

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**OBTENCIÓN DE UN HORMIGÓN CON ALTA PERMEABILIDAD
PARA UTILIZACIÓN EN PAVIMENTOS, RESISTENCIA A FLEXIÓN
DE 4 MPA, USANDO MATERIALES DE LA PROVINCIA DE
PICHINCHA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MENCIÓN ESTRUCTURAS**

AUTOR: CHANGO CHECA, RICARDO DAVID
ricardo.chango@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. LUNA HERMOSA GERMÁN VINICIO
german.luna@epn.edu.ec

Quito D.M., marzo 2020

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Chango Checa Ricardo David, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional, y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

CHANGO CHECA RICARDO DAVID

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Chango Checa Ricardo David, bajo mi supervisión.

Ing. Luna Hermosa Germán Vinicio
DIRECTOR DEL PROYECTO

DEDICATORIA

Dedicado a todas las personas que confían en mí y mis capacidades.

Ricardo David Chango Checa

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Escuela Politécnica Nacional y a mis profesores por brindarme todos los conocimientos y aptitudes para la exitosa culminación de mi vida universitaria.

A todas las personas e instituciones que confiaron en mí y me apoyaron de manera incondicional en la culminación de este documento y en las etapas de mi vida.

Un especial agradecimiento a mi director de tesis Ing. Germán Luna por obsequiarme su valioso tiempo para dirigirme, aconsejarme y apoyarme en el proceso del presente trabajo de titulación y en mi estadía por la facultad de Ingeniería Civil y Ambiental.

Ricardo David Chango Checa

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|------------------------------------|------|
| DECLARACIÓN DE AUTORÍA..... | I |
| CERTIFICACIÓN | II |
| DEDICATORIA..... | III |
| AGRADECIMIENTO..... | IV |
| ÍNDICE DE CONTENIDO..... | V |
| LISTA DE FIGURAS | IX |
| LISTA DE TABLAS..... | XI |
| LISTA DE ANEXOS..... | XIII |
| RESUMEN | XIV |
| ABSTRACT..... | XV |
| PRESENTACIÓN..... | XVI |
| CAPÍTULO 1 | 1 |
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1. ANTECEDENTES..... | 1 |
| 1.1.1. HIPÓTESIS..... | 3 |
| 1.2. OBJETIVOS | 3 |
| 1.2.1. OBJETIVO GENERAL | 3 |
| 1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 3 |
| 1.3. ALCANCE..... | 4 |
| 1.4. JUSTIFICACIÓN | 5 |
| CAPÍTULO 2 | 7 |
| MARCO TEÓRICO | 7 |
| 2.1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES | 7 |
| 2.1.1. HORMIGÓN CONVENCIONAL | 7 |
| 2.1.2. AGREGADOS | 7 |
| 2.1.3. CEMENTO..... | 10 |

| | | |
|--------|--|----|
| 2.1.4. | AGUA..... | 11 |
| 2.1.5. | ADITIVOS | 12 |
| 2.2. | PAVIMENTOS | 12 |
| 2.2.1. | PAVIMENTOS EN ECUADOR..... | 14 |
| 2.2.2. | PAVIMENTOS DE HORMIGÓN | 15 |
| 2.3. | HORMIGÓN PERMEABLE..... | 16 |
| 2.3.1. | AGREGADOS: GRUESO Y FINO | 18 |
| 2.3.2. | MATERIALES CEMENTOSOS | 20 |
| 2.3.3. | AGUA..... | 21 |
| 2.3.4. | ADITIVOS | 21 |
| 2.4. | CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL HORMIGÓN PERMEABLE..... | 22 |
| 2.4.1. | TRABAJABILIDAD..... | 23 |
| 2.4.2. | DENSIDAD Y POROSIDAD | 24 |
| 2.4.3. | DURABILIDAD | 24 |
| 2.4.4. | PERMEABILIDAD | 25 |
| 2.5. | CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DEL HORMIGÓN PERMEABLE | 26 |
| 2.5.1. | RESISTENCIA DEL HORMIGÓN..... | 26 |
| 2.5.2. | RESISTENCIA A COMPRESIÓN | 26 |
| 2.5.3. | RESISTENCIA A FLEXIÓN..... | 27 |
| | CAPÍTULO 3 | 29 |
| | METODOLOGÍA..... | 29 |
| 3.1. | CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS | 29 |
| 3.1.1. | MUESTREO DE AGREGADOS..... | 29 |
| 3.1.2. | REDUCCIÓN DE MUESTRAS A TAMAÑO DE PRUEBAS | 30 |
| 3.1.3. | CONTENIDO TOTAL DE HUMEDAD EN AGREGADOS | 30 |
| 3.1.4. | GRANULOMETRÍA DE AGREGADOS FINOS Y GRUESOS..... | 32 |
| 3.1.5. | MATERIAL MÁS FINOS QUE EL TAMIZ No. 200..... | 35 |
| 3.1.6. | DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA (PESO ESPECÍFICO) Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS GRUESOS | 36 |

| | | |
|----------|--|----|
| 3.1.7. | DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS FINOS | 39 |
| 3.1.8. | IMPUREZAS ORGÁNICAS EN AGREGADOS FINOS..... | 42 |
| 3.1.9. | DENSIDAD APARENTE EN AGREGADOS..... | 43 |
| 3.2. | CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL HORMIGÓN PERMEABLE..... | 45 |
| 3.2.1. | TEMPERATURA DEL HORMIGÓN RECIÉN MEZCLADO | 45 |
| 3.2.2. | ASENTAMIENTO DEL HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO | 46 |
| 3.2.3. | DENSIDAD Y CONTENIDO DE VACÍOS DEL HORMIGÓN PERMEABLE.. | 48 |
| 3.2.4. | ESPECÍMENES DE ENSAYO DE HORMIGÓN RECIÉN MEZCLADO..... | 49 |
| 3.2.5. | ENSAYO DE PERMEABILIDAD EN HORMIGÓN PERMEABLE..... | 53 |
| 3.3. | CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DEL HORMIGÓN PERMEABLE | 56 |
| 3.3.1. | ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN | 56 |
| 3.3.2. | ENSAYO DE RESISTENCIA A FLEXIÓN | 60 |
| 3.4. | DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN PERMEABLE..... | 63 |
| 3.4.1. | RELACIÓN AGUA-CEMENTO..... | 64 |
| 3.4.2. | CONTENIDO DE VACÍOS..... | 64 |
| 3.4.3. | CONTENIDO DE AGREGADO GRUESO | 65 |
| 3.4.4. | VOLUMEN DE AGUA Y CEMENTO | 66 |
| 3.4.5. | PROCEDIMIENTO DE DOSIFICACIÓN | 69 |
| 3.4.5.1. | Requisitos preliminares | 69 |
| 3.4.5.2. | Determinación del peso del agregado..... | 70 |
| 3.4.5.3. | Determinación de volumen de pasta..... | 71 |
| 3.4.5.4. | Determinación de contenido de cemento..... | 71 |
| 3.4.5.5. | Determinación de contenido de agua..... | 71 |
| 3.4.5.6. | Determinación de volumen sólido..... | 72 |
| 3.4.5.7. | Comprobación de contenido de vacíos y porosidad | 72 |
| 3.4.5.8. | Proporciones de materiales en peso y densidad del hormigón permeable | 73 |
| 3.4.5.9. | Ajuste por contenido de humedad y absorción del agregado | 73 |
| | CAPÍTULO 4 | 75 |

| | |
|--|-----|
| RESULTADOS | 75 |
| 4.1. RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS DE AGREGADOS | 75 |
| 4.1.1. AGREGADO FINO | 75 |
| 4.1.2. AGREGADO GRUESO | 77 |
| 4.2. DISEÑOS DE MEZCLAS DE HORMIGÓN | 82 |
| 4.3. RESULTADOS DE ENSAYOS FÍSICOS DEL HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO | 83 |
| 4.3.1. ASENTAMIENTO Y TEMPERATURA | 83 |
| 4.3.2. DENSIDAD Y CONTENIDO DE VACÍOS | 85 |
| 4.4. RESULTADOS DE ENSAYOS MECÁNICOS DEL HORMIGÓN EN ESTADO ENDURECIDO | 88 |
| 4.4.1. RESISTENCIA A COMPRESIÓN | 88 |
| 4.4.2. RESISTENCIA A FLEXIÓN..... | 90 |
| 4.5. RESULTADOS DE ENSAYOS DE PERMEABILIDAD DEL HORMIGÓN EN ESTADO ENDURECIDO | 92 |
| CAPÍTULO 5 | 94 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 94 |
| 5.1. CONCLUSIONES..... | 94 |
| 5.2. RECOMENDACIONES | 96 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 97 |
| ANEXOS | 101 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Agregado Fino | 8 |
| Figura 2. Agregado Grueso..... | 8 |
| Figura 3. Losa de hormigón permeable | 17 |
| Figura 4. Límites granulométricos..... | 19 |
| Figura 5. Hormigón permeable | 22 |
| Figura 6. Permeámetro de caída libre | 25 |
| Figura 7. Relación resistencia a compresión-porcentaje de aire contenido..... | 27 |
| Figura 8. Formación de tamices para ensayo granulométrico | 34 |
| Figura 9. Picnómetro, molde y compactador..... | 40 |
| Figura 10. Molde para ensayo de densidad aparente | 44 |
| Figura 11. Cono Abrams..... | 47 |
| Figura 12. Moldes cilíndricos para ensayos a compresión | 50 |
| Figura 13. Moldes de viga para ensayo a flexión | 52 |
| Figura 14. Anillo de infiltración..... | 54 |
| Figura 15. Implantación del anillo de infiltración..... | 54 |
| Figura 16. Representación del ensayo de permeabilidad de hormigón permeable.. | 55 |
| Figura 17. Colocación de probeta cilíndrica para ensayo a compresión..... | 58 |
| Figura 18. Tipos de fractura de especímenes cilíndricos..... | 59 |
| Figura 19. Probeta cilíndrica ensayada..... | 59 |
| Figura 20. Viga marcada tercios | 60 |
| Figura 21. Colocación de probeta prismática para ensayo a flexión..... | 61 |
| Figura 22. Viga fracturada en el tercio medio despues de ensayo a flexión | 62 |
| Figura 23. Infiltración vs Contenido de vacíos | 65 |
| Figura 24. Contenido de vacíos vs Contenido de pasta (% de volumen) | 67 |
| Figura 25. Curva granulométrica arena C33 Fucusucu – Castellanos | 77 |

| | |
|--|----|
| Figura 26. Asentamiento de diseños de hormigón permeable..... | 84 |
| Figura 27. Temperatura de diseños de hormigón permeable | 84 |
| Figura 28. Densidad real de diseños de hormigón permeable..... | 86 |
| Figura 29. Contenido de vacíos de diseños de hormigón permeable..... | 87 |
| Figura 30. Resistencia a compresión de diseños de hormigón permeable | 89 |
| Figura 31. Resistencia a flexión de diseños de hormigón permeable..... | 91 |
| Figura 32. Tasa de infiltración de diseños de hormigón permeable..... | 93 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1 Tipos de cemento hidráulico..... | 11 |
| Tabla 2 Características que afectan la funcionalidad de un pavimento | 13 |
| Tabla 3 Contenido de volúmenes de la NEVI-12 | 14 |
| Tabla 4 Clase, uso y especificaciones del hormigón | 16 |
| Tabla 5 Hormigón convencional y hormigón permeable | 18 |
| Tabla 6 Procedencia de los agregados empleados en las mezclas de hormigón | 20 |
| Tabla 7 Aditivo empleado en los diseños de hormigón permeable | 22 |
| Tabla 8 Revenimiento/ Asentamiento según tipo de construcción | 23 |
| Tabla 9 Agregados muestreados | 29 |
| Tabla 10 Masa mínima para ensayo de humedad de agregados | 31 |
| Tabla 11 Tamaño de muestra para ensayo de granulometría | 33 |
| Tabla 12 Tamaño de muestra para ensayo de material más fino que tamiz No. 200 | 35 |
| Tabla 13 Tamaño de muestra para obtención de densidad y absorción..... | 37 |
| Tabla 14 Escala de colores, impurezas inorgánicas en agregado fino..... | 43 |
| Tabla 15 Capacidad del molde para ensayo de densidad aparente | 44 |
| Tabla 16 Tolerancia de tiempo para rotura de especímenes cilíndricos | 57 |
| Tabla 17 Valores de relación b/bo según porcentaje de agregado fino..... | 66 |
| Tabla 18 Identificación arena C33 Fucusucu 3 – Castellanos | 76 |
| Tabla 19 Propiedades arena C33 Fucusucu - Castellanos | 76 |
| Tabla 20 Agregados gruesos. Mina de procedencia, distribución, ubicación de la mina | 78 |
| Tabla 21 Características agregado grueso | 78 |
| Tabla 22 Curvas granulométricas agregados gruesos..... | 79 |
| Tabla 23 Proporciones de diseños de hormigón permeable | 82 |

| | |
|--|----|
| Tabla 24 Asentamiento y temperatura de diseños de hormigón permeable | 83 |
| Tabla 25 Densidad de diseños de hormigón permeable..... | 85 |
| Tabla 26..... | 87 |
| Tabla 27 Resistencia a compresión diseños de hormigón permeable | 89 |
| Tabla 28 Resistencia a flexión diseños de hormigón permeable..... | 91 |
| Tabla 29 Resultados ensayo de permeabilidad diseños de hormigón permeable | 92 |
| | 92 |
| Tabla 30 Tasa de infiltración de diseños de hormigón permeable | 93 |

LISTA DE ANEXOS

| | |
|--------------|-----|
| ANEXO 1..... | 101 |
| ANEXO 2..... | 105 |
| ANEXO 3..... | 106 |
| ANEXO 4..... | 107 |

RESUMEN

La presente investigación se realiza con la finalidad de obtener un diseño de hormigón con características de alta permeabilidad y resistencia a flexión de 4 MPa para su uso en pavimentos, tomando como guía al reporte de hormigón permeable del ACI 522R (2010); para tal finalidad se emplean diferentes agregados pertenecientes a parroquias de: Pifo, San Antonio de Pichincha y Guayllabamba de la provincia de Pichincha, Ecuador.

Un pavimento que presente alta permeabilidad proporcionará soluciones que propendan a la recarga de acuíferos, reducción de costos en la construcción de sistemas de drenaje urbano y evitará accidentes o complicaciones en carreteras que no contemplen una correcta solución de filtración o drenaje de aguas lluvias u otras fuentes.

La alta permeabilidad se comprueba mediante el ensayo normado ASTM C1701/C1701M en losas de 850 milímetros de longitud por 850 milímetros de ancho y 200 milímetros de espesor de los diferentes diseños de hormigón permeable, con la finalidad de simular la implantación de un hormigón permeable como pavimento. La capacidad para uso en pavimentos se analiza mediante su resistencia a flexión, para lo cual se emplean vigas de hormigón para ser ensayadas según la norma ASTM C78/C78M.

Palabras clave: hormigón permeable, pavimentos, permeabilidad, resistencia a flexión.

ABSTRACT

The present investigation is carried out in order to obtain a concrete design with characteristics of high permeability and flexural strength of 4 MPa for use in pavements, taking as a guide the pervious concrete report of ACI 522R (2010); for this purpose, the design contain different aggregates belonging of: Pifo, San Antonio de Pichincha and Guayllabamba from Pichincha´s province, Ecuador.

A pavement that presents high permeability will provide solutions that tend to recharge aquifers, reduce costs in the construction of urban drainage systems and avoid accidents or complications on roads that do not contemplate a correct solution for filtration or drainage of rainwater or other sources.

The high permeability is verified by the ASTM C1701 / C1701M standard test on a slab (850mm long x 850mm wide and 200mm thick) of the different permeable concrete designs, in order to simulate the implantation of a permeable concrete as pavement. The capacity for use in pavements is analyzed by means of its resistance to bending, for which concrete beams are used to be flexibly tested according to the ASTM C78 / C78M standard.

Keywords: pervious concrete, pavement, permeability, flexural strength

PRESENTACIÓN

El presente trabajo se divide en cinco capítulos como se detalla a continuación:

CAPÍTULO 1: Se presentan los aspectos introductorios a tratar en el trabajo de investigación, tales como: antecedentes, hipótesis, objetivo general, objetivos específicos, alcance y finalmente la justificación del trabajo de titulación.

CAPÍTULO 2: Implica el contenido del marco teórico del trabajo de investigación, se presentan conceptos básicos y fundamentales acerca de: hormigón, los componentes de los cuales está conformado, resistencia a compresión y flexión, los ensayos y procedimientos basados en las normas ASTM para la elaboración de hormigón altamente permeable, y finalmente características y parámetros que definen a un hormigón de alta permeabilidad.

CAPÍTULO 3: Se describe las características de los diferentes agregados y componentes utilizados para los diseños de un hormigón altamente permeable; además se presenta los ensayos realizados al hormigón en estado fresco y endurecido para verificar el rendimiento del hormigón y su validación como hormigón de alta permeabilidad.

CAPÍTULO 4: Se presenta y compara los resultados obtenidos de los ensayos de los distintos diseños de hormigón en estado fresco y en estado endurecido; se analiza las características físicas y mecánicas de los diseños planteados.

CAPÍTULO 5: Por último, se expone las conclusiones obtenidas del trabajo de investigación; adicionalmente se presenta recomendaciones para futuros estudios o para complementar estudios presentes.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

Las ciudades de todo el mundo presentan un desarrollo y crecimiento notables, se construyen edificios, viviendas y para el cómodo tránsito de bienes y personas se pavimentan nuevas vías (de Solminihac, Videla, Fernández, & Castro, 2007). Los pavimentos del Ecuador y del mundo son diseñados mediante normas y especificaciones propias de la zona donde se implantará una nueva vía; según la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12 Volumen 3 (2013): “Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes” para la construcción de pavimentos se considera: aumento de requerimientos de mantenimiento, aumento del parque automotor, necesidad de reducir la contaminación por el tráfico y el requerimiento de minimizar los índices de severidad de los accidentes de tránsito. Actualmente se proponen nuevos desafíos para mejorar la calidad de todas las clases de vida y mejorar aspectos como seguridad vial y ambiental, por lo que aparecen nuevos conceptos como carreteras sostenibles, inteligentes, eco amigables y de baja emisión (Mendoza Sánchez, 2014).

La rápida construcción de pavimentos para la expedita circulación humana ha generado zonas críticas para procesos esenciales en ecosistemas delicados; produciendo cambios negativos en los ciclos naturales, estilo de vida humana, animal y vegetal (Trombulak & Frissell, 1999). La implantación de un proyecto vial causa cambios del flujo natural de aguas superficiales y produce acumulación de éstas o de cualquier otra fuente, provocando desde accidentes viales hasta grandes inundaciones. Existen procedimientos ingenieriles para prevenir estas deficiencias, tales como: instalación de barreras para redirigir escorrentía superficial (cunetas), instalación de zanjas de drenaje rellenas de roca a lo largo de los lados para aumentar la infiltración y en varios países se toma en cuenta la implementación de

hormigón permeable o poroso como pavimento o estanques de bio-retención (Quintero, 2016).

El ACI 522R (2010): “Informe del concreto permeable” expone que el hormigón permeable fue utilizado por primera ocasión a mediados de los años noventa como material para construcción de viviendas y elementos no estructurales en países como: Reino Unido, Escocia, Australia, Alemania, Holanda, Venezuela, España, Bélgica, Canadá y otros más; pero no es sino hasta el año de 1970 que se lo emplea como material para pavimento de un parqueadero de Florida, Estados Unidos. Más adelante, en el año 2010 el ACI publica el reporte ACI 522R para el estudio y elaboración de hormigón permeable, el cual brinda una referencia normada para dosificación y empleo en distintos campos de la ingeniería, incluido su utilización en pavimentos. El hormigón permeable adquiere atención especial en la última década por la necesidad de un correcto manejo de las aguas superficiales, por ende, se han realizado investigaciones en múltiples países, incluido Ecuador, para la adecuada elaboración y colocación de este tipo de hormigón con resultados óptimos, pero se evidencia una deficiencia en sus cualidades mecánicas: resistencia a flexión, característica necesaria para ser aceptado en diferentes tipos de pavimento.

Por lo mencionado, el presente trabajo tiene como finalidad determinar el diseño de un hormigón altamente permeable con resistencia a flexión de al menos 4 MPa, resistencia requerida para utilizarse en calles, avenidas, plazas, parqueaderos y zonas que cubren grandes superficies. La implementación de dicho hormigón como pavimento dará soporte ecológico, funcional y estético en la zona donde sea colocado (Cabello, y otros, 2015). La alta permeabilidad, 0.14 a 1.22 cm/s, permite que el ciclo de agua continúe libremente y no se interrumpa, la zona quede libre de la acumulación de grandes volúmenes de agua, procedente de la lluvia o cualquier otra fuente de agua superficial, facilitando el libre tránsito vehicular y peatonal; permite además la optimización de la escorrentía natural del agua, la recolección y conducción de aguas lluvias de las ciudades podrían ser más económicos y los acuíferos no se verán tan afectados en su recarga natural (Smith, 2006).

Establecidos los puntos clave de esta investigación, se plantea la siguiente hipótesis, la cual será comprobada o desvirtuada en el análisis de resultados del trabajo experimental.

1.1.1. HIPÓTESIS

Las características físicas de los pavimentos convencionales no permiten el libre paso de agua lluvia o de otras fuentes de agua superficial, lo cual genera problemas de seguridad vial y ambiental; por lo que se plantea que es factible la obtención de un diseño de hormigón con características de alta permeabilidad, resistencia a flexión de 4 MPa para la utilización en pavimentos viales, empleando materiales propios de la provincia de Pichincha.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar un hormigón de alta permeabilidad para ser utilizado en pavimentos, que presente una resistencia a flexión de 4 MPa utilizando agregados propios de la provincia de Pichincha.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir y comparar los componentes necesarios; tales como agregado fino, agregado grueso, aditivos, tipo de cemento y compuestos adicionales para satisfacer las necesidades del diseño.
- Realizar y probar diferentes alternativas de diseño de un hormigón altamente permeable, resistencia a flexión 4 MPa, para proponer el diseño idóneo.
- Comparar y analizar las características físico-mecánicas de las diferentes alternativas de diseño del hormigón altamente permeable, en estado fresco y endurecido.

- Analizar las características hidráulicas de las diferentes alternativas del hormigón para comprobar su grado de permeabilidad en estado endurecido.
- Mediante el análisis de los resultados generados en esta investigación, plantear aplicaciones del hormigón altamente permeable enfocándose no solo en la industria de la construcción.

1.3. ALCANCE

El presente proyecto de titulación busca implementar un diseño de hormigón apto para pavimentos con características de alta permeabilidad, propiedad deficiente en pavimentos convencionales implantados en la mayoría de vías; se pretende alcanzar una infiltración de agua superficial mínima de 81 L/min/m² o 0.1 cm/s permitiendo el libre paso de agua de cualquier procedencia y minimizar efectos negativos en aspectos como son: seguridad vial, sistemas de conducción de agua y conservación de ciclos naturales del agua. El producto a obtener deberá desarrollar una resistencia a flexión de al menos 4 MPa, propiedad mecánica necesaria para ser empleado como pavimento de uso vehicular; y para ello, se emplearán únicamente agregados propios de la provincia de Pichincha, por ser una zona con altos índices de construcción vial.

El análisis de la resistencia a flexión del hormigón será mediante la fabricación y ensayo de vigas de hormigón de 60 centímetros de largo, 15 centímetros de ancho y 15 centímetros de espesor. Las pruebas de flexión de vigas se efectuarán cumplidos los 28 días de edad, en base a la norma ASTM C78/C78M (2018): “Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la flexión del concreto (utilizando viga simple con carga en los tercios del claro)”. Para la verificación de la alta permeabilidad se empleará el método de la norma ASTM C1701/C1701M (2017); “Método de prueba estándar para la tasa de infiltración de hormigón permeable en el sitio”, una vez el hormigón se encuentre en estado endurecido.

Mediante el análisis de las características físico-mecánicas de las diferentes propuestas de diseño de hormigón altamente permeable, se escogerá el diseño óptimo que satisfaga las condiciones propuestas en la investigación.

1.4. JUSTIFICACIÓN

“La pavimentación no disimula los accidentes propios del terreno, sino que los tapiza. Por lo tanto, el agua que sigue la pendiente en busca de evacuación se almacena generalmente en las áreas más bajas estableciendo zonas de inundación claramente focalizadas” (Federovisky, 1990).

La presente investigación aporta información relevante para los profesionales en distintas áreas ya que abarca diferentes campos de la ciencia, proponiendo alternativas para diseño de pavimentos que no solo cumplan con especificaciones estructurales sino también soluciones encaminadas a seguridad vial, soporte ecológico y bienestar social (Cabello, y otros, 2015).

Las pruebas y ensayos en un hormigón de alta permeabilidad brindarán información relevante de su comportamiento físico-mecánico, la cual servirá como guía práctica de diseño de hormigones especiales para su utilización como pavimentos. Además, se obtendrá características y desempeño de los agregados, disponible en la provincia de Pichincha, pertenecientes a este tipo de hormigón.

Adicionalmente, el presente trabajo servirá como referencia para futuras investigaciones de índole similar, diferentes materiales de construcción o diferentes metodologías de diseño. Se comparará con investigaciones internacionales como la de Flores y Pacompia de Perú acerca de: “Diseño de mezcla de concreto permeable con adición de tiras de plástico para pavimentos $f'c$ 175 kg/cm² en la ciudad de Puno” (2015), o de Candelas, en México, acerca de : “Tecnología del concreto permeable o ecológico en la construcción” (2010), con investigaciones nacionales acerca de hormigones permeables, como la de Robert Alfredo Núñez

Moreno acerca de “Características básicas de un hormigón de alta permeabilidad” (2001); y se propondrá una nueva composición con materiales locales, componentes físicos y aditivos químicos existentes en la actualidad.

La implementación de un hormigón con permeabilidad alta como pavimento se ha realizado en varios lugares del mundo por los beneficios que éste proporciona. El resultado de la investigación podrá ser utilizado en cualquier zona con la ventaja de ser amigable con el medio ambiente, permitiendo un mejor estilo de vida humana y silvestre (Smith, 2006); proporcionará soluciones que propendan a la recarga de acuíferos y reducción de costos en la construcción de sistemas de drenaje urbano (sistema de alcantarillado). Adicionalmente se podrá prevenir catástrofes como inundaciones y accidentes viales, por la rápida infiltración de agua lluvia o cualquier otra fuente. La resistencia a flexión de 4 MPa permitirá su utilización en zonas como: carreteras, calles, canchas deportivas, plazas, parqueaderos, y lugares que presenten grandes superficies.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

2.1.1. HORMIGÓN CONVENCIONAL

El hormigón o concreto es una combinación, en proporciones determinadas, de agregado fino (arena), agregado grueso (ripio), y componentes adicionales unidos en una masa rocosa por medio de una pasta de cemento y agua; en circunstancias especiales, aditivos son añadidos modificando ciertas características de la mezcla (Mc Cormac & Brown, 2011).

El hormigón simple, es decir sin refuerzo, posee considerable resistencia a compresión, pero resistencia a tensión limitada, lo que limita sus aplicaciones como componente de un elemento estructural. Para suplir esta deficiencia en sus resistencias a tracción y flexotracción, se combina con refuerzo de acero que imposibilita el desarrollo de grietas que, por esta razón, se generarían en el material (González Cuevas & Robles Fernández-Villegas, 2005).

2.1.2. AGREGADOS

Los agregados utilizados para hormigón representan aproximadamente el 75% del volumen de la mezcla; son componentes más baratos que el cemento, por ello es recomendable su utilización en mayor proporción en la mezcla. Para las distintas mezclas se emplea agregado fino (arena) y agregado grueso (ripio o grava), las características de estos elementos tienen un efecto importante en la resistencia y propiedades del hormigón fresco y endurecido (Mc Cormac & Brown, 2011).

- Agregado Fino: Es el material que pasa por la malla No. 4 (tamiz con aberturas de 4.75 mm).



Figura 1. Agregado Fino

Elaborado por: Ricardo Chango

- Agregado grueso: Es el agregado cuyo mayor porcentaje de partículas quedan retenidas en la malla No. 4.



Figura 2. Agregado Grueso

Elaborado por: Ricardo Chango

2.1.2.1. Propiedades de los agregados

La presencia de agregados, finos y gruesos, es evidente en una mezcla de hormigón ya que representa aproximadamente el 75% del mismo; éstos presentan diversas propiedades que pueden influenciar la calidad de un hormigón en gran magnitud (Neville, 2013). A continuación, se definen propiedades empleadas en este documento, se tomará como referencia la norma ASTM C125 (2020): “Terminología estándar relacionada con el hormigón y los agregados de hormigón”.

- Gradación o graduación: término que indica la conformidad de tamaños o arreglos granulométricos de las partículas de los áridos.
- Módulo finura: factor empleado para identificar a un agregado, fino o grueso, según su granulometría.
- Tamaño máximo del agregado: Es la menor abertura del tamiz a través de la cual debe pasar la totalidad del agregado.
- Tamaño nominal máximo del agregado: Es la menor abertura de tamiz a través de la cual se permite pase casi la totalidad (90-95%) del agregado.
- Absorción: Proceso por el cual un líquido (en hormigones líquido=agua) llena los poros permeables de un cuerpo poroso (agregado) incrementando su masa. La capacidad de absorción interviene en las propiedades de los agregados como en la adherencia de éstos con el cemento, por lo cual puede infringir cambios de la resistencia de la mezcla de hormigón (Neville, 2013). Esta propiedad interviene directamente en el cálculo del agua de mezclado para las mezclas del hormigón, por ellos los ensayos para su obtención deben ser ejecutados con estricta precisión.
- Densidad relativa (gravedad o peso específico): Relación entre el peso de un material en un volumen determinado y el peso del agua destilada con el mismo volumen, a temperatura definida.
- Densidad aparente: Masa de material que cabe en una unidad de volumen de árido (en unidad de volumen que incluye partículas individuales y el volumen de vacíos entre partículas), se lo llama también peso unitario del árido.

Las ASTM C127 (2015) Y ASTM C128 (2015), referentes a métodos de ensayo para determinar densidad, densidad relativa y absorción de material fino y grueso proporcionan definiciones adicionales de términos relevantes en la realización de ensayos futuros. En materia de agregados existen diferentes tipos de densidades, las cuales difieren por presencia de poros en el agregado o el material se presente en diferentes estados. La densidad relativa o gravedad específica es la propiedad que se usa para el cálculo del volumen ocupado por dicho material en mezclas de hormigón. La densidad relativa (SSS) se emplea cuando el agregado está húmedo,

si ha logrado la absorción. La densidad relativa (OD) se usa cuando el material se encuentra en estado seco o se supone que lo está (ASTM C127, 2015).

- Condición de secado en horno (OD): Condición en la que los agregados han sido secados, mediante un horno a 110 ± 5 °C por un tiempo necesario para que la masa permanezca constante.
- Condición de saturado superficialmente seco (SSS): Es la condición en la que los poros permeables de la partícula del material son llenados con agua en la medida que se logre sumergiendo el agregado en agua durante un periodo establecido, sin agua libre en la superficie de las partículas.
- Densidad (OD): masa de agregado secado en horno por volumen unitario de las partículas del mismo agregado, incluido volumen de poros permeables e impermeables dentro de las partículas, pero no los vacíos entre las partículas.
- Densidad (SSS): masa de agregado secado en condición de saturado superficial seco por volumen unitario de las partículas del mismo agregado, incluido volumen de poros permeables e impermeables dentro de las partículas, pero no los vacíos entre las partículas.
- Densidad relativa (gravedad o peso específico) (OD): Relación de la densidad (OD) del agregado con la densidad del agua destilada a temperatura determinada.
- Densidad relativa (gravedad o peso específico) (SSS): Relación de la densidad (SSS) del agregado con la densidad del agua destilada a temperatura determinada.

2.1.3. CEMENTO

El cemento es un compuesto con características adhesivas y cohesivas, las que brindan capacidad de unir diferentes componentes para formar una mezcla compacta. Para aplicaciones en construcción e ingeniería civil, el cemento empleado en la fabricación de hormigón se denomina cemento hidráulico, presenta

la fragua y se endurece bajo o sumergido en agua (Neville, 2013). Los cementos hidráulicos están constituidos por silicatos y aluminatos de cal. Se clasifican en cementos naturales, portland y de alta alúmina (Neville, 2013).

En Ecuador, la NTE INEN 2380 (2011): “Cemento Hidráulico. Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos” clasifica a los cementos, basándose en requisitos específicos de desempeño: uso general, alta resistencia inicial, resistencia al ataque por sulfatos y calor de hidratación. La Tabla 1 presenta la nomenclatura empleada para la distinción de los tipos de cementos hidráulicos.

Tabla 1

Tipos de cemento hidráulico

| Tipo de Cemento | Descripción |
|-----------------|-------------------------------------|
| Tipo GU | Para construcción en general |
| Tipo HE | Alta resistencia inicial |
| Tipo MS | Moderada resistencia a los sulfatos |
| Tipo HS | Alta resistencia a los sulfatos |
| Tipo MH | Moderado calor de hidratación |
| Tipo LH | Bajo calor de hidratación |

Fuente: NTE INEN 2380 (2011)

Cuando es necesario un cemento que presente baja reactividad con áridos reactivos álcali-sílice se emplea la adición de la letra R, y aplica con cualquier tipo de cemento principales; Ejemplo Tipo MH(R).

2.1.4. AGUA

Acorde a la NTE INEN 1855-1 (2001): “Hormigones: Hormigón premezclado. Requisitos” el agua para hormigón debe cumplir con las especificaciones de agua potable, a falta de agua potable se puede utilizar agua que cumpla con las siguientes características:

- Agua clara y de apariencia limpia, libre de cantidades perjudiciales de componentes que puedan ser dañinos para la mezcla de hormigón o el acero de refuerzo. Si el agua tiene color, olor o sabor inusual no usarla a menos que existan registros de hormigones de buena calidad elaborados con ella.
- Agua originaria de operaciones de lavado de mezcladoras puede emplearse, pero debe ser analizada en intervalos de tiempo por el usuario y deben cumplir los criterios de aceptación ya establecidos.

2.1.5. ADITIVOS

Son los materiales o compuestos agregados al hormigón durante o previo al mezclado. Son utilizados para optimizar características y propiedades del hormigón, y en muchos de los casos para bajar el costo del mismo (Mc Cormac & Brown, 2011). Los aditivos más comunes son:

- Incluidores de aire: Se emplean para incrementar la resistencia del hormigón a condiciones de congelamiento y derretimiento.
- Acelerantes: Acelera el desarrollo de la temprana resistencia en el hormigón.
- Retardantes: Retarda el fraguado del hormigón y el aumento de temperatura.
- Superplastificantes: Reduce considerablemente el contenido de agua en el hormigón e incrementa el asentamiento del mismo.
- Impermeabilizantes de agua: Ayuda a retardar la penetración del agua en el hormigón. (Mc Cormac & Brown, 2011).

2.2. PAVIMENTOS

Un pavimento es una estructura conformada por varias capas superpuestas, relativamente horizontales, diseñadas y construidas con componentes de calidad idónea y apropiadamente compactados; resiste de buena manera los esfuerzos transmitidos por las cargas repetidas del tránsito. La estructura se apoya encima de la capa subrasante de un camino, el cual ha sido obtenido por movimiento de

tierras (Montejo Fonseca, 2002). Un pavimento tiene como función primordial brindar un nivel de servicio adecuado durante su periodo útil con bajo grado de mantenimiento y rehabilitación (MTO, 2012). Las características que afectan a la funcionalidad de un pavimento son presentadas en la Tabla 2.

Tabla 2

Características que afectan la funcionalidad de un pavimento

| Característica | |
|---------------------------------------|---|
| Condición Inicial | Relacionado a los procesos y calidad de la construcción del pavimento. |
| Deterioro prematuro | Relacionado a la calidad de materiales o deficiencias de diseño |
| Deterioro por fatiga | Se desarrolla de forma gradual por la fatiga ante las cargas de tránsito y las condiciones ambientales. Este deterioro ocurre al final de la vida útil del pavimento. |
| Deterioro relacionado con durabilidad | Relacionado con la calidad de los materiales. |

Fuente: Manual de Pavimentos Rígidos (MTO, 2012)

Se puede clasificar los pavimentos en:

- Pavimentos flexibles: formados por una capa uniforme bituminosa que se apoya usualmente sobre dos capas no rígidas: base y subbase.
- Pavimentos rígidos: constituidos por una losa de hormigón hidráulico, que se apoya sobre una capa (subbase) de material previamente seleccionado. El comportamiento de este tipo de pavimento es satisfactorio cuando existe zonas que presentan debilidad en la capa subrasante.
- Pavimentos semi-rígidos o semiflexibles: poseen semejante estructura que un pavimento flexible pero una de sus capas se presenta rigidizada, con el objeto de enmendar deficiencias o cambiar características mecánicas de materiales existentes en la zona.
- Pavimentos articulados: compuesta por una capa de rodadura compuesta de elementos de bloques de hormigón prefabricado (adoquines), puede situarse sobre una capa fina de agregado fino apoyado encima de una capa

de subbase granular o directamente sobre la subrasante (Montejo Fonseca, 2002).

2.2.1. PAVIMENTOS EN ECUADOR

El estado ecuatoriano se incluye en el reto de implementar proyectos viales que contemplen seguridad, protección y salud de la vida en general; por lo cual se ha emitido la Norma Ecuatoriana Vial, NEVI-12, elaborada y revisada por expertos en temas de ingeniería de caminos. Está constituida de políticas, regulaciones, planes, programas y proyectos para un correcto cumplimiento de estándares de calidad que deben ser consideradas por los constructores e ingenieros para el diseño o mantenimiento de una nueva actividad vial (NEVI-12, 2013). La Tabla 3 señala el contenido de la NEVI-12 y la temática específica según cada volumen.

Tabla 3

Contenido de volúmenes de la NEVI-12

| Volumen | Contenido | Alcance |
|--------------|---|--|
| Volumen 1 | Procedimientos para proyectos viales | Enfoques y metodología para el desarrollo de proyectos viales |
| Volumen 2A-B | Norma para estudios y diseños viales | Principios normativos para estudios viales |
| Volumen 3 | Especificaciones generales para construcción de caminos y puentes | Especificaciones técnicas regulatorias para la construcción de caminos y puentes |
| Volumen 4 | Estudios y criterios ambientales para proyectos viales | Marco legal regulatorio específico para estudios ambientales viales |
| Volumen 5 | Procedimientos de operación y seguridad vial | Normativa y especificación para seguridad y operación vial |
| Volumen 6 | Operaciones de mantenimiento vial | Normativa y especificación para el mantenimiento vial |

Fuente: NEVI-12 (2013)

El volumen 3 de la NEVI-12 establece procesos aplicables y propiedades para los materiales requeridos en los diferentes trabajos viales, los cuales van a ser utilizados en el presente trabajo de titulación para el diseño de mezclas de hormigón para pavimento.

2.2.2. PAVIMENTOS DE HORMIGÓN

Los pavimentos y bases de hormigón se encuentran expuestos a cargas de tránsito y otros factores que tienden a destruirlo, por lo cual es necesario un tratamiento especial al realizar el diseño de mezclas y a los procedimientos de colocación del mismo (Sánchez, 2001).

La NEVI-12 contempla la utilización de hormigón como material para pavimento; considera a las normas técnicas INEN 1855-1 (2001) y INEN 1855-2 (2002): “Hormigones: Hormigón preparado en obra. Requisitos” para el diseño, calidad de componentes, ensayos de caracterización y aplicación del hormigón en obras viales. Adicionalmente establece una dirección para la aplicación de los distintos tipos de hormigón en las distintas obras ingenieriles (incluidos los pavimentos) tomando en cuenta especificaciones y características puntuales en el hormigón.

La Tabla 4 presenta clases, usos y especificaciones para hormigones. Ésta señala, para el caso de pavimentos, un valor mínimo de resistencia a flexión en el hormigón, también conocido como módulo de rotura; el diseño de las mezclas se toma como principal especificación este parámetro (Neville, 2013). El diseño de hormigón que presente un módulo de rotura mayor a 4 MPa a 28 días de edad, desde su implantación, se considera adecuado para el uso en pavimentos rígidos, valor propuesto en el presente proyecto de titulación.

Tabla 4*Clase, uso y especificaciones del hormigón*

| Clase | Tipo de Hormigón | Resistencia a compresión MPa | Resistencia a tracción por flexión MPa | Uso General |
|-------|--|------------------------------|--|--|
| A | Estructura Especial | >35 | - | Obras de gran envergadura. Losa superior de alcantarillas de tráfico directo. Elementos prefabricados. Tanques y reservorios |
| B | Estructural | 21-35 | - | Losas, vigas, viguetas, columnas, nervaduras de acero, alcantarillas de cajón, estribos, muros, zapatas armadas |
| C | Para elementos trabajando a tracción | - | >4.0 | Pavimentos rígidos, tanques y reservorios cilíndricos o cónicos |
| D | Para compactar con rodillo o con pavimentadora | - | >4.0 | Pavimentos, presas de gravedad |
| E | No estructural | 18-21 | - | Zapatas sin armar, replantillos, bordillos, contrapisos |
| F | Ciclópeo | >14 | - | Muros, estribos y plintos no estructurales |
| G | Relleno fluido | 0.5-8 | - | Rellenos para nivelación, bases de pavimentos, rellenos de zanjas y excavaciones |

Fuente: NEVI-12: Volumen 3 (2013)

2.3. HORMIGÓN PERMEABLE

Un pavimento de hormigón correctamente diseñado e implantado, resistirá las cargas contempladas y las condiciones de la zona donde se colocará, durante un período de tiempo con mantenimiento mínimo y reparación. Los procedimientos de diseños y construcción de pavimentos han evolucionado con la experiencia, se busca que menoren los casos de deterioro que puedan presentarse; la acción que el agua lluvia, o cualquier otra fuente, tiene en un pavimento es sumamente relevante en el desarrollo de un tipo de pavimento (MTO, 2012). Para suplir posibles casos de deterioro por el agua o para solucionar diversas problemáticas

ambientales y ecológicas se considera el concepto de hormigón permeable como material para pavimentos rígido.

De acuerdo al reporte del comité del ACI 522R (2010) el hormigón permeable usualmente consiste en cemento Portland normal, agregado grueso de tamaño uniforme, baja o nula cantidad de agregado fino, agua y otros elementos que permitan la correcta adherencia de todos los puntos del agregado grueso. La Figura 3 indica un losa de hormigón permeable de un diseño con agregado grueso de distribución No. 67; se aprecia el resultado final, aspecto físico, de la implantación de hormigón permeable como pavimento.



Figura 3. Losa de hormigón permeable

Elaborado por: Ricardo Chango

La mezcla de hormigón permeable tiene, por lo general, espacios interconectados entre su agregado grueso de 1 a 5 milímetros aproximadamente; consecuentemente el porcentaje de contenido de vacíos está en un rango de 20 a 35%, los cuales permiten el fácil paso de agua a través del hormigón endurecido. La Tabla 5 expone un resumen de las diferencias que tiene el hormigón permeable del hormigón convencional.

Tabla 5*Hormigón convencional y hormigón permeable*

| Características | Hormigón Convencional | Hormigón Permeable |
|--------------------------|---|--|
| Manejabilidad | Mediana | Baja |
| Colocación | Normal | Normal-Difícil |
| Compactación | Normal | Normal-Difícil |
| Control de juntas | Normal | Normal |
| Mantenimiento | Normal | Normal |
| Aplicaciones | Elementos estructurales, no estructurales, pavimentos | Elementos no estructurales, pavimentos |
| Permeabilidad | Baja | Alta |
| Contenido de vacíos | Bajo | Alto |
| Durabilidad* | Alta | Mediana |
| Costo | Mediano | Mediano |
| Resistencia a compresión | Todos los niveles | Baja - Mediana |
| Resistencia a flexión | Mediana | Baja - Mediana |
| Densidad | 2200-2400 kg/m ³ | 1680-2000 kg/m ³ |

Fuente: ACI 522R (2010)

2.3.1. AGREGADOS: GRUESO Y FINO

El reporte ACI 522R (2010) estipula que para el diseño de un hormigón permeable sus agregados, finos y gruesos, cumplan los requerimientos de las normas:

- ASTM D448 (2017): “Clasificación estándar para tamaños de agregado para construcción de carreteras y puentes” expone especificaciones granulométricas del agregado grueso para ser empleado en pavimentos de hormigón.
- ASTM C33/C33M (2018): “Especificación normalizada para agregados para concreto” presenta especificaciones granulométricas, valores máximos y mínimos para propiedades como módulo de finura, cantidad de material que pasa por el tamiz No. 200, porcentaje de terrones de arcilla y entre otros

parámetros para la utilización de agregados, finos y grueso, para ser empleado en mezclas de hormigón de todo tipo.

El informe del hormigón permeable recomienda, mediante análisis de diferentes diseños, la utilización de bajo o nulo porcentaje de agregado fino. Adicionalmente el ACI 522R (2010) estipula:

- Agregado Fino: La cantidad de agregado fino es limitada, ya que gran presencia de éste reduce el rango de fluidez del agua a través de la mezcla de hormigón.
- Agregado grueso: Es recomendable que el tamaño de sus partículas tenga gradaciones entre 19 mm (3/4”) y 9.5 mm (3/8”), siendo aceptables los agregados redondeados o triturados; aparte de ello sus densidades pueden ser normales y ligeras.

La Figura 4 presenta los límites de porcentaje que pasa de cada tamiz, para cada tamaño de agregado, recomendados por la norma ASTM D448 (2017).

| Size Number | Nominal Size, Square Openings | Amounts Finer than Each Laboratory Sieve (Square Openings), mass percent | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|------------------------------------|--|----------------|---------------|----------------|---------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| | | 100-mm (4-in.) | 90-mm (3½-in.) | 75-mm (3-in.) | 63-mm (2½-in.) | 50-mm (2-in.) | 37.5-mm (1½-in.) | 25.0-mm (1-in.) | 19.0-mm (¾-in.) | 12.5-mm (½-in.) | 9.5-mm (¾-in.) | 4.75-mm (No. 4) | 2.36-mm (No. 8) | 1.18-mm (No. 16) | 300-µm (No. 50) | 150-µm (No. 100) |
| 1 | 90 to 37.5-mm (3½ to 1½-in.) | 100 | 90 to 100 | ... | 25 to 60 | ... | 0 to 15 | ... | 0 to 5 | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 2 | 63 to 37.5-mm (2½ to 1½-in.) | ... | ... | 100 | 90 to 100 | 35 to 70 | 0 to 15 | ... | 0 to 5 | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 24 | 63 to 19.0-mm (2½ to ¾-in.) | ... | ... | 100 | 90 to 100 | ... | 25 to 60 | ... | 0 to 10 | 0 to 5 | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 3 | 50 to 25.0-mm (2 to 1-in.) | ... | ... | ... | 100 | 90 to 100 | 35 to 70 | 0 to 15 | ... | 0 to 5 | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 357 | 50 to 4.75-mm (2-in. to No. 4) | ... | ... | ... | 100 | 95 to 100 | ... | 35 to 70 | ... | 10 to 30 | ... | 0 to 5 | ... | ... | ... | ... |
| 4 | 37.5 to 19.0-mm (1½ to ¾-in.) | ... | ... | ... | ... | 100 | 90 to 100 | 20 to 55 | 0 to 15 | ... | 0 to 5 | ... | ... | ... | ... | ... |
| 467 | 37.5 to 4.75-mm (1½-in. to No. 4) | ... | ... | ... | ... | 100 | 95 to 100 | ... | 35 to 70 | ... | 10 to 30 | 0 to 5 | ... | ... | ... | ... |
| 5 | 25.0 to 12.5-mm (1 to ½-in.) | ... | ... | ... | ... | ... | 100 | 90 to 100 | 20 to 55 | 0 to 10 | 0 to 5 | ... | ... | ... | ... | ... |
| 56 | 25.0 to 9.5-mm (1 to ¾-in.) | ... | ... | ... | ... | ... | 100 | 90 to 100 | 40 to 85 | 10 to 40 | 0 to 15 | 0 to 5 | ... | ... | ... | ... |
| 57 | 25.0 to 4.75-mm (1-in. to No. 4) | ... | ... | ... | ... | ... | 100 | 95 to 100 | ... | 25 to 60 | ... | 0 to 10 | 0 to 5 | ... | ... | ... |
| 6 | 19.0 to 9.5-mm (¾ to ¾-in.) | ... | ... | ... | ... | ... | ... | 100 | 90 to 100 | 20 to 55 | 0 to 15 | 0 to 5 | ... | ... | ... | ... |
| 67 | 19.0 to 4.75-mm (¾-in. to No. 4) | ... | ... | ... | ... | ... | ... | 100 | 90 to 100 | ... | 20 to 55 | 0 to 10 | 0 to 5 | ... | ... | ... |
| 68 | 19.0 to 2.36-mm (¾-in. to No. 8) | ... | ... | ... | ... | ... | ... | 100 | 90 to 100 | ... | 30 to 65 | 5 to 25 | 0 to 10 | 0 to 5 | ... | ... |
| 7 | 12.5 to 4.75-mm (½-in. to No. 4) | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | 100 | 90 to 100 | 40 to 70 | 0 to 15 | 0 to 5 | ... | ... | ... |
| 78 | 12.5 to 2.36-mm (½-in. to No. 8) | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | 100 | 90 to 100 | 40 to 75 | 5 to 25 | 0 to 10 | 0 to 5 | ... | ... |
| 8 | 9.5 to 2.36-mm (¾-in. to No. 8) | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | 100 | 85 to 100 | 10 to 30 | 0 to 10 | 0 to 5 | ... | ... |
| 89 | 9.5 to 1.18-mm (¾-in. to No. 16) | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | 100 | 90 to 100 | 20 to 55 | 5 to 30 | 0 to 10 | 0 to 5 | ... |
| 9 | 4.75 to 1.18-mm (No. 4 to No. 16) | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | 100 | 85 to 100 | 10 to 40 | 0 to 10 | 0 to 5 | ... |
| 10 | 4.75-mm (No. 4 to 0 ^a) | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | 100 | 85 to 100 | ... | ... | ... | 10 to 30 |

^a Screenings.

Figura 4. Límites granulométricos

Fuente: ASTM D448 (2017)

El presente proyecto de titulación contempla diseños con agregado fino y grueso procedente de diferentes minas de la provincia de Pichincha, las cuales son las más empleadas para la fabricación de hormigón premezclado en la provincia. La Tabla 6 presenta el nombre de cada mina y su respectiva ubicación.

Tabla 6

Procedencia de los agregados empleados en las mezclas de hormigón

| Mina | Ubicación | Material |
|--------------|--------------------------|--------------------|
| RIPCONCIV | Pifo | Ripio 19 mm y 9 mm |
| HOLCIM | Pifo | Ripio 19 mm y 9 mm |
| PÉREZ | San Antonio de Pichincha | Ripio 9 mm |
| GUAYLLABAMBA | Guayllabamba | Ripio 9 mm |
| CASTELLANOS | San Antonio de Pichincha | Arena |

Elaborado por: Ricardo Chango

2.3.2. MATERIALES CEMENTOSOS

Acorde al informe ACI 522R (2010), para el diseño de un hormigón altamente permeable se emplea usualmente cemento portland, que debe cumplir con las normas ASTM C150/C150M (2019); “Especificación estándar para cemento Portland”, ASTM C595/C595M (2019): “Especificación estándar para cementos hidráulicos mezclados” o ASTM C1157/1157M (2017): “Especificación de rendimiento estándar para cemento hidráulico”; se puede usar combinaciones con materiales cementosos suplementarios como cenizas volantes, escoria granulada de alto horno y humo de sílice, éstos deben cumplir con las normas ASTM C618, C989 y C1240 respectivamente. Se debe comprobar la compatibilidad de la mezcla con los materiales cementosos suplementarios para asegurar que las características y propiedades del hormigón permeable no han sido afectadas.

En el presente trabajo de investigación se obtendrá una mezcla de hormigón idónea para uso como pavimento; en el caso de carreteras se necesita que éstas sean lo más rápido posible transitadas, por lo que el hormigón debe alcanzar una

resistencia adecuada a temprana edad. Se empleará cemento hidráulico de alta resistencia inicial TIPO HE - MAGNO HE de UNACEM Ecuador, el cual cumple con la norma NTE INEN 2380 (2011) y la norma ASTM C1157 (2017). El cemento Magno HE puede tener aplicaciones en edificios, obras viales, estructuras de hormigón pre-esforzado y en prefabricados de hormigón.

2.3.3. AGUA

El ACI 522R (2010) expone que la calidad del agua para la elaboración de un hormigón permeable debe cumplir con los mismos requerimientos que aquella empleada en hormigones convencionales, esto es, agua potable y libre de agente perjudiciales para el hormigón o acero de refuerzo (en el caso que fuera combinado).

2.3.4. ADITIVOS

El presente proyecto de investigación contempla el diseño de un hormigón que requiere alta resistencia a flexión y compresión, por lo cual se utiliza baja relación agua-cemento (0.26 - 0.45). La escasez de agua en la mezcla produce una deficiencia en la trabajabilidad del hormigón; por lo que es necesaria la implementación de un aditivo reductor de agua que contemple una trabajabilidad deseable sin la necesidad de aumentar la relación a/c. Adicionalmente, es importante asegurar la correcta cohesión de los materiales a pesar de la baja cantidad de finos que posee la mezcla, por lo que se propone emplear un aditivo mineral que mejore la adhesión entre los agregados de la mezcla. En síntesis, se empleará un aditivo que permita el desarrollo de las características propias de un hormigón de alta permeabilidad, presentado en la Tabla 7.

Tabla 7*Aditivo empleado en los diseños de hormigón permeable*

| Nombre del aditivo | Descripción | Casa Comercial |
|--------------------|--|------------------|
| Viscomix MG-AC | Hiperplastificante, reductor de agua de alto rango | Admix Cia. Ltda. |

Elaborado por: Ricardo Chango

2.4. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL HORMIGÓN PERMEABLE

Son características del hormigón que se encuentran estrechamente relacionadas con los componentes antes expuestos (arena, ripio, material cementante, agua y aditivos) y con los procedimientos durante la mezcla; el adecuado entendimiento y correlación que éstas tienen con las propiedades mecánicas del hormigón brindan un producto de buena calidad.

**Figura 5.** Hormigón permeable

Elaborado por: Ricardo Chango

A continuación, se describe las características físicas del hormigón más relevantes; en gran parte, para la determinación de cada una de ellas es necesaria la ejecución de ensayos normados, los cuales se detallan en el capítulo 3.

2.4.1. TRABAJABILIDAD

Un hormigón se dice que es trabajable cuando se puede compactar con facilidad y tenga una suficiente resistencia a la segregación de sus componentes, adicionalmente se considera a la trabajabilidad como una propiedad física del hormigón que estipula la facilidad y homogeneidad con las cuales se puede mezclar, transportar, colocar, compactar y acabar (Neville, 2013).

Se puede considerar que la trabajabilidad de un hormigón se puede determinar por el asentamiento de la mezcla de hormigón en estado fresco en el Cono de Abrams; el ACI 211.1 (2002) expone diferentes valores de asentamiento para las distintas construcciones de hormigón, las cuales están presentadas en la Tabla 8.

Tabla 8

Revenimiento/ Asentamiento según tipo de construcción

| Tipo de Construcción | Revenimiento/Asentamiento (cm) | |
|---|--------------------------------|--------|
| | Máximo | Mínimo |
| Zapatas y muros de cimentación reforzadas | 8 | 2 |
| Zapatas simples, cajones y muros de subestructura | 8 | 2 |
| Vigas y muros reforzados | 10 | 2 |
| Columnas | 10 | 2 |
| Pavimentos y losas | 8 | 2 |
| Hormigón ciclópeo y masivo | 5 | 2 |

Fuente: ACI 211.1 (2002)

El presente proyecto de titulación contempla la elaboración de un pavimento de hormigón permeable por lo cual se puede considerar un asentamiento entre 2 a 8 centímetros para la mezcla.

2.4.2. DENSIDAD Y POROSIDAD

Es una característica física que se define como la unidad de masa que tiene la mezcla fresca en una unidad de volumen. La densidad de una mezcla de hormigón puede ser afectada por la densidad de sus agregados o por los espacios vacíos que tiene la mezcla de hormigón (Neville, 2013). El ACI 522R (2010) señala que el procedimiento para definir la densidad y cantidad de vacíos no se aplica con este tipo de hormigón por lo que se debe emplear la norma ASTM C1688/C1688M (2014): “Método de prueba estándar para la densidad y el contenido de vacíos de concreto permeable recién mezclado”. Una mezcla de hormigón permeable puede presentar valores de 1680 a 1920 kg/m³ de densidad, estos valores son característicos de un hormigón con gran cantidad de espacios vacíos.

La porosidad del hormigón se define como la cantidad porcentual de volumen de vacíos que tiene un cierto volumen de mezcla, se considera como una característica clave para la resistencia del mismo. La norma ASTM C1688/C1688M (2014) proporciona dos métodos para la medición de la porosidad del hormigón fresco. La porosidad depende de diferentes factores como el tamaño de los agregados, cantidad de pasta de la mezcla de hormigón y energía de compactación.

2.4.3. DURABILIDAD

Es una característica casi tan relevante como la resistencia mecánica del hormigón y se refiere a la funcionalidad que tiene el mismo a lo largo de su vida útil con respecto a las condiciones ambientales, exposición a altas temperaturas y contacto con agresivos componentes químicos (Neville, 2013). Adicionalmente la durabilidad del hormigón se sujeta a las características de los agregados, correctos procedimientos de curado y porcentaje de permeabilidad del hormigón.

2.4.4. PERMEABILIDAD

La permeabilidad es una característica física, determinada como la facilidad de paso de fluidos, tanto líquidos como gases, para ingresar y moverse a través del hormigón, se la puede relacionar con la cantidad de poros que posee el hormigón (Neville, 2013). El ACI 522R (2010) muestra un dato de permeabilidad de aproximadamente 0.14 a 1.22 cm/s para hormigón permeable. Ésta propiedad se cuantifica mediante la ejecución del ensayo de la norma ASTM C1701/C1701M (2017) o empleando un permeámetro de caída de flujo por gravedad. La Figura 6 presenta un permeámetro con el que es posible medir la permeabilidad del hormigón.

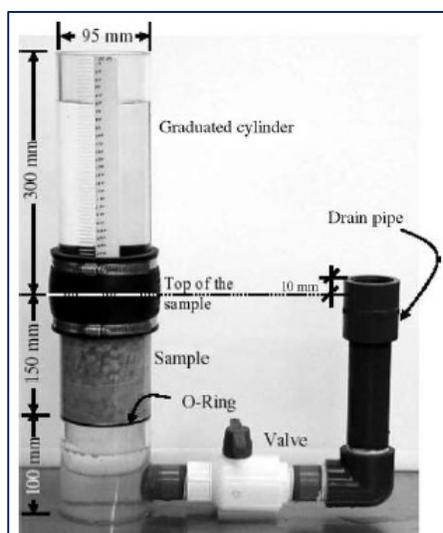


Figura 6. Permeámetro de caída libre

Fuente: ACI 522R (2010)

2.5. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DEL HORMIGÓN PERMEABLE

2.5.1. RESISTENCIA DEL HORMIGÓN

Se considera como la propiedad más importante, aunque en mucho de los casos son otras como la durabilidad, permeabilidad y estabilidad de volumen que presente. La resistencia está relacionada directamente con la cantidad, o simple presencia, de grietas, discontinuidades o poros en el hormigón endurecido; calidad de agregados y cemento son puntos adicionales a considerar en la resistencia de cualquier tipo de hormigón (Neville, 2013).

2.5.2. RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Es la característica más empleada como requisito para el diseño y construcción de obras de hormigón; se obtiene por medio de roturas de cilindros de hormigón hasta presentar una falla, a determinada edad y a una velocidad especificada de carga. Los resultados obtenidos de resistencia a compresión, dependen en gran mayoría del tamaño y forma de los especímenes sometido a prueba y de la manera en que son cargados (Mc Cormac & Brown, 2011).

La resistencia a compresión del hormigón permeable se la puede obtener de igual forma que un hormigón convencional, mediante ASTM C39/C39M (2018): "Método de ensayo normalizado para resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de concreto".

Según el ACI 522R (2010) la resistencia a compresión que presenta un hormigón permeable se encuentra directamente relacionada el contenido de aire en la mezcla; mientras más aumenta el contenido de aire, la resistencia a compresión simple baja. La Figura 7 representa la relación entre resistencia a compresión y contenido de la mezcla.

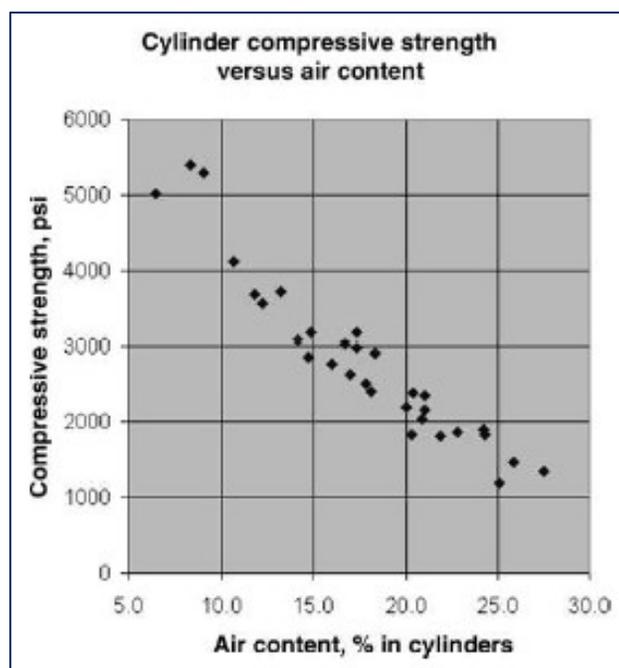


Figura 7. Relación resistencia a compresión-porcentaje de aire contenido

Fuente: ACI 522R (2010)

2.5.3. RESISTENCIA A FLEXIÓN

Según la ASTM C78 (2018): “Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la flexión del concreto (utilizando viga simple con carga en los tercios del claro)” la resistencia a flexión del hormigón es determinado empleando vigas con dimensiones específicas, las cuales se sujetan a flexión usando carga de dos puntos, espaciados a un tercio del claro libre, hasta que ocurra una falla. El esfuerzo a tensión máximo alcanzado por la viga es conocido como módulo de rotura (Neville, 2013).

Según el ACI 522R (2010) la resistencia a flexión en la viga de hormigón permeable depende de la cantidad de pasta que se utiliza en la mezcla, la dimensión de los agregados utilizados y la cantidad de espacios vacíos. Adicionalmente, Crouch et al (2006) propusieron una relación entre la resistencia a compresión y la resistencia

a flexión en el hormigón permeable, lo cual sirve de guía para el diseño. La relación es:

$$f_r = 0.083 f'_c{}^{\frac{2}{3}}, \text{ en unidades SI}$$

Donde:

f_r = Resistencia a flexión del hormigón permeable, MPa

f'_c = Resistencia a compresión de hormigón permeable, MPa

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

3.1. CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS

3.1.1. MUESTREO DE AGREGADOS

El procedimiento se lo realiza acorde a la norma ASTM D75/D75M (2019): “Práctica normativa para el muestreo de agregados”, la cual estipula la correcta obtención de muestras representativas, de agregado fino y grueso, con fines de aceptación del material para uso en diferentes ensayos de caracterización.

El muestreo se realizó de las reservas del material, el cual fue homogeneizado y desarrollado en un montón por un equipo mecánico para posteriormente ser sustraído de diferentes niveles y lugares hasta conformar una muestra de campo representativa. El procedimiento deberá ser efectuado para todos los agregados necesarios en las mezclas de hormigón. La Tabla 9 muestra los diferentes agregados muestreados.

Tabla 9

Agregados muestreados

| Identificación de la muestra | Masa de material muestreado | Mina de procedencia |
|------------------------------|-----------------------------|---------------------|
| Arena Coagregados | 25 kg | Castellanos |
| Ripconciv 67 | 25 kg | Ripconciv |
| Ripconciv 8 | 25 kg | Ripconciv |
| Holcim 67 | 25 kg | Holcim |
| Holcim 8 | 25 kg | Holcim |
| Perez 8 | 25 kg | Pérez |
| Guayllabamba 8 | 25 kg | Guayllabamba |

Elaborado por: Ricardo Chango

3.1.2. REDUCCIÓN DE MUESTRAS A TAMAÑO DE PRUEBAS

La reducción del tamaño de muestra se emplea para menorar la variación en las propiedades medidas entre las muestras de ensayo seleccionadas y así obtener una muestra representativa para la realización de diferentes ensayos. La norma ASTM C702/C702M (2018): “Práctica normativa para reducir las muestras de agregado a tamaño de prueba” presenta tres métodos para este proceso.

La presente investigación toma en cuenta el Método B para reducción de muestras, el cual consiste en el cuarteo del material. El método consiste en mezclar tres veces el material muestreado y colocarlo en forma de cono en una superficie dura, limpia y nivelada; se procede a aplanar el montón cónico hasta que tenga espesor y diámetro uniforme, se divide la masa aplanada en cuatro porciones de las cuales se toman dos opuestas entre sí para ser nuevamente cuarteadas. El proceso se lo realiza cuantas veces sea necesario para obtener como resultado la masa de muestra esperada para la realización del ensayo.

3.1.3. CONTENIDO TOTAL DE HUMEDAD EN AGREGADOS

El contenido de humedad excedente se lo puede definir como el exceso de agua en un estado saturado y con superficie seca de un agregado; característica relevante, junto a la capacidad de absorción de un agregado, al instante de calcular el agua de mezcla de cualquier diseño de hormigón (Neville, 2013). El procedimiento se lo realizará en base a la norma ASTM C566 (2019): “Método de ensayo para medir el contenido total de humedad en agregado mediante secado”. La Tabla 10 describe la masa en kilogramos la muestra necesaria para realizar el ensayo según su tamaño nominal máximo.

Tabla 10*Masa mínima para ensayo de humedad de agregados*

| Tamaño nominal máximo del agregado, mm | Masa mínima de la muestra de agregado de peso normal, kg |
|--|--|
| 4.75 (Arena) | 0.5 |
| 9.5 | 1.5 |
| 12.5 | 2 |
| 19.0 | 3 |
| 25.0 | 4 |
| 37.5 | 6 |
| 50 | 8 |
| 63 | 10 |
| 75 | 13 |
| 90 | 16 |
| 100 | 25 |
| 150 | 50 |

Fuente: ASTM C566 (2019)

Los equipos necesarios para la elaboración del ensayo son: báscula o balanza, fuente de calor (horno, parrilla eléctrica o a gas, horno microondas, etc.) y recipiente resistente al calor o fuego para la muestra. El ensayo se lo realiza de la siguiente manera:

- Se pesa la masa del agregado ya reducido a tamaño de muestra lo más cercano a 1.0 gramos.
- Se procede a secar la muestra en parrilla, horno u horno microondas cuidadosamente evitando pérdida de partículas. Se agita la muestra durante el secado.
- La muestra estará completamente seca cuando sea notable la no eliminación de vapor de agua de la misma.
- Se retira del secado y se procede a enfriar la muestra.
- Se pesa el material ya enfriado, con una aproximación de 1.0 gramos.

Para el cálculo de la humedad del material se emplea la siguiente ecuación:

$$\%w = \frac{100(W - D)}{D}$$

Donde:

%w= contenido total de humedad en la muestra, %

W= masa de la muestra original húmeda, g

D= masa de la muestra seca, g

3.1.4. GRANULOMETRÍA DE AGREGADOS FINOS Y GRUESOS

Se denomina granulometría a la separación de una muestra de material, fino o grueso, en porciones de aproximadamente el mismo tamaño y dentro de unos límites específicos o aberturas de tamices (Neville, 2013).

El resultado del análisis granulométrico se lo interpreta mediante gráficas granulométricas, las cuales se comparan entre las gráficas del material tamizado y curvas base según el probable tamaño nominal del agregado que se trate o emplee. Este análisis muestra si el material se ajusta a las especificaciones de uso que esté destinado a dársele, en este caso mezclas de hormigón. Brinda parámetros como tamaño máximo del material y módulo de finura, aspectos relevantes para el diseño de toda mezcla de hormigón (Neville, 2013).

Se ejecuta acorde a la norma ASTM C136/C136M (2019): "Método de ensayo normalizado para la determinación granulométrica de agregados finos y gruesos".

La norma establece la utilización de los siguientes equipos para la realización del ensayo: báscula o balanza (precisión de 0.1 gramos para agregado fino y 0.5 gramos para agregado grueso), juego de cribas o tamices, fuente de calor (horno, parrilla eléctrica o a gas, horno microondas, etc.) y recipiente resistente al calor o fuego para la muestra. El proceso es el descrito a continuación:

- Se reduce el material al tamaño de muestra con respecto a la Tabla 11.

Tabla 11

Tamaño de muestra para ensayo de granulometría

| Tamaño nominal máximo, mm | Tamaño de la muestra de ensayo mínima, kg |
|---------------------------|---|
| Arena | 0.3 |
| 9.5 | 1 |
| 12.5 | 2 |
| 19.0 | 5 |
| 25.0 | 10 |
| 37.5 | 15 |
| 50 | 20 |
| 63 | 35 |
| 75 | 60 |
| 90 | 100 |
| 100 | 150 |
| 150 | 300 |

Fuente: ASTM C136/C136M (2019)

- Secar el material a masa constante a una temperatura de 110 ± 5 °C.
- Seleccionar tamices con aberturas adecuadas para brindar la información necesaria con respecto al material procesado.
- Se coloca la muestra desde sección superior de la torre de tamices y agitar manualmente o con dispositivos mecánicos durante un tiempo suficiente.



Figura 8. Formación de tamices para ensayo granulométrico

Elaborado por: Ricardo Chango

- Finalizado el cribado principal, agitar manualmente cada tamiz con la mano hasta que no más del 1% del material retenido en uno de los tamices pase por ese tamiz durante un minuto de cribado manual.
- Determinar la masa retenida, de cada tamiz y de la bandeja del fondo.

Para la obtención del módulo de finura se suma los porcentajes retenidos acumulados de los tamices: No. 100, No. 50, No. 30, No. 16, No. 8, No. 4, 9.5 mm, 19 mm, 37.5 mm y mayores aumentos a razón de 2 a 1. La suma se la divide para 100.

$$MF = \frac{\sum \text{porcentaje retenido acumulados de tamices específicos}}{100}$$

3.1.5. MATERIAL MÁS FINOS QUE EL TAMIZ No. 200

El ensayo se lo emplea con la finalidad de verificar la cantidad de material fino que presenta un agregado. Gran cantidad de finos puede provocar excesiva pasta en una mezcla de hormigón, lo que conllevaría a pérdida de trabajabilidad, permeabilidad o disminución de espacios vacíos.

Se realiza en base a la norma ASTM C117 (2017): “Método de ensayo normalizado para materiales más finos que una criba No. 200 (75 μ m) en agregados minerales mediante lavado”,

Los equipos necesarios para el ensayo son: báscula o balanza (precisión de 0.1 gramos), tamiz No. 200 y No.16, horno y recipientes resistentes al calor o fuego para la muestra. El procedimiento se efectúa de la siguiente forma:

- Se reduce la muestra a tamaño de ensayo según lo estipulado en la Tabla 12.

Tabla 12

Tamaño de muestra para ensayo de material más fino que tamiz No. 200

| Dimensión nominal máximo, mm | Muestra de ensayo mínima, g |
|------------------------------|-----------------------------|
| 4.75 o inferior (arena) | 300 |
| 9.5 | 1000 |
| 19 | 2500 |
| 37.5 | 5000 |

Fuente: ASTM C117 (2017)

- Se seca la muestra a 110 \pm 5 °C. Posteriormente se deja enfriar al material y se pesa.
- Se coloca el material en un recipiente y se añade agua.

- Posteriormente se agita el recipiente con fuerza suficiente para separar todas las partículas finas (menores al tamiz No. 200) de las gruesas. El material fino queda en suspensión.
- Se vacía el agua con las partículas suspendidas en una formación del tamiz No. 200 (parte inferior) y el tamiz No. 16 (parte superior).
- Se repite la operación hasta obtener agua de lavado clara.
- Se devuelve todo el material retenido en los tamices al recipiente y se lo deja secar a 110 ± 5 °C. Se deja enfriar la muestra y posteriormente se pesa.

Para el cálculo de la cantidad de material más fino que el tamiz No. 200 de un agregado se emplea:

$$A = [(B - C)/B] \times 100$$

Donde:

A= material más fino que el tamiz No.200, %

B= masa seca original de la muestra, g

C= masa seca de la muestra después del lavado, g

3.1.6. DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA (PESO ESPECÍFICO) Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS GRUESOS

La norma ASTM C127 (2015): “Método de ensayo normalizado para determinar la densidad, densidad relativa (gravedad específica), y la absorción de agregado gruesos” será empleada para la obtención de las propiedades antes mencionadas.

Para la realización del ensayo es necesario el empleo de los siguientes equipos: báscula o balanza (precisión de 0.5 gramos), recipiente resistente al calor o fuego para la muestra, tanque con agua para sumergir el material, tamices No. 4 y No. 8, tela absorbente, recipiente anexo a la balanza para contener el material que se sumerge y horno. El procedimiento es el que se especifica a continuación:

- Se realiza un tamizado a través del tamiz No.4 y se emplea el material que se retiene, posteriormente se realiza un lavado del mismo para retirar polvo u otro recubrimiento. Si el agregado tiene gran cantidad de componentes que pasen por el tamiz No.4 se emplea el tamiz No. 8 para el tamizado inicial.
- Se reduce el material a tamaño de muestra para el ensayo de densidad y absorción según dicta la Tabla 13.

Tabla 13

Tamaño de muestra para obtención de densidad y absorción

| Tamaño máximo nominal, mm | Muestra de ensayo mínima, kg |
|---------------------------|------------------------------|
| 12.5 | 2.0 |
| 19 | 3.0 |
| 25 | 4.0 |
| 37.5 | 5.0 |
| 50 | 8.0 |
| 63 | 12.0 |
| 75 | 18.0 |
| 90 | 25.0 |
| 100 | 40.0 |
| 125 | 75.0 |

Fuente: ASTM C127 (2015)

- Se seca el material a 110 ± 5 °C, posteriormente se enfría a temperatura ambiente. Al instante el material pueda ser manipulado se sumerge la totalidad del mismo en agua a temperatura ambiente durante 24 horas ± 4 .

- Luego de la inmersión se seca las partículas con una tela absorbente o con una corriente de aire sin alterar la evaporación del agua de los poros del agregado. Cuando las partículas no presenten agua superficial (pierden el brillo de la humedad superficial), pesar el material para obtener la masa de la muestra en condición saturado superficialmente seco. Registrar el peso en aproximaciones más cercanas a 0.5 gramos.
- Para la obtención de la masa aparente en agua, que permitirá obtener el volumen de los sólidos, se sumerge el material en estado saturado superficialmente seco con ayuda del recipiente anexo a la balanza en el tanque con agua a 23 ± 2 °C. Se registra la masa sumergida a 0.5 gramos más cercanos.
- La masa seca del material resulta del secado de todo el material anteriormente utilizado a temperatura de 110 ± 5 °C.

Para el cálculo de la densidad relativa (OD) se emplea:

$$\text{Densidad relativa (OD)} = \frac{A}{(B - C)}$$

Para el cálculo de la densidad relativa (SSS) se emplea:

$$\text{Densidad relativa (SSS)} = \frac{B}{(B - C)}$$

Para el cálculo de la absorción se emplea:

$$\text{Absorción, \%} = \frac{(B - A)}{A} \times 100$$

Donde:

A= masa de la muestra de ensayo en condición de secado en el horno, g

B= masa de la muestra de ensayo en condición SSS, g

C= masa aparente de muestra sumergida en agua, g

Para el cálculo de las densidades se multiplica por un factor de conversión cualquier densidad relativa, de dicha manera:

$$\text{Densidad, } \frac{kg}{m^3} = 997.5 \times \text{Densidad relativa}$$

3.1.7. DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS FINOS

Para agregados finos se emplea la norma ASTM C128 (2015): “Método de ensayo normalizado para determinar la densidad, densidad relativa y la absorción de agregados finos”, los equipos a utilizarse son: báscula o balanza (precisión de 0.1 gramos), picnómetro con un volumen de 500 cm³ marcado, molde y compactador para ensayo de humedad superficial, horno y recipiente resistentes al calor. El procedimiento se describe como:

- Se seca una cantidad de aproximadamente 1000 gramos de material en horno a temperatura de 110±5 °C. Se deja enfriar, cuando el material sea cómodamente manipulable se lo sumerge con agua totalmente durante 24 horas ± 4 horas y se deja reposar.
- Luego del reposo del material, se retire el agua en exceso de la muestra. Se trasvasa el material a una superficie plana no absorbente y se deja secar con una corriente de aire tibio hasta que alcance su estado saturado superficialmente seco (SSS).

Procedimiento gravimétrico

- Se llena parcialmente de agua un picnómetro, se introduce 500 ± 10 gramos de agregado fino en estado SSS y se llena con agua aproximadamente hasta la totalidad de su capacidad.



Figura 9. Picnómetro, molde y compactador

Elaborado por: Ricardo Chango

- Se rueda, invierte y agita manualmente el picnómetro para así suprimir todas las burbujas de aire.
- Se agita mecánicamente mediante vibración externa hasta alcanzar una extracción de aire aceptable, se puede emplear una bomba de vacío.
- Se ajusta el picnómetro y su contenido a temperatura de 23 ± 2 °C y se lleva el nivel de agua a su capacidad calibrada. Se pesa la masa del picnómetro, agua y agregado en aproximación de 0.1 gramos.
- Se retira el agregado fino del picnómetro y se seca a 110 ± 5 °C en horno, se deja enfriar y se determina la masa del agregado fino seco.
- Se determina la masa del picnómetro lleno a su capacidad calibrada con agua a 23 ± 2 °C.

Se determina la densidad relativa (OD) de la siguiente manera:

$$\text{Densidad relativa (OD)} = \frac{A}{B + S - C}$$

Se determina la densidad relativa (SSS) de la siguiente manera:

$$\text{Densidad relativa (SSS)} = \frac{S}{B + S - C}$$

Se determina la absorción de la siguiente manera:

$$\text{Absorción, \%} = 100 \times \frac{S - A}{A}$$

Donde:

A= masa de la muestra de ensayo en condición de secado en el horno, g

B= masa del picnómetro lleno de agua hasta la marca de calibración, g

C= masa del picnómetro llenado con el espécimen y agua hasta la marca de calibración, g

S= masa de la muestra en condición SSS.

Para el cálculo de las densidades se multiplica por un factor de conversión cualquier densidad relativa, de dicha manera:

$$\text{Densidad, } \frac{kg}{m^3} = 997.5 \times \text{Densidad relativa}$$

3.1.8. IMPUREZAS ORGÁNICAS EN AGREGADOS FINOS

La presencia de impurezas orgánicas se emplea para la aceptación o rechazo de materiales, según la ASTM C33/C33M (2018) el material fino no debe contener cantidades perjudiciales de impurezas orgánicas.

Para determinar impurezas orgánicas del material fino se emplea la norma ASTM C40/C40M (2020): “Método de prueba estándar para impurezas orgánicas en agregados finos para concreto”.

Se emplean los siguientes equipos para el ensayo: botella de vidrio de 240 a 740 mililitros de capacidad y estándares de color. El procedimiento para la realización del ensayo es:

- Se pesa aproximadamente 450 gramos de muestra de agregado fino.
- Se llenar una botella de vidrio (graduada y normada) al nivel de 130 mililitros aproximadamente con la muestra de material fino.
- Se agrega la solución de hidróxido de sodio hasta que el volumen del material y el líquido, después de agitarse, sea 200 mililitros aproximadamente.
- Tapar la botella, agitar vigorosamente y dejar reposar durante 24 horas.
- Pasada las 24 horas se compara el color de la solución con colores de referencia y se estima la presencia de contenido de impurezas orgánicas.

Existe dos escalas de color para la comparación con el color de la solución con la muestra de hormigón, los cuales presentan valores mostrados en la Tabla 14.

Tabla 14*Escala de colores, impurezas inorgánicas en agregado fino*

| Color Gardner No. | Placa orgánica No. |
|-------------------|--------------------|
| 5 | 1 |
| 8 | 2 |
| 11 | 3 (referencia) |
| 14 | 4 |
| 16 | 5 |

Fuente: ASTM C40/C40M (2020)

Cuando la muestra de agregado fino sometido a este ensayo produzca un color más oscuro que el color de referencia, o placa orgánica No. 3 se considera que el material ensayado posiblemente contenga impurezas inorgánicas perjudiciales (ASTM C40/C40M, 2020).

3.1.9. DENSIDAD APARENTE EN AGREGADOS

La densidad aparente de un agregado, fino o grueso, es la cantidad de una unidad de volumen correspondiente al agregado total, se incluye el volumen de las partículas individuales y el volumen de los vacíos entre las partículas (ASTM C125, 2020). Depende del grado de compactación que el agregado presente y de las formas y tamaños de sus partículas (Neville, 2013).

Para la medición de esta propiedad, la norma ASTM C29/C29M (2017): "Método de prueba estándar para la densidad aparente ("peso unitario") y vacíos en el agregado" expone un procedimiento adecuado para agregado fino y grueso.

Se emplea: báscula o balanza (0.5 gramos de precisión), moldes para contención del material, varilla de compactación, horno y cuchara para acarreo de material.



Figura 10. Molde para ensayo de densidad aparente

Elaborado por: Ricardo Chango

El procedimiento se detalla a continuación:

- Se seca la muestra de agregado hasta resultar una masa constante, se aconseja secado en horno a 110 ± 5 °C.
- Se elige el molde adecuado dependiendo del tamaño nominal máximo del agregado a ensayarse. La Tabla 15 muestra la capacidad que debe tener el molde a ser utilizado en el ensayo.

Tabla 15

Capacidad del molde para ensayo de densidad aparente

| Tamaño máximo nominal, mm | Capacidad del molde en m ³ |
|---------------------------|---------------------------------------|
| 12.5 | 0.0028 |
| 25.0 | 0.0093 |
| 37.5 | 0.014 |
| 75.0 | 0.028 |
| 100.0 | 0.070 |
| 125.0 | 0.1 |

Fuente: ASTM C29/C29M (2017)

- Se llena la tercera parte del molde y se compacta con 25 golpes de varilla de compactación los cuales se distribuyen de manera uniforme en toda la superficie.
- Se llena el tercio siguiente y se realiza la misma ejecución anteriormente mencionada.
- Finalmente se llena el molde a rebosar, se compacta de la forma antes indicada.
- Se nivela la superficie del molde con los dedos o con una regleta.
- Se determina la masa del molde y la masa del molde más agregado. Se registra los resultados a 0.05 kilogramos.

Se calcula la densidad aparente de la siguiente manera:

$$\text{Masa unitaria, } \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \frac{G - T}{V}$$

Donde:

G= Masa del molde más el agregado, kg

T= Masa del molde, kg

V= Volumen del molde, m³

3.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL HORMIGÓN PERMEABLE

3.2.1. TEMPERATURA DEL HORMIGÓN RECIÉN MEZCLADO

Se ha comprobado que la temperatura de la mezcla influye en las propiedades del hormigón endurecido; la norma NTE INEN 1855-1 (2001), contempla que, para zonas geográficas tropicales, como Ecuador, el hormigón suministrado debe

entregarse a temperatura menores a 32 °C. La medición de temperatura del hormigón fresco se realiza en base a la ASTM C1064/C1064M (ASTM C1064/C1064M, 2017): “Método estándar de temperatura de concreto de cemento hidráulico recién mezclado”.

Se emplea los siguientes equipos: contenedor de la muestra de hormigón, dispositivos de medición (precisión 0.5 °C) y cuchara para acarreo de hormigón.

El procedimiento se debe realizar es el siguiente:

- En la muestra de hormigón fresco se ubica el dispositivo de medición de temperatura con el extremo sensible inmerso mínimo 75 mm dentro de la muestra.
- Se cierra el hueco, dejado por la colocación del dispositivo, mediante suave presión del hormigón a su alrededor.
- Se mantiene el dispositivo, mínimo dos minutos y máximo cinco minutos.
- Se toma el resultado de temperatura del hormigón y se registra a 0.5 °C más cercano.

3.2.2. ASENTAMIENTO DEL HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO

El asentamiento es una característica que puede considerarse para cualificar la trabajabilidad del hormigón, para la sollicitación de hormigón premezclado en construcciones éste es uno de los parámetros principales ya que facilita o dificulta la colocación del material en las diferentes estructuras. Se tiene valores máximos y mínimos para cada construcción, lo cual se evidencia en la Tabla 8.

Para el ensayo de asentamiento se emplea la norma ASTM C143/C143M (2015): “Método de ensayo normalizado para asentamiento de concreto de cemento hidráulico”. Se emplea: cono de Abrams y su base, varilla de compactación, dispositivo de medición y pala, su procedimiento se describe a continuación.



Figura 11. Cono Abrams

Elaborado por: Ricardo Chango

- Se realiza un humedecimiento del cono de Abrams y su base. Se mantiene firme el cono en su base.
- Se llena el cono de Abrams de hormigón, previamente muestreado y mezclado, en tres porciones de igual volumen.
- Luego de cada capa se compacta 25 veces mediante varillado el hormigón, se realiza el procedimiento de forma circular hacia el centro.
- Realizado el proceso en las tres capas se procede a alisar la superficie mediante regleado y rolado de la varilla compactadora.
- Se limpia los lados del cono y las superficies cercanas.
- Finalmente se levanta el cono a una distancia de 30 milímetros en 5 ± 2 segundos en forma continua y con firmeza hacia arriba y sin movimientos laterales o torsión. Se coloca el cono junto al material ensayado para poder tomar la lectura del asentamiento.
- Se mide la distancia vertical entre el borde superior del cono, proyectado horizontalmente por la varilla de compactación, y la posición desplazada del centro original de la superficie del material ensayado. Se registra el valor de asentamiento a 5 milímetros de aproximación.

3.2.3. DENSIDAD Y CONTENIDO DE VACÍOS DEL HORMIGÓN PERMEABLE

Para la obtención de este parámetro la ASTM presenta una norma específica para este tipo de hormigón (hormigón permeable). La norma ASTM C1688/C1688M (2014): “Método de prueba estándar para la densidad y el contenido vacío de concreto permeable recién mezclado” propone un procedimiento estandarizado para la obtención de la densidad y contenidos de vacíos, el cual se explica a continuación.

Para la elaboración del ensayo se emplea: martillo Proctor estándar o un martillo Marshall, un recipiente de capacidad de 7 ± 0.6 litros, una placa de metal rectangular y cuchara para acarreo de hormigón.

- Se pesa el recipiente vacío.
- Se sitúa el recipiente, previamente humedecido, en una superficie plana y libre de vibraciones.
- Se coloca el hormigón permeable, de manera uniforme, en el recipiente en dos capas de igual volumen.
- Para la consolidación del hormigón se lo puede realizar con el martillo Proctor estándar o con el martillo Marshall. Con el martillo Proctor se deja caer el martillo verticalmente 20 veces desde una altura de 305 milímetros. Con el martillo Marshall se deja caer 10 veces desde una altura de 457 milímetros.
- Terminada la consolidación nivelar la superficie del hormigón con la placa de metal cuadrada con movimientos de sierra.
- Se limpia el exceso de hormigón fuera del recipiente y se pesa la masa del hormigón con el recipiente, se emplea una presión de 50 gramos.

Se calcula la densidad de la siguiente manera:

$$D, \frac{kg}{m^3} = \frac{Mh - Mr}{Vr}$$

Donde:

Mh= Masa del recipiente con hormigón, g

Mr= Masa del recipiente, g

Vr= Volumen del recipiente, cm³

D= Densidad, g/cm³

Para el cálculo del contenido de vacíos (U) se necesita encontrar una relación entre la densidad calculada mediante la ejecución del método ASTM C1688 y la densidad teórica (T), obtenida de la dosificación teórica en peso para un metro cúbico, con los parámetros de los materiales empleados para la mezcla de hormigón. El contenido de vacíos se encuentra de la siguiente manera:

$$U, \text{ contenido de vacíos} = \frac{T - D}{T} \times 100$$

3.2.4. ESPECÍMENES DE ENSAYO DE HORMIGÓN RECIÉN MEZCLADO

Para el control y cumplimiento de especificaciones se realizan ensayos y controles cuando el hormigón se encuentra en estado endurecido. Para tal motivo es necesario la toma de especímenes del hormigón en estado fresco, éstas pruebas pueden ser analizadas a la edad que el profesional responsable crea necesario, o la edad que se necesite cumplir dentro de una especificación en particular (Neville, 2013).

Las pruebas más comunes para el análisis de hormigón son las pruebas de resistencia a compresión y a flexión.

La norma ASTM C31/C31M (2019): “Práctica estándar para preparación y curado de especímenes de ensayo de concreto en la obra” y la norma ASTM C192/C192M (2019): “Práctica estándar para elaborar y curar especímenes de concreto en el laboratorio” proponen ensayos para la obtención y curado de especímenes cilíndricos y prismáticos (vigas) de muestras representativas de hormigón en estado fresco.

Para especímenes cilíndricos se emplean moldes cuya longitud sea dos veces su diámetro; generalmente se emplean moldes de: 100 milímetros de diámetro y 200 milímetros de altura, 150 milímetros de diámetro y 300 milímetros de longitud. Adicionalmente, el diámetro debe ser mínimo tres veces el tamaño nominal máximo del agregado grueso.



Figura 12. Moldes cilíndricos para ensayos a compresión

Elaborado por: Ricardo Chango

Se consideran los siguientes parámetros para el moldeo de especímenes cilíndricos:

- Los métodos de compactación se los selecciona en base al asentamiento que presente la mezcla. La norma establece que para un hormigón con asentamiento menor a 25 milímetros se emplea únicamente vibrado para compactar el hormigón, cuando el asentamiento es mayor o igual a 25 milímetros se permite emplear vibración o varillado.
- En caso que sea varillado el método elegido, se aplica 25 golpes de varilla en cada capa de hormigón cuando el diámetro del espécimen es menor o igual a 150 milímetros. El diámetro de la varilla es de 10 ± 2 milímetros si el diámetro del molde es menor de 150 milímetros y 16 ± 2 milímetros para mayores a 150 milímetros.
- El número de capas de hormigón se considera dependiendo del diámetro del molde que se usará para la toma de especímenes. Se realizan dos capas de hormigón para moldes con 100 milímetros de diámetro y tres capas para moldes de 150 milímetros de diámetro. Las capas deben ser de igual altura.

El procedimiento de moldeo de especímenes cilíndricos se detalla a continuación:

- Se escoge el lugar donde se moldeará los especímenes, zona de superficie rígida a nivel, libre de vibración y lo más cercana posible al lugar de almacenamiento.
- Se prepara los moldes cilíndricos, aceitándolos o cubriéndolos con un material desmoldante con la finalidad de evitar daños en los especímenes al momento de la extracción del molde. Se distribuye el hormigón en el molde de manera uniforme en cada capa.
- Se realiza el proceso de compactación, sea vibrado o varillado. Se golpea de 10 a 15 veces con un mazo de goma en los lados exteriores del molde. Se emplea el mismo procedimiento en cada capa.
- En la capa final, se realiza un acabado nivelando la superficie superior con la varilla de compactación o con una llana.

Para especímenes de viga se emplean moldes de longitud al menos 50 milímetros más grande que tres veces la profundidad ensayada. La relación del ancho a la profundidad moldeada no debe exceder 1.5. La viga normalizada debe tener una sección transversal de 150 por 150 milímetros para un hormigón de agregado de tamaño nominal máximo de 50 milímetros. Generalmente se emplean moldes de 600 milímetros de largo, 150 milímetros de espesor y 150 milímetros de profundidad.



Figura 13. Moldes de viga para ensayo a flexión

Elaborado por: Ricardo Chango

En el procedimiento de moldeo de vigas se considera:

- Los métodos de compactación se selecciona en base al asentamiento que presente la mezcla al igual que el moldeo de especímenes cilíndricos.
- En caso que sea varillado el método empelado, se aplica un golpe de varilla por cada 14 cm² de la superficie superior de la viga en cada capa de hormigón. El diámetro de la varilla es de 10±2 milímetros si el ancho de la viga es menor de 150 milímetros y 16±2 milímetros para mayores a 150 milímetros.
- El número de capas de hormigón se considera dependiendo del ancho de la viga. Se realiza dos capas de hormigón para vigas de 150 a 200 milímetros de ancho y tres o más para vigas con más de 200 milímetros de ancho. Las capas deben ser de igual altura.

El procedimiento de moldeo de especímenes prismáticos se detalla a continuación:

- Se prepara los moldes de igual manera que con el moldeo de especímenes cilíndricos. El lugar donde se moldeará los especímenes deberá tener las mismas características que en el moldeo de cilindros.
- Se distribuye el hormigón en el molde de manera uniforme en cada capa.
- El proceso de compactación es similar al de moldeo de cilindros.
- En la capa final, se realiza un acabado nivelando la superficie superior con una llana para producir una superficie uniforme y plana.

Se toma en cuenta las siguientes consideraciones para curado de especímenes cilíndricos o vigas:

- Se mueve los especímenes al lugar de curado inicial para almacenamiento, se mantiene los cilindros por 48 horas en el sitio con un ambiente que mantenga la temperatura entre 16 y 27°C.
- Se realiza un curado final después de desmoldar los especímenes, se los traslada a tanques de almacenamiento de agua o cuartos húmedos con temperatura de 23 ± 2 °C y se los mantiene hasta el día de ensayo a compresión o flexión, para vigas se emplea agua saturada con hidróxido de calcio (cal).

Se realiza una identificación, sin alterar las caras o superficie del cilindro o viga, dependiendo de la información que sea relevante para el trabajo o ensayo.

3.2.5. ENSAYO DE PERMEABILIDAD EN HORMIGÓN PERMEABLE

El ensayo se lo realiza en base a la ASTM C1701/C1701M (2017); “Método de prueba estándar para la tasa de infiltración de hormigón permeable en el sitio”, el cual describe un procedimiento para obtener características del hormigón permeable endurecido y con ellas calcular la tasa de infiltración.

Se emplean los equipos y materiales siguientes: anillo de infiltración de PVC de diámetro interior 300 ± 10 milímetros, altura mínima de 50 milímetros, con dos marcas establecidas (100 y 150 milímetros de altura desde la superficie), sellante, agua potable, termómetro.

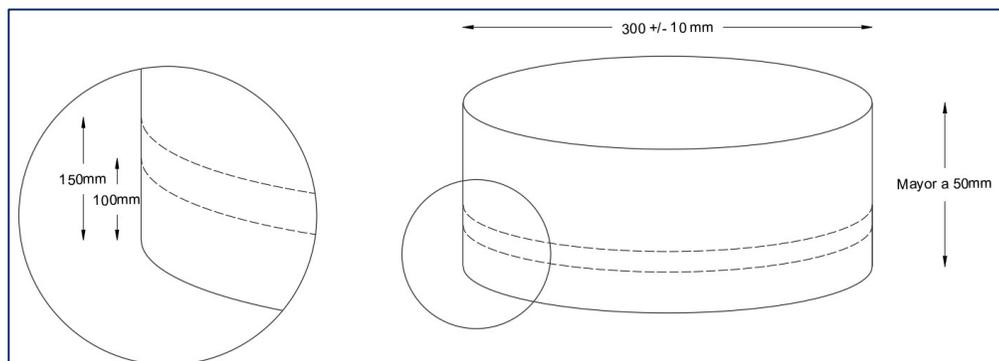


Figura 14. Anillo de infiltración

Elaborado por: Ricardo Chango

El procedimiento se describe a continuación:

- Instalación del anillo de filtración en una superficie de hormigón: Se limpia la superficie donde se colocará el anillo; asegurando con una masilla sellante, el anillo y la superficie del hormigón, evitando pérdidas de agua.

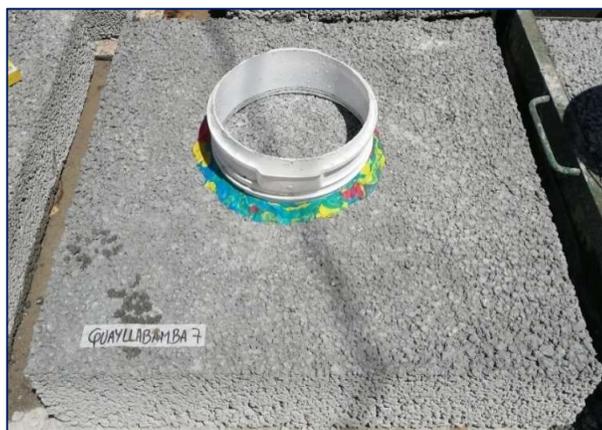


Figura 15. Implantación del anillo de infiltración

Elaborado por: Ricardo Chango

- Se realiza un humedecimiento inicial al hormigón permeable, colocando 3.6 kilogramos de agua aproximadamente dentro del anillo de filtración, con caudal necesario para mantener el nivel de agua entre las marcas ya establecidas. Se registra el tiempo, con precisión de 0.1 segundos, transcurrido desde que el agua impacta la superficie de hormigón hasta que no haya presencia de ella.

Si el tiempo de humedecimiento inicial es menor o igual a 30 segundos se empleará 3.6 kilogramos de agua, caso contrario se usará 18 kilogramos para el ensayo definitivo.

- El ensayo definitivo se realiza dos minutos después del humedecimiento inicial. Se deja caer el agua dentro del anillo de infiltración, manteniendo el nivel entre las dos marcas especificadas y se registra el tiempo, 0.1 segundos de precisión, desde que comienza a tocar el agua con el hormigón hasta el momento que no exista agua excedente en su superficie.

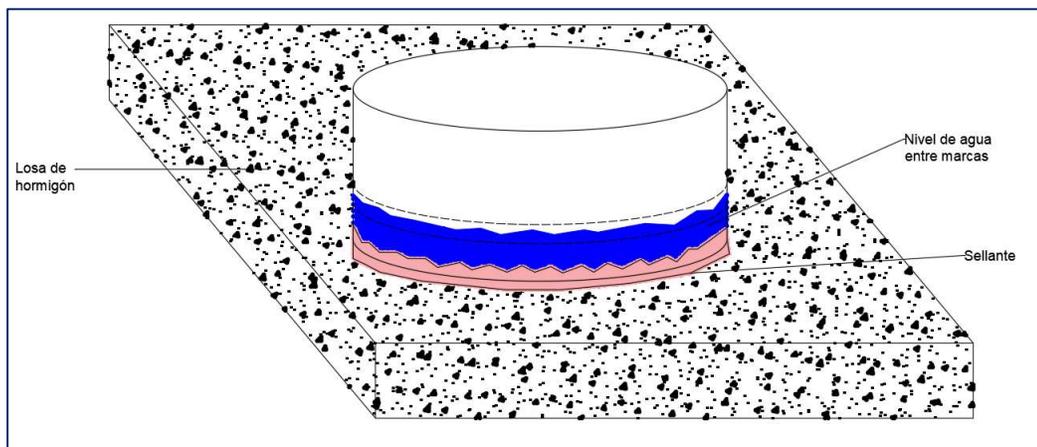


Figura 16. Representación del ensayo de permeabilidad de hormigón permeable

Elaborado por: Ricardo Chango

Se calcula la infiltración con la siguiente ecuación:

$$I = \frac{K \times M}{D^2 \times T}$$

Donde:

I= Infiltración, mm/h

K= constante, 45833666000 en SI

M= masa de agua infiltrada, kg

D= diámetro interior del anillo, mm

T= tiempo de infiltración, seg

3.3. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DEL HORMIGÓN PERMEABLE

3.3.1. ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Ésta propiedad se obtiene mediante parámetros obtenidos de la realización de la norma ASTM C39/C39M (2018), para lo cual se empleará una máquina de ensayo calibrada con capacidad suficiente y velocidades adecuadas para la realización del ensayo y sus componentes para medición de carga.

La tolerancia de tiempo, en edad del espécimen para la rotura, deberá obedecer a lo especificado a Tabla 16 para poder obtener resultados representativos.

Tabla 16*Tolerancia de tiempo para rotura de especímenes cilíndricos*

| Edad de ensayo | Tolerancia admisible |
|-----------------------|-----------------------------|
| 24 horas | ±0.5 horas |
| 3 días | ±2 horas |
| 7 días | ±6 horas |
| 28 días | ±20 horas |
| 90 días | ±2 días |

Fuente: ASTM C39/C39M (2018)

El ensayo se lo efectúa mediante el siguiente procedimiento:

- El espécimen debe ser ensayado tan pronto como sea posible, una vez sea retirado del almacenamiento húmedo.
- Se mide y comprueba que los diámetros de los especímenes a ensayarse no difieran en más del 2% entre sí. Se comprueba planicidad y perpendicularidad de los extremos de los especímenes, caso contrario se emplea los diferentes tipos de refrentado. La medición debe realizarse a la altura media del espécimen, se toman dos valores de diámetro perpendiculares entre sí con precisión de 0.25 milímetros. Si es necesario, datos de longitud (precisión 1 milímetros) y peso del cilindro se los toma.
- Se limpia los bloques de apoyo del espécimen y se alinea cuidadosamente en el centro de empuje del bloque de asiento de la máquina de ensayo. Si el refrentado es no adherido se coloca el espécimen en los anillos que contienen las almohadillas elastoméricas.
- Se verifica que el indicador de carga esté en cero y se realiza cuidadosamente un asentamiento del bloque en la parte superior del espécimen.



Figura 17. Colocación de probeta cilíndrica para ensayo a compresión

Elaborado por: Ricardo Chango

- Se aplica una velocidad de carga continua y sin impacto de 0.25 ± 0.05 MPa/s, en especial en la última fase de la carga esperada para la falla o anticipada.
- Se aplica la carga hasta que el ensayo presente el valor de carga máxima y se evidencie una fractura definida en el espécimen. La Figura 18 presenta los tipos de fractura en un espécimen de hormigón, la Figura 19 presenta una probeta, de hormigón permeable, ensayada a compresión con presencia de fractura.

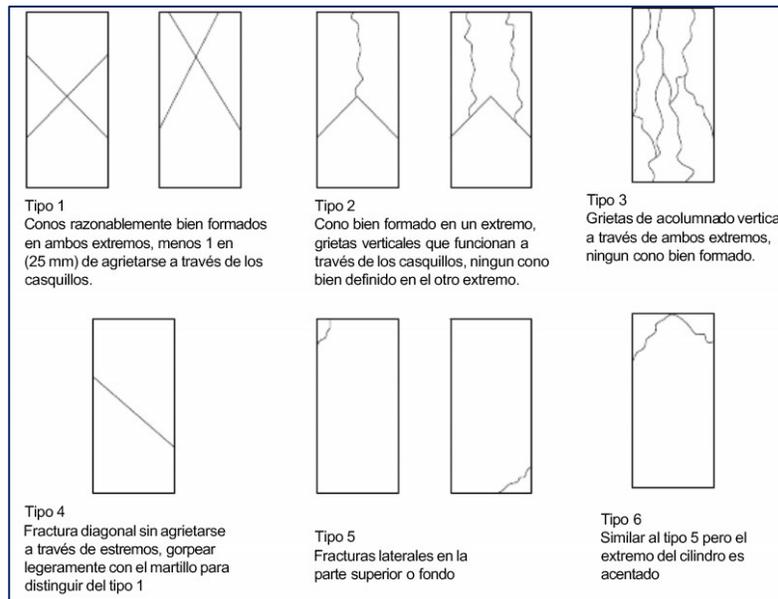


Figura 18. Tipos de fractura de especímenes cilíndricos

Fuente: ASTM C39/C39M (2018)

La resistencia a compresión se obtiene dividiendo la carga máxima del ensayo para el área del cilindro. El área del cilindro se calcula con el promedio de los diámetros medidos del espécimen.



Figura 19. Probeta cilíndrica ensayada

Elaborado por: Ricardo Chango

3.3.2. ENSAYO DE RESISTENCIA A FLEXIÓN

Ésta característica mecánica se la puede obtener por la aplicación de carga en los tercios del claro de una viga simple, acorde a la norma ASTM C78/C78M (2018). Se emplea:

- Máquina de ensayo calibrada, con la capacidad suficiente y ajuste de velocidad dependiendo del caso.
- Equipo de soporte del espécimen, se emplean portacojines que aseguren la perpendicularidad de las fuerzas de carga en los tercios del claro de la viga ($L/3$). Deben tener la capacidad de conservar su longitud especificada de claro y distancias constantes entre apoyos.

El ensayo se lo realiza de la forma indicada:

- Se retira del almacenamiento a la viga y se toman medidas de longitud, ancho y profundidad del espécimen. Se realizan marcas donde se apoyarán los portacojines y los tercios del claro de la viga.



Figura 20. Viga marcada tercios

Elaborado por: Ricardo Chango

- Se centra en los bloques de soporte que estarán ya colocados en los tercios del claro, se la rota sobre un lado respecto a la posición que se moldeó. Se realiza una aplicación de carga inicial de entre el 3 y 6% de la carga máxima

estimada, inmediatamente se comprueba planicidad entre los apoyos y el espécimen y se realiza refrentado si es necesario.



Figura 21. Colocación de probeta prismática para ensayo a flexión

Elaborado por: Ricardo Chango

- Se aplica la carga de manera continua y sin impacto, con velocidad constante hasta que la rotura se presente. La velocidad de carga se la calcula obedeciendo la expresión:

$$r = \frac{S \times b \times d^2}{L}$$

Donde:

r= velocidad de carga, MN/min

S= velocidad de incremento en tensión extrema de las fibras, MPa/min (0.86-1.21MPa/min)

b= promedio del ancho del espécimen, mm

d = promedio de profundidad del espécimen, mm

L = largo del claro, mm

- Después de la fractura, se toman medidas de ancho y profundidad en la zona de rotura. Para determinar la profundidad o ancho promedio se toma una medición en el borde superior, una en el borde inferior y una en el medio.

Para la obtención de la resistencia a flexión (MR) se consideran dos casos:

- Cuando la fractura inicia sobre la superficie en tensión dentro del tercio medio de la longitud del claro, se emplea:

$$MR = \frac{P \times L}{b \times d^2}$$



Figura 22. Viga fracturada en el tercio medio despues de ensayo a flexión

Elaborado por: Ricardo Chango

- Cuando la fractura se presenta sobre la superficie en tensión fuera del tercio medio de la longitud del claro por no más del 5% de la longitud del claro, se emplea:

$$MR = \frac{3P \times a}{b \times d^2}$$

Donde:

MR= módulo de rotura, MPa

P= máxima carga aplicada por la máquina de ensayos, N

L= longitud del claro, mm

b= ancho promedio del espécimen después de la fractura, mm

d= profundidad promedio del espécimen después de la fractura, mm

a= distancia entre la fisura y el apoyo más cercano, mm

Cuando la fractura se presenta sobre la superficie en tensión fuera del tercio medio de la longitud del claro por más del 5% de la longitud del claro se descarta el espécimen de ensayo.

3.4. DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN PERMEABLE

Éste procedimiento se realiza en base al reporte ACI 522R (2010), el cual brinda un procedimiento detallado para el cálculo de las cantidades de los materiales para la mezcla de hormigón. Un diseño de mezcla de hormigón contempla varios aspectos, entre ellos la heterogeneidad de los materiales empleados, por tal motivo se deben realizar varias pruebas para obtener un resultado óptimo, modificando procesos o cantidades según se presente la necesidad. A continuación, se detallan características fundamentales para la dosificación de un hormigón permeable.

3.4.1. RELACIÓN AGUA-CEMENTO

Como se mencionó anteriormente, la relación agua/cemento (a/c) es un aspecto sumamente relevante para resultar una resistencia deseada, sea a compresión o flexión; también contribuye a darle a la mezcla una trabajabilidad específica y morfología uniforme. Una elevada relación a/c minimiza la adhesión de los materiales y causa que la pasta llene los espacios vacíos, disminuyendo la permeabilidad del hormigón. La baja relación a/c afecta en la uniformidad de la mezcla produciendo un resultado no manejable.

Conforme se han realizado investigaciones con mezclas de hormigón permeable se ha comprobado que la relación agua/cemento de 0.25 a 0.45 provee una mezcla manejable y con adherencia óptima entre los materiales. Se ha comprobado también que la relación entre a/c y la resistencia a compresión no aplica en el hormigón permeable.

3.4.2. CONTENIDO DE VACÍOS

Ésta característica debe ser lo suficientemente alta como para que el agua pueda infiltrarse rápidamente; investigaciones confirman que porcentaje mayores la 15% de contenido de vacíos permiten una relevante filtración de agua a través del hormigón permeable, por lo que se toma este valor como base para definir a un hormigón con tales propiedades. La ASTM C1688/C1688 (2014) presentan el método por el cual se obtiene este valor. La Figura 23 presenta la relación que tiene la infiltración versus el contenido de vacíos en un hormigón permeable según el reporte ACI 522R (2010).

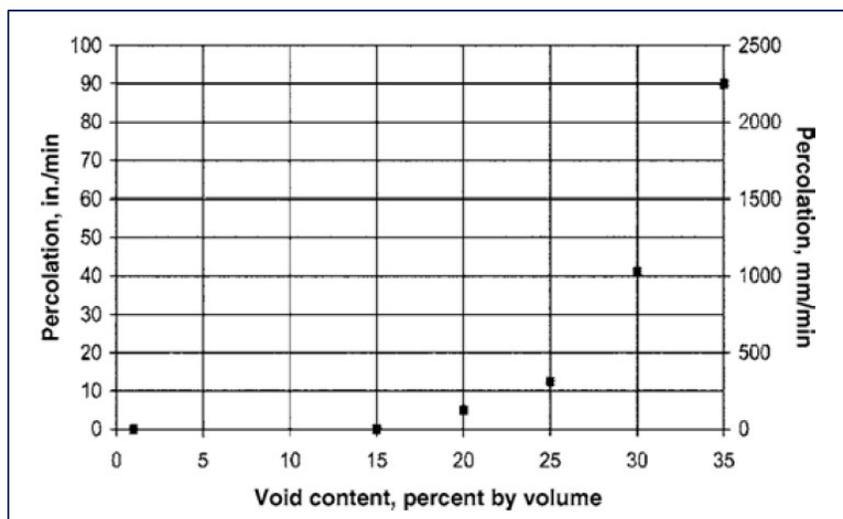


Figura 23. Infiltración vs Contenido de vacíos

Fuente: ACI 522R (2010)

3.4.3. CONTENIDO DE AGREGADO GRUESO

Para obtener la cantidad de agregado grueso el ACI 522R (2010) recomienda el empleo del peso unitario (densidad aparente) compactado por unidad de volumen de hormigón (b/b_o) del material grueso, esta propiedad puede ser efectiva para una correcta dosificación. El valor b/b_o es utilizada en por el método ACI 211.1 y fue introducida por Ricart y Talbot en 1921 y 1923 en Estados Unidos; compensa los efectos de los diferentes tamaños, gradaciones y pesos específico del hormigón (Sánchez, 2001). La expresión contempla:

b = Volumen absoluto o sólido del agregado grueso, por unidad de volumen de hormigón

b_o = Volumen absoluto o sólido del agregado grueso, por unidad de volumen compactada de agregado grueso

La expresión contempla distintas cantidades de agregado fino en la mezcla, o ninguna, y las gradaciones más comunes del agregado grueso para mezclas de

hormigón permeable, que son la distribución No. 8 y No. 67. La Tabla 17 facilita los valores recomendados por la ACI 522R (2010) para la relación b/b_o empleadas en la dosificación de hormigón permeable.

Tabla 17

Valores de relación b/b_o según porcentaje de agregado fino

| Porcentaje de agregado fino | b / b_o | |
|-----------------------------|--|---|
| | ASTM C33/C33M Agregado grueso distribución No. 8 | ASTM C33/C33M Agregado grueso distribución No. 67 |
| 0 | 0.99 | 0.99 |
| 10 | 0.93 | 0.93 |
| 20 | 0.85 | 0.86 |

Fuente: ACI 522R (2010)

La dosificación de mezclas de hormigón se corrige dependiendo de factores como la calidad del agregado grueso o fino, por lo que la dosificación se convierte en un trabajo de prueba y error para encontrar proporciones de materiales que generen un hormigón manejable y que cumpla con las especificaciones requeridas.

3.4.4. VOLUMEN DE AGUA Y CEMENTO

Los volúmenes de agua y cemento conforman el conocido volumen de pasta de una mezcla de hormigón, este componente interviene en propiedades como la buena adherencia entre materiales, porcentaje óptimo de contenido de vacíos, manejabilidad del hormigón acertada y correcta resistencia a flexión o compresión. El ACI 522R (2010) proporciona una correlación entre porcentaje de contenido de vacíos deseable de un hormigón permeable y el recomendable contenido de pasta en porcentaje de volumen para una mezcla de hormigón permeable, considerando compactación buena y compactación ligera del hormigón.

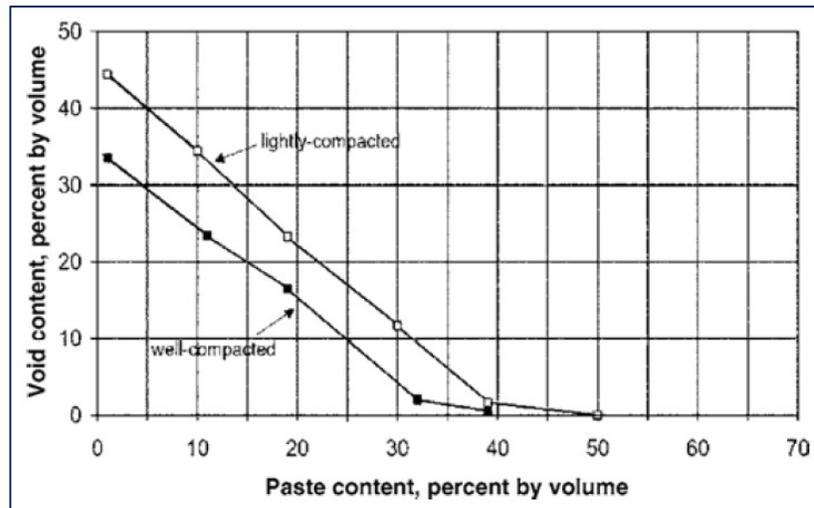


Figura 24. Contenido de vacíos vs Contenido de pasta (% de volumen)

Fuente: ACI 522R (2010)

Adicionalmente el reporte del ACI 522R (2010) resuelve la fórmula de volumen de pasta de un hormigón (V_p) para proporcionar el contenido (en kilogramos) de cemento y agua de la misma, considerando los valores, ya establecidos, de relación a/c y volumen de pasta.

$$V_p = V_c + V_a$$

Resolviendo la ecuación:

$$\text{Densidad relativa del cemento, } D_c = \left(\frac{M_c}{V_c} \right)$$

$$\text{Densidad relativa del agua, } D_a = \left(\frac{M_a}{V_a} \right)$$

Se multiplica por 997.5, densidad del agua a 23 °C, para transformar el valor de densidad relativa a densidad del material en kg/m^3 .

$$V_c = \left(\frac{M_c}{D_c \times 997.5} \right) \quad ; \quad V_a = \left(\frac{M_a}{D_a \times 997.5} \right)$$

Sabiendo que la densidad relativa del agua, $Da=1$:

$$Vp = \frac{Mc}{Dc \times 997.5} + \frac{Ma}{997.5}$$

Contemplando que:

$$\text{Relación } a/c = \frac{Ma}{Mc}$$

$$Ma = \text{Relación } a/c \times Mc$$

Se obtiene:

$$Vp = \frac{Mc}{Dc \times 997.5} + \frac{a/c}{997.5} \times Mc$$

$$Vp = \frac{Mc}{997.5} \left(\frac{1}{Dc} + a/c \right)$$

$$Mc, kg = \frac{Vp}{\left(\frac{1}{Dc} + a/c \right)} \times 997.5$$

Donde:

Vp = volumen de Pasta

Da = densidad relativa del agua

Ma = masa del agua, kg

Va = volumen de agua, m^3

Dc = densidad relativa del cemento

M_c = masa del cemento, kg

V_c = volumen del cemento, m³

a/c = relación agua-cemento

3.4.5. PROCEDIMIENTO DE DOSIFICACIÓN

El reporte del ACI 522R (2010) recomienda seguir el procedimiento que se describe a continuación, para la obtención de cantidades para mezclas de hormigón permeable.

3.4.5.1. Requisitos preliminares

Para la estimación de proporciones de una mezcla de hormigón permeable es necesario definir previamente, como mínimo, los siguientes aspectos:

Respecto al hormigón:

- Resistencia a flexión mínima
- Tipo de estructura a realizarse.
- Asentamiento máximo y mínimo del hormigón.
- Relación agua-cemento
- Densidad deseable
- Permeabilidad deseable
- Tamaño máximo del agregado grueso
- Contenido de agregado fino del total de la masa de agregado para la mezcla de hormigón

Para los agregados:

- Origen de los agregados
- Análisis granulométrico de agregado fino y grueso
- Tamaño máximo y tamaño nominal máximo del agregado grueso
- Densidad aparente compactada de material fino y grueso
- Capacidad de absorción de material fino y grueso
- Contenido natural de humedad de material fino y grueso
- Densidad aparente de agregado fino y grueso
- Contenido de finos y sustancias perjudiciales de agregado fino y grueso

Respecto al cemento:

- Densidad

3.4.5.2. Determinación del peso del agregado

Se determina el volumen seco y compactado de agregado grueso por volumen unitario de hormigón b/b_0 , acorde a la Tabla 17. Después se multiplica b/b_0 por la masa compactada del hormigón grueso y por un metro cúbico que es el volumen típico de diseño de mezclas, teniendo la siguiente expresión:

$$\text{Masa total del agregado, kg} = \frac{b}{b_0} \times \text{Masa unitaria (kg/m}^3\text{)} \times 1\text{m}^3$$

El porcentaje de agregado fino se lo considera del total de la masa de agregado, es decir agregado fino más agregado grueso; cuando no es cero, el volumen de pasta se reduce en 2% por cada 10% de agregado fino para buena compactación del hormigón y 1% por cada 10 % de agregado fino para compactación ligera del hormigón.

Por ende:

Masa agregado fino, kg

$$= \text{Masa total de agregado} \times \text{Porcentaje de agregado fino}$$

Masa agregado grueso, kg = Masa total de agregado – masa de agregado fino

3.4.5.3. Determinación de volumen de pasta

Éste se obtiene basándose de la Figura 24, tomando en cuenta la compactación del hormigón (buena o ligera) y el contenido de vacíos requerido para el hormigón. El valor de volumen de pasta (V_p) adquirido mediante la utilización de la Figura 24 representa el porcentaje de volumen, por lo cual dicho valor (V_p) se multiplica por el volumen de mezcla a diseñar.

3.4.5.4. Determinación de contenido de cemento

Establecida la relación agua-cemento (a/c), conociendo en valor de la densidad del cemento (D_c) y obtenido anteriormente de volumen de pasta (V_p), la cantidad de cemento, es decir la masa de cemento, se calcula de la fórmula antes presentada:

$$M_c, kg = \frac{V_p}{\left(\frac{1}{D_c} + a/c\right)} \times 997.5$$

3.4.5.5. Determinación de contenido de agua

Se obtiene sustituyendo los valores de masa de cemento (M_c) y relación agua-cemento (a/c) en la ecuación:

$$M_a, kg = \text{Relación } a/c \times M_c$$

3.4.5.6. Determinación de volumen sólido

Es la determinación de los volúmenes del agregado grueso, agregado fino, cemento y agua de la mezcla, lo cual se lo realiza siguiendo la ecuación:

$$\text{Volumen, m}^3 = \frac{\text{Masa del material}}{\text{Densidad aparente del material compactada} \times 997.5}$$

Se obtiene el volumen total de la mezcla sumando los volúmenes de cada material:

$$\text{Volumen total de la mezcla, m}^3 = V_{ag} + V_{af} + V_c + V_a$$

Donde:

V_{ag} = Volumen de agregado grueso, m^3

V_{af} = Volumen de agregado fino, m^3

V_c = Volumen de cemento, m^3

V_a = Volumen de agua, m^3

3.4.5.7. Comprobación de contenido de vacíos y porosidad

Éste debe tener similitud al contenido de vacíos establecido como dato preliminar, el contenido de vacíos de la mezcla se lo calcula mediante la expresión:

$$\begin{aligned} &\text{Contenido de vacíos, \%} \\ &= \frac{\text{Volumen total estimado}(\text{m}^3) - \text{Volumen total de la mezcla}(\text{m}^3)}{\text{Volumen total estimado}(\text{m}^3)} \end{aligned}$$

El volumen total estimado es un metro cúbico, el volumen de diseño de mezclas.

3.4.5.8. Proporciones de materiales en peso y densidad del hormigón permeable

Ya obtenidos los valores de masa de cada uno de los agregados (M_{af} , M_{ag} , M_c , M_a) se obtiene la masa total de la mezcla y se puede calcular el valor de densidad del hormigón permeable siguiendo la expresión:

$$\text{Masa total de la mezcla, kg} = M_{af} + M_{ag} + M_c + M_a$$

$$\text{Densidad del hormigón, kg/m}^3 = \frac{\text{Masa total de la mezcla (kg)}}{\text{Volumen total estimado (m}^3\text{)}}$$

Donde:

M_{ag} = Masa de agregado grueso, kg

M_{af} = Masa de agregado fino, kg

M_c = Masa de cemento, kg

M_a = Masa de agua, kg

3.4.5.9. Ajuste por contenido de humedad y absorción del agregado

Es necesario realizar una corrección a los agregados por su humedad y su capacidad de absorción, lo cual generará un aumento o disminución de masa de agregado y agua para amasado dependiendo de la saturación del agregado en su estado natural. Para la corrección de masa de cada agregado se rige a la expresión:

- Se determina los pesos húmedos de los agregados:

Masa de agregado húmedo, kg

$$= \text{Masa del agregado sin corregir} * \left(1 + \frac{\text{Humedad del agregado}}{100}\right)$$

- Se determina el agua a añadir, la cantidad de agua a corregir se la realiza a cada uno de los agregados considerando su humedad (%) y capacidad de absorción (%), se rige a la ecuación::

Masa de agua a añadir, kg

$$= \text{Masa de agua sin corregir} \\ - \text{masa de agregado seco} \left(\frac{\text{Humedad del agregado}}{100} \right. \\ \left. - \frac{\text{absorción del agregado}}{100} \right)$$

Finalmente, con las correcciones realizadas se tendrían las masas para realizar las mezclas de hormigón permeable para un metro cúbico.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS

Con la finalidad de la aceptación de un hormigón como pavimento, y adicionalmente de alta permeabilidad, es necesario el cumplimiento de requerimientos específicos en su totalidad y en sus componentes; el análisis de datos permitirá corroborar que todos, uno o ninguno de los diseños presentados cumplen con las características de un hormigón altamente permeable y apto para pavimentos.

4.1. RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS DE AGREGADOS

Mediante la utilización de diferentes materiales disponibles en la provincia de Pichincha, se desea proveer varias opciones de diseño del hormigón y no una solución aislada; tomando en cuenta factores como: economía, ubicación de la implantación de la estructura y diferentes necesidades o requerimientos del constructor. A continuación se presenta el resumen de la caracterización de los materiales empleados en los diferentes diseños, características mínimas requeridos por la NEVI-12 de agregados para utilización en pavimentos. Los agregados fueron muestreados la fecha 25 de febrero del 2020 por Ricardo Chango. El Anexo 2 presenta los resultados de los ensayos de caracterización del material pétreo con mayor detalle.

4.1.1. AGREGADO FINO

La arena procedente de la mina de Fucusucu 3 - Castellanos presenta propiedades óptimas para la realización de hormigón y cumple los requerimientos de la norma ASTM C33/C33M (2018) con respecto a la gradación de agregado fino; lo mencionado se refleja en la Figura 25 que presenta la curva granulométrica del agregado, la cual se presenta en los límites que sugiere la norma.

La Tabla 18 presenta la identificación del material fino y la Tabla 19 resume las propiedades, obtenidas por los ensayos normados en laboratorio, necesarias para el proceso de dosificación del hormigón permeable.

Tabla 18

Identificación arena C33 Fucusucu 3 – Castellanos

| | |
|--------------------------|--------------------------|
| Identificación: | Arena C33 |
| Nombre de la Cantera: | Fucusucu 3 - Castellanos |
| Ubicación de la cantera: | San Antonio de Pichincha |
| Fecha de muestreo: | 25/2/2020 |
| Muestreado por: | Ricardo Chango |

Elaborado por: Ricardo Chango

Tabla 19

Propiedades arena C33 Fucusucu - Castellanos

| Propiedad | Valor | Unidad |
|---|-------|--------------------|
| Módulo de finura: | 2,95 | - |
| Material más fino que el tamiz No. 200: | 8,49 | % |
| Absorción: | 5,06 | % |
| Densidad Relativa: | 2,46 | gr/cm ³ |
| Masa unitaria Suelta: | 1,54 | gr/cm ³ |
| Masa unitaria Compactada: | 1,69 | gr/cm ³ |
| Colorimetría | 1 | - |

Elaborado por: Ricardo Chango

La Figura 25 presenta la curva granulométrica resultante del análisis granulométrico del material fino, también presenta los límites que la ASTM C33/C33M (2018) establece para una arena apta para uso en hormigones.

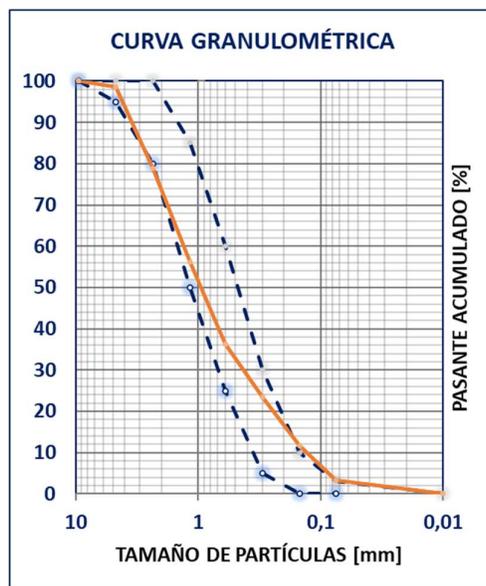


Figura 25. Curva granulométrica arena C33 Fucusucu – Castellanos

Elaborado por: Ricardo Chango

4.1.2. AGREGADO GRUESO

Se empleó agregado grueso, ripio, de las parroquias de Pifo, San Antonio de Pichincha y Guayllabamba para los diferentes diseños del hormigón altamente permeable, éstos lugares presentan las minas más empleadas para extracción de material pétreo para producción de hormigón. La elección de las distribuciones granulométricas de los agregados gruesos se la realizó tomando en cuenta las recomendaciones del ACI 522R (2010), ésta sugiere emplear material de distribución No. 89, No. 67, No. 8 y No. 7 según los parámetros de la norma ASTM C33/C33M (2018).

La Tabla 20 expone la identificación empleada para los diferentes agregados gruesos, distribución según el análisis granulométrico, la mina de procedencia y su ubicación.

Tabla 20

Agregados gruesos. Mina de procedencia, distribución, ubicación de la mina

| Identificación | Distribución | Mina de procedencia | Ubicación de la mina |
|-------------------|--------------|---------------------|--------------------------|
| Ripconciv No.67 | No. 67 | Ripconciv | Pifo |
| Ripconciv No.8 | No. 8 | Ripconciv | Pifo |
| Holcim No.67 | No. 67 | Holcim | Pifo |
| Holcim No.8 | No. 8 | Holcim | Pifo |
| Perez No.8 | No. 8 | Perez | San Antonio de Pichincha |
| Guayllabamba No.7 | No. 7 | Guayllabamba | Guayllabamba |

Elaborado por: Ricardo Chango

La Tabla 21 presenta cada agregado grueso y sus propiedades, obtenidas mediante ensayos normados de laboratorio, indispensables en el diseño de mezclas de hormigón permeable.

Tabla 21

Características agregado grueso

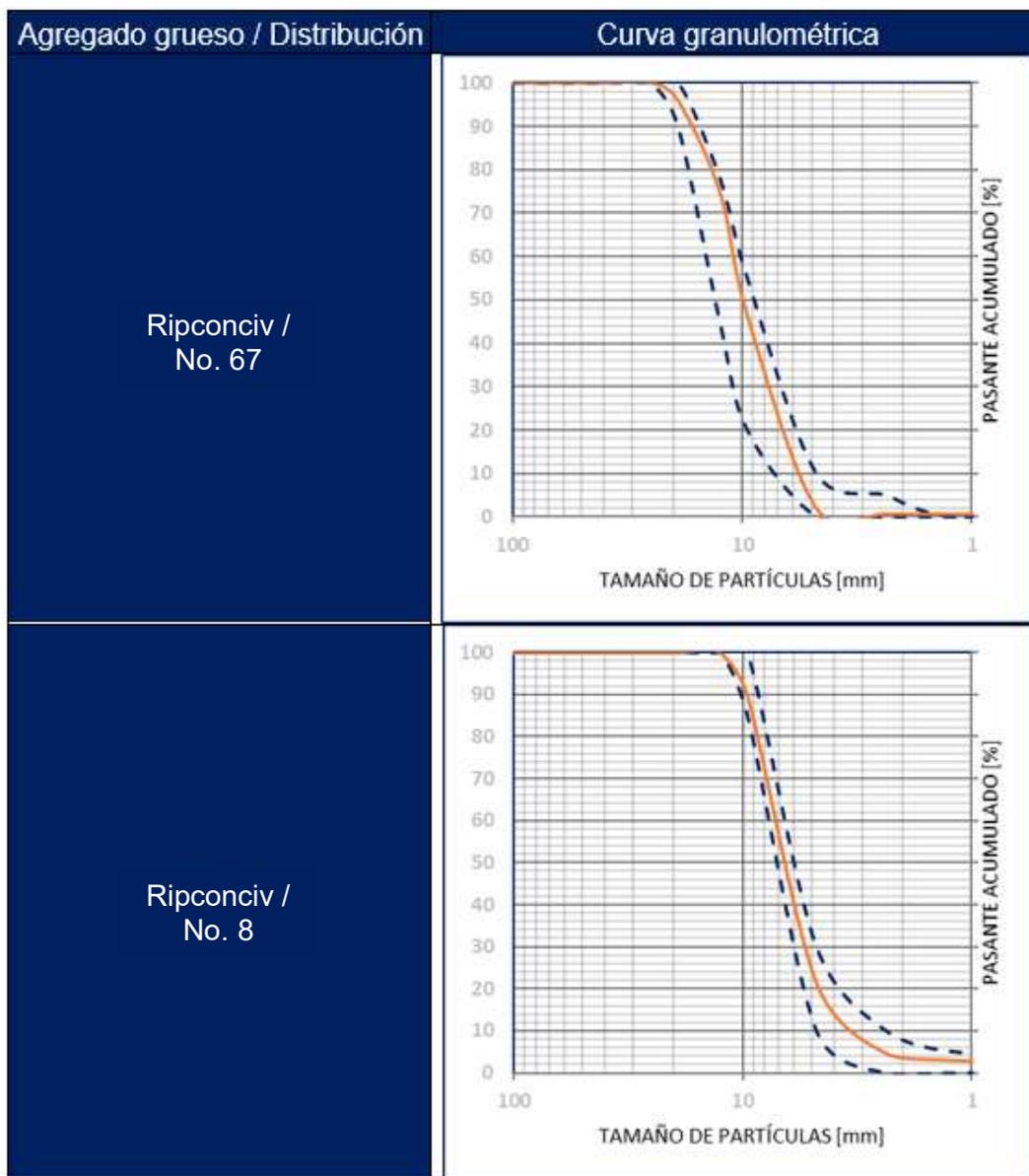
| Agregado grueso / Distribución | Módulo de finura | Material más fino que el tamiz No. 200 | Absorción | Densidad Relativa | Masa unitaria Compactada | Desgaste |
|--------------------------------|------------------|--|-----------|--------------------|--------------------------|----------|
| | - | % | % | gr/cm ³ | gr/cm ³ | % |
| Ripconciv / No. 67 | 6,53 | 0,67 | 2,28 | 2,467 | 1,503 | 21.0 |
| Ripconciv / No. 8 | 5,52 | 1,94 | 2,48 | 2,510 | 1,478 | 27.0 |
| Holcim / No. 67 | 6,68 | 1,09 | 3,48 | 2,348 | 1,538 | 22.0 |
| Holcim / No. 8 | 5,72 | 1,81 | 2,09 | 2,530 | 1,562 | 25.0 |
| Pérez / No. 8 | 5,63 | 1,75 | 3,68 | 2,444 | 1,480 | 41.0 |
| Guayllabamba / No. 7 | 6,10 | 1,58 | 1,91 | 2,517 | 1,546 | 21.0 |

Elaborado por: Ricardo Chango

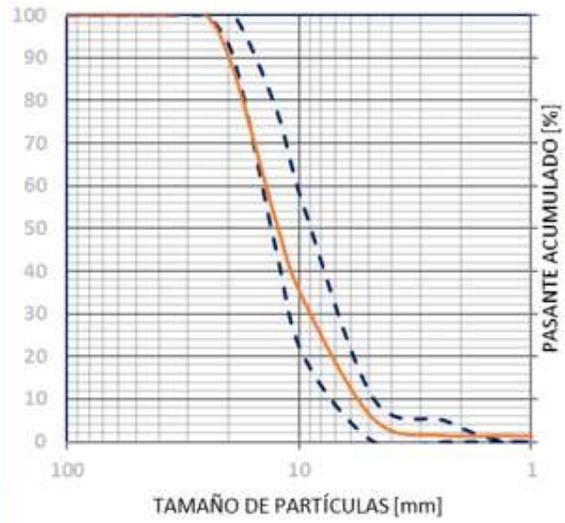
La Tabla 22 presenta las curvas granulométricas de los diferentes agregados gruesos, resultado del análisis granulométrico de cada uno de ellos; se aprecia que el material presenta curvas granulométricas que se encuentran dentro de los límites, para cada una de sus distribuciones, expuestos para la ASTM C33/C33M (2018).

Tabla 22

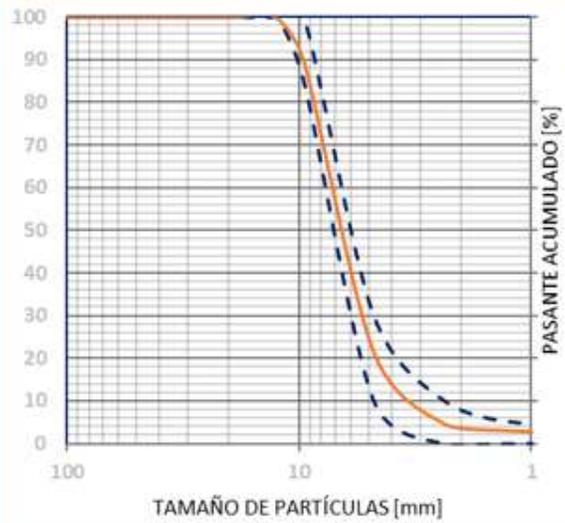
Curvas granulométricas agregados gruesos

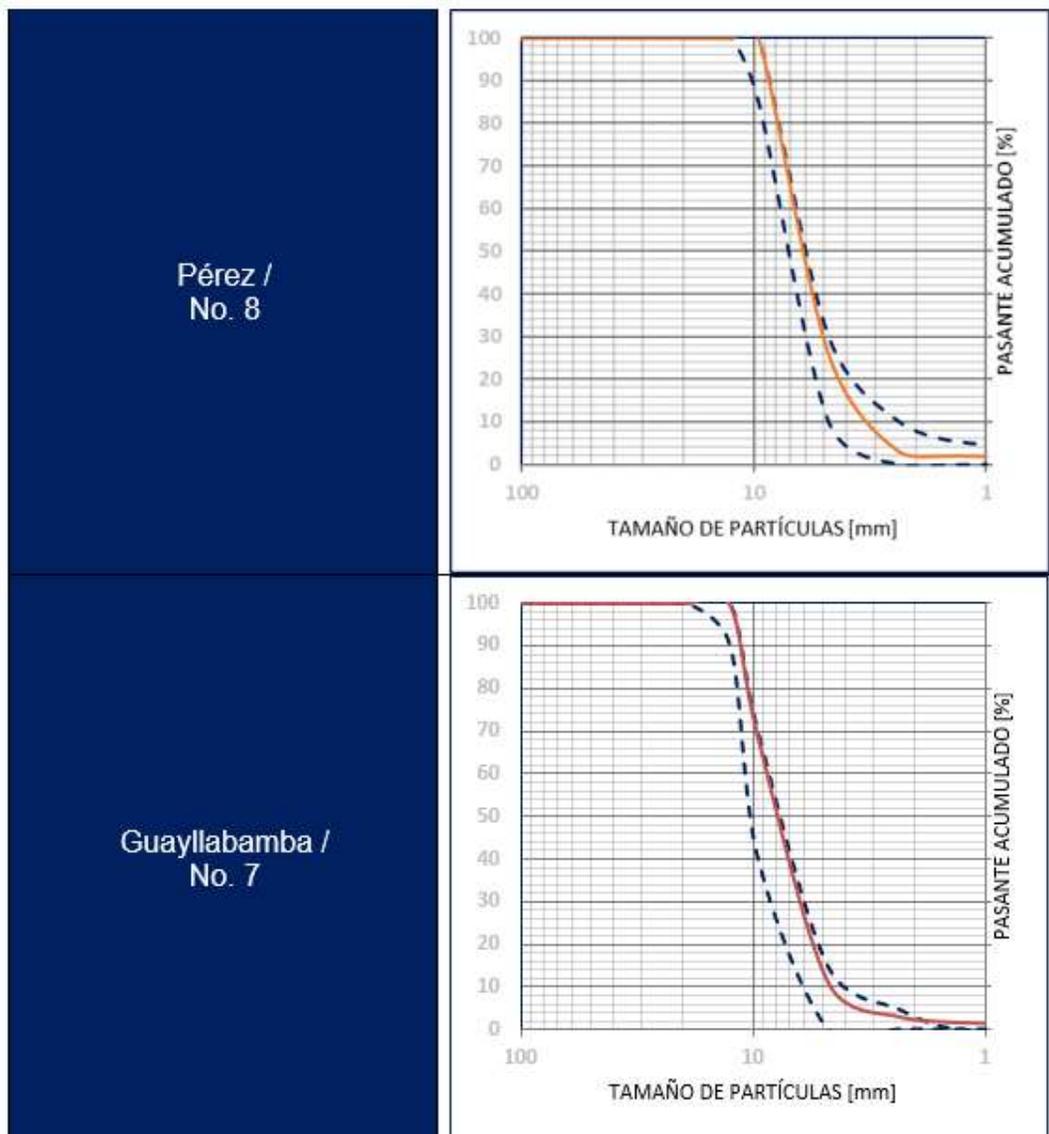


Holcim /
No. 67



Holcim /
No. 8





Elaborado por: Ricardo Chango

4.2. DISEÑOS DE MEZCLAS DE HORMIGÓN

Se establece una relación agua-cemento, para todos los diseños de hormigón permeable, de 0.26 con la finalidad de alcanzar los altos requerimientos de un hormigón permeable y que sea apto para uso en pavimentos, es decir obtener una resistencia a flexión de 4 MPa a la edad de 28 días. Adicionalmente se emplea un aditivo reductor de agua Viscomix MG-AC de la casa de aditivos Admix Cia. Ltda. para mejorar las características mecánicas y físicas del hormigón permeable, el cual se dosifica al 0.4% de la masa total de cemento del diseño; el peso de aditivo para un metro cúbico de hormigón permeable resultaría 1,611 kilogramos.

Se realizaron seis diferentes diseños de hormigón permeable, conocidas a continuación como: P1, P2, P3, P4, P5 y P6 los cuales se presentan para un volumen unitario, es decir un metro cúbico; la Tabla 23 exhibe la cantidad de cemento, agua y los pesos secos del material fino y grueso en kilogramos.

Tabla 23

Proporciones de diseños de hormigón permeable

| Diseño | Agregado Grueso / Distribución | Cemento | Agua | Agregado Grueso | Agregado Fino |
|--------|-----------------------------------|---------|--------|--------------------|------------------|
| | | kg | kg | kg | kg |
| P1 | Ripconci / No. 8 | 402,86 | 104,74 | 1237,09 | 137,45 |
| P2 | Ripconci / No. 67 | 402,86 | 104,74 | 1258,01 | 139,78 |
| P3 | Guayllabamba / No.7 | 402,86 | 104,74 | 1294,00 | 143,78 |
| P4 | Holcim / No. 8 | 402,86 | 104,74 | 1307,39 | 145,27 |
| P5 | Holcim / No. 67 | 402,86 | 104,74 | 1287,31 | 143,03 |
| P6 | Pérez / No. 8 | 402,86 | 104,74 | 1238,76 | 137,64 |

Elaborado por: Ricardo Chango

4.3. RESULTADOS DE ENSAYOS FÍSICOS DEL HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO

Los análisis físicos (asentamiento, densidad, contenido de vacíos, temperatura del hormigón) se ejecutan inmediatamente se realizan las mezclas, es decir el hormigón en estado fresco. Presentan características fundamentales al momento de la implantación del producto en los elementos a fundir, en el presente caso pavimentos; expresan trabajabilidad y condiciones iniciales del hormigón esenciales para su eficiente tratamiento en colocación y manipulación.

Como se indicó anteriormente se realizaron seis diferentes diseños de hormigón permeable, con un único agregado fino y diferente agregado grueso en cada una.

4.3.1. ASENTAMIENTO Y TEMPERATURA

En primera instancia, se efectúan los ensayos estandarizados de asentamiento y temperatura del hormigón en estado fresco. La Tabla 24, y las Figuras 26 y 27, muestran y comparan los resultados de asentamiento y temperatura que presentaron los diferentes diseños ya establecidos.

Tabla 24

Asentamiento y temperatura de diseños de hormigón permeable

| Diseño | Agregado Grueso / Distribución | Asentamiento | Temperatura |
|--------|--------------------------------|--------------|-------------|
| | | mm | °C |
| P1 | Ripconciv / No. 8 | 45 | 22,5 |
| P2 | Ripconciv / No. 67 | 30 | 22,0 |
| P3 | Guayllabamba / No.7 | 40 | 21,0 |
| P4 | Holcim / No. 8 | 40 | 21,5 |
| P5 | Holcim / No. 67 | 25 | 21,0 |
| P6 | Pérez / No. 8 | 40 | 22,0 |

Elaborado por: Ricardo Chango

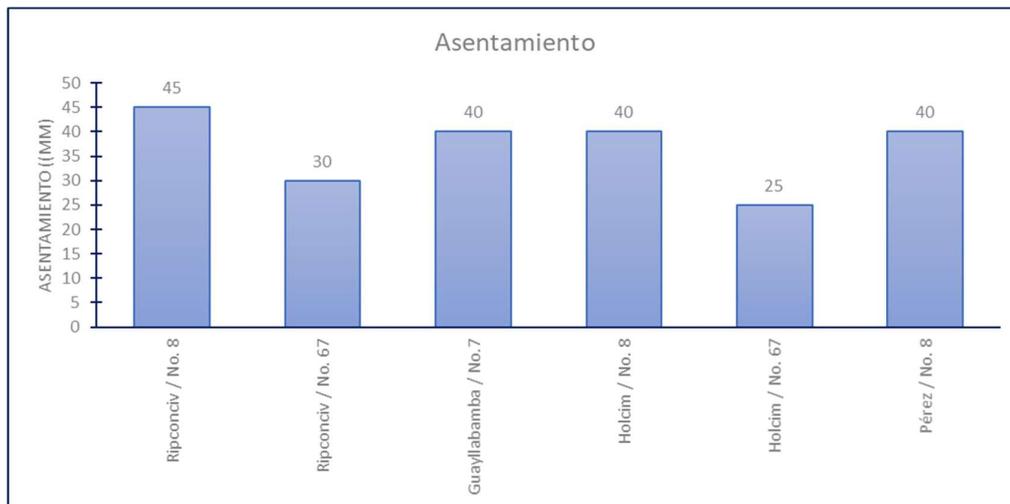


Figura 26. Asentamiento de diseños de hormigón permeable

Elaborado por: Ricardo Chango

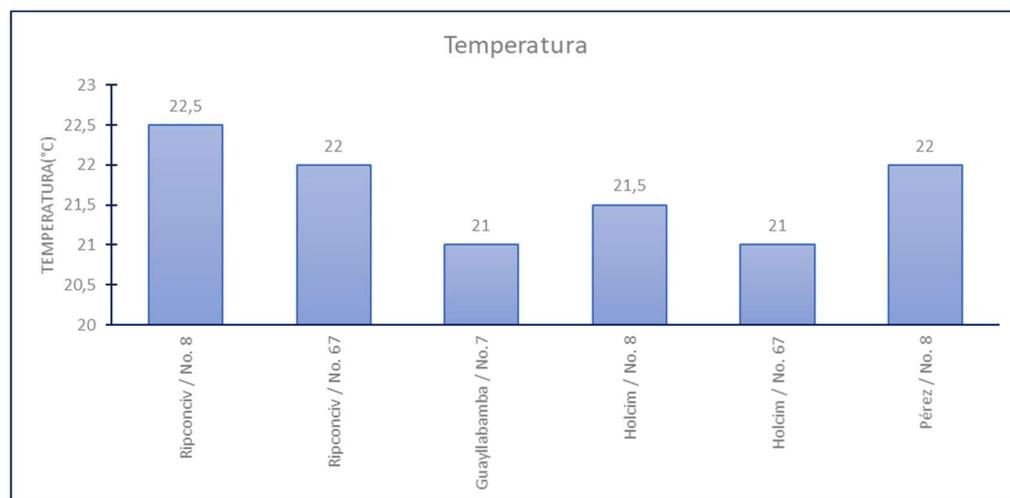


Figura 27. Temperatura de diseños de hormigón permeable

Elaborado por: Ricardo Chango

Los resultados de la característica física de trabajabilidad, asentamiento, indica una clara tendencia a ser mayor con la implementación de agregado grueso de distribución No.8. y No.7, y mucho menor en el material con distribución No.67; expresa que con partículas más pequeñas, el hormigón responde con mejor trabajabilidad y manipulación en estado fresco. Como parte de un análisis físico cualitativo, manipulación de la mezcla, se comprobó que los diseños con agregado grueso No.8 y No.7 presentan mejor trabajabilidad, se facilita la acción de colocación, compactación y mezcla de materiales.

Se logra apreciar que la temperatura presentada en los diseños de hormigón se presentan sin ninguna relación entre distribución granulométrica del agregado grueso, procedencia del material y propiedades mecánicas o físicas de la mezcla; son valores dispersos que dependen de factores como temperatura y humedad del medio en el que se realiza la mezcla de hormigón.

4.3.2. DENSIDAD Y CONTENIDO DE VACÍOS

El ensayo para encontrar los valores de densidad, o densidad real, se los realiza con hormigón en estado fresco, los resultados obtenidos de densidad de los diferentes diseños de hormigón permeable se presentan en la Tabla 25 y una presentación gráfica de los resultados se encuentra en la Figura 28.

Tabla 25

Densidad de diseños de hormigón permeable

| Diseño | Agregado Grueso / Distribución | Masa del recipiente con hormigón (Mh) | Masa del recipiente (Mr) | Volumen del recipiente (Vr) | Densidad Real (D) |
|--------|--------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|-------------------|
| | | g | g | L | kg/m ³ |
| P1 | Ripconciv / No. 8 | 13950 | 2500 | 7,1 | 1613 |
| P2 | Ripconciv / No. 67 | 13400 | 2500 | 7,1 | 1535 |
| P3 | Guayllabamba / No.7 | 13900 | 2500 | 7,1 | 1606 |
| P4 | Holcim / No. 8 | 14150 | 2500 | 7,1 | 1641 |
| P5 | Holcim / No. 67 | 13350 | 2500 | 7,1 | 1528 |
| P6 | Pérez / No. 8 | 13950 | 2500 | 7,1 | 1613 |

Elaborado por: Ricardo Chango



Figura 28. Densidad real de diseños de hormigón permeable

Elaborado por: Ricardo Chango

La densidad que presentan los diferentes diseños de hormigón permeable presentados corresponden a los datos expuestos por el reporte del ACI 522R (2010), 1680 a 1920 kg/m³.

La Tabla 26 presenta el resultado de contenido de vacíos de los diferentes diseños de hormigón permeable; se presentan datos como densidad teórica, obtenida de diseño virtual del hormigón, densidad real, obtenido por ensayos de laboratorio.

Tabla 26

Densidad real, teórica y contenido de vacíos de diseños de hormigón permeable

| Diseño | Agregado Grueso / Distribución | Densidad Teórica (T) | Densidad Real (D) | Contenido de Vacíos (U) |
|--------|--------------------------------|----------------------|-------------------|-------------------------|
| | | kg/m ³ | kg/m ³ | % |
| P1 | Ripconciv / No. 8 | 1905 | 1613 | 15,4 |
| P2 | Ripconciv / No. 67 | 1882 | 1535 | 18,4 |
| P3 | Guayllabamba / No.7 | 1938 | 1606 | 17,1 |
| P4 | Holcim / No. 8 | 1960 | 1641 | 16,3 |
| P5 | Holcim / No. 67 | 1884 | 1528 | 18,9 |
| P6 | Pérez / No. 8 | 1945 | 1613 | 17,1 |

Elaborado por: Ricardo Chango

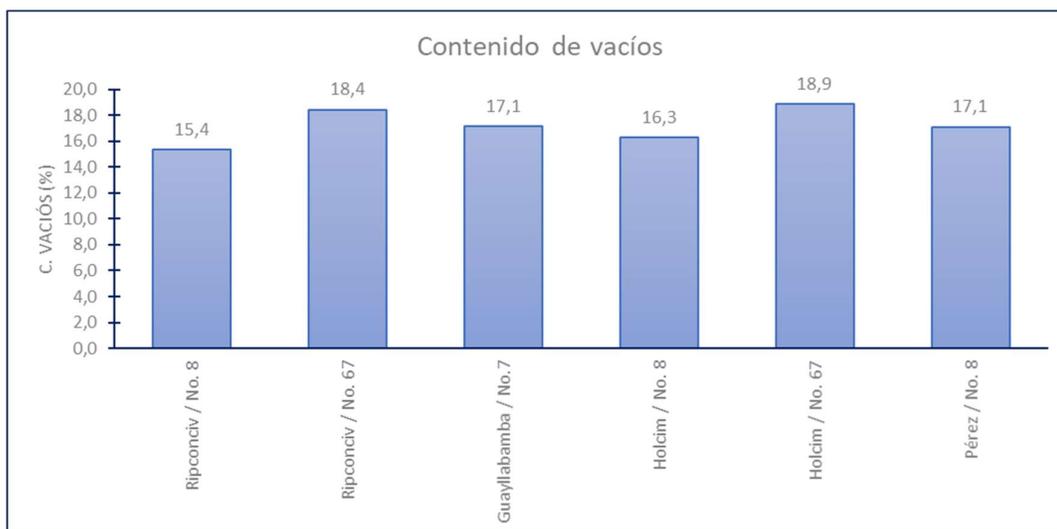


Figura 29. Contenido de vacíos de diseños de hormigón permeable

Elaborado por: Ricardo Chango

Como se observa en la Figura 29, el contenido de vacíos de los diferentes diseños varía entre 15 y 19 %, siendo porcentajes aptos para el libre paso de agua a través del pavimento de hormigón permeable; los diseños con agregado grueso de distribución No. 67 presentan los valores más altos de contenido de vacíos lo cual indica que el alto tamaño nominal máximo del agregado grueso contribuye al elevado contenido de vacíos, y por ende mayor tasa de infiltración.

4.4. RESULTADOS DE ENSAYOS MECÁNICOS DEL HORMIGÓN EN ESTADO ENDURECIDO

El análisis de las características mecánicas del hormigón se lo realiza a determinada edad del moldeo o vaciado del hormigón, es decir el hormigón en estado endurecido. El requisito fundamental que exige la NEVI-12 para aceptar un hormigón como pavimento es obtener una resistencia a flexión, módulo de rotura, de mínimo 4 MPa a la edad de 28 días del hormigón; por tal motivo se diseña hormigón permeable para cumplir esta única resistencia, sin dejar de lado el análisis de resistencia a compresión.

Se realizaron, virtualmente, seis diferentes diseños de hormigón permeable, con un único agregado fino y diferente agregado grueso en cada una; para un ampliado análisis de propiedades mecánicas del hormigón se realizaron dos corridas de cada diseño, para la presentación y discusión de resultados se tomó un promedio de las dos corridas.

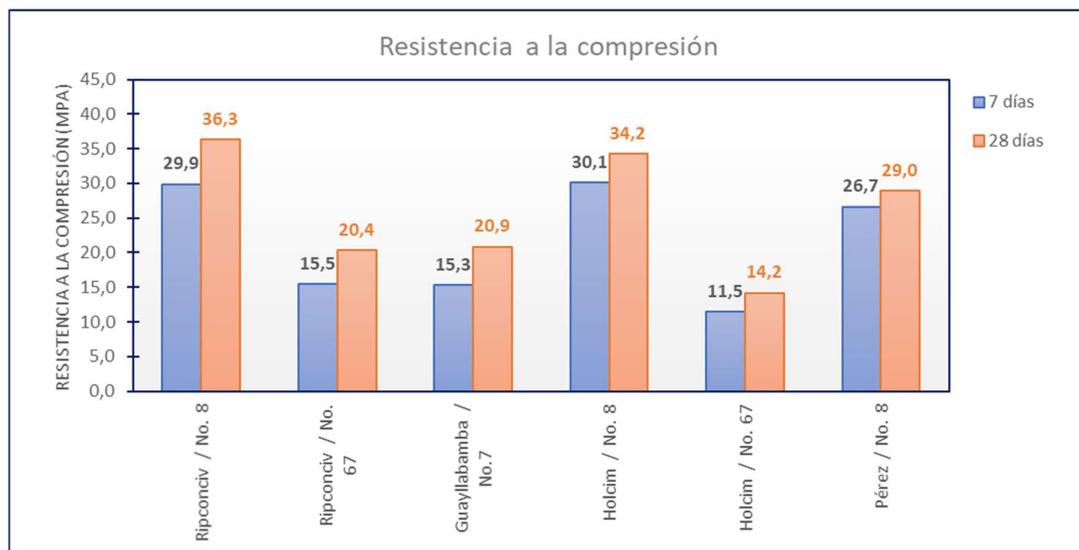
4.4.1. RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Para éste análisis los diseños de hormigón permeable se toman seis probetas cilíndricas, 102 milímetros de diámetro y 200 milímetros de alto, de cada diseño. Tres probetas se ensayan a 7 días y tres a 28 días de edad, la Tabla 27 presenta el promedio de las probetas ensayadas a su respectiva edad y la Figura 30 representa los resultados de manera gráfica para comparar los resultados entre los diferentes diseños. El Anexo 3 presenta con mayor detalle los resultados de los ensayos a compresión de los diferentes diseños de hormigón permeable.

Tabla 27*Resistencia a compresión diseños de hormigón permeable*

| Diseño | Agregado Grueso / Distribución | Resistencia a la compresión (MPa) | |
|--------|-----------------------------------|--------------------------------------|---------|
| | | 7 días | 28 días |
| P1 | Ripconci / No. 8 | 29,9 | 36,3 |
| P2 | Ripconci / No. 67 | 15,5 | 20,4 |
| P3 | Guayllabamba / No.7 | 15,3 | 20,9 |
| P4 | Holcim / No. 8 | 30,1 | 34,2 |
| P5 | Holcim / No. 67 | 11,5 | 14,2 |
| P6 | Pérez / No. 8 | 26,7 | 29,0 |

Elaborado por: Ricardo Chango

**Figura 30.** Resistencia a compresión de diseños de hormigón permeable

Elaborado por: Ricardo Chango

Se visualiza una clara diferencia entre los diseños con agregado de distribución No. 67 y No. 8 y No. 7, existe una tendencia de resistencia a compresión mayor a 20 MPa en diseños con material grueso de bajo tamaño nominal máximo y un déficit de resistencia a compresión en agregado grueso de alto tamaño nominal máximo. Se comprende que al existir agregado grueso con partículas pequeñas, existe mejor adherencia entre ellas ya que las superficies de contacto totales serán mucho mayores. Se aprecia una relación inversamente proporcional entre el contenido de vacíos y la resistencia a compresión; los diseños con agregado grueso de distribución No. 8 y No. 7 presentan menor contenido de vacíos comparado con los diseños con agregado grueso de distribución No. 67, pero presentan mayor resistencia a compresión.

4.4.2. RESISTENCIA A FLEXIÓN

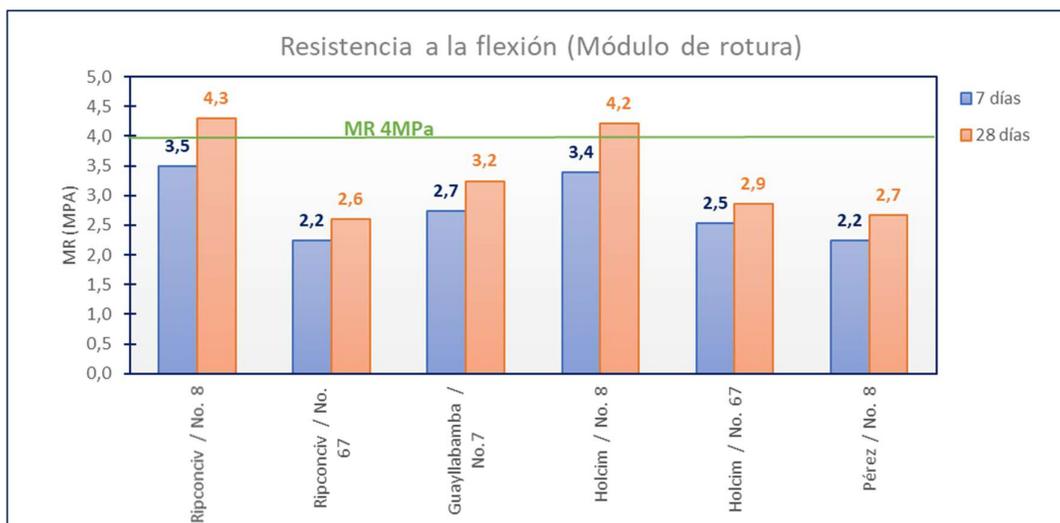
La presente investigación pretende obtener uno o varios diseños de hormigón permeable para uso en pavimentos con un requerimiento de resistencia a flexión específico, por lo que se compara con una resistencia a flexión mínima de 4 MPa.

Para el análisis de la resistencia a flexión, módulo de rotura, de los diseños de hormigón permeable se toman 4 probetas prismáticas de tipo viga de cada diseño, con 600 milímetros de longitud 150 milímetros de alto y 150 milímetros de ancho. Dos probetas se ensayan a 7 días y dos a 28 días de edad, la Tabla 28 presenta el promedio y el porcentaje de resistencia alcanzado comparado con 4 MPa de las probetas ensayadas a su respectiva edad y la Figura 31 representa los resultados de manera gráfica para comparar los resultados entre los diferentes diseños. El Anexo 4 presenta con mayor detalle los resultados de los ensayos a flexión de los diferentes diseños de hormigón permeable.

Tabla 28*Resistencia a flexión diseños de hormigón permeable*

| Diseño | Agregado Grueso / Distribución | Resistencia a flexión - Módulo de rotura (MPa) | | | |
|--------|--------------------------------|--|-------------------------------|---------|--------------------------------|
| | | 7 días | Porcentaje alcanzado a 7 días | 28 días | Porcentaje alcanzado a 28 días |
| P1 | Ripconciv / No. 8 | 3,5 | 87,3% | 4,3 | 107,2% |
| P2 | Ripconciv / No. 67 | 2,2 | 55,9% | 2,6 | 64,9% |
| P3 | Guayllabamba / No.7 | 2,7 | 68,4% | 3,2 | 81,1% |
| P4 | Holcim / No. 8 | 3,4 | 84,5% | 4,2 | 105,2% |
| P5 | Holcim / No. 67 | 2,5 | 63,3% | 2,9 | 71,3% |
| P6 | Pérez / No. 8 | 2,2 | 56,1% | 2,7 | 66,9% |

Elaborado por: Ricardo Chango

**Figura 31.** Resistencia a flexión de diseños de hormigón permeable

Elaborado por: Ricardo Chango

Se constata que se cumple el requerimiento de 4 MPa mínimo de resistencia a flexión, módulo de rotura, a edad de 28 días en los diseños con agregado grueso procedente de la mina de Ripconciv y Holcim, ambas con distribución No. 8 y originarias de la parroquia de Pifo; se identifica la tendencia a bajas resistencias a flexión en diseños con agregados de distribución No. 67, continuando con la tendencia presentada en el análisis a compresión.

4.5. RESULTADOS DE ENSAYOS DE PERMEABILIDAD DEL HORMIGÓN EN ESTADO ENDURECIDO

Para el análisis de permeabilidad se realizó pequeñas losas, de los diferentes diseños de hormigón permeable, de 850 milímetros de largo, 850 milímetros de ancho y 200 milímetros de espesor; se realiza el procedimiento con el fin de simular la capa de hormigón permeable como pavimento. El ensayo se ejecutó a 7 días de edad de la realización de las losas de hormigón. La Tabla 29 presenta los resultados obtenidos de permeabilidad de los diferentes diseños de hormigón permeable.

Tabla 29

Resultados ensayo de permeabilidad diseños de hormigón permeable

| Diseño | Agregado Grueso / Distribución | Tiempo – humedecimiento inicial | Masa de agua infiltrada | Tiempo de ensayo | Infiltración |
|--------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------|------------------|--------------|
| | | seg | kg | seg | mm/h |
| P1 | Ripconci / No. 8 | 16,0 | 18,0 | 98,0 | 10010,68 |
| P2 | Ripconci / No. 67 | 10,0 | 18,0 | 65,0 | 15093,02 |
| P3 | Guayllabamba / No.7 | 15,0 | 18,0 | 80,0 | 12263,08 |
| P4 | Holcim / No. 8 | 16,0 | 18,0 | 79,0 | 12418,31 |
| P5 | Holcim / No. 67 | 18,0 | 18,0 | 60,0 | 16350,77 |
| P6 | Pérez / No. 8 | 28,0 | 18,0 | 120,0 | 8175,39 |

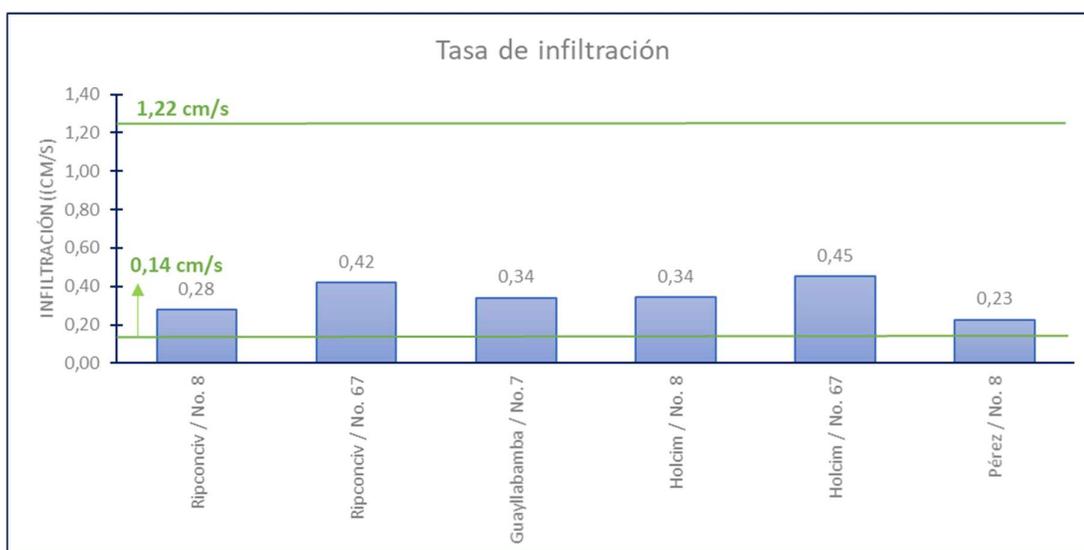
Elaborado por: Ricardo Chango

La Tabla 30 presenta la tasa de infiltración, en mm/h y cm/s, de agua a través de la losa de hormigón permeable. La Figura 32 expone, gráficamente, los resultados de ensayos de permeabilidad de los diferentes diseños; se estable como límites, máximo y mínimo, los recomendados por el reporte del ACI 522R (2010).

Tabla 30*Tasa de infiltración de diseños de hormigón permeable*

| Diseño | Agregado Grueso / Distribución | Tasa de infiltración | |
|--------|--------------------------------|----------------------|------|
| | | mm/h | cm/s |
| P1 | Ripconciv / No. 8 | 10010,68 | 0,28 |
| P2 | Ripconciv / No. 67 | 15093,02 | 0,42 |
| P3 | Guayllabamba / No.7 | 12263,08 | 0,34 |
| P4 | Holcim / No. 8 | 12418,31 | 0,34 |
| P5 | Holcim / No. 67 | 16350,77 | 0,45 |
| P6 | Pérez / No. 8 | 8175,39 | 0,23 |

Elaborado por: Ricardo Chango

**Figura 32.** Tasa de infiltración de diseños de hormigón permeable

Elaborado por: Ricardo Chango

Se observa el cumplimiento de la especificación de alta permeabilidad del hormigón en la totalidad de los diseños presentados, teniendo valores mayores en los diseños con agregado grueso de distribución No. 67 por la presencia de contenido de vacíos mayores que los diseños con agregado grueso de distribución No. 8 y No. 7.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Se realizó la caracterización de los componentes de cualquier diseño de hormigón: cemento, agua, agregado fino y agregado grueso, mediante métodos de laboratorio normalizados. Los agregados fino y grueso cumplen con las especificaciones mínimas establecidas por la ASTM C33/C33M (2018).
- Se empleó arena de San Antonio de Pichicha como el agregado fino para cada diseño de dosificación de hormigón permeable; el agregado grueso utilizado es de distribución No.67, No.8 y No.7 acorde a la recomendación del reporte del ACI 522R (2010) para el diseño de un hormigón permeable. Los agregados, finos y grueso, son originarios de: Pifo, San Antonio de Pichincha, y Guayllabamba, agregados más utilizados para realización de hormigón para obras civiles en la provincia de Pichincha.
- Se realizó los diferentes diseños de hormigón permeable con módulo de rotura de 4 MPa en base al reporte del comité del ACI 522R (2010); se mantuvo la relación de agua/cemento de 0.26 en todos los diseños y se modificó las cantidades de agregado fino y grueso según las características de los agregados gruesos.
- Se analizó de manera cualitativa el comportamiento físico de cada diseño de hormigón permeable, en estado fresco; se concluyó que los diseños con agregado grueso de distribución No.8 y No.7, por su tamaño de partícula, presentan una mezcla con gran facilidad de colocación y manipulación.
- Se evidenció que la mayoría de diseños con agregado grueso de distribución No.8 y No.7 alcanzan mayor resistencia a la compresión en las edades de 7 y 28 días, a comparación de los diseños con agregado grueso de distribución No.67; lo cual expresa una relación inversamente proporcional entre contenido de vacíos y resistencia a compresión, es decir a menor contenido de vacíos de un hormigón permeable es mayor su resistencia a compresión.

Al comparar entre los diferentes diseños se logra definir que el diseño con mayor resistencia a compresión a 7 y 28 días es el que contiene agregado grueso procedente de la parroquia de Pifo, perteneciente a la mina de Ripconciv de distribución No. 8.

- El agregado grueso procedente de San Antonio de Pichincha de distribución No. 8 presenta el mayor porcentaje de desgaste, 41%, el diseño de hormigón permeable demuestra deficientes características mecánicas; esto expresa que existe una relación inversamente proporcional entre el porcentaje de desgaste del agregado grueso y el desarrollo de resistencia a compresión y flexión de un hormigón, convencional o permeable.
- Se evidenció que los diseños, a edades de 7 y 28 días, con agregado grueso de distribución No.8 y No.7 presentan mayor resistencia a flexión (módulo de rotura) que los diseños con agregado grueso de distribución No.67. Al comparar entre los diferentes diseños se logra definir que el diseño con agregado grueso procedente de la parroquia de Pifo, perteneciente a la mina de Ripconciv de distribución No. 8 presenta la mayor módulo de rotura a 7 y 28 días, siendo así el diseño más idóneo para la utilización en pavimentos.
- Se evidenció que los diseños con agregado grueso de distribución No.8 y No.7 permiten menor paso de agua (tasa de infiltración) a través de la masa de hormigón, que los diseños con agregado grueso de distribución No.67; se comprueba que con mayor contenido de vacíos existe mayor permeabilidad en los diseños de hormigón permeable.
- Se concluye que los diseños que cumplen con características de alta permeabilidad, con resistencias a flexión de al menos 4 MPa y agregados originarios de la provincia de Pichincha son los diseños que contemplan agregado grueso de la parroquia Pifo de las minas de Ripconciv y Holcim, de distribución No.8.
- El hormigón de tipo permeable puede ser empleado para filtración de agua u otros líquidos, complementando procesos de tratamiento de residuos, en el sector de gestión de desechos. Adicionalmente se podría emplear como hormigón de muros de contención para obtener, al igual que el pavimento de

hormigón permeable, un adecuado drenaje de aguas subterráneas y no generar grandes esfuerzos a dicha estructura.

5.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda seguir correctas prácticas de laboratorio para generar datos acercados a la realidad, siguiendo los lineamientos establecidos por las diferentes normas para la realización de los ensayos normalizados.
- Se recomienda realizar una investigación del desarrollo de las resistencias a compresión y flexión del hormigón permeable a edades de 1, 3, 7, 14, 28 días, ya que se puede exigir especificaciones de resistencia a compresión y flexión a edades tempranas de hormigón para pavimentos.
- Se recomienda realizar una ampliación del estudio de las características hidráulicas del hormigón permeable y la influencia de su alta permeabilidad en la capa base y subbase que conforman los pavimentos.
- Se recomienda el correcto transporte, almacenamiento y manipuleo de los componentes para el diseño de hormigón permeable, para que éstos no presenten contaminación ni alteración por sustancias no deseadas.
- El desencofrado, manipulación y almacenamiento de las probetas cilíndricas y prismáticas del hormigón permeable en estado endurecido pueden reflejar resultados con poca o mucha dispersión en cualquiera de sus características, por lo cual se sugiere tener muy en cuenta los procedimientos para efectuar dichas acciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI Committee. (2002). ACI 211.1. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete.*
- ACI Committee. (2010). ACI 522R-10. Report on Pervious Concrete.*
- ASTM C1064/C1064M. (2017). Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic-Cement Concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International.*
- ASTM C1157/C1157M. (2017). Standard Performance Specification for Hydraulic Cement. West Conshohocken, PA: ASTM International.*
- ASTM C117. (2017). Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing. West Conshohocken, PA: ASTM International.*
- ASTM C125. (2020). Terminología estándar relacionada con el hormigón y los agregados de hormigón. West Conshohocken, PA: ASTM International.*
- ASTM C127. (2015). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. West Conshohocken, PA: ASTM International.*
- ASTM C128. (2015). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. West Conshohocken, PA: ASTM International.*
- ASTM C136/C136M. (2019). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. West Conshohocken, PA: ASTM International.*
- ASTM C143/C143M. (2015). Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International.*
- ASTM C150/C150M. (2019). Standard Specification for Portland Cement. West Conshohocken, PA: ASTM International.*
- ASTM C1688/C1688M. (2014). Standard Test Method for Density and Void Content of Freshly Mixed Pervious Concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International.*
- ASTM C1701/C1701M. (2017). Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International.*
- ASTM C192/C192. (2019). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. West Conshohocken, PA: ASTM International.*
- ASTM C29/C29M. (2017). Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate. West Conshohocken, PA: ASTM International.*

- ASTM C31/C31M. (2019). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field. West Conshohocken, PA: ASTM International.*
- ASTM C33/C33M. (2018). Standard Specification for Concrete Aggregates. West Conshohocken, PA: ASTM International.*
- ASTM C39/C39M. (2018). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. West Conshohocken, PA: ASTM International.*
- ASTM C40/C40M. (2020). Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International.*
- ASTM C566. (2019). Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying. West Conshohocken, PA: ASTM International.*
- ASTM C595/C595M. (2019). Standard Specification for Blended Hydraulic Cements. West Conshohocken, PA: ASTM International.*
- ASTM C702/C702M. (2018). Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size. West Conshohocken, PA: ASTM International.*
- ASTM C78/C78M. (2018). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Beam with Third-Point Loading). West Conshohocken, PA: ASTM International.*
- ASTM D448. (2017). Standard Classification for Sizes of Aggregate for Road and Bridge Construction. West Conshohocken, PA: ASTM International.*
- ASTM D75/D75M. (2019). Standard Practice for Sampling Aggregates. West Conshohocken: ASTM International.*
- Cabello, S., Zapata, P., Pardo, A., Campuzano, L., Espinoza, J., & Sánchez, C. (2015). Concreto Poroso: Constitución, Variables influyentes y protocolos para su caracterización. CUMBRES, Revista Científica, 64-69.*
- Candelas Ramírez, L. (2010). Tecnología del concreto permeable o ecológico en la construcción. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.*
- Crouch, L. K., Smith, N., Walker, A., Dunn, T., & Sparkman, A. (2006). Determining Pervious PCC Permeability with a Simple Triaxial Flexible-Wall. Tennessee.*
- de Solminihaç, H., Videla, C., Fernández, B., & Castro, J. (2007). Desarrollo de mezclas de hormigón poroso para pavimentos urbanos permeables. Santiago de Chile.*
- Federovisky, S. (1990). Influencias de la urbanización en un desastre: El caso del área metropolitana de la ciudad de Buenos Aires. Buenos Aires.*

- Flores Quispe, C. E., & Pacompia Calcina, I. A. (2015). Diseño de mezcla de concreto permeable con adición de tiras de plástico para pavimentos $f'c$ 175 kg/cm² en la ciudad de Puno. Puno: Universidad Nacional del Altiplano.*
- González Cuevas, Ó. M., & Robles Fernández-Villegas, F. (2005). Aspectos fundamentales del concreto reforzado. Azcapotzalco: Limusa.*
- Mc Cormac, J. C., & Brown, R. H. (2011). Diseño de Concreto Reforzado. México D.F.: Alfaomega.*
- Mendoza Sánchez, J. F. (2014). Criterios de sustentabilidad para carreteras en México. Instituto Mexicano del Transporte.*
- Montejo Fonseca, A. (2002). Ingeniería de Pavimentos para Carreteras Tomo I. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.*
- MTOP. (2012). Manual de Pavimentos Rígidos. Quito D.M.: Ministerio de Transporte y Obras Públicas.*
- NEVI-12. (2013). Norma Ecuatoriana Vial Volumen No. 3: Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes. Quito D.M.: Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador.*
- NEVI-12. (2013). Norma Ecuatoriana Vial Volumen No.1: Procedimientos para proyectos viales. Quito D.M.: Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador.*
- Neville, A. M. (2013). Tecnología del concreto. México: M. en A. Soledad Moliné Venanzi.*
- Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1855-1. (2001). Hormigones: Hormigón Premezclado. Requisitos. Quito D.M.: Instituto Ecuatoriano de Normalización.*
- Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1855-2. (2002). Hormigones: Hormigón preparado en obra. Requisitos. Quito D.M.: Instituto Ecuatoriano de Normalización.*
- Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2380. (2011). Cemento Hidráulico. Requisitos de desempeño para Cementos Hidráulicos. Quito: Instituto Ecuatoriano de Normalización.*
- Núñez Moreno, R. A. (2001). Características básicas de un hormigón de alta permeabilidad. Quito D.M.: Escuela Politécnica Nacional.*
- Quintero, J. D. (2016). Guía de buenas prácticas para carreteras ambientalmente amigables. Panamá: The Nature Conservancy & Latin America Conservation Council.*

- Sánchez, D. (2001). Tecnología del concreto y del mortero. Bogotá: Bhandar Editores LTDA.*
- Smith, D. R. (2006). Permeable Interlocking Concrete Pavements. Washington DC: Interlocking Concrete Pavement Institute.*
- Trombulak, S. C., & Frissell, C. A. (1999). Review of Ecological Effects of Roads on Terrestrial and Aquatic Communities. Middlebury: Middlebury College.*

ANEXOS

ANEXO 1

Agregados para mezclas de hormigón permeable

| AGREGADO FINO | | Fotografía |
|-----------------------|------------------------------|--|
| Identificación: | Arena – ASTM C33 |  |
| Mina: | Fucusucu3 - Castellano | |
| Ubicación de la mina: | San Antonio de Pichincha | |
| AGREGADO FINO | | Fotografía |
| Identificación: | Ripio distribución No. 67 |  |
| Mina: | Ripconciv | |
| Ubicación de la mina: | Pifo | |
| AGREGADO FINO | | Fotografía |
| Identificación: | Ripio distribución No. 8 |  |
| Mina: | Ripconciv | |
| Ubicación de la mina: | Pifo | |
| AGREGADO FINO | | Fotografía |

| | | |
|-----------------------|------------------------------|--|
| Identificación: | Ripio distribución No. 7 |  |
| Mina: | Guayllbamba | |
| Ubicación de la mina: | Guayllabamba | |
| AGREGADO FINO | | Fotografía |
| Identificación: | Ripio distribución No. 8 |  |
| Mina: | Pérez - Mandingo | |
| Ubicación de la mina: | San Antonio de Pichincha | |
| AGREGADO FINO | | Fotografía |
| Identificación: | Ripio distribución No. 67 |  |
| Mina: | Holcim | |
| Ubicación de la mina: | Pifo | |
| AGREGADO FINO | | Fotografía |

| | | |
|--------------------------|-----------------------------|--|
| Identificación: | Ripio distribución No. 8 |  |
| Mina: | Holcim | |
| Ubicación de la mina: | Pifo | |

ANEXO 2
Caracterización de agregados

ANEXO 3

Resultados ensayos de resistencia a compresión

ANEXO 4

Resultados ensayos de resistencia a flexión