entero de cada material a utilizar (Cement and Concrete Association, 1989, pág. 44). La palabra representativa nos indica que debe representar las características reales del lote.

El material seleccionado debe provenir del producto final, es decir que no va a ser sometido a mayores reducciones de las partículas. Si el material va a ser recogido de una pila, se lo debe obtener de distintos lugares de la misma y luego mezclar todo hasta obtener un material homogéneo, sin alterar el tamaño de sus partículas.

Puesto que el muestreo es tan importante como los ensayos en sí, se debe seguir la norma ASTM D75/D75M – 14 “Standard Practice for Sampling Aggregates” o en español “Método Estándar para Muestreo de Agregados” (American Concrete Institute Committee D04, 2014, págs. 1-7). Para esta disertación se decidió probar los materiales antes de utilizarlos en las dosificaciones, fue necesario realizar 2 muestreos diferentes, uno para los ensayos y otro para las mezclas.

Ensayos

Con la finalidad de obtener una mezcla duradera y resistente, la calidad de los materiales que la componen debe ser óptima y comprobada en laboratorio con los debidos ensayos. Para la dosificación del hormigón permeable es necesario encontrar el porcentaje de absorción y la gravedad específica de los agregados. Algunos ensayos, no son necesarios para la dosificación pero permiten al ingeniero determinar la calidad de los materiales.

2.1. Agregados

El control de calidad de los agregados debe ser minucioso para tener la seguridad de que la mezcla va a ser duradera y resistente.

2.1.1. Especificaciones de los agregados

La norma ASTM C33/C33M – 13 cuyo apartado titula “Standard Specification for Concrete Aggregates” o en español “Especificaciones Estándar de Agregados para Concreto” permite gradar al agregado (American Concrete Institute Committee C09, 2013, págs. 1-7).

La granulometría es la gradación de las partículas de los materiales, con la finalidad de conocer sus propiedades mecánicas y origen. Su determinación se la hace a través de tamices normados que permiten separar las partículas en grupos dependiendo de su tamaño.

La siguiente tabla indica la típica granulometría de un agregado #67 y un #8, el material A es el agregado de la cantera de Pifo utilizado en esta disertación. Como muestra la tabla, éste es un agregado #67 por lo que los resultados obtenidos en las dosificaciones serán específicamente para este agregado.

Tabla 2.1: Granulometría del Agregado Grueso

Tamiz	1	3/4	1/2	3/8	#4	Pasa #4	#8	#16
% pasante acumulado #67	100	90 to 100	-	20 to 55	0 to 10	-	0 to 5	
% pasante acumulado #8			100	85 to 100	10 to 30		0 to 10	0 to 5
Material A. Masa ret. Parcial	0,0	63,8	5034,6	3386,3	5203,6	1235,9		
Material A. Masa ret. Acumulado	0,0	63,8	5098,4	8484,7	13688,3	14924,2		
Material A. % masa ret acumulado	0,0	0,4	34,2	56,9	91,7	100,0		
Material A. % masa pasa acumulado	100,0	99,6	65,8	43,1	8,3	0,00		

Fuente: Elaboración Propia

Por otro lado la siguiente tabla muestra la granulometría del agregado fino B utilizado en la mayoría de dosificaciones para brindar mayor resistencia al hormigón, restando al mismo tiempo su permeabilidad.

Tabla 2.2: Granulometría del Agregado Fino

Tamiz	3/8	#4	Pasa #4	#8	#16	#30	#50	#100	Pan
% pasante acumulado Fino	100	95 to 100		80 to 100	50 to 85	25 to 60	5 to 30	0 to 10	0
Material B. Masa ret. Parcial	0,0	0,9		107,6	115,3	83,5	65,6	45,0	82,9
Material B. Masa ret. acumulado	0,0	0,9		107,6	222,9	306,4	372,0	417,0	499,9
Material B. % masa ret acumulado	0,0	0,2		21,5	44,6	61,3	74,4	83,4	100,0
Material B. % masa pasa acumulado	100,0	99,8		78,5	55,4	38,7	25,6	16,6	0,0

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede observar, el porcentaje de agregado fino acumulado que pasa el tamiz #100 es de 16, y mayor al valor recomendado para un agregado fino. Este pequeño porcentaje no va a afectar las dosificaciones

2.1.2. Gravedad Específica y Porcentaje de Absorción

La norma ASTM C127 – 12 cuyo apartado titula “Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate” o en español “Método Estándar para la Determinación de la Densidad, Densidad Relativa (“Gravedad Específica”) y Porcentaje de Absorción en el Agregado Grueso”, permite determinar la densidad promedio del agregado grueso, sin incluir los vacíos; determinar además la densidad relativa (o gravedad específica) y el porcentaje de absorción del agregado grueso (American Concrete Institute Committee C09, 2012, págs. 1-4).

Se selecciona una muestra del agregado grueso y se la seca, para posteriormente sumergirla en agua hasta saturar la muestra. Se la remueve y se la coloca en una toalla absorbente. La superficie de cada partícula debe secarse individualmente evitando la evaporación del agua. Se pesa la muestra. Posteriormente se determina la masa aparente de la misma al estar sumergida y para finalizar se seca la muestra y se la pesa (American Concrete Institute Committee C09, 2012, pág. 3).

Tabla 2.3: Gravedad Específica y % Absorción del Agregado Grueso

A=	5298,2	g	Ge=	2,40
B=	5460,3	g	Ges=	2,47
C=	3249,1	g	Gea=	2,59
			%Abs=	3,06

Fuente: Elaboración Propia

Donde,

A: Masa de la muestra seca (Densidad Relativa)

B: Masa de la muestra saturada con superficie seca (kg)

C: Masa de la muestra sumergida (kg)

Ge: Gravedad específica

Ges: Gravedad específica

Gea: Gravedad específica aparente

%Abs: Porcentaje de Absorción (porcentaje)

Por otro lado la norma ASTM C128 – 12 cuyo apartado titula “Standard Test for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate” o en español “Método

Estándar para la Determinación de la Densidad, Densidad Relativa (“Gravedad Específica”) y Porcentaje de Absorción en el Agregado Fino” permite realizar el mismo ensayo pero con el agregado fino (American Concrete Institute Committee C09, 2012, págs. 1-5).

En un matraz, se coloca 500gr de agregado fino saturado con superficie seca y se llena el 90% del mismo con agua, para después agitarlo. Se debe eliminar las burbujas de aire moviendo, invirtiendo y rodándolo. Se debe llevar el matraz a una temperatura de 23 grados y llenarlo con agua. Se determina la masa de la muestra con el matraz, se la seca y se la pesa nuevamente. Para finalizar se determina la masa del matraz lleno de agua (American Concrete Institute Committee C09, 2012, pág. 4).

Tabla 2.4: Gravedad Específica y % Absorción del Agregado Fino

Agregado Fino				
A=	478	g	Ge=	2,38
B=	500	g	Ges=	2,49
Mm=	152,4	g	Gea=	2,67
Mmw=	951,5	g	Ab=	4,60
Ma=	299,1	g		

Fuente: Elaboración Propia

Donde,

Mm: Masa del Matraz (kg)

Mmw: Masa del conjunto matraz, agua y muestra (kg)

Ma: Masa de agua añadida al matraz (kg)

La gravedad específica es comúnmente utilizada para calcular el volumen ocupado por el agregado al momento de dosificar, mientras que el porcentaje de absorción y la humedad natural, permiten calcular el agua de la mezcla del hormigón.

2.1.3. Masa Unitaria y Porcentaje de Vacíos

La norma ASTM C29/C29M – 09, cuyo apartado titula “Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate” o en español “Método Estándar para la Determinación de la Densidad Bulk (“Masa Unitaria”) y Porcentaje de Vacíos en el Agregado” es utilizada en este ensayo (American Concrete Institute Committee C09, 2009, págs. 1-4).

Esta norma permite calcular la masa unitaria del agregado tanto fino como grueso a partir de un volumen de material en el cual se incluyen los vacíos y el agregado en sí. Además permite determinar el porcentaje de vacíos entre partículas (American Concrete Institute Committee C09, 2009, pág. 1).

Para la masa unitaria compactada, se utiliza un molde cilíndrico metálico para el ensayo. Se llena el cilindro con el material seco, hasta un tercio de su capacidad, para después compactar la muestra con 25 golpes de la varilla normada y golpear el cilindro 10 veces con un martillo de caucho. Se repite el procedimiento hasta los 2 tercios y hasta llenar el cilindro. Se determina la masa del cilindro más la muestra, la masa del cilindro solo y se determina el volumen del cilindro (American Concrete Institute Committee C09, 2009, pág. 3).

Tabla 2.5: Masa Unitaria y % de Vacíos

Muestra 1				
G=	21988	G	PU_G=	1351,76
T=	8538	G		
V=	9950	Cm³		
Muestra 2				
G=	21918	G	PU_G=	1344,72
T=	8538	G		
V=	9950	Cm³		
Muestra 3				
G=	21789	G	PU_G=	1331,76
T=	8538	G		
V=	9950	Cm³		

PU_{GP}=	1343	kg/m ³
% Vacíos=	43,8	%

Fuente: Elaboración Propia

Donde,

PU_G: Masa Unitaria Compactada del Agregado Grueso (kg/m³)

G: Masa del Agregado + Masa del Recipiente (kg)

T: Masa del Recipiente (kg)

V: Volumen del Recipiente (m³)

2.1.4. Resistencia a la Abrasión

Se usa la norma ASTM C131 – 06 cuyo apartado titula “Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles

Machine” o en español “Método Estándar para la Determinación de la Resistencia a la Degradación de Agregado Grueso de Partículas Pequeñas, debido a la Abrasión e Impacto en la Máquina de Los Ángeles” (American Concrete Institute Committee C09, 2006, págs. 1-3).

El ensayo permite determinar la resistencia del agregado grueso, que tenga hasta un tamaño máximo nominal 1½ in., a la abrasión. La máquina de los Ángeles consiste en un cilindro grande de acero que se encuentra colocado con sus caras perpendiculares al suelo. El cilindro tiene la capacidad de girar alrededor de su eje central. Dependiendo del tipo de gradación de la muestra que se va a ensayar, se colocará una cierta cantidad de bolas de acero cuya masa varía entre 390 y 445 gramos (American Concrete Institute Committee C09, 2006, pág. 1).

Se coloca el agregado grueso, el cual fue previamente secado y pesado, en la máquina de los ángeles e inmediatamente se colocan las bolas de acero. El cilindro empieza a girar y las bolas de acero se encargan de causar el desgaste en el material. Al finalizar el ensayo se saca el agregado y se lo pasa por el tamiz #12. El material retenido se lava para eliminar las partículas finas, se seca al horno y para finalizar se pesa la muestra (American Concrete Institute Committee C09, 2006, pág. 3).

El cálculo se lo realiza obteniendo la diferencia de masas entre el material sobrante y el material inicial en porcentaje con relación a la masa del material inicial. Este valor se conoce como el porcentaje de abrasión o de pérdida (American Concrete Institute Committee C09, 2006, pág. 3).

Tabla 2.6: Resistencia a la Abrasión

1/2 in=	2499,8	g
3/8 in=	2500,0	g
Total=	4999,8	g
Pasa Tamiz #12=	1299,7	g
Retiene Tamiz #12=	3700,1	g
% Abrasión=	25,995	

Fuente: Elaboración Propia

2.1.5. Durabilidad de los agregados

Se usa la norma ASTM C88 – 13 cuyo apartado titula “Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate” o en español “Método Estándar para Determinar la Durabilidad de los Agregados con el uso de Sulfato de Sodio o Sulfato de Magnesio” (American Concrete Institute Committee C09, 2013, págs. 1-5).

El ensayo provee un método para realizar una estimación preliminar de la durabilidad que el agregado va a tener al usarlo en una mezcla de hormigón, a través del tiempo. La utilización de los sulfatos simula las fuerzas internas que provoca la expansión del agua cuando se congela, por lo que brinda información importante de cómo reaccionaría el agregado en casos con temperaturas extremas (American Concrete Institute Committee C09, 2013, pág. 1).

Tanto el agregado grueso como el agregado fino deben ser tamizados, separados por tamaños y pesados al estar secos. Cada muestra es sumergida en la solución previamente preparada de sulfato de sodio o de sulfato de magnesio por un tiempo no menor a 16 ni mayor a 18 horas. Se

cubre las muestras de tal forma que se impida la evaporación de la solución y el ingreso de sustancias extrañas (American Concrete Institute Committee C09, 2013, págs. 2-3).

Transcurrido el tiempo propuesto, se lleva las muestras al horno y se las calienta hasta que la solución se derrita y pueda ser removida, para posteriormente secar el material. Nuevamente se agrega la solución de sulfato y se realiza el mismo procedimiento hasta cumplir la cantidad de 5 ciclos. Para finalizar se lava cada muestra con agua hasta eliminar el contenido de sulfato, se la seca y se la tamiza, en el caso del agregado fino, por el tamiz que fue cada muestra tamizada, y en el caso del agregado grueso se debe utilizar el tamiz que se especifica en la norma (American Concrete Institute Committee C09, 2013, pág. 3).

Los cálculos se realizan al descontar la masa inicial de cada muestra de la masa obtenido al finalizar los ciclos, en porcentaje con relación a la masa inicial de cada muestra. Para esta disertación se realizó el ensayo solamente con el agregado grueso (American Concrete Institute Committee C09, 2013, pág. 4).

Tabla 2.7: Durabilidad de los Agregados

Grueso					
Tamiz que retiene	%Retenido Parcial	Masa antes del ensayo (gr.)	Masa después del ensayo (gr.)	% Pasa después del ensayo	% de Pérdida Parcial
3/4 in	0,43	1508,4	1465,4	2,85	0,012
3/8 in	56,42	1001,5	972,1	2,94	1,656
#4	34,87	301,4	288,3	4,35	1,516
#8	8,28				-
	100				3,184

Fuente: Elaboración Propia

2.1.6. Terrones de Arcilla

La norma ASTM C142/C142M – 10 cuyo apartado titula “Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates” o en español “Método Estándar para Determinar el Porcentaje de Terrones de Arcilla y Partículas Desmenuzables en los Agregados” es usada en este ensayo (American Concrete Institute Committee C09, 2010, págs. 1-2).

Este método permite determinar la aceptabilidad que va a tener el agregado en la elaboración de una mezcla de hormigón, mediante el cálculo del porcentaje de terrones de arcilla y partículas desmenuzables en el agregado (American Concrete Institute Committee C09, 2010, pág. 1).

Se debe separar el material en muestras de acuerdo a lo estipulado en la norma, para posteriormente secarlas y pesarlas. Cada muestra es sumergida en agua destilada durante 24 horas aproximadamente. Manualmente y sin utilizar las uñas, se debe presionar cada partícula individualmente tratando de romperla en partículas más pequeñas. Para finalizar se debe realizar un tamizado húmedo, es decir pasar agua a través del tamiz mientras se lo agita de tal forma que las partículas que se desprenden pasen y se eliminen. Luego, se debe secar cada muestra y pesar (American Concrete Institute Committee C09, 2010, págs. 1-2).

El cálculo se lo realiza al restar la masa inicial con la masa obtenida al finalizar el ensayo, éste se expresa en porcentaje con respecto a la masa inicial. El procedimiento debe ser realizado para cada muestra (American Concrete Institute Committee C09, 2010, pág. 2).

Tabla 2.8: Terrones de Arcilla de Agregado Fino

Agregado Fino					
M=	160	g		P=	1,00
R=	158,4	g			

Fuente: Elaboración Propia

Donde,

M: Masa inicial de la muestra

R: Masa seca de la muestra retenida en el tamiz #20 después del ensayo

P: Porcentaje de arcilla en terrones

Tabla 2.9: Terrones de Arcilla de Agregado Grueso

Grueso					
Tamiz que retiene	%Retenido Parcial	Masa antes del ensayo (gr.)	Masa después del ensayo (gr.)	% Pasa después del ensayo	% de Pérdida Parcial
3/4 in	0.43	3029.0	2860.0	5.58	0.024
3/8 in	56.42	2016.0	1905.0	5.51	3.106
#4	34.87	1002.0	932.0	6.99	2.436
#8	8.28				-
	100				5.566

Fuente: Elaboración Propia

2.2. Cemento

El cemento es el material encargado de brindar los enlaces o puentes entre partículas, creando una condición aglomerante que las mantiene juntas. El material cementante que proviene de la combinación del agua con el cemento deberá cubrir las partículas completamente para que exista una buena adherencia.

El cemento Portland es el más utilizado en la elaboración del hormigón permeable. Sin embargo, en nuestro medio no se encuentra este tipo de cemento, por lo que se utilizó el Portland puzolánico. Al seleccionar el tipo de cemento, se debe tener en cuenta que los hormigones con altos porcentajes de vacíos, tienden a tener un periodo de secado más corto, es decir que el curado es más rápido y más sensible a los cambios de temperatura y a la evaporación del agua de la mezcla (Meneses & Bravo, 2007, pág. 12).

2.3. Agua

El agua tiene un papel fundamental en la elaboración del hormigón, que es el de ocasionar la reacción química del cemento, permitiendo que éste se endurezca. Además, la cantidad de agua utilizada va a permitir modificar la trabajabilidad de la mezcla, permitiendo obtener mayor facilidad al colocarlo en obra y compactarlo (Cement and Concrete Association, 1989, pág. 108).

Es interesante saber que una cierta cantidad del agua de la mezcla es utilizada en la reacción química, mientras que el resto se va a evaporar durante el fraguado o endurecimiento del hormigón. Esa cantidad “extra” de agua es la que permite que la mezcla sea trabajable y pueda ser puesta en obra con menor esfuerzo (Cement and Concrete Association, 1989, pág. 109). Pero debido a la gran sensibilidad que tiene el hormigón permeable a la cantidad de agua, ésta debe ser controlada con mucho esmero para evitar que la resistencia de la mezcla y que la trabajabilidad de la misma se vean afectadas.

En general el agua a usarse en las mezclas debe cumplir ciertas especificaciones brindadas por la ASTM. Vale la pena aclarar, que el agua potable de la ciudad de Quito entra en los requerimientos de las normas, por lo que es apta para el uso.

3. CAPÍTULO III: FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN PERMEABLE

Después de realizar un análisis de varios estudios, investigaciones y trabajos de varias universidades en diferentes países del mundo, se llegó a tomar la decisión de utilizar una fuente específica para la fabricación del hormigón permeable. La norma ACI 522R-10 es la base de las dosificaciones llevadas a cabo en esta disertación de grado.

Durante las dosificaciones realizadas, la meta propuesta fue la de alcanzar la resistencia mínima a compresión de 210 kg/cm^2 el coeficiente de permeabilidad $10\text{E-}3 \text{ cm/s}$, esto como se indica en el objetivo del plan de disertación de grado.

3.1. Factores necesarios para Dosificar

La dosificación es el cálculo de las proporciones de cada material que componen la mezcla a fin de obtener la resistencia, durabilidad, densidad y en el caso de esta disertación, la permeabilidad deseada.

Los valores de la dosificación van a variar dependiendo del tipo de agregado que se va a usar, de la cantera, del porcentaje de absorción de los agregados, de su masa unitaria, de su granulometría, de la calidad del cemento, entre otros factores.

Debido al factor económico no se puede elaborar un hormigón de altísima resistencia todo el tiempo. Su resistencia va a ser determinada de acuerdo al uso que se le va a dar, teniendo en

cuenta que existen estructuras o elementos que pueden tener resistencias menores y trabajar en excelentes condiciones, es decir no podemos comparar el hormigón usado en una vivienda de 2 pisos con el hormigón que se deberá usar en la construcción de una represa.

Antes de realizar la dosificación, se debe tener claro cuál es la resistencia a la compresión y condición de permeabilidad que se desea obtener. La resistencia a la flexión en el hormigón simple (sin armadura), es considerada como nula o cero al momento de realizar los cálculos estructurales de cada elemento de una edificación (López Palacios, 2010, pág. 19). Sin embargo, en el caso del hormigón para pavimentos rígidos, este valor es muy importante, por lo que se debe realizar los debidos ensayos de resistencia a la flexión para establecer que esté dentro de las especificaciones.

3.2. Parámetros de dosificación

Todos los materiales que van a ser empleados en la fabricación de este tipo de hormigón, deben cumplir con ciertas normas, que para nuestro caso, son regidas por la ASTM (American Society for Testing Materials, por sus siglas en inglés).

3.2.1. Agregado Grueso

Este material es el que ocupa la mayor cantidad en cuanto al volumen de la mezcla, es por eso que su resistencia y granulometría son los principales factores a tomar en cuenta. Las gradaciones (granulometría) más comunes usadas en las mezclas de hormigón permeable

cumplen los requerimientos de ASTM C33/C33M de agregados #7 (1/2" a No.4), #8 (3/8" a No.8) #67 (3/4" a No.4) y #89 (3/8" a No.16), donde los valores dentro de los paréntesis representan los tamices por los cuales las partículas del agregado pasan y se quedan respectivamente (American Concrete Institute Committee 522, 2010, pág. 12).

Para la investigación se escogió el agregado #67 que cumple con lo estipulado en la ACI. Esto debido a que es una gradación utilizada comúnmente en las construcciones dentro de la provincia. Mediante los ensayos, se determinó que el porcentaje de absorción es de 3,37% y la gravedad específica es 2,36.

3.2.2. Agregado Fino

Como se explicó anteriormente, la característica principal de este hormigón es la carencia de agregado fino. Pero algunas investigaciones, entre las cuales se puede nombrar a la misma ACI, nos dicen que el usar agregado fino en la mezcla brinda menor permeabilidad pero permite alcanzar resistencias más altas, factor importante dependiendo del uso que se le va a dar a la mezcla (Aoki, 2009, pág. 27).

Las normas ASTM para el agregado fino nos permiten determinar la cantidad de material que pasa el tamiz #200, la resistencia del material a los sulfatos, además de su granulometría.

Durante las dosificaciones se incluirá agregado fino y se aumentará su cantidad, conforme se realicen más ensayos, esto para establecer como varía la resistencia de la mezcla. El porcentaje de absorción del material empleado es de 5,8% con una gravedad específica de 2,38.

3.2.3. Cemento

El cemento es el material que actúa como enlace entre las partículas de los agregados, es necesario que éste entre en contacto con el agua para que por medio de una reacción química se endurezca. El cemento Portland puzolánico es utilizado para la elaboración del hormigón en esta disertación (Amde & Rogge, 2013, pág. 11).

La cantidad de pasta cementante va a influir directamente en las propiedades del hormigón. Si se tiene una mayor cantidad de material cementante, se podrá abarcar una mayor superficie de las partículas de los agregados, permitiendo que éstas se enlacen de mejor forma brindando mayor resistencia a la mezcla, pero a su vez ocupará el espacio de los vacíos o poros que brindan las propiedades permeables a este hormigón.

El efecto contrario se obtendrá si la cantidad de pasta cementante es baja (López Palacios, 2010, pág. 20). La gravedad específica del cemento Portland puzolánico utilizado en esta disertación es de 3.00.

3.2.4. Agua

Una buena mezcla va a depender de la calidad del agua empleada. Este líquido debe ser potable y carecer de sales, aceites e impurezas que puedan afectar a los agregados y a la mezcla (López Palacios, 2010, pág. 21). La masa unitaria del agua para esta investigación es 1000 kg/m^3 .

3.2.5. Porcentaje de Vacíos

La resistencia del hormigón y su permeabilidad están ligadas directamente al porcentaje de vacíos que la mezcla tenga, y este valor se verá afectado por la cantidad de agregado fino, el porcentaje de pasta cementante que se utilice y la fuerza con la que se compacte al hormigón. Los valores de porcentaje de vacíos recomendados para el hormigón permeable varían entre 15 y 30% (Aoki, 2009, pág. 7).

3.2.6. Pasta Cementante

Es la pasta que se forma de la unión entre el agua y el cemento y es parte importante de la dosificación. Su porcentaje dentro de la mezcla va a depender del porcentaje de vacíos y la resistencia del hormigón que se desea obtener. A mayor cantidad de pasta cementante, menor porcentaje de vacíos y mayor superficie de los agregados cubiertas por, en este caso, aglomerante, por lo que se obtiene mayor resistencia. De acuerdo a la ACI los valores más utilizados para porcentaje de pasta cementante sobre el volumen total de la mezcla varían entre 10 y 30, por lo que para esta disertación se escogieron porcentajes entre esos valores.

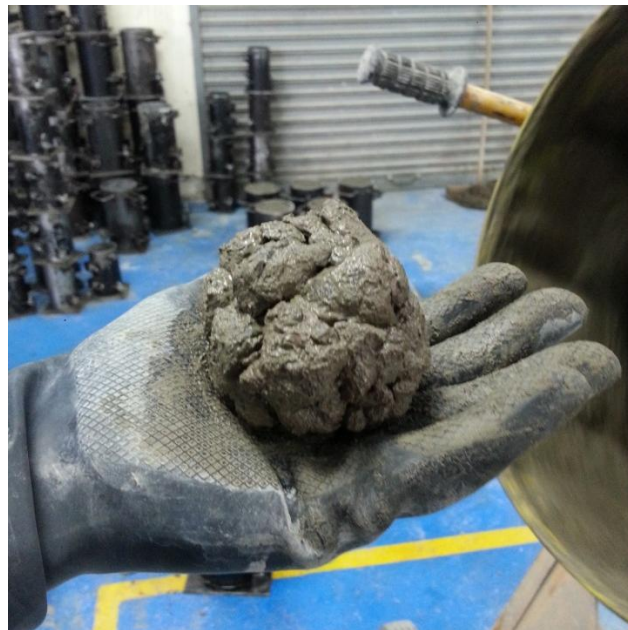
3.2.7. Relación A/C

Como se explicó con anterioridad, el agua es un factor sumamente importante en la elaboración de la mezcla. La relación A/C (Agua-Cemento) muestra, como su nombre lo indica, la relación entre la masa del agua utilizada en la mezcla y la masa del cemento.

La relación entre, A/C y resistencia, no se puede aplicar en el hormigón permeable de la misma forma en que se la hace en el hormigón convencional (American Concrete Institute Committee 522, 2010, pág. 13). Según el ACI, la relación A/C óptima para formar una pasta estable varía entre 0,26 y 0,45. Para este estudio se tomó el valor de 0,3.

Se debe tener en cuenta que una gran cantidad de agua en la mezcla, ocasionará el drenaje de la pasta cementante tapando los poros de la misma, por otro lado la carencia de agua formará un hormigón muy seco que no podrá formar enlaces resistentes entre sus partículas (Amde & Rogge, 2013, pág. 11).

Imagen 3.1: Bola de Hormigón permeable con Relación A/C Apropia



Fuente: Elaboración Propia

La mejor manera de comprobar si la consistencia del hormigón fabricado es formar una bola con las manos. Esta bola, si tiene poca cantidad de agua, se va a deshacer, por otro lado, la cantidad excesiva de agua va a dejar rastros muy grandes de pasta cementante en los guantes. La *Imagen 3.1* muestra una mezcla bien realizada (Aoki, 2009, pág. 6).

3.2.8. Relación F/G

Aunque la filosofía del hormigón poroso indica que éste debe carecer de agregado fino, debido a los requerimientos de esta disertación, se utilizó material fino en pequeñas cantidades, hasta obtener la resistencia requerida. Este factor muestra la relación entre la masa del agregado fino en la mezcla y la masa del agregado grueso en la misma. Es importante notar que un valor de F/G bajo, no permite la formación de enlaces fuertes entre las partículas grandes.

Por otro lado al tener relaciones F/G altas, se debe tener cuidado al momento de escoger la relación A/C. Valores elevados de A/C provocarán al momento de compactar la mezcla, que el mortero se escurra a la zona inferior limitando la cantidad de enlaces entre partículas gruesas. Los valores recomendados de F/G varían entre 0.0 y 0.3 (Meneses & Bravo, 2007, pág. 12).

3.3. Cálculo

El método empleado por la ACI no permite hacer un cálculo de las cantidades de materiales en base a la resistencia deseada, pero permite crear varias tablas que servirán como guía para elaborar un hormigón permeable con la resistencia requerida.

El cálculo de las cantidades necesarias de cada material se determinará de acuerdo a la dosificación recomendada por la ACI 522R-10. En nuestro caso, se realizaron ciertas modificaciones para incluir agregado fino en la mezcla además de las debidas correcciones de cantidad de agua debido a la humedad natural de los agregados.

Estas dosificaciones son al peso, debido a eso y para tener una correcta mezcla de acuerdo al tipo de agregado que se va a usar, es de gran importancia conocer su masa unitaria, porcentaje de absorción y gravedad específica.

3.3.1. Sin Agregado Fino

Puesto que se va a realizar una mezcla al peso, como primer paso se debe encontrar la masa seca total de los agregados, para ello se utiliza la masa unitaria del agregado grueso.

$$W_{Ts} = Pu_G * V_T$$

Dónde,

W_{Ts}: Masa total de los agregados seco (kg)

Pu_G: Masa unitaria del agregado grueso (kg/m³)

V_T: Volumen total de la mezcla (m³)

Es importante notar que la masa total de los agregados va a ser en este caso la masa del agregado grueso,

$$W_{Ts} = W_{Gs}$$

Donde,

W_{Gs}: Masa del agregado grueso seco (kg)

Posteriormente se calcula la masa del agregado grueso en estado natural, para lo cual se debe obtener la humedad natural del material, previa su utilización en la mezcla,

$$W_{GEN} = W_{GS} * \left(1 + \frac{HN_G}{100} \right)$$

Dónde,

W_{GEN}: Masa del agregado grueso en estado natural (kg)

HN_G: Humedad natural del agregado grueso (porcentaje)

El volumen de pasta se determina con la siguiente fórmula, una vez que se haya impuesto el porcentaje de pasta cementante que se va a utilizar,

$$V_p = \frac{\%V_p}{100} * V_T$$

Dónde,

V_p: Volumen de pasta cementante (m³)

%V_p: Porcentaje de pasta cementante (porcentaje)

El siguiente paso es calcular el contenido de cemento en la mezcla, para ello es necesario tener claro cuál es la relación a/c que se va a imponer, tomando en cuenta que es un factor que se debe

variar de dosificación en dosificación hasta conseguir el que permita tener un equilibrio entre resistencia, permeabilidad y manejabilidad.

$$Vp = \text{Volumen de cemento} + \text{Volumen de Agua}$$

$$Vp = \left(\frac{c}{Ge_c * Pu_a} \right) + \frac{am}{Pu_a}$$

Utilizando $am=c*(a/c)$ se obtiene

$$Vp = \left(\frac{c}{Ge_c * Pu_a} \right) + \frac{c * a/c}{Pu_a}$$

Reduciendo la fórmula se puede obtener

$$c = \left(\frac{Vp}{\frac{1}{Ge_c} + a/c} \right) * Pu_a$$

Dónde,

c: Masa del cemento (kg)

a/c: Relación agua/cemento (adimensional)

Pu_a: Masa unitaria del agua (kg/m³)

Ge_c: Gravedad específica del cemento (adimensional)

Una vez obtenida la cantidad de cemento y conociendo la relación a/c que se desea implementar, se calcula el contenido de agua,

$$am = c * a/c + W_{Gs} * \left(\frac{Abs_G - HN_G}{100} \right)$$

Donde,

am: Masa del agua (kg)

Abs_G: Porcentaje de absorción de agua del agregado grueso (porcentaje)

En este punto ya se conoce la masa que se va a utilizar de cada material, por lo que se puede empezar a elaborar la mezcla con:

- W_{GEN}
- c
- am

3.3.2. Con Agregado Fino

Para incluir el agregado fino se toma en cuenta ciertos factores que serán explicados en este numeral. Como primer paso, se debe encontrar la masa seca total de los agregados, para ese fin se debe utilizar la masa unitaria del agregado grueso.

$$W_{Ts} = Pu_G * V_T$$

Dónde,

W_{Ts}: Masa total de los agregados seco (kg)

P_{UG}: Masa unitaria del agregado grueso (kg/m³)

V_T: Volumen total de la mezcla (m³)

Posteriormente, se debe calcular la masa total de los agregados saturados con superficie seca, se utiliza la gravedad específica del agregado grueso,

$$W_{T_{SSS}} = W_{T_S} * \left(1 + \frac{Abs_G}{100} \right)$$

Donde,

W_{TSSS}: Masa total de los agregados saturados con superficie seca (kg)

Abs_G: Porcentaje de absorción de agua del agregado grueso (porcentaje)

Lo siguiente, es determinar cuál es el porcentaje de agregados finos que se van a usar en la mezcla para poder calcular su masa,

$$W_{F_{SSS}} = W_{T_{SSS}} * \frac{\%F}{100}$$

Donde,

W_{FSSS}: Masa del agregado fino saturado con superficie seca (kg)

%F: Porcentaje de agregado fino que se usará en la mezcla (porcentaje)

A continuación se calcula la masa seca del agregado fino, para ese fin se utiliza su porcentaje de absorción,

$$W_{FS} = \frac{W_{FSSS}}{\left(1 + \frac{Abs_F}{100}\right)}$$

W_{FS}: Masa del agregado fino seco

Abs_F: Porcentaje de absorción de agua del agregado grueso (porcentaje)

Luego se calcula la masa del agregado fino en estado natural, para lo cual se debe obtener la humedad natural del material antes de ser utilizado en la mezcla,

$$W_{FEN} = W_{FS} * \left(1 + \frac{HN_F}{100}\right)$$

Dónde,

W_{FEN}: Masa del agregado fino en estado natural (kg)

HN_F: Humedad natural del agregado fino (porcentaje)

Con la cantidad de agregado fino que se va a usar, se debe calcular la cantidad de agregado grueso necesaria. En este caso se descontará el material fino en estado saturado con superficie seca de la masa total de agregados en el mismo estado, con lo que se obtiene la masa del agregado grueso saturado con superficie seca que se utilizará en la mezcla,

$$W_{G_{SSS}} = W_{T_{SSS}} - W_{F_{SSS}}$$

Donde,

W_{GSSS}: Masa del agregado grueso saturado con superficie seca

A continuación, se calcula la masa del agregado grueso seco, para lo cual se utiliza su porcentaje de absorción,

$$W_{G_S} = \frac{W_{G_{SSS}}}{\left(1 + \frac{Abs_G}{100}\right)}$$

Donde,

W_{G_S}: Masa del agregado grueso seco

Luego se calcula la masa del agregado grueso en estado natural, para ese propósito se debe obtener la humedad natural del material antes de ser utilizado en la mezcla,

$$W_{G_{EN}} = W_{G_S} * \left(1 + \frac{HN_G}{100}\right)$$

Dónde,

W_{GEN}: Masa del agregado grueso en estado natural (kg)

HN_G: Humedad natural del agregado grueso (porcentaje)

Es importante notar que la cantidad de agregado grueso se ve disminuida, debido a que ese espacio es utilizado por el agregado fino incluido en la dosificación.

El volumen de pasta se lo va a determinar con la siguiente fórmula, una vez que se haya impuesto el porcentaje de pasta cementante que se va a utilizar. Este porcentaje deberá disminuir en 2% por cada 10% de agregado fino que se use en la mezcla bien compactada y en 1% por cada 10% de agregado fino que se use en la mezcla livianamente compactada,

$$Vp = V_T * (\%Vp - \%)$$

Dónde,

Vp: Volumen de pasta cementante (m³)

%Vp: Porcentaje de pasta cementante (porcentaje)

%: Porcentaje que se debe disminuir dependiendo de la cantidad de agregado fino (porcentaje)

En el siguiente paso se calcula el contenido de cemento, se debe conocer la relación a/c que se va a imponer,

$$c = \left(\frac{Vp}{\frac{1}{Gec} + a/c} \right) * Pu_a$$

Dónde,

c: Masa del cemento (kg)

a/c: Relación agua/cemento (adimensional)

Pu_a: Masa unitaria del agua (kg/m³)

Ge_c: Gravedad específica del cemento (adimensional)

Con la cantidad de cemento estipulada y la relación a/c impuesta, se procede a calcular el contenido de agua

$$am = c * a/c + W_{G_S} * \left(\frac{Abs_G - HN_G}{100} \right) + W_{F_S} * \left(\frac{Abs_F - HN_F}{100} \right)$$

Donde,

am: Masa del agua de mezcla (kg)

En este punto ya se conoce la masa que se va a utilizar de cada material, el siguiente paso es elaborar la mezcla con los siguientes datos:

- W_{GEN}
- W_{FEN}
- c
- am

3.3.3. Cálculo de porcentaje de vacíos y densidad de la mezcla

Al finalizar el cálculo de la dosificación, se puede calcular el porcentaje de vacíos y la densidad de la mezcla esperada. Como primer paso se debe determinar el volumen de todos y cada uno de los materiales, con las siguientes expresiones.

$$V_G = \frac{W_{G_S}}{Ge_{G_S} * Pu_a}$$

$$V_F = \frac{W_{F_S}}{G_{e_{F_S}} * P_{u_a}}$$

$$V_C = \frac{c}{G_{e_C} * P_{u_a}}$$

$$V_a = \frac{am}{P_{u_a}}$$

Donde,

V_G: Volumen del agregado grueso (m³)

V_F: Volumen del agregado fino (m³)

V_c: Volumen del cemento (m³)

V_a: Volumen del agua (m³)

Se obtiene el volumen total de los materiales sumando cada volumen y se calcula el porcentaje de vacíos,

$$V_M = V_G + V_F + V_c + V_a$$

$$\%Vac = (V_T - V_M) * \frac{100}{V_T}$$

Donde,

V_T: Volumen total de hormigón por parada (m³)

V_M: Volumen de los materiales (m³)

%Vac: Porcentaje de vacíos (porcentaje)

Para finalizar, se calcula la densidad de la mezcla con los valores ya obtenidos,

$$D = \frac{W_{GEN} + W_{FEN} + am + c}{V_T}$$

Donde,

D: Densidad de la mezcla (kg/m³)

Es importante tener en cuenta, que el cálculo de la densidad y de porcentaje de vacíos de la mezcla es aproximado. Si se quiere obtener valores reales, se debe realizar los ensayos correspondientes expuestos en el siguiente capítulo.

3.4. Dosificaciones

El objetivo de esta investigación, es el de realizar varias dosificaciones utilizando diferentes porcentajes de agregado fino y diferentes cantidades de pasta cementante, hasta conseguir la resistencia a la compresión, flexión y permeabilidad deseada; además, elaborar tablas que permitan la fabricación de un hormigón permeable, que cumpla con la resistencia y permeabilidad requeridos.

La cantidad de dosificaciones realizadas fueron suficientes para cumplir con los objetivos planteados. Se realizó una dosificación por día y se siguió lo estipulado en las normas ASTM para la construcción de probetas que puedan ser ensayadas en el laboratorio de Materiales, fue necesario realizar una dosificación de prueba para establecer la trabajabilidad de la mezcla.

Un par de dosificaciones tuvieron que ser desechadas, una porque se utilizó 2 personas para compactar las probetas, con lo cual se obtuvo resultados poco satisfactorios, esta dosificación tuvo que ser repetida. La otra debido a que al realizar las tablas los resultados estuvieron fuera de la tendencia de las demás dosificaciones.

Las modificaciones realizadas de dosificación en dosificación se encuentran descritas en la siguiente tabla

Tabla 3.1: Dosificaciones

Dosificación	a/c	F/G	%Vp
1ra	0.3	0.087	20.0
2da	0.3	0.135	23.6
3ra	0.3	0.155	25.0
4ta	0.3	0.188	27.3

Fuente: Elaboración Propia

Nota:

- ❖ Los cálculos realizados en las 4 dosificaciones que resultaron exitosas se detallan en las siguientes tablas. Cabe recalcar que los resultados de Densidad y porcentaje de vacíos son estimados, para obtener resultados reales es necesario realizar los ensayos de laboratorio correspondientes.
- ❖ Se debe tener en cuenta que el agregado grueso utilizado en esta investigación contiene un 8% de agregados finos, debido a eso la relación F/G tuvo que ser calculada incluyendo ese porcentaje.

3.4.1. Primera

Dosificación	
% Finos=	0
% Pasta cementante=	20
A/C=	0,3
Cantidad Hormigón=	0,133 m3
Densidad Agua=	1000 kg/m3

Agregado Fino	
% Absorción=	5,81
Gravedad específica=	2,38
Gravedad específica sss=	2,49

Agregado Grueso	
Peso Unitario Agregado=	1343 kg/m3
Gravedad específica=	2,36
Gravedad específica sss=	2,44
% Absorción=	3,37

5 cilindros pequeños=	0,008 m3
10 cilindros grandes=	0,053 m3
5 viguetas=	0,060 m3
Material=	0,133 m3

1) Peso del Agregado Seco	
WTs=	177,97 Kg
2) Ajuste a Peso SSS	
WTsss=	183,97 kg

3) Peso del Agregado Fino SSS	
WFsss=	0,00 kg
4) Peso del Agregado Fino Seco	
WFs=	0,00 kg

5) Peso del Agregado Grueso SSS	
WGsss=	183,97
6) Peso del Agregado Grueso Seco	
WGs=	177,97

7) Determinar Volumen de Pasta	
Vp=	0,0265 m3
8) Determinar Contenido de Cemento	
c=	41,86 kg
9) Determinar Contenido de Agua	
a=	12,56 kg

10) Determinar Volúmenes	
Volumen Agreg. Gr. VG=	0,076 m3
Volumen Agreg. Fi. VF=	0,000 m3
Volumen Cemento Vc=	0,014 m3
Volumen Agua Va=	0,013 m3
Volumen Total Vm=	0,102 m3

11) Determinación %Vacíos	
%Vac=	23,022
12) Densidad Hormigón Permeable	
D=	1798,53 kg/m3

Porcentaje Humedad Natural Fino				
Peso Húmedo=	0,100	0,100	0,100	HN= 0
Peso Seco=	0,100	0,100	0,100	
HN=	0,000	0,000	0,000	

Porcentaje Humedad Natural Grueso				
Peso Húmedo=	2,468	2,168	1,863	HN= 2,66
Peso Seco=	2,404	2,111	1,816	
HN=	2,66	2,71	2,59	

Agua de Mezcla Final	
a=	13,830 kg

Agregado en Estado Natural	
WFen=	0,00 kg

Agregado en Estado Natural	
WGen=	182,70 kg

Peso seco de los agregados	
WGs=	163,73 kg
WFs=	14,24 kg

Relación F/G	
F/G=	0,087

3.4.2. Segunda

Dosificación	
% Finos=	4,35
% Pasta cementante=	23,6
A/C=	0,3
Cantidad Hormigón=	0,133 m ³
Densidad Agua=	1000 kg/m ³

Agregado Fino	
% Absorción=	5,81
Gravedad específica=	2,38
Gravedad específica sss=	2,45

Agregado Grueso	
Peso Unitario Agregado=	1343 kg/m ³
Gravedad específica=	2,36
Gravedad específica sss=	2,44
% Absorción=	3,37

5 cilindros pequeños=	0,008	m ³
10 cilindros grandes=	0,053	m ³
5 viguetas=	0,060	m ³
Material=	0,133	m ³

1) Peso del Agregado Seco	
WTs=	177,97 kg
2) Ajuste a Peso SSS	
WTsss=	183,97 kg

3) Peso del Agregado Fino SSS	
WFsss=	8,00 kg
4) Peso del Agregado Fino Seco	
WFs=	7,56 kg

5) Peso del Agregado Grueso SSS	
WGsss=	175,97
6) Peso del Agregado Grueso Seco	
WGs=	170,23

7) Determinar Volumen de Pasta	
Vp=	0,0302 m ³
8) Determinar Contenido de Cemento	
c=	47,62 kg
9) Determinar Contenido de Agua	
a=	14,29 kg

10) Determinar Volúmenes	
Volumen Agreg. Gr. VG=	0,072 m ³
Volumen Agreg. Fi. VF=	0,003 m ³
Volumen Cemento Vc=	0,016 m ³
Volumen Agua Va=	0,014 m ³
Volumen Total Vm=	0,106 m ³

11) Determinación %Vacíos	
%Vac=	20,321
12) Densidad Hormigón Permeable	
D=	1855,08 kg/m ³

Porcentaje Humedad Natural Fino				
Peso Húmedo=	1,069	0,901	0,982	HN= 0,13
Peso Seco=	1,068	0,899	0,980	
HN=	0,122	0,133	0,122	

Porcentaje Humedad Natural Grueso				
Peso Húmedo=	1,731	1,533	1,651	HN= 2,63
Peso Seco=	1,688	1,488	1,613	
HN=	2,51	3,01	2,36	

Agua de Mezcla Final	
a=	15,98 kg

Agregado en Estado Natural	
WFen=	7,57 kg

Agregado en Estado Natural	
WGen=	174,70 kg

Peso seco de los agregados	
WGs=	156,61 kg
WFs=	21,18 kg

Relación F/G	
F/G=	0,135

3.4.3. Tercera

Dosificación	
% Finos=	6
% Pasta cementante=	25
A/C=	0,3
Cantidad Hormigón=	0,133 m ³
Densidad Agua=	1000 kg/m ³

Agregado Fino	
% Absorción=	5,81
Gravedad específica=	2,38
Gravedad específica sss=	2,49

Agregado Grueso	
Peso Unitario Agregado=	1343 kg/m ³
Gravedad específica=	2,36
Gravedad específica sss=	2,44
% Absorción=	3,37

5 cilindros pequeños=	0,008	m ³
10 cilindros grandes=	0,053	m ³
5 viguetas=	0,060	m ³
Material=	0,133	m ³

1) Peso del Agregado Seco	
WTs=	177,97 kg
2) Ajuste a Peso SSS	
WTsss=	183,97 kg

3) Peso del Agregado Fino SSS	
WFsss=	11,04 kg
4) Peso del Agregado Fino Seco	
WFs=	10,43 kg

5) Peso del Agregado Grueso SSS	
WGsss=	172,93
6) Peso del Agregado Grueso Seco	
WGs=	167,29

7) Determinar Volumen de Pasta	
Vp=	0,0315 m ³
8) Determinar Contenido de Cemento	
c=	49,81 kg
9) Determinar Contenido de Agua	
a=	14,94 kg

10) Determinar Volúmenes	
Volumen Agreg. Gr. VG=	0,071 m ³
Volumen Agreg. Fi. VF=	0,004 m ³
Volumen Cemento Vc=	0,017 m ³
Volumen Agua Va=	0,015 m ³
Volumen Total Vm=	0,107 m ³

11) Determinación %Vacíos	
%Vac=	19,296
12) Densidad Hormigón Permeable	
D=	1876,53 kg/m ³

Porcentaje Humedad Natural Fino				
Peso Húmedo=	0,671	0,606	0,679	HN= 5,48
Peso Seco=	0,637	0,577	0,640	
HN=	5,304	5,150	5,983	

Porcentaje Humedad Natural Grueso				
Peso Húmedo=	3,321	2,977	3,347	HN= 2,00
Peso Seco=	3,257	2,918	3,280	
HN=	1,95	2,03	2,03	

Agua de Mezcla Final	
a=	17,27 kg

Agregado en Estado Natural	
WFen=	11,00 kg

Agregado en Estado Natural	
WGen=	170,64 kg

Peso seco de los agregados	
WGs=	153,91 kg
WFs=	23,82 kg

Relación F/G	
F/G=	0,155

3.4.4. Cuarta

Dosificación	
% Finos=	8,7
% Pasta cementante=	27,3
A/C=	0,3
Cantidad Hormigón=	0,133 m ³
Densidad Agua=	1000 kg/m ³

Agregado Fino	
% Absorción=	5,81
Gravedad específica=	2,38
Gravedad específica sss=	2,49

Agregado Grueso	
Peso Unitario Agregado=	1343 kg/m ³
Gravedad específica=	2,36
Gravedad específica sss=	2,44
% Absorción=	3,37

5 cilindros pequeños=	0,008	m ³
10 cilindros grandes=	0,053	m ³
5 viguetas=	0,060	m ³
Material=	0,133	m ³

1) Peso del Agregado Seco	
WTs=	177,97 kg
2) Ajuste a Peso SSS	
WTsss=	183,97 kg

3) Peso del Agregado Fino SSS	
WFsss=	16,01 kg
4) Peso del Agregado Fino Seco	
WFs=	15,13 kg

5) Peso del Agregado Grueso SSS	
WGsss=	167,96
6) Peso del Agregado Grueso Seco	
WGs=	162,49

7) Determinar Volumen de Pasta	
Vp=	0,0338 m ³
8) Determinar Contenido de Cemento	
c=	53,39 kg
9) Determinar Contenido de Agua	
a=	16,02 kg

10) Determinar Volúmenes	
Volumen Agreg. Gr. VG=	0,069 m ³
Volumen Agreg. Fi. VF=	0,006 m ³
Volumen Cemento Vc=	0,018 m ³
Volumen Agua Va=	0,016 m ³
Volumen Total Vm=	0,109 m ³

11) Determinación %Vacíos	
%Vac=	17,619
12) Densidad Hormigón Permeable	
D=	1911,63 kg/m ³

Porcentaje Humedad Natural Fino				
Peso Húmedo=	1,749	1,806	1,380	HN= 0,21
Peso Seco=	1,744	1,802	1,379	
HN=	0,292	0,239	0,109	

Porcentaje Humedad Natural Grueso				
Peso Húmedo=	1,969	2,201	1,583	HN= 2,52
Peso Seco=	1,918	2,150	1,544	
HN=	2,659	2,372	2,533	

Agua de Mezcla Final	
a=	18,243 kg

Agregado en Estado Natural	
WFen=	15,16 kg

Agregado en Estado Natural	
WGen=	166,58 kg

Peso seco de los agregados	
WGs=	149,49 kg
WFs=	28,13 kg

Relación F/G	
F/G=	0,188

3.5. Preparación del terreno

Una vez elaborada la mezcla hay que transportarla y colocarla en su lugar, para ello hay ciertos factores que se deben tomar en cuenta, el primero es tener la seguridad de que el lugar en obra se encuentre listo para recibir al hormigón.

La condición de permeabilidad que se obtiene, permitirá evitar que el agua se empoce sobre la superficie de la rasante. El problema recae en la permeabilidad que pueda brindar el suelo bajo de la capa de hormigón, ya que al existir precipitaciones muy fuertes es probable que no se pueda evacuar toda el agua.

Se debe tener una correcta preparación de la sub-base, para conocer sus propiedades se recomienda realizar pruebas de permeabilidad y de capacidad de carga, y posterior a eso nivelarla quitando todas las irregularidades y brindando la compactación adecuada dependiendo del diseño de la obra (López Palacios, 2010, pág. 56).

Cuando el suelo bajo la rasante no es de buena calidad, la ACI recomienda usar una sub-base de material granular por debajo del hormigón que brinde la resistencia requerida, de tal forma que permita reducir el espesor de la rasante. Esta sub-base granular debe ser permeable, para que permita el paso del agua (American Concrete Institute Committee 522, 2010, pág. 16).

3.6. Colocación

Para que el material pueda ser colocado, primero se lo debe transportar, aquí se encuentra un problema que puede causar varios inconvenientes. Debido a que se debe tener un estricto control de la relación a/c, el hormigón permeable va a contar con poca trabajabilidad, lo que significa que no va a poder ser bombeado de la forma que se lo hace con un hormigón convencional (Aoki, 2009, pág. 33).

Esto conlleva varios problemas, al no poder ser bombeado, no se podrá llevar el hormigón a sitios altos con facilidad ni a lugares donde la mezcladora no pueda llegar, se deberá usar una grúa para transportar el hormigón. El conflicto que se crea, es que la mezcla deberá ser colocada lo más cerca posible al lugar donde se lo va a usar, de tal forma que no pierda agua por evaporación y se llegue a obtener un hormigón que falle prematuramente. Por lo que se recomienda planificar con tiempo el transporte del material al sitio de colocación, y si es necesario usar bandas transportadoras evitando el bombeo (American Concrete Institute Committee 522, 2010, pág. 21).

El terreno debe estar debidamente humedecido de tal forma que al colocar el hormigón en el sitio, este no absorba el agua de la mezcla que debe ser controlada con mucho cuidado. Una vez colocado el hormigón, se lo debe arrastrar o palear, cuando está fresco, a su posición final. Se debe procurar no caminar sobre el mismo para evitar incluir materiales dañinos o que no sean parte de la mezcla (López Palacios, 2010, pág. 60).

3.7. Vibrado y compactado

En el caso de obras pequeñas, como la cancha de uso múltiple que se propone, el vibrado estaría a cargo de la regla vibradora, elemento que se puede encontrar en el mercado. Esta máquina busca consolidar y enrasar la mezcla sin provocar la disminución de los vacíos que debe llegar a tener el hormigón. Para obras grandes, se debería usar una enrasadora vibratoria de marco, la cual debe apoyarse sobre rieles, para lo cual se puede usar un encofrado metálico que cumpla con ese fin (López Palacios, 2010, pág. 61).

La compactación se lleva a cabo con rodillos de acero suficientemente pesados para brindar la compactación y resistencia requerida, sin minimizar la permeabilidad que se pueda llegar a obtener. El rodillo promedio para cubrir un ancho de 3,7 m pesa 227 kg, pero esto puede variar dependiendo del ancho de la franja que se desea compactar (American Concrete Institute Committee 522, 2010, pág. 23).

Por último, la construcción de juntas se realiza con cortador de juntas cuando el hormigón todavía se encuentra fresco, inmediatamente después de haberlo compactado. Las juntas se deben hacer lo más cerca posible y quedan a cargo del diseñador (López Palacios, 2010, pág. 64), su implementación es importante debido a la dilatación y expansión del hormigón provocados por los cambios de temperatura.

3.8. Acabado y curado

A diferencia del hormigón convencional, el hormigón permeable no presenta un acabado totalmente liso en su superficie, ya que al implementar algún tipo de sellado, su función principal de permeabilidad se vería afectada. El último paso de su construcción es la compactación que permita tener una superficie estable y nivelada (López Palacios, 2010, pág. 66).

Sin embargo, se podrá implementar una capa de hormigón permeable con material grueso de menor tamaño que permita formar una superficie un poco más lisa (Aoki, 2009, pág. 44). La idea es no perder la permeabilidad de la mezcla y seguir brindando en capas inferiores gran facilidad de evacuación del agua.

Con esta técnica, se puede realizar la construcción de canchas de uso múltiple que brinden una rugosidad baja, que no sea incómoda para los usuarios. Se recomienda utilizar este procedimiento en la construcción de canchas en parques, para comprobar su utilidad. Si se requiere pintar las canchas, la superficie menos rugosa facilitará el trabajo.

Debido a la porosidad de la mezcla, la ventilación del hormigón y por ende la evaporación del agua que contiene va a ser alta, por lo que el proceso de curado, es de vital importancia una vez que se haya compactado todo.

Un método recomendable, consiste en cubrir la losa con plástico de polietileno para trabajo duro, lo suficientemente grande para que cubra toda la franja de trabajo, y cumpla la norma ASTM C171. Lo ideal, es no dejar que pase más de 20 minutos desde la colocación del hormigón hasta que éste sea cubierto con el plástico, y dejarlo puesto durante al menos 7 días (American Concrete Institute Committee 522, 2010, pág. 25).

3.9. Mantenimiento

Cuando el agua atraviesa la capa de hormigón, ésta lleva partículas muy finas de polvo, que al sedimentarse, pueden tapar los poros del concreto. El mantenimiento del hormigón permeable consiste principalmente en evitar que los poros se tapen y si eso ocurre, habrá que limpiarlos.

Las 2 técnicas usadas para dicho fin, son la de lavar a presión y usar una aspiradora de gran poder. La primera busca enviar los contaminantes a través de la mezcla y la segunda de removerlos, se debe tener especial cuidado al usar la máquina a presión ya que si la fuerza es excesiva, el hormigón podría verse afectado (López Palacios, 2010, pág. 70).

4. CAPÍTULO IV: ENSAYOS DE LABORATORIO

Al igual que con el hormigón convencional, es necesario realizar los debidos ensayos en laboratorio para conocer las bondades de la mezcla realizada. La elaboración y ensayo de las probetas se realizó en el Laboratorio de Materiales de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

Los ensayos más importantes necesarios para cumplir con los objetivos propuestos en esta disertación fueron:

- Ensayo de Compresión
- Ensayo de Flexión
- Ensayo de Permeabilidad
- Ensayo para determinar la Densidad y el Porcentaje de Vacíos

En criterio conjunto con el director de la disertación, se decidió elaborar 10 cilindros estándar para probar la resistencia del hormigón a la compresión, se ensayaron 5 cilindros a los 7 días y 5 a los 28 días. 5 viguetas estándar de hormigón permeable fueron ensayadas para probar la resistencia a la flexión a los 28 días. Y por último, 5 cilindros pequeños (10 x 20 cm) fueron elaborados para probar la permeabilidad de la mezcla y calcular su masa unitaria

Cabe recalcar que actualmente la ASTM no cuenta con normas específicas que permitan ensayar la resistencia a la compresión y flexión de un hormigón permeable, por lo que se utilizó las normas del hormigón convencional

4.1. Ensayo de Compresión

La norma ASTM C39/C39M – 14a cuyo apartado titula “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens” o en español “Método de Prueba Estándar para Resistencia a Compresión de Especímenes Cilíndricos de Hormigón” es la norma utilizada en este ensayo y se resume a continuación (American Concrete Institute Committee C09, 2014, págs. 1-6).

Descripción

El ensayo busca determinar la resistencia a la compresión del hormigón permeable; para lo cual, se elaboran probetas cilíndricas de hormigón, a las cuales se les aplica una fuerza axial de compresión que aumenta de forma controlada hasta que se llegue a la falla. La resistencia a la compresión, se calcula dividiendo la fuerza máxima obtenida para el área de la sección transversal de la muestra (American Concrete Institute Committee C09, 2014, págs. 1,4).

La fuerza máxima obtenida va a depender de factores como el muestreo de los materiales, el procedimiento de mezclado, el método de elaboración de las probetas, la fuerza de compactación, la edad del hormigón, la temperatura y humedad del ambiente durante el curado de la muestra (American Concrete Institute Committee C09, 2014, pág. 1).

Equipo

Se utiliza la máquina universal, que brinda una fuerza axial de compresión a lo largo de una probeta diseñada para ese fin. La máquina debe estar calibrada, y recibir mantenimiento periódico. La carga administrada por la máquina debe variar de manera constante para evitar que la muestra falle antes de lo esperado y se pueda alcanzar la carga máxima soportada por el hormigón (American Concrete Institute Committee C09, 2014, pág. 2).

Probetas

Para esta disertación se elaboraron 10 cilindros estándar, cuyo radio es igual a 15cm y su longitud de 30cm, que fueron ensayados a los 7 y 28 días. La resistencia alcanzada a los 7 días es aproximadamente el 70% de la resistencia esperada a los 28 días, por lo que nos da una estimación de lo que podemos alcanzar. La resistencia a los 28 días es la utilizada en los cálculos de estructuras.

Las probetas son elaboradas en moldes normalizados. El hormigón se vierte hasta un tercio del molde, se compacta con 25 golpes de la varilla normalizada y se da 15 golpes con el martillo de hule alrededor del cilindro. Luego, se realiza el mismo procedimiento en los 2 siguientes tercios hasta llenar el molde, momento en el cual se debe nivelar el borde del cilindro para que se lo pueda ensayar (American Concrete Institute Committee C09, 2014, pág. 4).

Imagen 4.1: Probeta Cilíndrica de Hormigón Permeable



Fuente: Elaboración Propia

Capeado

La no uniformidad de la superficie de las probetas es un inconveniente al momento de probar las muestras en la máquina de compresión, ya que para este ensayo se debe tener una superficie totalmente lisa, esto sucede debido a la carencia de agregados finos. Una superficie no lisa provoca que la carga máxima conseguida no sea real, ya que ésta debe estar distribuida en toda la cara de la superficie de la muestra. Por esa razón, todas las probetas tuvieron que ser capeadas mediante la norma ASTM C617/C617M – 12 “Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens” o en español “Práctica Estándar para Capeado de Especímenes Cilíndricos de Hormigón” (American Concrete Institute Committee C09, 2012, págs. 1-5).

Imagen 4.2: Probeta Cilíndrica de Hormigón Permeable Capeadas



Fuente: Elaboración Propia

Este procedimiento consiste en brindar una superficie plana a los extremos de las muestras que van a ser ensayados. Para el ensayo de compresión, la capa de refrentado debe ser totalmente perpendicular al eje longitudinal del cilindro, para lo cual se emplea el molde de capeado de cilindros. En esta disertación, se utilizó una mezcla de capeado conformada por 50% azufre y 50% material fino que pasa el tamiz #100. Una vez realizado el capeado se debe esperar entre 2 a 4 horas antes de ensayar las probetas, tiempo durante el cual éstas deben ser curadas (American Concrete Institute Committee C09, 2012, pág. 1).

Procedimiento

La máquina debe ser manejada por un operador experimentado y capacitado para ello. Se coloca la muestra en la máquina y se empieza a cargar la fuerza axial de compresión, la cual va aumentando a velocidad constante, hasta que la probeta falle. Se debe anotar las medidas de

la muestra, su masa, el tipo de falla y la carga máxima aplicada sobre el cilindro (American Concrete Institute Committee C09, 2014, pág. 4).

Imagen 4.3: Máquina de Resistencia a la Compresión



Fuente: Elaboración Propia

Cálculo

El cálculo de la resistencia a la compresión se lo realiza con la siguiente fórmula

$$R_c = \frac{C_c * \frac{1000}{9.81}}{A_c}$$

Donde,

R_c: Resistencia a la compresión (kg/cm²)

C_c: Carga de compresión (KN)

A_c: Área de contacto (cm²)

Si es necesario se puede calcular la densidad de cada muestra a partir de,

$$D = \frac{W}{V}$$

Donde,

D: Densidad de la muestra (kg/m³)

W: Masa de la muestra (kg)

V: Volumen de la muestra (m³)

4.2. Resistencia a la Flexión

La norma ASTM C78/C78M – 10 cuyo apartado titula “Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)” o en español “Método de Prueba Estándar para Resistencia a Flexión del Hormigón (Usando una Viga Simple con Cargas a los Tercios)” es la norma utilizada en este ensayo y se resume a continuación (American Concrete Institute Committee C09, 2010, págs. 1-3).

Descripción

El objetivo del ensayo es determinar el módulo de rotura, por medio de vigas de hormigón, en las cuales se aplican fuerzas puntuales en los tercios medios hasta que falla. La resistencia a la flexión es entonces calculada dependiendo de en qué sitio a lo largo la probeta ocurre la falla (American Concrete Institute Committee C09, 2010, pág. 1).

El módulo de rotura depende de varios factores, como la potencia de la compactación, las condiciones de curado, la calidad de los materiales, entre otros. Es importante considerar este valor cuando se quiere hacer un control de calidad, ya que la resistencia a la flexión está entre el 10 y 20% de la resistencia a la compresión

Equipo

Se utiliza la máquina universal que brinda fuerzas de flexión ayudada con bloques de acero que permiten que las cargas sean perpendiculares a la cara más larga de la probeta. La carga administrada por la máquina, debe variar de manera constante para evitar que la muestra falle antes de lo esperado (American Concrete Institute Committee C09, 2010, pág. 1).

Probetas

La norma indica que las probetas deben ser ensayadas a los 28 días. Éstas consisten en vigas de 54cm de longitud, 15cm de ancho y 15cm de profundidad. Las vigas son elaboradas en moldes normalizados. El hormigón se vierte hasta la mitad del molde, se compacta con 66 golpes con la varilla normalizada y se da 15 golpes con el martillo de hule alrededor de la viga. Luego, se realiza el mismo procedimiento en la otra mitad hasta llenar el molde, momento en el cual se debe nivelar el borde de la viga para que se la pueda ensayar en la máquina (American Concrete Institute Committee C09, 2010, pág. 2).

Imagen 4.4: Vigueta de Hormigón Permeable



Fuente: Elaboración Propia

Procedimiento

Las vigas deben ser ensayadas lo más pronto posible una vez que son sacadas del cuarto húmedo. Los bloques de acero de la máquina de flexión se encuentran separados entre sí por 15cm, por lo que es una buena práctica señalar en las vigas, con la ayuda de un marcador, los lugares donde éstos se van a apoyar. Se debe tomar las medidas de las muestras así como su masa (American Concrete Institute Committee C09, 2010, pág. 2).

La probeta debe ser girada a un lado con respecto a la posición en la que fue moldeada. Se la coloca en la máquina y con la ayuda de un operador experimentado se empieza a suministrar

la fuerza de flexión, la cual aumenta a velocidad constante. La carga máxima es la que provoca la falla en la muestra y su valor deberá ser anotada; además, se debe ubicar el lugar donde ocurre la fractura superficial, la cual puede ocurrir dentro del tercio medio o fuera (American Concrete Institute Committee C09, 2010, pág. 2).

Imagen 4.5: Máquina Resistencia a la Flexión



Fuente: Elaboración Propia

Se deberá anotar también el promedio de 3 medidas de profundidad y el promedio de 3 medidas del ancho de la probeta en el lugar donde ocurre la falla. Las 3 medidas utilizadas en el promedio deben ser tomadas en el centro y en los extremos de la cara (American Concrete Institute Committee C09, 2010, págs. 2-3).

Cálculo

Si la falla ocurre en el tercio medio, el módulo de rotura se calculará con la siguiente fórmula:

$$R = \frac{C_F}{b * d^2} * L$$

Donde,

R: Módulo de Rotura (kg/cm²)

C_F: Carga de Flexión (N)

L: Longitud total entre bloques de acero (cm)

b: ancho promedio de la probeta en el lugar donde ocurre la falla (cm)

d: profundidad promedio de la probeta en el lugar donde ocurre la falla (cm)

Si la falla ocurre fuera del tercio medio a una distancia menor al 5% de la longitud entre los bloques de acero, el módulo de rotura se lo calculará con ,

$$R = \frac{3 * \frac{C_F}{9.81} * e}{b * d^2}$$

Donde,

e: Distancia promedio entre la línea de fractura superficial y el soporte más cercano (cm)

Por otro lado si la fractura superficial ocurre fuera del tercio medio a una distancia mayor al 5% de la longitud entre los bloques de acero, los resultados deberán ser desechados. Si es necesario se puede calcular la densidad de cada muestra a partir de,

$$D = \frac{W}{V}$$

Donde,

D: Densidad de la muestra (kg/m³)

W: Masa de la muestra (kg)

V: Volumen de la muestra (m³)

En esta disertación todas las muestras mostraron la fractura superficial en el tercio medio, por lo que se utilizó una sola fórmula para el cálculo del módulo de rotura, el cual estuvo dentro del porcentaje esperado con relación a la resistencia a la compresión

4.3. Ensayo de Permeabilidad

La ASTM no cuenta con un método estandarizado con el cual se pueda medir la permeabilidad del hormigón utilizando probetas en el laboratorio. Pero la ACI 522R nos da pautas de un ensayo de permeabilidad que brinda datos confiables.

Debido a la inexistencia de un método estandarizado, el laboratorio de materiales no cuenta con una máquina de permeabilidad para hormigón permeable, por lo que hubo la necesidad de construirla. Los materiales necesarios para ello, el método empleado en su uso, la elaboración de las probetas entre otros puntos, se encuentran descritos a continuación.

Descripción

El método consiste en dejar pasar agua a través de unas probetas cilíndricas de hormigón permeable en un ambiente controlado, y medir el tiempo que toma al agua atravesar una distancia específica. La velocidad con la que el agua atraviese la muestra de hormigón va a

depender de la cantidad de vacíos que ésta tenga y de la conectividad que éstos tengan entre sí (American Concrete Institute Committee 522, 2010, págs. 10-11).

Equipo

La máquina consiste en una serie de tuberías conectadas a un cilindro donde se coloca la probeta y una válvula que permite el control del paso del agua a través de la muestra. El cilindro donde se introduce la muestra debe tener las medidas especificadas por la ACI, de tal manera que la fórmula de permeabilidad pueda ser aplicada (American Concrete Institute Committee 522, 2010, págs. 10-11).

La válvula se encuentra entre el cilindro y la tubería de desagüe, el cilindro permite introducir la muestra en él y por medio de una agarradera bien sellada colocar otro cilindro encima que permita almacenar agua para la prueba. El extremo de la tubería de desagüe se encuentra a la misma altura de la parte alta de la muestra.

La *Imagen 4.6: Máquina de Permeabilidad* muestra el equipo terminado y listo para ensayar las probetas. Junto a la imagen se describe cada parte del equipo, de forma que se la pueda utilizar siguiendo el procedimiento descrito en la página 87.

Imagen 4.6: Máquina de Permeabilidad



Fuente: Elaboración Propia

Probetas

Para este ensayo se elaboraron 5 cilindros pequeños de radio igual a 10cm y longitud 20cm, los cuales calzan perfectamente en la máquina de permeabilidad. Estas probetas fueron ensayadas después de cumplir los 28 días y fueron utilizadas también en el ensayo de densidad y porcentaje de vacíos (American Concrete Institute Committee 522, 2010, págs. 10-11).

Para la toma de muestras, se coloca el hormigón hasta la mitad del molde, se compacta con 25 golpes con la varilla normalizada y se da 15 golpes con el martillo de hule alrededor del

cilindro. Luego, se realiza el mismo procedimiento en la otra mitad hasta llenar el molde, momento en el cual se debe nivelar el borde del cilindro para que se lo pueda ensayar en la máquina de permeabilidad.

Procedimiento

El procedimiento para el uso de esta máquina se detalla a continuación:

- a) Abrir la válvula de agua e introducir la probeta de hormigón permeable dentro del cilindro de plástico.
- b) Colocar el otro cilindro de plástico encima y sellarlo para evitar que se filtre el agua
- c) Con la ayuda de una agarradera sostener ambos cilindros y colocar agua sobre la muestra hasta que el nivel alcance la parte alta de la tubería de desagüe.
- d) Cerrar la válvula y colocar agua hasta la primera marca que se encuentra 29.46 cm sobre la probeta.
- e) Abrir la válvula y con la ayuda de un cronómetro, tomar el tiempo que le toma al agua llegar a la segunda marca que se encuentra 7.11 cm sobre la probeta.

Cálculo

El cálculo de permeabilidad se lo realiza con la siguiente fórmula,

$$p = \frac{C}{t}$$

Donde,

p: Permeabilidad de la muestra (mm/s)

C: Constante igual a 195 (mm)

t: Tiempo que tarda el agua en ir de la primera a la segunda marca (s)

La permeabilidad obtenida satisface el objetivo propuesto en esta disertación y los resultados son muy semejantes a los expuestos en la ACI 522.

4.4. Ensayo para determinar la Densidad y el Porcentaje de Vacíos

La norma ASTM C1754/C1754M – 12 cuyo apartado titula “Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete” o en español “Método de Prueba Estándar para Densidad y Contenido de Vacíos del Hormigón Permeable Endurecido” es la norma utilizada en este ensayo y se encuentra resumida a continuación (American Concrete Institute Committee C09, 2012, pág. 2).

Descripción

Este ensayo busca determinar la densidad y porcentaje de vacíos del hormigón permeable, en su estado endurecido. Se utilizan las mismas probetas empleadas en el ensayo de permeabilidad. Se toma las dimensiones de las muestras y se determina su volumen, la diferencia entre las masas de la muestra seca y sumergida permite determinar el volumen de sólidos y posteriormente el porcentaje de vacíos (American Concrete Institute Committee C09, 2012, pág. 1).

Equipo

El aparato utilizado en este ensayo consiste de una balanza con suficiente capacidad y precisión de 0.5g, que permita determinar la masa sumergida de la muestra, mediante una canastilla metálica sumergida en un recipiente lo suficientemente grande para ahogar la muestra al pesarla. Además, se necesita de un calibrador, y un horno que permita secar las muestras por los 2 métodos recomendados por la norma (American Concrete Institute Committee C09, 2012, págs. 1-2).

Probetas

La norma indica que al usar muestras cilíndricas, éstas deberían tener un diámetro de 100mm. Para este ensayo se elaboraron 5 cilindros pequeños de radio igual a 10cm y longitud 20cm. Si

las muestras van a ser utilizadas en el ensayo de permeabilidad se recomienda utilizar el método “A” de secado (American Concrete Institute Committee C09, 2012, pág. 2).

Procedimiento

Se deben tomar las medidas de la muestra sacando un promedio de su longitud y diámetro con el calibrador. El siguiente paso es secar la muestra, y para ello hay 2 métodos:

- **Método A:** Consiste en secar la muestra a una temperatura de 38 ± 3 °C en el horno y cada 24 ± 1 h tomar la masa de la muestra, repetir el mismo procedimiento hasta que la diferencia de 2 medidas de masa seguidas sea menor al 0.5%. La última medida de masa determinada va a ser grabada como la masa seca “A”. Este método puede durar hasta una semana (American Concrete Institute Committee C09, 2012, pág. 2).

- **Método B:** Consiste en secar la muestra a una temperatura de 110 ± 5 °C en el horno durante 24 ± 1 h, dejar que enfríe a la temperatura ambiente durante 1 a 3 horas y tomar la masa de la muestra. Meter al horno la probeta durante 2 horas y nuevamente dejar que se enfríe, tomar la medida de la masa. Repetir el procedimiento hasta que la diferencia de 2 medidas de masa seguidas sea menor al 0.5%. La última medida de masa determinada va a ser grabada como la masa seca “A”. El inconveniente con este método es que a pesar de ser muy rápido, puede dañar la estructura de la muestra por lo que no podrá ser utilizada en ningún otro ensayo posterior (American Concrete Institute Committee C09, 2012, pág. 2).

Una vez determinado la masa seca A, sumergir completamente la muestra en agua en el balde durante 30+/-5min. Golpear ligeramente la probeta 10 veces y girarla cada vez para forzar a que las partículas de aire atrapadas en los espacios vacíos puedan salir. Determinar la masa sumergida B de la muestra. Como paso final, determinar la temperatura del agua donde la probeta se encuentra sumergida (American Concrete Institute Committee C09, 2012, pág. 2).

Imagen 4.7: Probeta cilíndrica sumergida en agua



Fuente: Elaboración Propia

Cálculo

La densidad del hormigón permeable se calcula por medio de,

$$D = \frac{K * A}{\theta^2 * L}$$

Donde,

K: Constante igual a $1273240 \frac{(mm^3 * kg)}{(m^3 * g)}$

A: Masa seca de la muestra (kg)

θ : Diámetro promedio de la muestra (mm)

L : Longitud promedio de la muestra (mm)

Para obtener el porcentaje de vacíos es necesario utilizar la Tabla 3 “Density of Water” del ensayo ASTM C29/C29M – 09 el cual nos permite obtener la densidad del agua a partir de la temperatura de la misma. Lo valores de densidad deben ser interpolados a partir de la temperatura exacta del agua.

Tabla 4.1: Densidad del Agua de acuerdo a la Temperatura

Temperatura	Densidad
°C	Kg/m³
15.6	999.01
18.3	998.54
21.1	997.97
23.0	997.54
23.9	997.32
26.7	996.59
29.4	995.83

Fuente: Tabla 3 “Density of Water” de la norma ASTM C29/C29M

El porcentaje de vacíos del hormigón se lo obtiene a partir de,

$$\%Vac = \left[1 - \left(\frac{K * (A - B)}{\rho_a * \theta^2 * L} \right) \right] * 100$$

Donde,

%Vac: Porcentaje de Vacíos (porcentaje)

B: Masa sumergida de la muestra (kg)

ρ_a : Densidad del agua a la temperatura a la que se ensayó la muestra (kg/m^3)

Los valores de masa unitaria obtenidos, son muy similares a los que se esperaba de acuerdo a las fórmulas de dosificación, por lo que se tiene la seguridad que los resultados son aceptables.

5. CAPÍTULO V: RESULTADOS

Este capítulo presenta los resultados obtenidos, luego de haber ensayado las probetas de hormigón permeable en el laboratorio; también, se elaboraron tablas que permitan al Ingeniero diseñador, tener una idea clara de los valores en porcentaje de cemento y agregado fino, que deben tomarse en cuenta para la dosificación de la mezcla; además, permiten calcular un estimado de la masa unitaria y porcentaje de vacíos que se obtendrá en el hormigón.

5.1. Resistencia a la compresión a los 7 días

Cuando se ensayan las probetas de hormigón a los 7 días, éstas deberían alcanzar de un 65% a 75% de la resistencia que se obtiene a los 28 días.

Tabla 5.1: Resultados de la 1ra Dosificación en el ensayo de Compresión a los 7 días

Probeta	1	2	3	4	5
Diámetro 1 (mm)	153,45	150,35	151,10	152,70	150,85
Diámetro 2 (mm)	154,15	150,25	151,80	152,10	150,50
Altura sin Refrenado (mm)	306,00	299,73	305,40	303,90	300,90
Altura con Refrenado (mm)	317,00	306,00	311,00	309,00	306,00
Masa (kg)	10,48	9,77	10,27	10,32	10,09
Carga de Ruptura (KN)	189,55	193,98	207,49	223,21	217,17
Tipo de Falla	4	4	4	4	4
Refrenado (mm)	11	6,275	5,6	5,1	5,1
Área de Contacto (cm²)	185,78	177,42	180,15	182,41	178,31
Resistencia (kg/cm²)	104,00	111,45	117,41	124,74	124,15

Resistencia promedio=	116.35	kg/cm ²
Resistencia esperada a los 28 días=	166.21	kg/cm ²

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5.2: Resultados de la 2da Dosificación en el ensayo de Compresión a los 7 días

Probeta	1	2	3	4	5
Diámetro 1 (mm)	152,15	152,20	152,40	153,85	150,10
Diámetro 2 (mm)	152,30	153,50	151,40	153,55	150,60
Altura sin Refrenado (mm)	305,20	304,78	300,68	302,40	305,30
Altura con Refrenado (mm)	311,00	311,00	307,50	306,00	309,00
Masa (kg)	11,00	10,87	10,65	10,97	10,57
Carga de Ruptura (KN)	241,86	250,20	246,88	238,97	268,37
Tipo de Falla	4	4	4	4	4
Refrenado (mm)	5,8	6,225	6,825	3,6	3,7
Área de Contacto (cm²)	182,00	183,49	181,22	185,54	177,54
Resistencia (kg/cm²)	135,47	138,99	138,87	131,29	154,09

Resistencia promedio=	139.74	kg/cm ²
Resistencia esperada a los 28 días=	199.63	kg/cm ²

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5.3: Resultados de la 3ra Dosificación en el ensayo de Compresión a los 7 días

Probeta	1	2	3	4	5
Diámetro 1 (mm)	152,35	150,00	150,90	150,88	153,90
Diámetro 2 (mm)	152,40	150,30	151,15	151,00	153,90
Altura sin Refrenado (mm)	307,40	307,65	303,00	303,10	305,58
Altura con Refrenado (mm)	310,00	311,00	311,50	312,80	310,70
Carga de Ruptura (KN)	186,50	252,30	257,70	256,15	295,40
Tipo de Falla	4	4	4	4	4
Refrenado (mm)	2,6	3,35	8,5	9,7	5,125
Área de Contacto (cm²)	182,35	177,07	179,14	178,94	186,02
Resistencia (kg/cm²)	104,25	145,25	146,64	145,92	161,87

Resistencia promedio=	140.79	kg/cm ²
Resistencia esperada a los 28 días=	201.13	kg/cm ²

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5.4: Resultados de la 4ta Dosificación en el ensayo de Compresión a los 7 días

Probeta	1	2	3	4	5
Diámetro 1 (mm)	151,16	150,82	150,66	150,86	150,22
Diámetro 2 (mm)	152,08	150,82	150,90	150,68	150,46
Altura sin Refrenado (mm)	300,60	300,72	302,81	303,64	299,44
Altura con Refrenado (mm)	311,50	309,50	311,00	315,00	308,00
Masa (kg)	10,90	10,89	10,72	10,74	10,70
Carga de Ruptura (KN)	250,38	356,43	299,25	304,25	302,62
Tipo de Falla	4	4	4	4	4
Refrenado (mm)	10,9	8,78	8,19	11,36	8,56
Área de Contacto (cm ²)	180,55	178,65	178,56	178,53	177,52
Resistencia (kg/cm ²)	141,36	203,37	170,84	173,72	173,78

Resistencia promedio=	172.61	kg/cm ²
Resistencia esperada a los 28 días=	246.59	kg/cm ²

Fuente: Elaboración Propia

5.2. Resistencia a la compresión a los 28 días

Tabla 5.5: Resultados de la 1ra Dosificación en el ensayo de Compresión a los 28 días

Probeta	1	2	3	4	5
Diámetro 1 (mm)	150,56	151,80	151,70	150,00	153,88
Diámetro 2 (mm)	150,00	152,32	152,78	152,46	153,16
Altura sin Refrenado (mm)	304,46	305,10	305,43	305,08	304,54
Altura con Refrenado (mm)	316,00	315,00	317,00	317,00	317,00
Masa (kg)	10,05	10,38	10,46	10,61	10,53
Carga de Ruptura (KN)	276,82	221,45	311,82	267,80	287,42
Tipo de Falla	4	4	4	4	4
Refrenado (mm)	11,54	9,9	11,57	11,92	12,46
Área de Contacto (cm ²)	177,37	181,60	182,03	179,62	185,11
Resistencia (kg/cm ²)	159,09	124,30	174,62	151,98	158,28

Resistencia promedio=	153.65	kg/cm ²
-----------------------	--------	--------------------

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5.6: Resultados de la 2da Dosificación en el ensayo de Compresión a los 28 días

Probeta	1	2	3	4	5
Diámetro 1 (mm)	150,90	151,15	150,70	149,45	152,60
Diámetro 2 (mm)	150,90	150,20	150,25	150,55	153,30
Altura sin Refrenado (mm)	300,58	300,90	299,23	305,75	305,00
Altura con Refrenado (mm)	312,00	312,00	306,00	315,00	313,00
Masa (kg)	10,65	10,61	10,81	10,62	11,06
Carga de Ruptura (KN)	316,28	325,43	382,39	331,46	351,23
Tipo de Falla	4	4	4	4	4
Refrenado (mm)	11,425	11,1	6,775	9,25	8
Área de Contacto (cm²)	178,84	178,31	177,84	176,71	183,73
Resistencia (kg/cm²)	180,27	186,04	219,19	191,20	194,86

Resistencia promedio=	194.31	kg/cm ²
------------------------------	--------	--------------------

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5.7: Resultados de la 3ra Dosificación en el ensayo de Compresión a los 28 días

Probeta	1	2	3	4	5
Diámetro 1 (mm)	151,00	152,00	150,68	153,74	153,90
Diámetro 2 (mm)	150,62	152,30	150,96	153,54	152,56
Altura sin Refrenado (mm)	301,74	304,31	305,53	302,50	304,00
Altura con Refrenado (mm)	313,00	320,00	320,00	313,00	316,00
Masa (kg)	11,16	11,21	11,53	11,51	11,32
Carga de Ruptura (KN)	360,00	366,00	374,00	369,00	336,00
Tipo de Falla	4	4	4	4	4
Refrenado (mm)	11,26	15,69	14,475	10,5	12
Área de Contacto (cm²)	178,63	181,82	178,65	185,40	184,41
Resistencia (kg/cm²)	205,44	205,20	213,40	202,89	185,73

Resistencia promedio=	202.53	kg/cm ²
------------------------------	--------	--------------------

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5.8: Resultados de la 4ta Dosificación en el ensayo de Compresión a los 28 días

Probeta	1	2	3	4	5
Diámetro 1 (mm)	153,00	150,40	153,80	152,56	152,56
Diámetro 2 (mm)	153,60	149,52	154,12	152,44	153,14
Altura sin Refrenado (mm)	304,36	305,82	301,22	304,65	303,84
Altura con Refrenado (mm)	311,00	312,00	308,00	310,00	309,00
Masa (kg)	11,25	10,91	11,26	11,45	11,01
Carga de Ruptura (KN)	418,09	434,00	401,86	498,06	360,25
Tipo de Falla	4	4	4	4	4
Refrenado (mm)	6,64	6,18	6,78	5,35	5,16
Área de Contacto (cm²)	184,58	176,62	186,17	182,65	183,49
Resistencia (kg/cm²)	230,90	250,48	220,04	277,96	200,13

Resistencia promedio=	235.90	kg/cm ²
------------------------------	--------	--------------------

Fuente: Elaboración Propia

5.3. Resistencia a la Flexión

Debe estar entre el 14% y 18% de la resistencia a la compresión a los 28 días.

Tabla 5.9: Resultados de la 1ra Dosificación en el ensayo de Flexión

Vigueta	1	2	3	4
Altura (mm)	149,95	151,30	150,40	150,05
Ancho (mm)	151,25	149,48	150,80	149,60
Longitud (mm)	537,50	537,00	535,00	542,50
Longitud de apoyo (mm)	450,00	450,00	450,00	450,00
Masa (kg)	23,46	22,81	23,03	22,86
Carga de Ruptura (N)	19730,00	18398,00	17111,00	16874,00
Tercio de Falla	Medio	Medio	Medio	Medio
Resistencia (kg/cm²)	26,61	24,66	23,01	22,98

Resistencia promedio=	24.32	kg/cm ²
------------------------------	-------	--------------------

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5.10: Resultados de la 2da Dosificación en el ensayo de Flexión

Vigueta	1	2	3	4
Altura (mm)	150,38	149,68	151,28	150,20
Ancho (mm)	150,13	150,20	150,78	150,10
Longitud (mm)	540,00	534,00	540,00	536,50
Longitud de apoyo (mm)	450,00	450,00	450,00	450,00
Masa (kg)	23,75	23,54	24,42	23,44
Carga de Ruptura (N)	19258,00	20481,00	20297,00	20686,00
Tercio de Falla	Medio	Medio	Medio	Medio
Resistencia (kg/cm²)	26,02	27,92	26,98	28,02

Resistencia promedio=	27.24	kg/cm ²
------------------------------	-------	--------------------

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5.11: Resultados de la 3ra Dosificación en el ensayo de Flexión

Vigueta	1	2	3	4
Altura (mm)	150,16	152,28	150,19	151,50
Ancho (mm)	151,01	150,46	150,41	151,40
Longitud (mm)	541,00	537,00	540,00	538,50
Longitud de apoyo (mm)	450,00	450,00	450,00	450,00
Masa (kg)	25,48	25,27	24,40	24,69
Carga de Ruptura (N)	24965,00	23506,00	22101,00	18948,00
Tercio de Falla	Medio	Medio	Medio	Medio
Resistencia (kg/cm²)	33,63	30,90	29,88	25,01

Resistencia promedio=	29.86	kg/cm ²
------------------------------	-------	--------------------

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5.12: Resultados de la 4ta Dosificación en el ensayo de Flexión

Vigueta	1	2	3	4
Altura (mm)	149,96	150,17	149,77	150,78
Ancho (mm)	150,09	150,42	149,48	150,23
Longitud (mm)	534,50	533,50	533,00	534,00
Longitud de apoyo (mm)	450,00	450,00	450,00	450,00
Masa (kg)	23,85	23,41	23,15	24,09
Carga de Ruptura (N)	24727,00	25749,00	27286,00	28085,00
Tercio de Falla	Medio	Medio	Medio	Medio
Resistencia (kg/cm²)	33,61	34,82	37,33	37,72

Resistencia promedio=	35.87	kg/cm ²
------------------------------	-------	--------------------

Fuente: Elaboración Propia

5.4. Permeabilidad

El ensayo de permeabilidad es el más importante es esta disertación puesto que se prueba la principal característica de este material, que es el paso de los líquidos a través de él. Las probetas fueron ensayadas después de los 28 días y se cumplió con lo propuesto.

Tabla 5.13: Resultados de la 1ra Dosificación en el ensayo de Permeabilidad

Probeta	1	2	3	4	5
Tiempo (s)	64,37	53,29	55,15	73,11	64,59
Altura de Agua (cm)	22,35	22,35	22,35	22,35	22,35
Permeabilidad (cm/s)	0,30	0,37	0,35	0,27	0,30

Permeabilidad promedio=	0.318	cm/s
--------------------------------	-------	------

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5.14: Resultados de la 2da Dosificación en el ensayo de Permeabilidad

Probeta	1	2	3	4	5
Tiempo (s)	83,3	62,48	96,54	93	80,91
Altura de Agua (cm)	22,35	22,35	22,35	22,35	22,35
Permeabilidad (cm/s)	0,23	0,31	0,20	0,21	0,24

Permeabilidad promedio=	0.240	cm/s
--------------------------------	-------	------

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5.15: Resultados de la 3ra Dosificación en el ensayo de Permeabilidad

Probeta	1	2	3	4	5
Tiempo (s)	87,83	99,35	83,38	102,51	110,56
Altura de Agua (cm)	22,35	22,35	22,35	22,35	22,35
Permeabilidad (cm/s)	0,22	0,20	0,23	0,19	0,18

Permeabilidad promedio=	0.204	cm/s
--------------------------------	-------	------

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5.16: Resultados de la 4ta Dosificación en el ensayo de Permeabilidad

Probeta	1	2	3	4	5
Tiempo (s)	123,06	139,66	153,67	85,26	97,03
Altura de Agua (cm)	22,35	22,35	22,35	22,35	22,35
Permeabilidad (cm/s)	0,16	0,14	0,13	0,23	0,20

Permeabilidad promedio=	0.171	cm/s
--------------------------------	-------	------

Fuente: Elaboración Propia

5.5. Porcentaje de Vacíos y Masa Unitaria

Tabla 5.17: Resultados de la 1ra Dosificación en el ensayo de % de Vacíos y MU

Probeta	1	2
Diámetro 1 (mm)	100,98	103,04
Diámetro 2 (mm)	102,50	102,92
Longitud 1 (mm)	199,24	203,80
Longitud 2(mm)	199,12	203,66
Masa Seca (kg)	2912,00	3004,00
Masa Sumergida (kg)	1718,00	1743,00
Temperatura Agua (°C)	21,10	21,10
Densidad Agua (kg/m ³)	997,97	997,97
Masa Unitaria (kg/m ³)	1798,34	1770,31
% de Vacíos	26,11	25,54

	Promedio	Diseño	
Masa Unitaria=	1784.33	1798.53	kg/m ³
% de Vacíos=	25.824	23.022	%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5.18: Resultados de la 2da Dosificación en el ensayo de % de Vacíos y MU

Probeta	1	2
Diámetro 1 (mm)	102,40	101,38
Diámetro 2 (mm)	101,18	100,98
Longitud 1 (mm)	203,42	203,34
Longitud 2(mm)	203,00	203,10
Masa Seca (kg)	3086,00	3053,00
Masa Sumergida (kg)	1789,00	1756,00
Temperatura Agua (°C)	21,10	21,10
Densidad Agua (kg/m ³)	997,97	997,97
Masa Unitaria (kg/m ³)	1866,17	1868,45
% de Vacíos	21,41	20,46

	Promedio	Diseño	
Masa Unitaria=	1867.31	1855.08	kg/m ³
% de Vacíos=	20.935	20.321	%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5.19: Resultados de la 3ra Dosificación en el ensayo de % de Vacíos y MU

Probeta	1	2
Diámetro 1 (mm)	101,68	102,26
Diámetro 2 (mm)	102,66	102,46
Longitud 1 (mm)	203,02	203,80
Longitud 2(mm)	202,88	203,66
Masa Seca (kg)	3160,00	3143,00
Masa Sumergida (kg)	1822,00	1810,00
Temperatura Agua (°C)	21,10	21,10
Densidad Agua (kg/m ³)	997,97	997,97
Masa Unitaria (kg/m ³)	1899,16	1874,73
% de Vacíos	19,42	20,33

	Promedio	Diseño	
Masa Unitaria=	1886.95	1876.53	kg/m ³
% de Vacíos=	19.875	19.296	%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5.20: Resultados de la 4ta Dosificación en el ensayo de % de Vacíos y MU

Probeta	1	2
Diámetro 1 (mm)	102,94	100,76
Diámetro 2 (mm)	101,76	102,56
Longitud 1 (mm)	202,70	204,08
Longitud 2(mm)	203,00	203,86
Masa Seca (kg)	3170,00	3194,00
Masa Sumergida (kg)	1816,00	1853,00
Temperatura Agua (°C)	21,10	21,10
Densidad ^{A3gua} (kg/m ³)	997,97	997,97
Masa Unitaria (kg/m ³)	1899,41	1929,21
% de Vacíos	18,71	18,84

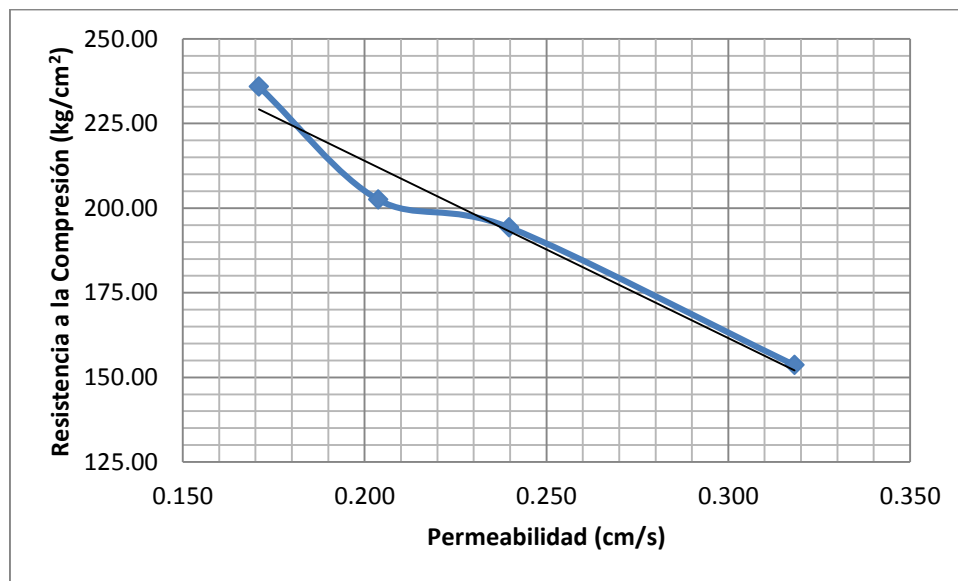
	Promedio	Diseño	
Masa Unitaria=	1914.31	1911.63	kg/m ³
% de Vacíos=	18.772	17.619	%

Fuente: Elaboración Propia

5.6. Gráficos Con Resultados

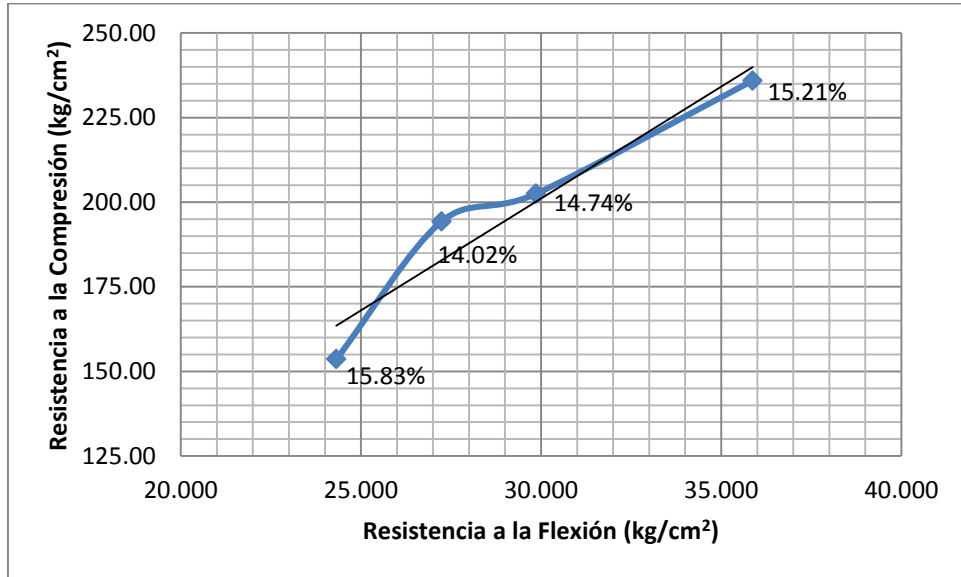
Se hicieron gráficos que relacionan ciertos resultados, que al final nos permitirán analizar las características y/o comportamiento del hormigón estudiado; se relacionó: Permeabilidad Vs $f'c$ (Gráfico 5.1), Módulo de Rotura en kg/cm^2 y porcentaje Vs $f'c$ (Gráfico 5.2), Porcentaje de Pasta Cementante Vs $f'c$ (Gráfico 5.3), Porcentaje de Finos Totales Vs $f'c$ (Gráfico 5.4), Masa Unitaria Vs $f'c$ (Gráfico 5.5), Porcentaje de Vacíos Vs $f'c$ (Gráfico 5.6), Relación Finos Añadidos/Gruoso Vs $f'c$ (Gráfico 5.7), Permeabilidad Vs Porcentaje de Finos Totales (Gráfico 5.8), Porcentaje de Finos Totales Vs Porcentaje Pasta Cementante (Gráfico 5.9).

Gráfico 5.1: Permeabilidad Vs $f'c$



Fuente: Elaboración Propia

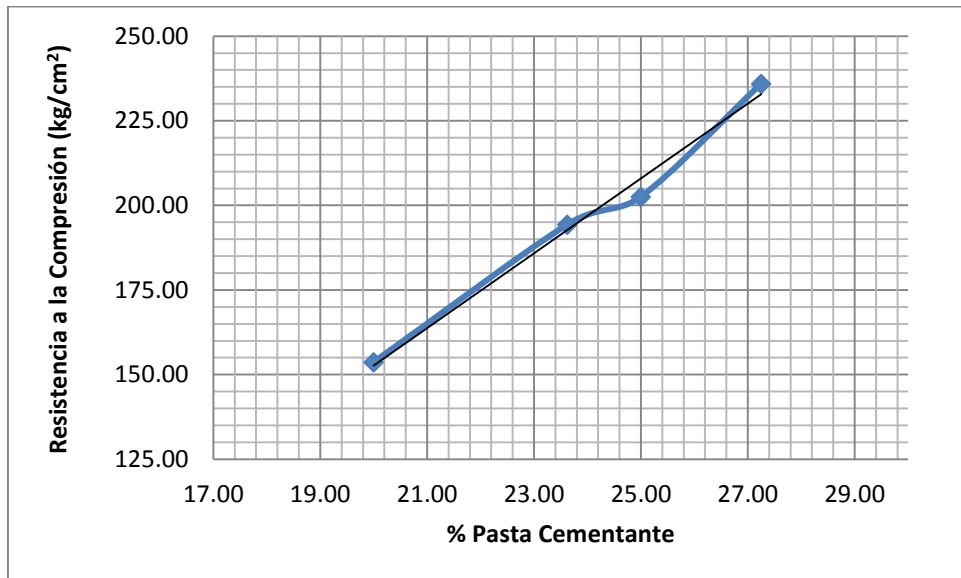
Gráfico 5.2: Módulo de Rotura Vs $f'c$



Fuente: Elaboración Propia

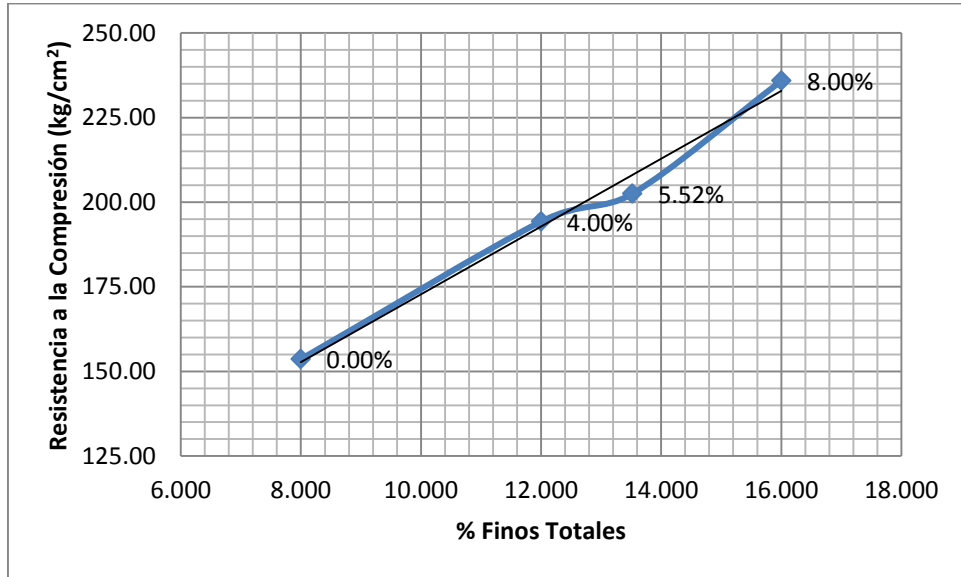
Explicación: Los valores escritos bajo la línea indican el módulo de rotura en porcentaje con relación al valor de resistencia a compresión

Gráfico 5.3: % Pasta Cementante Vs $f'c$



Fuente: Elaboración Propia

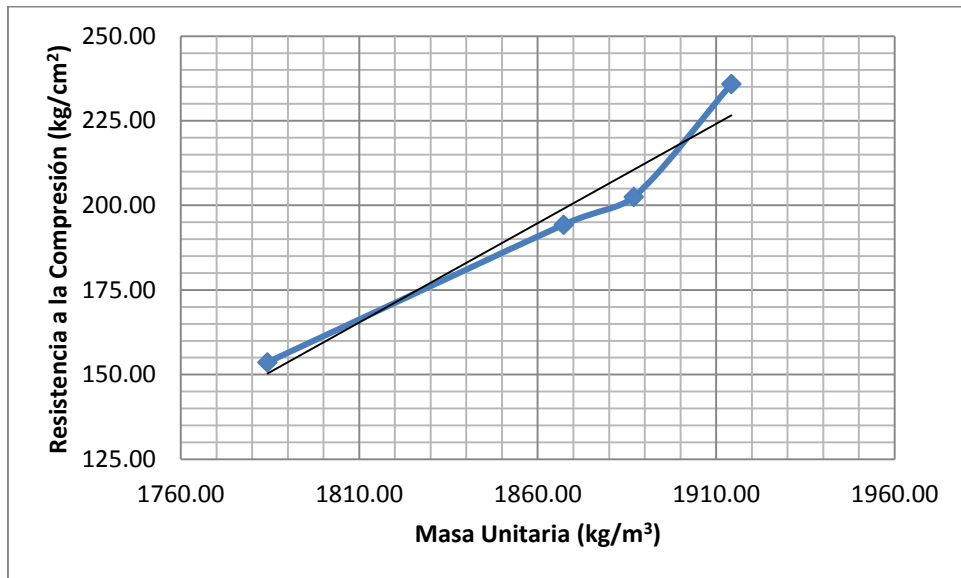
Gráfico 5.4: % Finos Totales Vs $f'c$



Fuente: Elaboración Propia

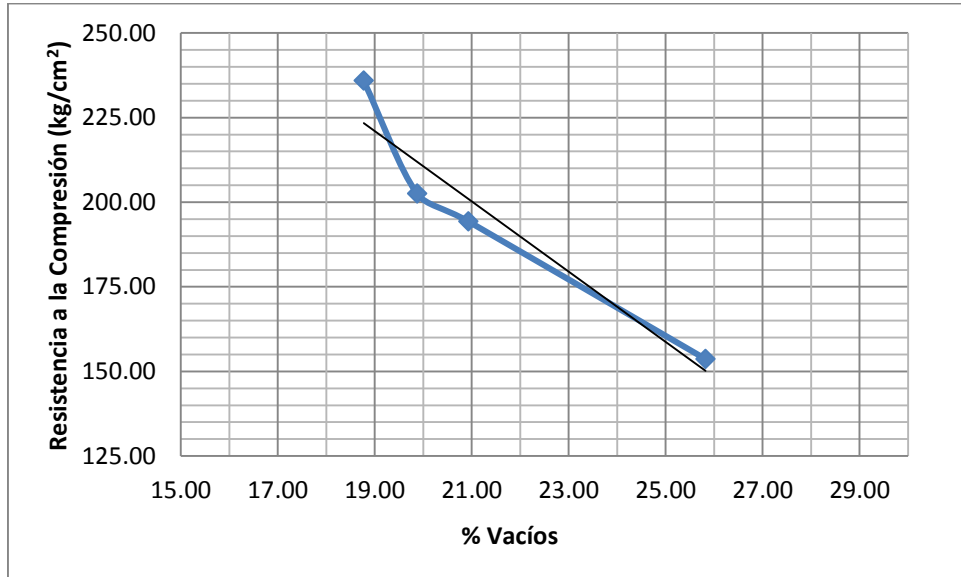
Explicación: Los valores escritos bajo la línea indican el porcentaje de finos añadidos existentes en la mezcla.

Gráfico 5.5: Masa Unitaria Vs $f'c$



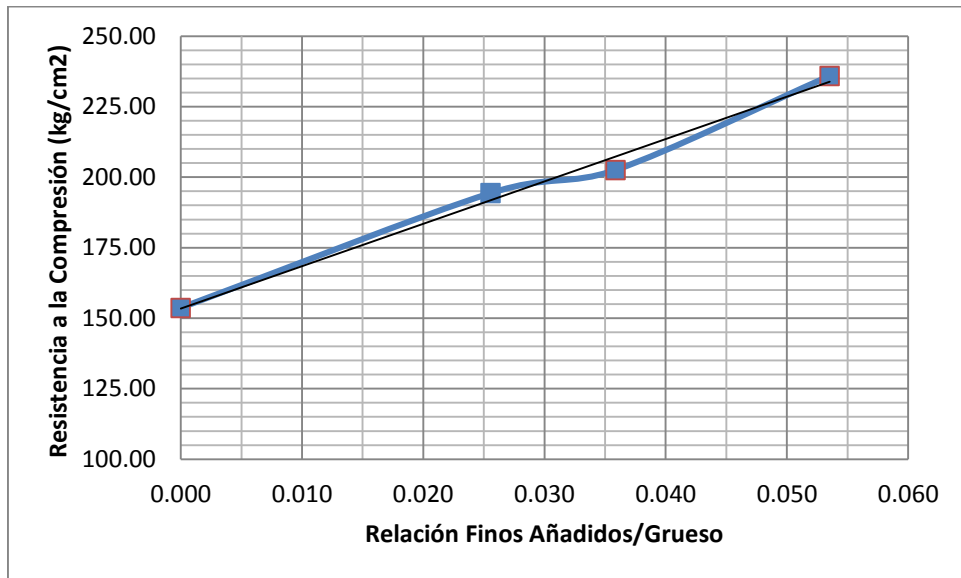
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 5.6: % Vacíos Vs $f'c$



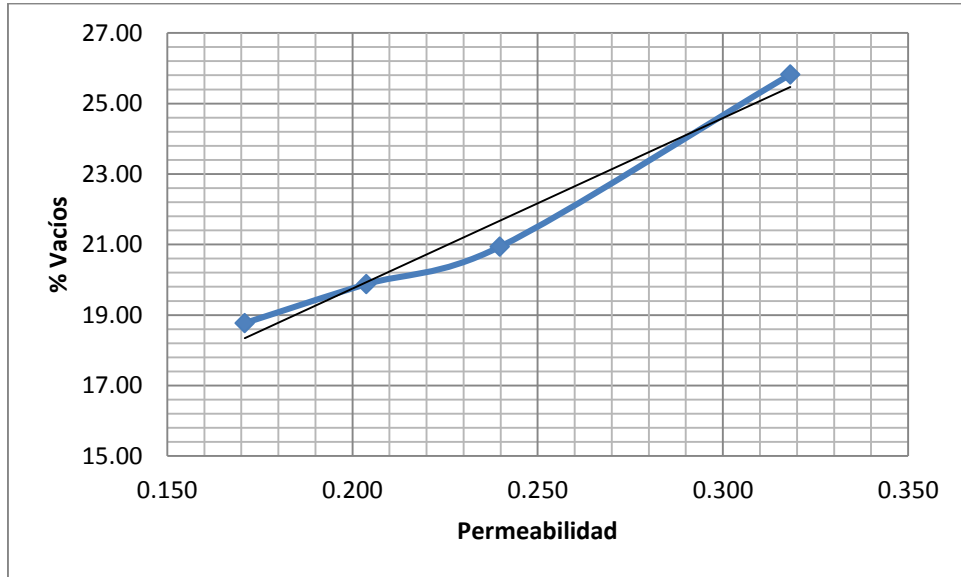
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 5.7: Relación Finos Añadidos/Gruoso Vs $f'c$



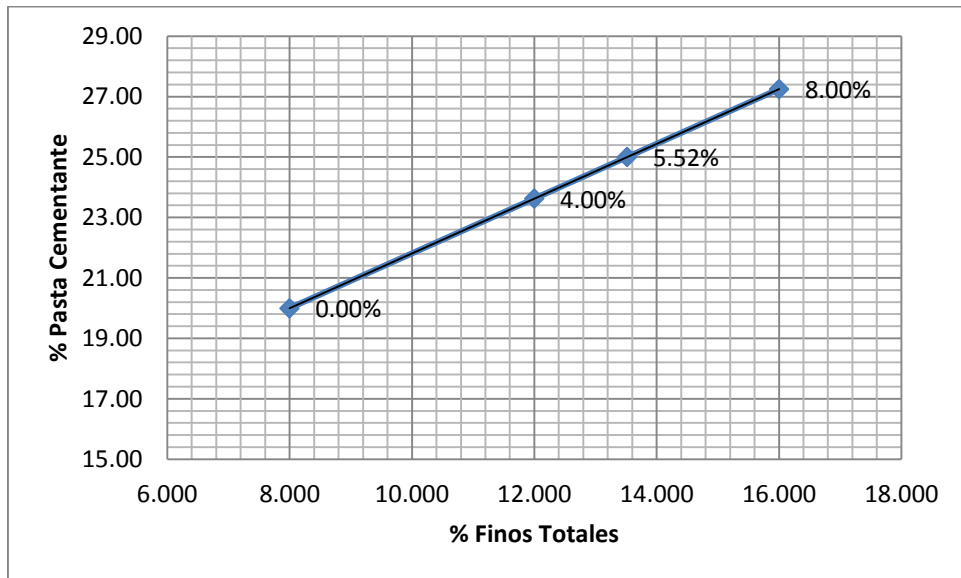
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 5.8: Permeabilidad Vs % Vacíos



Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 5.9: % Finos Totales Vs %Pasta Cementante



Fuente: Elaboración Propia

5.7. Método de Dosificación de Hormigones Permeables como Aplicación del Estudio Realizado

El resultado final de esta disertación de grado, muestra el método de dosificación del hormigón permeable utilizando los gráficos de resultados del capítulo 5 y las fórmulas del capítulo 3. El procedimiento recomendado se describe a continuación:

a) Establecer características del material a usar

Los agregados deberán cumplir con las normas ASTM C33/C33M, que permitan comprobar la calidad de los mismos. Además, es indispensable determinar la masa unitaria, porcentaje de absorción y gravedad específica de los agregados. El agregado grueso debe también, cumplir con las características de granulometría #67.

b) Establecer datos de diseño

Con la ayuda de los gráficos 5.1 y 5.2 y en base a la resistencia a la compresión ($f'c$) que se desea obtener, determinar si el módulo de rotura y el valor de permeabilidad satisfacen las necesidades del hormigón que se va a diseñar.

Posteriormente, utilizar los gráficos 5.3 y 5.4 para determinar los valores de porcentaje de pasta cementante y porcentaje de finos. Tener en cuenta que la relación A/C en esta disertación fue de 0.3, por lo que es el valor que se debe usar.

c) Diseño del hormigón permeable

Una vez obtenidos los datos de diseño, el siguiente paso es utilizar las fórmulas del apartado 3.3.1 (cuando no se utiliza agregado fino) o del 3.3.2 (si se utiliza agregado fino) para determinar cuanta masa de cada material se debe usar en la dosificación.

d) Ensayos de laboratorio

Como último paso, es indispensable realizar los debidos ensayos de laboratorio descritos en el capítulo IV para comprobar los resultados obtenidos.

6. CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación se presentan las conclusiones en base a los resultados obtenidos de los ensayos realizados en el laboratorio, los cuales deben ser utilizados en el diseño de hormigones para la construcción de canchas de uso múltiple.

6.1. Conclusiones

- La relación entre la resistencia a la compresión y la permeabilidad del hormigón tiene una forma prácticamente lineal, es decir que si la resistencia aumenta, la permeabilidad disminuye. Como se observa en el *Gráfico 5.1*, la resistencia a la compresión de 235.9 kg/cm^2 permite tener una permeabilidad de 0.171 cm/s , por otro lado al disminuir la resistencia a 153.65 kg/cm^2 , la permeabilidad aumenta hasta 0.318 cm/s .
- Si se compara los datos del módulo de rotura obtenidos en el ensayo a flexión con los de resistencia a la compresión, se puede observar que los de módulo de rotura representan valores entre 14.02% y 15.83% de la resistencia a la compresión obtenida en esta disertación de grado (Ver *Gráfico 5.2*). Estos valores se encuentran dentro de los parámetros esperados.
- En base a la conclusión anterior y el *Gráfico 5.2*, se relaciona directamente la resistencia a la compresión con el módulo de rotura. Esto quiere decir, que si uno

aumenta, el otro lo hace también. Valores de resistencia a la compresión de 153.65 kg/cm² que varían hasta 235.90 kg/cm² suponen módulos de rotura que van desde los 24.32 kg/cm² hasta 35.87 kg/cm².

- En el *Gráfico 5.3*, se puede observar que el porcentaje de pasta cementante influye directamente en la resistencia a la compresión; ésta puede ir desde los 153.65 kg/cm² hasta los 235.90 kg/cm², si los valores de porcentaje de pasta cementante varían desde 20% hasta 27.25%, respectivamente.
- Para una correcta dosificación se debe partir del hecho de que el agregado grueso va a contar siempre con finos, siempre dentro de los valores permitidos por la norma granulométrica. En el caso de esta disertación, el valor de finos contenidos en el agregado grueso es del 8%. Sin embargo, estos finos no deben ser tomados en cuenta en las fórmulas del apartado 3.3. *Cálculo* de dosificaciones, ya que los finos nombrados en las dosificaciones son los añadidos, mas no de los que se encuentran dentro de la granulometría del agregado grueso.
- En base al *Gráfico 5.4*, se concluye que el añadir agregado fino a la mezcla ayuda a incrementar la resistencia a la compresión del hormigón permeable. Cuando se aumenta la cantidad de agregado fino añadido del 0.0% al 8.0%, la resistencia aumenta de 153.65 kg/cm² hasta 235.90 kg/cm².

- El aumento de porcentaje de pasta cementante y agregado fino añadido, provoca que la mezcla aumente en su masa unitaria. Cuando esos valores varían entre 1784.33 kg/m^3 y 1914.31 kg/m^3 , provocan aumentos en la resistencia a la compresión que van desde 153.65 kg/cm^2 hasta 235.90 kg/cm^2 , respectivamente (Ver *Gráfico 5.5*).

- Los vacíos aumentan en el hormigón permeable cuando no se añaden finos a la mezcla, lo que provoca una disminución tanto en el peso volumétrico como en la resistencia (Ver *Gráfico 5.6*). Porcentajes de vacíos que varían entre 25.82% y 18.77% producen resistencias a la compresión que van desde 153.65 kg/cm^2 a 235.90 kg/cm^2 .

- El aumento o disminución de finos añadidos, repercute directamente en la relación F/G existente en la mezcla. En base al *Gráfico 5.7*, cuando la relación F/G aumenta de 0.000 % a 0.054 %, la resistencia a compresión lo hace de 153.65 kg/cm^2 hasta 235.90 kg/cm^2 . Estos valores se encuentran dentro de los normales en un hormigón permeable.

- El *Gráfico 5.8* muestra la relación existente entre el porcentaje de vacíos y la permeabilidad de la mezcla. Mayor porcentaje de vacíos implica una disminución en la resistencia a la compresión y un aumento en la permeabilidad. 25.82% de vacíos permite tener una permeabilidad de 0.318 cm/s, por otro lado al contar con 18.77% de vacíos, la permeabilidad disminuye hasta 0.171 cm/s.

6.2. Recomendaciones

- Par cumplir con todos los objetivos de este estudio, se recomienda en un futuro realizar una mayor cantidad de ensayos, incluyendo aditivos y utilizando otros agregados gruesos, con diferente granulometría.
- Con una relación A/C de 0.3 como en el caso de este estudio, se llegó a un tope en cuanto al módulo de rotura de 36 kg/cm^2 y en el caso de la resistencia a la compresión de 235 kg/cm^2 (Ver *Gráfico 5.2*); por lo que, si se requiriera valores de diseño superiores a los mencionados, tanto para el módulo de rotura como para la compresión, se debe hacer un estudio similar al realizado, con valores de relación A/C iguales a 0.26, que es el mínimo recomendado para este tipo de hormigones.
- Para mejorar la resistencia sin disminuir las condiciones de permeabilidad en la recomendación anterior; quizás, se debería trabajar con súper fluidificantes para disminuir la cantidad de agua y de esa manera, mejorar la resistencia del hormigón, sin alterar la permeabilidad..
- Varios estudios recomiendan que durante su puesta en obra, el curado debe empezar máximo 20 minutos después de ser colocado. Además, no debe existir mucha manipulación de la mezcla para evitar la pérdida de agua.
- La mejor manera de controlar la cantidad de agua, es visualmente; durante su fabricación, la pasta de cemento deberá cubrir cada partícula de agregado en su

totalidad, formando una película brillante. Se recomienda utilizar el control visual para determinar la cantidad de agua que se utilizará en cada mezcla.

- La elaboración del suelo base sobre el cual se colocará el hormigón permeable debe seguir las recomendaciones descritas por la norma ACI 522R en el apartado 7.2.1.
- Antes de realizar el ensayo de permeabilidad, se recomienda sumergir las probetas de hormigón durante 30 min en agua, de tal manera que deben estar saturadas durante el ensayo, esto para lograr datos más fidedignos.
- Se recomienda realizar mantenimiento periódico, cuyos tiempos van a variar dependiendo de la permeabilidad del hormigón y de las condiciones de exposición. Las principales desventajas de este tipo de hormigón, son la baja resistencia que se alcanza y el mantenimiento al que debe ser sometido. Para lo cual se utiliza mangueras de agua a presión o aspiradoras de alta potencia.
- Se espera, que este trabajo sirva como base para futuras investigaciones. Para ampliar los resultados obtenidos, se recomienda realizar mayor cantidad de dosificaciones variando la relación A/C, el porcentaje de pasta cementante y de finos añadidos, agregado grueso con diferente granulometría, además de la inclusión de aditivos.

- Se recomienda construir capas con material granular bajo el hormigón permeable, y cuando sea necesario drenes. Ambas soluciones ayudarán a evacuar el agua de las escorrentías.

6.3. Comentarios

- Las fórmulas expuestas en el apartado 3.3. *Cálculo* y los gráficos del apartado 5.6. *Gráficos con Resultados*, permiten al Ingeniero dosificar el hormigón permeable siguiendo los pasos del apartado 5.7. *Método de Dosificación de Hormigones Permeables como Aplicación del Estudio Realizado*.
- En el *Gráfico 5.9* se puede observar una relación lineal entre el porcentaje de pasta cementante y el porcentaje de finos. Esto ocurre, debido a que son valores propuestos mas no calculados; es decir se incrementaron a placer para realizar dosificaciones controladas, que permiten obtener gráficos explicativos de los resultados de cada mezcla.
- Debido a la estrecha relación que existe entre la resistencia a la compresión y la permeabilidad, se debe buscar el equilibrio entre ambas características al dosificar, de manera que se pueda obtener la resistencia mínima requerida de acuerdo al uso, y una permeabilidad que permita drenar adecuadamente, de tal manera que no se produzcan los emposamientos.

- El evitar que el agua proveniente de las precipitaciones se empoce sobre la superficie y en su lugar permitir el paso del agua a través de sí, contribuye a que las aguas subterráneas se recarguen y no desaparezcan. Esta característica permite calificar a este material como ecológico.

- En esta disertación ninguna mezcla fue realizada con 0% de finos “totales” ya que el agregado grueso utilizado contiene 8% de partículas finas.

- Este hormigón, debe estar colocado sobre una base de suelo granular, ya que si el agua pasa a través del hormigón pero se queda atrapada sobre el suelo, puede regresar a la superficie y crear zonas con agua empozada e incluso tapar los poros del hormigón debido a la sedimentación de materiales finos.

Bibliografía

- Amde, A. M., & Rogge, S. (2013). *Development of High Quality Pervious Concrete Specifications for Maryland Conditions*. Baltimore: The University of Maryland. Acceso: 2014-03-19
- American Concrete Institute Committee 522. (2010). Report on Pervious Concrete. En *ASTM Standards* (págs. 2-26). Pontificia Universidad Católica del Ecuador - PUCE (Pontificia Universidad Católica del Ecuador).
- American Concrete Institute Committee C09. (2006). ASTM C131 Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. En *ASTM Standards*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador - PUCE (Pontificia Universidad Católica del Ecuador - PUCE) pursuant to License Agreement.
- American Concrete Institute Committee C09. (2009). ASTM C29/C29M Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate. En *ASTM Standards*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador - PUCE (Pontificia Universidad Católica del Ecuador - PUCE) pursuant to License Agreement.
- American Concrete Institute Committee C09. (2010). ASTM C142/C142M Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates. En *ASTM Standards*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador - PUCE (Pontificia Universidad Católica del Ecuador - PUCE) pursuant to License Agreement.
- American Concrete Institute Committee C09. (2010). ASTM C78/C78M Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). En *ASTM Standards*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador - PUCE (Pontificia Universidad Católica del Ecuador - PUCE) pursuant to License Agreement.
- American Concrete Institute Committee C09. (2012). ASTM C127 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. En *ASTM Standards*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador - PUCE (Pontificia Universidad Católica del Ecuador - PUCE) pursuant to License Agreement.
- American Concrete Institute Committee C09. (2012). ASTM C128 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate. En *ASTM Standards*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador - PUCE (Pontificia Universidad Católica del Ecuador - PUCE) pursuant to License Agreement.
- American Concrete Institute Committee C09. (2012). ASTM C1754/C1754M Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete. En *ASTM Standards*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador - PUCE (Pontificia Universidad Católica del Ecuador - PUCE) pursuant to License Agreement.

- American Concrete Institute Committee C09. (2012). ASTM C617/C617M Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens. En *ASTM Standards*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador - PUCE (Pontificia Universidad Católica del Ecuador - PUCE) pursuant to License Agreement.
- American Concrete Institute Committee C09. (2013). ASTM C33/C33M Standard Specification for Concrete Aggregates. En *ASTM Standards*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador - PUCE (Pontificia Universidad Católica del Ecuador - PUCE) pursuant to License Agreement.
- American Concrete Institute Committee C09. (2013). ASTM C88 Standard Test Method for Soundness of Aggregate by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate. En *ASTM Standards*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador - PUCE (Pontificia Universidad Católica del Ecuador - PUCE) pursuant to License Agreement.
- American Concrete Institute Committee C09. (2014). ASTM C39/C39M Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. En *ASTM Standards*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador - PUCE (Pontificia Universidad Católica del Ecuador - PUCE) pursuant to License Agreement.
- American Concrete Institute Committee D04. (2014). ASTM D75/D75M Standard Practice for Sampling Aggregates. En *ASTM Standards*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador - PUCE (Pontificia Universidad Católica del Ecuador - PUCE) pursuant to License Agreement.
- Aoki, Y. (Junio de 2009). *Development of Pervious Concrete*. Sydney: University of Technology. Acceso: 2014-09-17
- BASF. (s.f.). *BASF, The Chemical Company*. Obtenido de <http://www.centroamerica.basf-cc.com/SiteCollectionDocuments/CTUs-Boletines/InfProdConcretoPermeable-sp-0209.pdf>. Acceso: 2014-11-16
- Cement and Concrete Association. (1989). *El Concreto en la Obra (Man on the Job)* (Vol. 1). México D.F., México: Limusa.
- Hormigón Express. (s.f.). *Hormigón Express, Comprometidos con Panamá*. Obtenido de http://www.hormigonexpress.com/hormigon_ecologico.php. Acceso: 2015-05-13
- López Palacios, E. (2010). *Control de Calidad y Colocación de Concretos Permeables*. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México. Acceso: 2014-11-19
- Meneses, C. M., & Bravo, C. H. (2007). *Resistencia Mecánica y Condiciones de Obra del Concreto Poroso en los Pavimentos Según el Tipo de Granulometría*. Medellín: Universidad de Medellín. Acceso: 2015-02-05

- Montejo Fonseca, A. (2008). *Ingeniería de Pavimentos, Evaluación Estructural, Obras de Mejoramiento y Nuevas Tecnologías* (Tercera ed.). Bogotá, Colombia: Universidad Católica de Colombia.
- Muñoz Salinas, F., & Sastre Sastre, R. (2010). *Propiedades de los Materiales y Elementos de Construcción* (Primera ed.). Barcelona, España: Universitat Politecnica de Catalunya.
- Revista Cemento Año 5. (s.f.). *Asociación Colombiana de Productores de Concreto*. Obtenido de http://www.asocreto.org.co/boletin/infraestructura1-2015/hormigon_poroso.pdf. Acceso: 2014-02-05
- Short, A., & Kinniburgh, W. (1967). *Concreto Ligero*. México D.F., México: Limusa-Wiley.
- Waddell, J. J., & Dobrowolski, J. A. (1996). *Manual de la Construcción con Concreto* (Tercera ed., Vol. I). (H. Pérez Castellanos, Trad.) México D.F.: McGraw-Hill.