



# **UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO**

**Colegio de Ciencias e Ingeniería**

**Desarrollo de Hormigones Permeables enfocado al diseño de mezclas, construcción de obras y a la protección ambiental, basado en las normas ACI, ASTM e INEN**

**Francisco Wladimir Játiva Valverde**

**Fabricio Yépez, PhD., Director de Tesis**

Tesis de grado presentada como requisito  
para la obtención del título de Ingeniero Civil

Quito, mayo de 2014

## HOJA DE APROBACION DE TESIS

**DESARROLLO DE HORMIGONES PERMEABLES ENFOCADO AL DISEÑO DE MEZCLAS, CONSTRUCCIÓN DE OBRAS Y A LA PROTECCIÓN AMBIENTAL, BASADO EN LAS NORMAS ACI, ASTM E INEN**

**Francisco Wladimir Játiva Valverde.**

Fabricio Yépez, PhD.  
Director de Tesis y Miembro del Comité

---

Fernando Romo, MSc.  
Director de la Carrera de Ingeniería Civil

---

Miguel Andrés Guerra, MSc.  
Miembro del Comité de Tesis

---

Ximena Córdova, PhD.  
Decana de la Escuela de Ingenierías  
Colegio de Ciencias e Ingeniería

---

Quito, Mayo 2014

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma: \_\_\_\_\_

Francisco Wladimir Játiva Valverde

C. I.: 1712590452

Fecha: Mayo de 2014

**Dedicatoria**

Para mi amada familia.

## **Agradecimiento**

Un sincero agradecimiento a mi Padre, madre y hermanita, su ejemplo y apoyo incondicional han hecho que todo sea posible en mi vida.

Un profundo agradecimiento al Dr. Fabricio Yépez por su motivación y conocimiento a lo largo de este trabajo y durante mi vida universitaria.

Agradezco al Ing. Oswaldo Yépez, pues gracias a sus incentivos técnicos, la rama de los hormigones ha cobrado gran interés en mi vida profesional.

A todas las personas que de alguna manera estuvieron involucradas en este trabajo y a todos mis amigos de la USFQ.

## RESUMEN

El Hormigón Permeable es un tema actual en el mundo de la Ingeniería Civil y su explotación, permite no solamente mejorar las condiciones de circulación de peatones y de vehículos livianos, sino que además pueden desarrollarse sistemas de reservorios de agua para uso en jardines y otros más.

Los estudios realizados con materiales obtenidos en la región circundante a la ciudad de Quito, y con otros más resistentes procedentes de otra zona, han permitido realizar dosificaciones que cumplen con los parámetros de resistencia mecánica y de permeabilidad preestablecidos.

Este estudio teórico y experimental ha permitido demostrar que es posible la fabricación de hormigones permeables acordes a las normas internacionales existentes; sin embargo, el estudio encuentra que es necesario desarrollar normativas exclusivas para este tipo de hormigones.

En el estudio se recomienda el uso de agregados resistentes y el uso de cemento Portland para alcanzar los valores internacionales de flexión, compresión simple y permeabilidad.

El estudio recomienda análisis para establecer una normativa de preparación y ensayos en hormigones permeables actualmente no existente así como también la investigación de estos hormigones estructurados con mallas biaxiales para obtener valores de flexión elevadas compatibles con las cargas de tráfico pesado para su uso en vías de intenso tráfico.

**Abstract**

Pervious concrete has become a hot topic around civil engineering, and the study of it not only allows improving the passing of pedestrians and cars under a raining event but also allows the design of reservoir systems.

Mechanical design values and permeability design values have been reached by using materials found in the surrounding of Quito, and others materials with better properties found in Ecuador.

This study has proven that it is possible to make pervious concrete based on international standards. However, the need to develop standards specifically for pervious concrete is necessary.

This study suggest the use of high quality materials and Portland cement to reach the international values of flexural resistance, compression resistance and permeability,

It is suggested further studies in order to create standards regarding mixing and placing pervious concrete, as well as studying pervious concrete using biaxial membranes to improve flexural resistance under heavy traffic.





## **Universidad San Francisco de Quito**

Santiago Gangotena González, *Canciller*  
Carlos Montúfar, *Presidente, Decano Académico*

### **Comité Técnico de Edición de Tesis**

Fernando Pinto, *Director de Biblioteca*  
Xavier Palacios, Orlando Bracho, *Bibliotecarios*

## CONTENIDO

|   |           |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN.....  | <b>18</b> |
| 1.1. Antecedentes .....   | 19        |
| Justificación del Proyecto.....   | 19        |
| 1.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO .....   | 20        |
| 1.2.1. Objetivos Generales .....  | 20        |
| 1.2.2. Objetivos Específicos.....   | 20        |
| <br>  |           |
| 2. BENEFICIOS AMBIENTALES Y BENEFICIOS DE SERVICIO .....  | <b>21</b> |
| <br>  |           |
| 3. APLICACIONES .....   | <b>22</b> |
| 3.1. Desempeño:.....  | 22        |
| <br>  |           |
| 4. NORMAS UTILIZADAS PARA EL DISEÑO DE HORMIGONES PERMEABLES .  | <b>23</b> |
| 4.1. Norma ASTM C39/C39M-04 <sup>a</sup> (Método estándar para la prueba de resistencia a compresión).....                    | 23        |
| 4.2. Norma ASTM C78/C78M-02 (Resistencia a Flexión del Hormigón).....   | 23        |
| 4.3. Norma ASTM C127/C127M-01 (Método para determinar peso específico y absorción del agregado grueso).....                   | 24        |
| 4.4. Norma ASTM C192/C192M-07 .....   | 24        |
| 4.5. Norma ACI 212.3R-14 (Mezclas químicas para el hormigón).....   | 24        |
| 4.6. Norma ASTM D422 (Clasificación de los agregados).....  | 25        |
| 4.7. ACI 522R-06 (Propiedades mecánicas del hormigón permeable).....  | 25        |
| 4.8. Norma ASTM C1157/C1157M-11 (Cemento hidráulico).....   | 25        |
| 4.9. Norma ASTM C1754/C1754M-12 (Método para determinar densidad y contenido de vacíos en hormigón permeable endurecido)..... | 25        |
| 4.10. Norma INEN 2380 (Cemento Hidráulico).....   | 26        |
| <br>  |           |
| 5. CONSTRUCCIÓN DE EQUIPOS .....  | <b>27</b> |
| 5.1. Permeámetro acorde con ACI 522R-06.....  | 27        |
| <br>  |           |
| 6. MATERIALES .....   | <b>32</b> |
| 6.1. Agregados .....  | 32        |
| 6.1.1. Descripción del agregado utilizado .....   | 33        |
| 6.1.2. Granulometría .....  | 33        |
| 6.1.3. Densidad y Absorción .....   | 35        |
| 6.1.4. Granulometría de los Agregados para el diseño de hormigones permeables .....   | 36+       |

|  |           |
|--|-----------|
|  | 11        |
| 6.2. Cementantes .....   | 37        |
| 6.2.1. Análisis del cemento Holcim tipo GU (Uso General).....                                    | 38        |
| 6.2.2. Microsílica.....  | 39        |
| 6.3. Aditivos.....   | 41        |
| 6.3.1. Rheobuid 1000 .....   | 43        |
| 6.4. Capping.....  | 46        |
| <b>7. CAPACIDADES MECÁNICAS.....</b>   | <b>47</b> |
| 7.1. Capacidad Compresiva .....  | 47        |
| 7.1.1. Pruebas a Compresión basadas en ASTM C39.....   | 48        |
| 7.2. Capacidad Permeable .....   | 51        |
| 7.2.1. Pruebas de Permeabilidad basadas en ACI 522R-06 .....                                     | 52        |
| 7.3. Capacidad de resistencia a Tensión de las viguetas de hormigón permeable<br>ensayadas ..... | 56        |
| 7.3.1. Pruebas a Flexión basadas en ASTM C78-02 .....  | 57        |
| 7.3.2. Parámetros de adherencia y compactación que influyen en la resistencia a flexión. ..      | 58        |
| <b>8. DOSIFICACIÓN .....</b>   | <b>61</b> |
| 8.1. Dosificaciones ‘Beta’ .....   | 62        |
| ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....  | 64        |
| 8.2 Dosificaciones para Diseño .....   | 65        |
| <b>9. RESULTADOS .....</b>   | <b>72</b> |
| 9.1 Resultados basados en la resistencia a compresión simple: .....                              | 72        |
| 9.2 Resultados basados en la permeabilidad .....   | 76        |
| 9.3 Resultados basados en la resistencia a la flexión .....                                      | 80        |
| DISCUSIÓN.....   | 83        |
| 9.4 Resultados basados en el costo.....  | 86        |
| <b>10. DISEÑO DE PAVIMENTOS .....</b>  | <b>88</b> |
| 10.1 Antecedentes.....   | 88        |
| 10.2 Introducción.....   | 88        |
| 10.3 Características Geotécnicas del suelo de fundación del pavimento permeable ..               | 89        |
| 10.4 Diseño del pavimento de hormigón permeable sin mejoramiento de la subrasante<br>.....       | 89        |
| a. Tiempo .....  | 89        |
| b. Tránsito .....  | 89        |
| c. Valores de distribución de carga usados: .....  | 91        |
| d. Criterios de adopción de niveles de serviciabilidad: .....                                    | 92        |

|  |            |
|--|------------|
|  | 12         |
| e. Cambio en el Índice de Serviabilidad.....   | 92         |
| f. Módulo de reacción de la sub-rasante ( $K_{rs}$ ) y Módulo Resiliente (MRSG) .....  | 92         |
| g. Caracterización de los materiales que conformarán las losas .....   | 94         |
| • Módulo de rotura del hormigón .....  | 94         |
| • Módulo de elasticidad del hormigón ( $E_c$ ).....  | 95         |
| 10.5 Diseño de Losa.....   | 96         |
| <b>11. DISEÑO HIDROLÓGICO PARA EL HORMIGÓN PERMEABLE .....</b>   | <b>97</b>  |
| 11.1 Introducción:.....  | 97         |
| 11.2 Determinación del volumen de agua a ser drenada: .....  | 97         |
| a. Intensidad de lluvia .....  | 97         |
| 11.3 Espesor de la capa de drenaje .....   | 100        |
| <b>12. DISEÑO DE UN RESERVORIO DE AGUA DE LLUVIA .....</b>   | <b>102</b> |
| 12.2 Tecnología ECOaid <sup>®</sup> .....  | 102        |
| 12.3 Consideraciones del diseño .....  | 103        |
| 12.2.3 Diseño Geométrico del reservorio.....   | 104        |
| <b>13. CONCLUSIONES.....</b>   | <b>109</b> |
| <b>14. RECOMENDACIONES .....</b>   | <b>112</b> |
| <b>15. ANEXOS.....</b>   | <b>116</b> |
| 15.1 Determinación de Densidad, peso específico y Absorción del agregado grueso en laboratorio. ....   | 117        |
| 15.2 Ficha Técnica Rheobuild 1000 .....  | 120        |
| 15.4 Isolíneas de intensidades de precipitación para varios periodos de retorno en función de la máxima en 24 horas registro de información 1967-1998..... | 123        |

## LISTA DE FIGURAS

|              |   |    |
|--------------|---|----|
| Figura 5.1:  | Características de Permeámetro presentado en ACI522R-06 .....   | 27 |
| Figura 5.2:  | Partes fabricadas del Permeámetro.....  | 28 |
| Figura 5.3:  | Permeámetro utilizado .....   | 28 |
| Figura 5.4:  | Dimensiones y Materiales de permeámetro diseñado .....  | 30 |
| Figura 5.5:  | Modelo construido (Basado en ACI 522R-06) .....   | 31 |
| Figura 6.1:  | Granulometría encontrada para agregados Río Guayllabamba .....  | 34 |
| Figura 6.2:  | Propiedades de los agregados encontrados en Tesis: “Análisis de los agregados del Distrito Metropolitano de Quito” .....              | 35 |
| Figura 6.3:  | Proceso de tamizado en barril.....  | 36 |
| Figura 6.4:  | Proceso de lavado y secado del agregado. ....   | 37 |
| Figura 6.5:  | Comparativo de resistencia a compresión simple de cemento Holcim tipo ‘GU’ .....  | 39 |
| Figura 6.6:  | Comparación en tamaño entre partícula de cemento y partícula de microsíllica. ....  | 40 |
| Figura 6.7:  | Microsíllica sobre cemento .....  | 41 |
| Figura 6.8:  | Proceso de defloculación y dispersión de las partículas de cemento .....  | 43 |
| Figura 6.9:  | Mezcla una vez cumplida la reacción del superplastificante. ....  | 44 |
| Figura 6.10: | Relación entre extensión de mesa de flujo y contenido de agua de hormigón con y sin superplastificante.....                           | 44 |
| Figura 6.11: | Proceso de cocción para capping.....  | 46 |
| Figura 7.1:  | Energía de consolidación en función del diámetro de moldes cilíndricos ..   | 49 |
| Figura 7.2:  | Cilindros Beta puestos a secar .....  | 50 |
| Figura 7.3:  | Mezcla 1. ....  | 51 |
| Figura 7.4:  | Secuencia que describe gráficamente el proceso de preparación de las muestras para el análisis de permeabilidad. ....                 | 53 |
| Figura 7.5:  | Diagrama de corte y momento bajo una carga puntual (ASTM C293) .....  | 56 |
| Figura 7.6:  | Diagrama de corte y momento bajo dos cargas simétricas (ASTM C78) .....   | 57 |
| Figura 7.7:  | Número de golpes por capa de hormigón para conseguir el apropiado nivel de compactación basado en ASTM C192.....                      | 59 |
| Figura 9.1:  | Tiempo (Días) Vs. Resistencia a la compresión simple [kg/cm <sup>2</sup> ] .....  | 72 |
| Figura 9.2:  | Densidad [gr/cm <sup>3</sup> ] Vs. Resistencia a la compresión simple.....  | 74 |
| Figura 9.3:  | Resistencia a la compresión simple [kg/cm <sup>2</sup> ] Vs. Relación W/C.....  | 75 |
| Figura 9.4:  | Resistencia a la compresión simple [kg/cm <sup>2</sup> ] Vs. Permeabilidad [cm/s] ...   | 76 |
| Figura 9.5:  | Relación Tiempo [Días] Vs. Permeabilidad [cm/s].....  | 77 |
| Figura 9.6:  | Comparación entre la Permeabilidad (Izquierda) y Resistencia a la compresión simple (Derecha) Vs. Tiempo .....                        | 78 |
| Figura 9.7 : | Presión de expansión en arcillas vs. Tiempo .....   | 79 |
| Figura 9.8:  | Relación Permeabilidad [cm/s] Vs. Densidad [gr/cm <sup>3</sup> ] .....  | 80 |
| Figura 9.9:  | Relación Resistencia a la Compresión simple vs. Resistencia a la flexión  | 81 |
| Figura 9.10: | Comparación de comportamiento entre hormigones tradicionales y permeables con relación a la resistencia a flexión Vs. Compresión..... | 81 |
| Figura 9.11: | Relación resistencia a la Flexión [kg/cm <sup>2</sup> ] Vs. Permeabilidad [cm/s] .....  | 83 |
| Figura 9.12: | Relación Tiempo [Días] Vs. Resistencia a la Flexión [kg/cm <sup>2</sup> ] .....   | 84 |
| Figura 9.13: | Comparación entre la Resistencia a la Flexión (Izquierda) y Resistencia a la compresión simple (Derecha) Vs. Tiempo .....             | 85 |
| Figura 9.14: | Relación entre el costo y la resistencia a la flexión simple .....  | 86 |
| Figura 9.15: | Relación entre el costo y la resistencia a la compresión simple.....  | 87 |

|              |   |     |
|--------------|---|-----|
| Figura 10.1: | Vista en planta del parqueadero de la USFQ.....   | 90  |
| Figura 10.2: | Clasificación de suelos relacionada con parámetros de resistencia .....   | 93  |
| Figura 10.3: | Abaco para estimar el módulo compuesto de reacción de subrasante, considerando una profundidad infinita de capa.....  | 94  |
| Figura 11.1: | Corte transversal típico de hormigón permeable. Alojamiento de agua con sub-base impermeable (sin mejoramiento) ..... | 97  |
| Figura 11.2: | Curvas I-D-F con tiempo de retorno de 5 años y 10 años .....  | 99  |
| Figura 11.3: | Vista en planta de la capa de hormigón permeable y reservorio.....  | 101 |
| Figura 11.4: | Vista 3D. de la capa de rodadura y reservorio.....  | 101 |
| Figura 12.1: | Proceso de evacuación de agua lluvia .....  | 103 |
| Figura 12.2: | Corte Transversal de reservorio.....  | 104 |
| Figura 12.3: | Variables geométricas de entrada para el diseño de reservorio.....  | 104 |
| Figura 12.4: | Características semicilindro tipo EC-1000 .....   | 105 |
| Figura 12.5: | ventana de entrada de datos del programa ECOaid Tank Calculator .....   | 106 |
| Figura 12.6: | ventana de salida de datos del programa ECOaid Tank Calculator .....  | 108 |

## LISTA DE TABLAS

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| Tabla 3.1:  | Aplicaciones del hormigón permeable .....   | 22  |
| Tabla 4.1:  | Especificación para moldes de cilindros de hormigón .....   | 23  |
| Tabla 6.1:  | Valores de densidad y absorción encontrado para agregados .....   | 35  |
| Tabla 6.2:  | Descripción y denominación dada a los agregados.....  | 36  |
| Tabla 6.3:  | Naturaleza cementante de materiales en cementos mezclados.....  | 38  |
| Tabla 6.4:  | Propiedades de Superplastificante Rheobuild 1000 .....  | 45  |
| Tabla 7.1:  | Valores de las características del permeámetro .....  | 55  |
| Tabla 8.1:  | Resultados de mezclas ‘Beta’ .....  | 63  |
| Tabla 8.2:  | Resultados obtenidos en mezclas de diseño .....   | 66  |
| Tabla 9.1:  | Precio unitario de materiales utilizados.....   | 86  |
| Tabla 10.1: | Valores de distribución de carga utilizados.....  | 91  |
| Tabla 10.2: | Resistencia a la flexión (MR) en relación a la resistencia a la compresión simple, basado en ASTM C78.....              | 94  |
| Tabla 10.3: | Módulo de elasticidad en función a la resistencia a la flexión simple (MR), basado en ASTM C469 .....                   | 95  |
| Tabla 10.4: | Datos para diseño de losa de hormigón permeable .....   | 96  |
| Tabla 11.1: | Precipitaciones registradas entre (Año 1990-2013) en milímetros .....   | 98  |
| Tabla 11.2: | Ecuaciones representativas para determinar la intensidad de lluvia en cualquier período de retorno (Quito-INAMHI) ..... | 99  |
| Tabla 11.3: | Valores para el diseño de capa de drenaje.....  | 100 |

## LISTA DE ACRÓNIMOS / ABREVIACIONES

|          |   |
|----------|---|
| AASHTO   | American Association of State Highway and Transportation Officials. |
| ACI      | American Concrete Institute.  |
| ACPA     | American Concrete Pavement Association.                             |
| ADT      | Tráfico Diario Promedio.  |
| ASTM     | American Society for Testing and Materials.                         |
| Agg/C    | Relación Agregado/ Cemento.   |
| $A_p$    | Área a ser recubierta de hormigón permeable [ $ft^2$ ].             |
| $A_b$    | Área no permeable a ser drenada [ $ft^2$ ].                         |
| CBR      | Relación de valor soporte California.                               |
| $C_d$    | Coefficiente de Drenaje.  |
| cm       | Centímetros.  |
| D        | Espesor de la Losa  |
| $E_c$    | Modulo Elástico del Hormigón.                                       |
| $E_{sb}$ | Modulo Elástico de la sub-base.                                     |
| $F'_c$   | Resistencia la compresión simple del hormigón [ $kg/cm^2$ ].        |
| GY       | Factor de Crecimiento.  |
| $H_s$    | Espesor de la Capa de sub-base/reservorio para evacuación de agua.  |
| I        | Intensidad de lluvia [in].  |
| I-D-F    | Intensidad-Duración-Frecuencia.                                     |
| INAMHI   | Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología.                    |
| INEN     | Instituto Ecuatoriano de Normalización.                             |
| J        | Coefficiente de Transferencia de Carga.                             |
| K        | Coefficiente de Permeabilidad [ $cm/s$ ]                            |
| Kg       | Kilogramo.  |



|                  |   |
|------------------|---|
| $K_{rs}$         | Módulo de Reacción de la Sub-rasante                                  |
| min              | Minuto.   |
| $M_r$            | Módulo de Rotura del Hormigón   |
| MRS <sub>G</sub> | Módulo Resiliente de la Subrasante.                                   |
| PCA              | Portland Cement Association.  |
| $P_o$            | Índice de serviciabilidad inicial.                                    |
| $P_t$            | Índice de serviciabilidad final.                                      |
| $\Delta$ PSI     | Cambio en índice de serviciabilidad.                                  |
| R                | Fiabilidad en porcentaje.   |
| s                | Segundos.   |
| $S_c$            | Modulo de Ruptura del hormigón Permeable en $[\text{kg}/\text{cm}^2]$ |
| $S_o$            | Desviación Estándar.  |
| SSD              | Superficie saturada seca (Saturated surface dry).                     |
| TR               | Tiempo de Retorno.  |
| V                | Volumen de agua a ser drenada por el hormigón permeable               |
| W/C              | Relación Agua/Cementante.   |
| $Z_r$            | Desviación Estándar basado en la confiabilidad.                       |

## 1. INTRODUCCIÓN

El hormigón permeable, estudiado a finales del siglo XIX en Europa y Japón debido a su bajo costo, fue considerado como una alternativa de construcción a gran escala en la década de 1920, debido a la crisis de cemento existente en Europa, principalmente en Escocia e Inglaterra (Wanielista & Chopra, 2007).

Pero esta alternativa de construcción masiva no se esparció por Europa, debido a que no se podían lograr resistencias superiores a  $150 \text{ kg/cm}^2$ , inferiores a los mínimos necesarios de  $210 \text{ kg/cm}^2$  (Gupta, Desai, & Patil, 2009).

La resistencia de este tipo de hormigón permeable depende fundamentalmente de la adhesión entre la pasta de cemento y el agregado mineral. En tiempos modernos la tecnología permite utilizar elementos como superfluidificantes o microsíllica, los cuales brindan propiedades de adhesión muy superiores y con su uso pueden obtenerse resistencias aceptables para los usos en obras. Se han registrado hormigones permeables de hasta  $250 \text{ kg/cm}^2$  (Kervern, 2008).

El hormigón permeable ha vuelto a tener protagonismo debido a un factor fundamental, el ambiental. El crecimiento demográfico, el incremento vehicular hasta niveles de saturación completa, y leyes más estrictas sobre el cuidado del medio ambiente han promovido el estudio de este tipo de hormigón en la actualidad. Su potencial radica en proveer al usuario de un mejor servicio y contribuye con la disminución del impacto ambiental. (Tennis, Leming, & Akers, 2004)

El uso del hormigón permeable en veredas, canchas y en cualquier espacio de recreación mejora la serviciabilidad ya que evita formación de espejos de agua que pueden causar accidentes e inconvenientes al usuario, de igual manera permite la oxigenación y riego del suelo debajo de la capa de hormigón, potenciando así la vegetación local (Tennis, Leming, & Akers, 2004).

El hormigón permeable utilizado en caminos y avenidas permite mejorar la seguridad en la conducción pues gran cantidad de agua puede fluir a través del hormigón permeable, permitiendo la filtración del agua hacia drenes, lo que evita la formación de nubes de agua formadas por el paso rápido de vehículos, elimina la posibilidad de los nefastos acumulamientos de agua que generan el fenómeno conocido como aqua-planning y ayuda a controlar los eventuales pero nocivos y peligrosos derrames de aceites, diesel gasolina, etc., que podrían causar deslizamientos muy peligrosos en los vehículos. Además, una superficie de hormigón poroso permite la filtración a drenes bajo la rasante y permite su control para que no sea diseminado. (Wanielista & Chopra, 2007).

Debido al poco uso de esta tecnología en Ecuador, se ha concebido esta Tesis para demostrar que la tecnología de los hormigones permeables puede ser realizada en nuestro medio, con agregados o áridos y cementos nacionales y aditivos importados y así proporcionar mayor seguridad y serviciabilidad al usuario y disminuir el impacto ambiental.

Actualmente, las investigaciones en hormigón poroso se dirigen hacia el desarrollo de capas de rodadura para carreteras con circulación de vehículos pesados y extrapesados, incluyendo el uso de materiales modernos (como por ejemplo mallas biaxiales, mallas metálicas, etc.). No obstante, estas investigaciones experimentales requieren laboratorios y vías experimentales, con importantes costos y tiempos de desarrollo.

## 1.1. Antecedentes

El Hormigón Permeable es un tema actual en el mundo de la Ingeniería Civil; las normas existentes sobre el hormigón permeable son escasas y es un tema aún en fase de investigación y desarrollo.

Los últimos avances en aditivos para mejorar la resistencia de un hormigón carente de agregados finos como es el hormigón permeable, han permitido la utilización industrial de este hormigón en proyectos alrededor del mundo, desde parqueaderos hasta puentes prototipo.

Lamentablemente, en Ecuador no existe una norma acerca del hormigón permeable y menos proyectos que se hayan desarrollado con el mismo. Debido al interés actual por preservar el ambiente y mejorar la calidad de la construcción se debe mirar hacia opciones como ésta las cuales pueden revolucionar la forma en la que utilizamos el hormigón cumpliendo así con estándares, tanto ambientales como de servicio.

Corrientes políticas actuales apuntan hacia una ciudad con mayor número de peatones y ciclistas; debido a que éste es un grupo vulnerable hacia los elementos, cualquier acumulación de agua mayor a 10 cm puede causar inconvenientes (Tennis, Leming, & Akers, 2004), por lo que los hormigones permeables son una alternativa económica y relativamente fácil de implementar en nuestro medio que ayudaría a resolver dicha vulnerabilidad.

De igual manera en lugares con flujos de tránsito liviano se pueden construir calles y avenidas perfectamente horizontales aprovechando así todo el espacio y evitando la construcción de cunetas, además del control del agua de escorrentía.

Las normas vigentes para este tipo de hormigón están dadas por la ACI (American concrete Institute), ASTM (American Society for Testing and Material). El tipo de cemento se rige en normas ecuatorianas (INEN) y ASTM.

## Justificación del Proyecto

Alrededor del mundo se produce el fenómeno de migración desde áreas rurales hacia grandes urbes, tanto así que se prevee en 2030 que 5 mil millones de personas vivan en áreas urbanas (**Naciones Unidas, 2010**).

Ante este escenario y la alta demanda de petróleo a nivel mundial, países alrededor del mundo incluyendo el Ecuador han promovido la creación de políticas de transporte masivo, utilización de medios de transporte alternativos como la bicicleta y promoviendo la creación de micro negocios que buscan el menor desplazamiento

posible de personas. Este escenario visto desde el punto de vista de la Ingeniería Civil, representa el mejoramiento sustancial de veredas, calles, áreas de recreación, y grandes avenidas para poder brindar un mejor servicio y prevenir que precipitaciones con acumulación de agua detengan la movilidad de una urbe.

El uso de hormigones permeables de alta resistencia brinda la posibilidad de disminuir el impacto ambiental ya que permite la oxigenación y humedecimiento del suelo debajo de la capa hormigonada, de igual manera, evita la concentración de agua en su superficie lo que ayuda a prevenir posibles accidentes y aumenta las prestaciones de servicio.

Los hormigones permeables también se caracterizan por filtrar productos peligrosos como aceite, gasolina o diesel en calles y avenidas, lo que reduce el índice de accidentes y ayuda a reducir la contaminación. Igualmente ante una precipitación se elimina la posibilidad de formación de nubes de agua lo que mejora sustancialmente la visibilidad.

Las aplicaciones no solamente se limitan en áreas peatonales o vías; también puede ser utilizado en muelles, canchas sintéticas, alrededor de piscinas, caminos vecinales, estructuras hidráulicas, entre otras.

Las experiencias expuestas en esta Tesis, han sido desarrolladas en concordancia con las normativas y requisitos internacionales y nacionales, y con ellos se han desarrollado mezclas de hormigón permeable producido con materiales hallados comúnmente en el país. Las normas ACI, ASTM e INEN guían para que la mezcla encontrada tenga la calidad suficiente como para ser utilizada de manera industrial.

## **1.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO**

### **1.2.1. Objetivos Generales**

Desarrollar Hormigones Permeables utilizando Cemento Holcim Rocafuerte tipo 'GU' y agregados de 3/8", #4 y #8 proveniente de la cantera del Rio Guayllabamba y comparar los resultados con uso de otro cemento y otro agregado.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Desarrollar una dosificación basada en las normas ACI y ASTM para producir hormigón permeable con características de permeabilidad y resistencia aceptables con materiales encontrados en Ecuador.
- Realizar ensayos de laboratorio que permitan determinar la resistencia a la compresión, flexión, contenido de vacíos, peso específico y capacidad permeable del hormigón.
- Encontrar correlaciones con los ensayos realizados tales como:
  - Compresión Vs. Unidad de peso.
  - Flexión Vs. Permeabilidad
  - Permeabilidad Vs. Tiempo, entre otros.

- Establecer conclusiones sobre los resultados encontrados y compararlos con aquellos encontrados en la literatura mundial.

## **2. BENEFICIOS AMBIENTALES Y BENEFICIOS DE SERVICIO**

El uso de hormigones permeables permiten un mejor manejo del agua de escorrentía sobre las vías debido a que su área de esparcimiento es significativamente menor que el mismo flujo manejado de manera tradicional, lo que permite controlar los posibles contaminantes lavados por el agua de escorrentía sean estos gasolinas, aceites, fertilizantes, sales, sedimentos o basura.

En Estados Unidos por ejemplo, se ha realizado desde el año 2000 una legislación la cual toma en cuenta los altos niveles de concentración de contaminantes en zonas urbanas. Esta ley es denominada Stormwater Phase II (Final Rule).

La ley Stormwater Phase II, se enfoca en el problema que conlleva el encausamiento de agua de escorrentía sobre una superficie, debido a que ésta se dirige hacia a un mismo punto (cunetas por ejemplo) lo que aumenta la concentración de contaminante y puede ser un potencial foco de infecciones y contaminación dentro de una zona urbana (Environmental Protection Agency, 2005).

El hormigón permeable al permitir que el agua de escorrentía se filtre, se está incrementando la absorción de agua por parte del suelo disminuyendo de esta forma la cantidad de agua que fluye a través de los canales de drenaje, lo que en consecuencia minimiza posibles inundaciones, de igual manera, el hormigón permeable al percollar el agua de escorrentía permite que los contaminantes se sedimenten sobre el suelo permitiendo que reacciones químicas y biológicas puedan tratar dichos contaminantes de manera natural (Tennis, Leming, & Akers, 2004).

Otra ventaja del hormigón permeable es la de mantener al suelo hidratado, si se considera la utilización de este hormigón en parqueaderos y zonas peatonales, la cantidad de agua que aporta a los acuíferos del subsuelo, mejorará los niveles de agua subterránea acumulada y mejora la vivencia de la vegetación.

En cuanto a la calidad de servicio que puede brindar el hormigón permeable se puede enumerar algunos beneficios en comparación con el hormigón tradicional.

Debido a que los principales usos son en áreas peatonales y de tráfico liviano como en parqueaderos o entradas a urbanizaciones, se puede señalar que el hormigón permeable ayuda a la disminución de zonas de acumulación de agua y deslizamientos de usuarios. En vías de uso vehicular liviano, evita la formación de nubes de agua formada por el paso de los autos, y de igual manera se eliminan los espejos de agua sobre la calzada lo que minimiza accidentes relacionados a esta causa.

Esta última propiedad es de gran valor para áreas alrededor de piscinas y zonas de duchas, en facilidades industriales o en cualquier área con flujo peatonal.

Ya que el color del hormigón permeable endurecido es de tonalidad gris clara, no permite que la absorción de calor proveniente de la radiación solar sea alta, además la matriz porosa característica de este tipo de hormigón hace que no pueda guardar esta radiación por un tiempo prolongado.

Por los altos niveles de insolación encontrados en el Ecuador esta propiedad lo hace especialmente útil para “refrescar” áreas urbanas, fundamentalmente aquellas con alto volumen de transeúntes (Tennis, Leming, & Akers, 2004).

### 3. APLICACIONES

Aunque el hormigón permeable a existido desde mediados del siglo XVIII (Ghafoori & Dutta, History of pervious concrete, 1995), uno de los mayores usos además del de percolar el agua es el de poder maximizar espacios de construcción debido que se suprimen accesorios como pozos de revisión, cunetas o canales de drenaje; entonces, para lugares urbanos en donde el costo por metro cuadrado es sustancial el hormigón permeable pasa a ser una alternativa bastante atractiva. A continuación se enumeran las aplicaciones del hormigón permeable:

|  |
|--|
| <b>Pavimentos de bajo volumen de Tráfico</b>                               |
| <b>Vías residenciales, callejones y calles de ingreso a urbanizaciones</b> |
| <b>Veredas</b>   |
| <b>Estacionamientos en centros comerciales</b>                             |
| <b>Patios</b>  |
| <b>Alrededor de piscinas</b>   |
| <b>Drenajes para pavimentos impermeables (sustituye a la cuneta)</b>       |
| <b>Paredes</b>   |
| <b>Canchas de Tenis</b>  |
| <b>Sub base para el soporte de pavimentos convencionales</b>               |

*Tabla 3.1: Aplicaciones del hormigón permeable*

**Fuente:** (Tennis, Leming, & Akers, 2004).

#### 3.1. Desempeño:

Debido a que el hormigón permeable carece (o posee un bajo contenido) de agregado fino, su apariencia es similar a granos de cereal aglomerados con miel. En consecuencia su puesta in situ es diferente al hormigón convencional. Para su alisamiento, se debe utilizar reglas vibrantes las cuales permiten que la superficie sea suave y uniforme.

Cuando las materias primas que conforman el hormigón permeable son elegidas adecuadamente, se ha demostrado que el hormigón permeable ayuda a biodegradar aceites, reduce el ruido provocado por la capa de rodadura y la llanta, además de preservar el ecosistema nativo y reducir costos (Ferguson, 2010)

Se han registrado hormigones permeables que exceden los 230 kg/cm<sup>2</sup> de resistencia a compresión y los 35 kg/cm<sup>2</sup> de resistencia a flexión, lo suficientemente altos como para su uso peatonal o reducido volumen de tráfico (Tennis, Leming, & Akers, 2004).

#### 4. NORMAS UTILIZADAS PARA EL DISEÑO DE HORMIGONES PERMEABLES

##### 4.1. Norma ASTM C39/C39M-04<sup>a</sup> (Método estándar para la prueba de resistencia a compresión)

La norma ASTM C39 se refiere a la geometría que deben poseer los cilindros de laboratorio a ser probados, así como información sobre la máquina de ensayos y la velocidad de prueba.

En este estudio y para este ensayo se utilizaron cilindros de 3" x 6" los cuales cumplen con esta especificación.

| Diámetro de especímenes de prueba<br>in. [mm] | Diámetro máximo de varilla lisa<br>in. [mm] |
|---|---|
| 2[50]   | 4[105]                                      |
| 3[75]   | 5[130]                                      |
| 4[100]  | 6.5[165]                                    |
| 6[150]  | 10[255]                                     |
| 8[200]  | 11[280]                                     |

*Tabla 4.1: Especificación para moldes de cilindros de hormigón*

Fuente: (ASTM C39, 2004)

Los ensayos a compresión simple a realizarse serán a los 3,7 y 28 días respectivamente.

##### 4.2. Norma ASTM C78/C78M-02 (Resistencia a Flexión del Hormigón)

La norma ASTM C78 se refiere con detalle a la geometría del espécimen a ser probado para determinar su resistencia a flexión, además de información acerca de la velocidad de prueba e interpretación de datos.

Se escogió la norma ASTM C78 referente a la resistencia a flexión por medio de carga a tres puntos.

No se consideró la norma ASTM C293 referente a la resistencia a flexión por medio de carga a un solo punto, y los argumentos para esa decisión se discutirán en secciones posteriores.

#### **4.3. Norma ASTM C127/C127M-01 (Método para determinar peso específico y absorción del agregado grueso)**

Este método cubre la determinación de absorción, densidad del agregado grueso, incluyendo la gravedad específica aparente, la cual se la ha denominado “SSD” del inglés “saturated surface dry”.

Para el cálculo de la SSD y absorción, se debe proceder a la saturación del agregado en agua, con un mínimo de 15 horas. (ASTM C127-04, 2004).

#### **4.4. Norma ASTM C192/C192M-07**

Esta norma especifica el método estándar para el mezclado y curado de los especímenes de hormigón a utilizarse en laboratorio.

Dentro de esta norma constan las especificaciones recomendadas para moldes cilíndricos verticales los cuales deben tener el doble de ancho que de largo. En concordancia con ASTM C192, se construyeron moldes cilíndricos metálicos de (3” de diámetro interior x 6” de largo), acorde con esta norma, para los moldes utilizados se debe utilizar una varilla de 10mm de diámetro y el número de golpes debe ser de 25 a dos capas para su adecuada compactación, sin embargo, según la Norma ACI 522R-06 referente a hormigones permeables recomienda el vibrado en lugar del varillado; queda a criterio del diseñador el escoger el método más apropiado.

En cuanto a los moldes destinados para pruebas a flexión se recomienda el uso de una máquina que este ajustada a los estándares de la ASTM C78-02. Dicho ajuste se cumple debido a que la máquina de flexión del Laboratorio de Materiales de la USFQ cumple estos estándares.

Las dimensiones de los moldes metálicos construidos son de una sección de 10cm x10cm y 60cm de largo. Las dimensiones de las viguetas serán de (10 x 10 x 30) cm, es decir, 3 viguetas por molde.

#### **4.5. Norma ACI 212.3R-14 (Mezclas químicas para el hormigón)**

La norma ACI 212.3R-14 se refiere a los aditivos utilizados en las mezclas de hormigón, y abarca desde retardantes hasta pigmentos para el hormigón; de esta norma se tomará en cuenta el Capítulo 4 referente a reductores de agua de alto rango, es decir, superplastificantes.

Las especificaciones detalladas del superplastificante escogido, así como sus propiedades son explicadas más adelante.



#### **4.6. Norma ASTM D422 (Clasificación de los agregados)**

Este método cubre la clasificación de agregados menores de 3/8" y retenidos en el tamiz #200.

De igual manera, brinda parámetros máximos y mínimos de las curvas granulométricas para que un lote de material este correctamente proporcionado.

#### **4.7. ACI 522R-06 (Propiedades mecánicas del hormigón permeable)**

El reporte del comité ACI 522R-06 provee de información técnica sobre la aplicación, métodos de diseño, materiales, propiedades, dosificación, métodos constructivos, pruebas, e inspecciones del hormigón permeable (ACI-522/06, 2006).

Sobre esta norma se basan los parámetros considerados para la construcción de un permeámetro de carga variable que se utilizó para calcular el valor de la permeabilidad del espécimen de hormigón permeable. Se describe con más detalle este procedimiento en el subcapítulo 5.3

#### **4.8. Norma ASTM C1157/C1157M-11 (Cemento hidráulico)**

Los requisitos presentados en ASTM C1157, se refieren a los componentes y los parámetros permitidos para ser considerados como cemento hidráulico. El cemento Holcim tipo 'GU' se acoge a esta norma por lo que su utilización cumple con los parámetros impuestos.

#### **4.9. Norma ASTM C1754/C1754M-12 (Método para determinar densidad y contenido de vacíos en hormigón permeable endurecido)**

La norma ASTM C1754-12 es probablemente la norma más nueva a utilizarse, en ella se especifican dos métodos distintos de secado para la determinación de la densidad y contenido de vacíos en el hormigón permeable endurecido.

El método 'A' fue utilizado en mezclas preliminares debido a que el tiempo de secado es muy extenso (hasta 1 semana), sin embargo, permitió determinar de manera consistente los rangos de valores a esperarse de densidades. El método B fue utilizado en ciertas mezclas ya que afecta las propiedades del hormigón al utilizar temperaturas elevadas.

El método 'A' consiste en secar la muestra de hormigón a temperatura constante de aproximadamente 70°C hasta conseguir densidad de masa constante. El tiempo requerido para encontrar este dato varía dependiendo de la cantidad de agua en la mezcla aunque puede demorar hasta 1-2 semanas.

El método 'B' consiste en secar la muestra de hormigón a temperatura de aproximadamente 120 °C. Dado a que su temperatura es más elevada que el método 'A' la determinación de la densidad constante será más rápida 1-2 días, sin embargo,

ASTM C1754 sugiere que el método 'B' sea utilizado cuando el espécimen no va a ser sometido a pruebas de resistencia ya que puede dañar su estructura.

#### **4.10. Norma INEN 2380 (Cemento Hidráulico)**

La norma INEN 2380 establece los requisitos de desempeño para los cementos hidráulicos para aplicaciones generales y especiales (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011). Esta norma es muy similar a la ASTM C1157.

Se utilizará el cemento Holcim 'GU', el cual es un cemento hidráulico de uso general que cumple con esta norma.

## 5. CONSTRUCCIÓN DE EQUIPOS

Para la realización de la presente de la investigación, fue necesario el diseño y la construcción de algunos equipos normalizados para la obtención de especímenes a los cuales se los sometió a los diferentes ensayos.

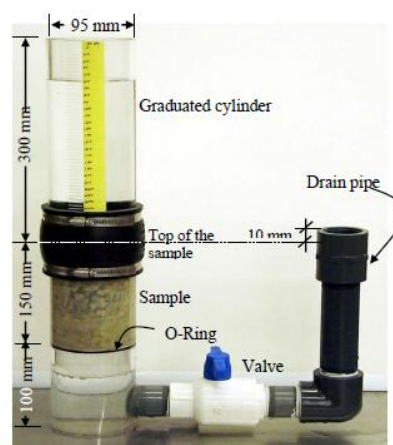
Acorde con las especificaciones ASTM C39, ASTM C78, y ACI 522R-06, es decir, especificaciones referentes a la geometría y materiales de cilindros, viguetas y permeámetro respectivamente, se procedió a la construcción de los moldes a utilizarse y permeámetro para las pruebas. Se decidió no adquirir dichos moldes debido a su alto costo y dificultad de compra al ser equipos importados, en especial el permeámetro.

Ya que el número de ensayos a realizarse es relativamente elevado y debido a que el agregado máximo en tamaño a utilizarse será el pasante del tamiz 3/8" pero retenido en tamiz #4, es decir, agregado de 3/8" de sección transversal máxima, se procedió a escoger las geometrías más idóneas para este propósito.

### 5.1. Permeámetro acorde con ACI 522R-06.

Para la construcción del permeámetro se siguió las recomendaciones del comité ACI 522R-06 y también de la contribución de Neithalath, Weiss y Olek (2008), que exponen los parámetros principales para la construcción del permeámetro de carga variable utilizado en este estudio

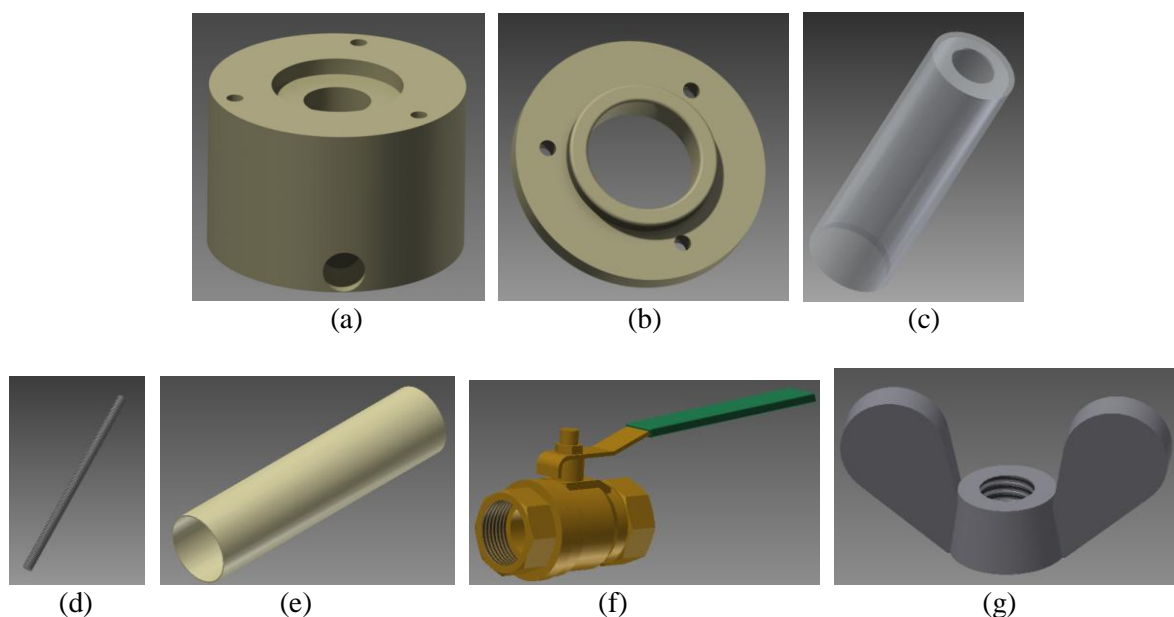
El Comité de la ACI 522R-06 recomienda la utilización de un modelo que contempla un cilindro acrílico, la muestra revestida de látex y una salida por medio de tubos PVC; las especificaciones se muestran a continuación:



*Figura 5.1: Características de Permeámetro presentado en ACI522R-06*

Fuente: (Neithalath, Weiss, & Olek, Predicting the Permeability of Pervious Concrete (Enhanced Porosity Concrete) from Non-Destructive Electrical Measurements, 2008)

Las partes fundamentales del permeámetro se presentan en la figura 5.2.



*Figura 5.2: Partes del Permeámetro.*

En el grafico (a) se puede apreciar la base del permeámetro que consta de soporte para apoyo del espécimen, 3 orificios para perfiles roscados y finalmente un tubo de desfogue de agua en su parte inferior.

En el grafico (b) se aprecia el soporte superior el espécimen cilíndrico, el cual consta de 3 orificios para perfiles roscados y el soporte central para el tubo acrílico. El tubo acrílico es mostrado en el grafico (c) y los perfiles roscados en el gráfico (d).

Se utilizaron tubos tipo PVC, una válvula globo y tuercas tipo mariposa, gráficos (e), (f) y (g) respectivamente. A continuación se muestra el permeámetro utilizado:



*Figura 5.3: Permeámetro utilizado*

Al momento de realizar la construcción del permeámetro basado en ACI 522R-06, no se consiguió una réplica exacta del modelo, sin embargo, este ‘error’ respecto al

permeámetro construido es compensado dentro de los parámetros establecidos por la ley de Darcy la que será utilizada para calcular la permeabilidad de la muestra.

El permeámetro utilizado es considerado como de nivel variable en donde la columna de agua varía desde un punto inicial a uno final, es decir, no existe un ingreso de agua externa que mantenga constante el nivel de agua.

Como puede observarse en el plano anexo, el permeámetro fabricado consiste en un tubo acrílico de 77.5mm de diámetro interior, diámetro externo de 79.5mm, y longitud de 300mm. Este embona en una base fabricada de nylon de 142 mm de diámetro la que contiene 3 orificios a 120° de separación entre sí para el ingreso de ejes roscados de apoyo.

La base consiste en un cilindro hueco fabricado en nylon de 100mm de altura y 152 mm de diámetro exterior con un orificio en su centro con diámetro de 70mm y 3 orificios en la cara superior en donde se acoplan los ejes roscados para brindar horizontalidad.

El orificio interior de 86mm de diámetro, poseen a 10mm de profundidad, una muesca de 3.5mm para el ingreso de un 'O-ring' sellante.

Después de los 10mm de profundidad del primer orificio se realizó un orificio de 18mm de longitud con un diámetro de 65mm. El centro del tubo de desfogue de agua está ubicado a 32mm de la cara superior del cilindro de nylon y tiene un diámetro de  $\frac{3}{4}$ " ó 19mm el cual se conecta a una ampliación (codo) de  $\frac{3}{4}$ " a 1" o de 19mm a 25.4mm. Posteriormente se une a un tubo de diámetro 1 pulgada con longitud de 198 mm.

La boca del tubo está 10mm por encima de la muestra, para asegurar su saturación.

A continuación se presentan los planos detallados del permeámetro construido.

# Dimensiones y Materiales de Permeámetro Diseñado

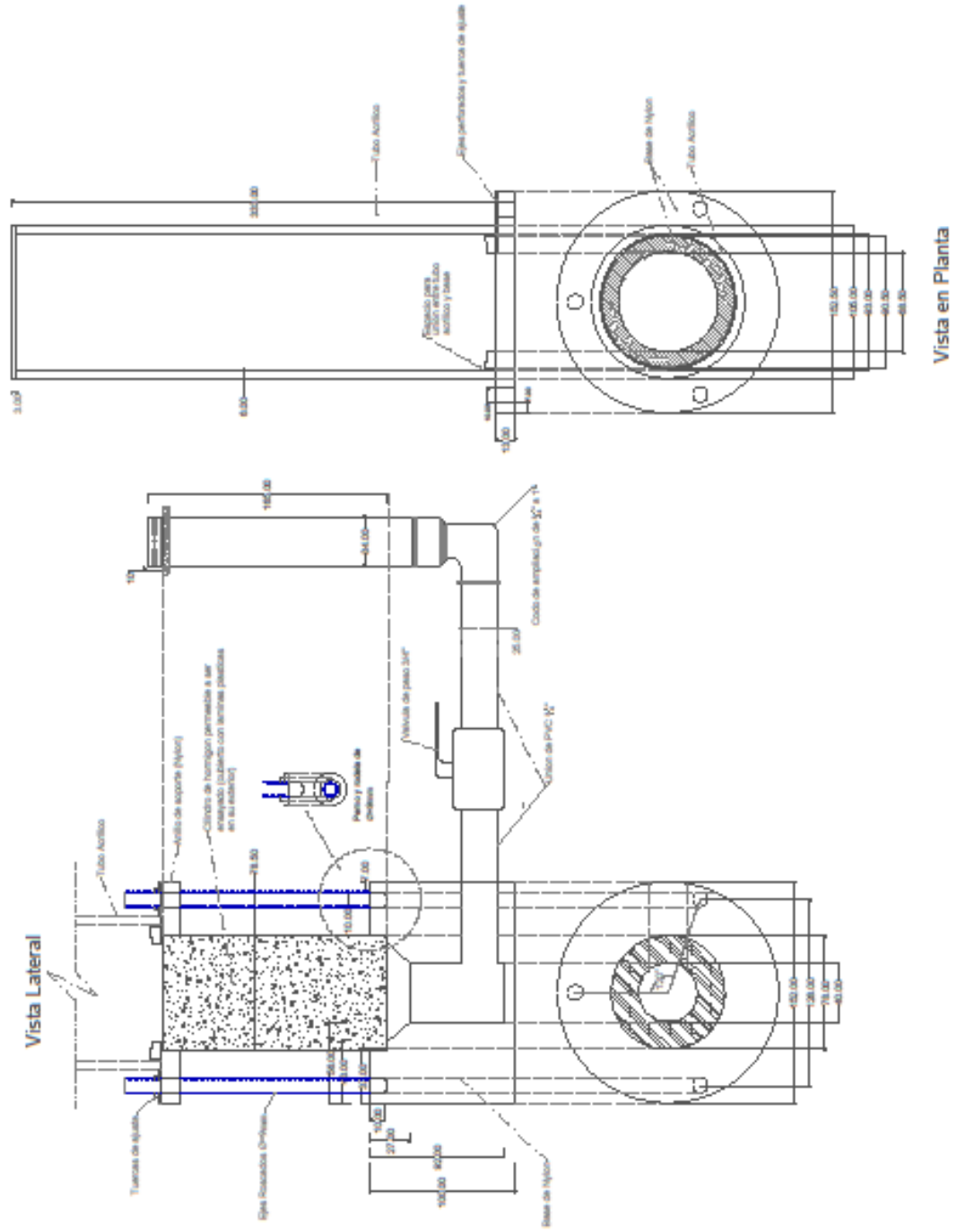
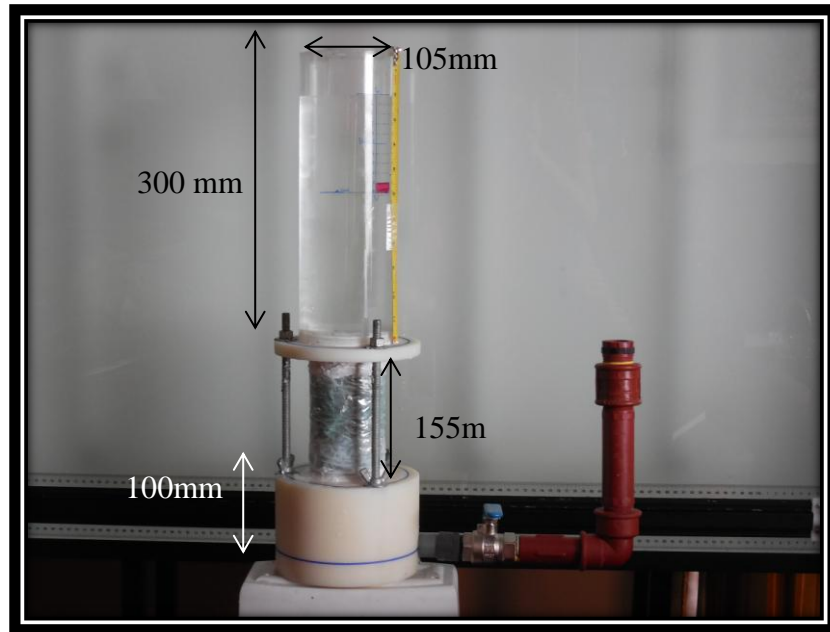


Figura 5.4: Dimensiones y Materiales de permeámetro diseñado



*Figura 5.5: Modelo construido (Basado en ACI 522R-06)*

El funcionamiento del permeámetro es descrito en la sección 7.5

## 6. MATERIALES

Los hormigones permeables tienen una granulometría no uniforme, y relativamente estrecha, con una cantidad alta de agregado 3/8" y agregado #4, y cantidades medias a bajas de agregados: #10, #20, y #60; se ha elaborado una mezcla de materiales en donde la norma ASTM D448-01 referente a la calidad del agregado grueso sea cumplida.

Para la búsqueda de la mina más adecuada debió considerarse las facilidades de adquisición y transporte.

El Material utilizado proviene de la mina del Río Guayllabamba. Estos, son agregados provenientes de las playas cercanas al río, desde donde el material es extraído, triturado y tamizado.

El cemento utilizado es el Holcim tipo 'GU', catalogado como de uso general.

Éste es un cemento hidráulico que fue considerado debido a su fácil compra en el mercado ecuatoriano.

Cabe recalcar que los estudios realizados en el mundo sobre hormigones permeables utilizan cementos portland ASTM C150. Sin embargo, el aprovisionamiento de este tipo de cemento en Ecuador es muy reducido y debido a que uno de los propósitos de este proyecto es demostrar que se puede desarrollar hormigón permeable a partir de materias primas de fácil acceso, se consideró el uso del cemento Holcim tipo "GU" que cumple con las normas ASTM C1157.

En cuanto a la microsílica y superplastificante a utilizarse, ambas cumplen con las normas ASTM C1240 y ASTM C494 respectivamente y fueron adquiridas en el mercado local.

A continuación se describen detalladamente tanto los agregados como los cementantes a ser utilizados.

### 6.1. Agregados

Para la producción de hormigón convencional es necesario considerar la resistencia de la adhesión existente entre el cementante y el agregado y la resistencia del agregado por sí solo. Resulta que en hormigones convencionales la adhesión entre el cementante y el agregado suele ser más débil que el agregado por sí solo.

Para Hormigones Permeables y por lo tanto porosos, la única adherencia capaz de generar resistencias considerables es solo aquella entre el cementante y el agregado. Es importante entonces, utilizar un, agregado con buena resistencia a la compresión como el granito, así como un cemento con propiedades de fraguado adecuado (Mulligan, 2005).

Para el Hormigón Permeable, la fuerza de adhesión agregado-pasta es fundamental para alcanzar alta resistencia (Tennis, Leming, & Akers, 2004). Debido a



las características de una matriz abierta es necesario obtener alta adherencia entre la pasta del cemento y el agregado.

### **6.1.1. Descripción del agregado utilizado**

Para esta investigación se ha escogido un agregado proveniente de las canteras del río Guayllabamba, esto debido a facilidades de desplazamiento y adquisición y por su buen comportamiento mecánico.

El agregado de la cantera del Río Guayllabamba tiene una abrasión promedio de 26.1%, muy por debajo del máximo permitido por la norma INEN 872 que especifica un valor del 50% de abrasión para agregado destinado a la construcción de calzadas.

Por otro lado el agregado es proveniente de andesita triturada y angulosa (Guillén, 2013).

Esta propiedad brinda mayor adherencia con la pasta cementante, así como permite la creación de una matriz abierta granular que brinda la propiedad permeable al hormigón.

Sin embargo de la buena capacidad de resistencia a la abrasión del agregado, al ser un material de depósito tipo aluvial, se encuentran proporciones bajas de feldespatos calizas y muy bajas de pómez, por lo que se debe calcular sus propiedades relevantes antes de su uso.

Debido a que durante la experimentación se midió una humedad relativa del aire (Guayllabamba) entre el 40 % y 65% se tomó al porcentaje de absorción como el 2% para los agregados, lo cual redundó en una mejor estabilidad a la hora del mezclado, así como mejores resultados a las formulas encontradas.

### **6.1.2. Granulometría**

La granulometría presentada a continuación fue evaluada de la compra de un lote de 1 m<sup>3</sup> de la cantera del Río Guayllabamba.

Hay que mencionar que en esta cantera no se realizan controles sobre la mezcla del agregado, por lo que normalmente este no cumplirá las especificaciones ASTM D422. El uso del material para estas investigaciones, debió ajustar los valores granulométricos principalmente así como el lavado de finos.

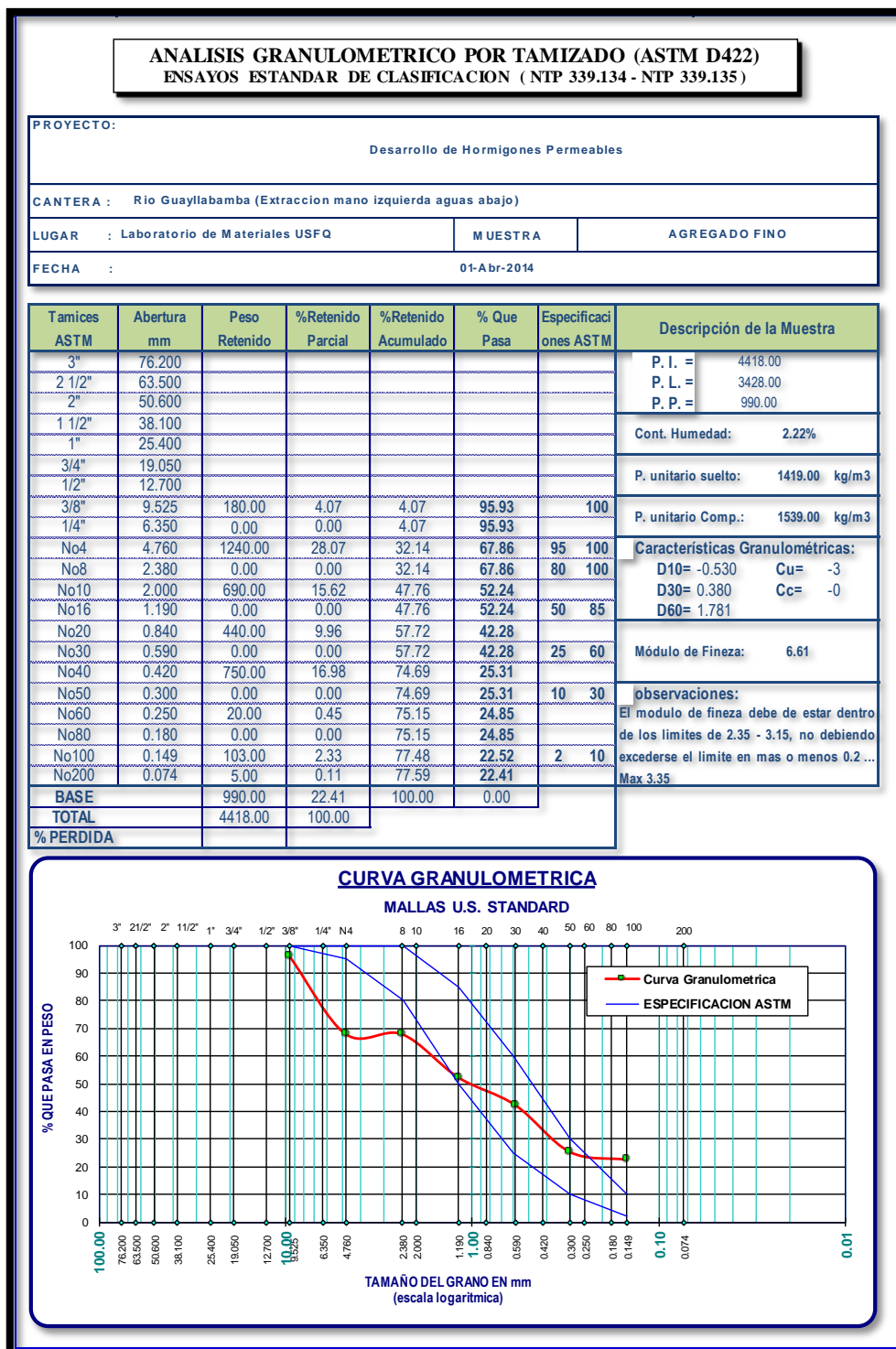


Figura 6.1: Granulometría encontrada para agregados Río Guayllabamba

Como se puede observar existe una alta cantidad de agregado #4 y #10. Sin embargo, las cantidades de agregado #40 y #60 fueron bajas, en consecuencia, la norma ASTM D422 no es cumplida.

Como los agregados utilizados para el diseño de hormigones permeables, tienen una granulometría discontinua, los parámetros granulométricos especificados en ASTM D422 no son aplicables.

A la fecha de este trabajo no se ha creado un comité especializado para emitir recomendaciones sobre granulometrías de hormigones permeables, labor de investigación que debe ser continuada.

### 6.1.3. Densidad y Absorción

Tanto la densidad como la absorción de los agregados son parámetros indispensables para el diseño de cualquier tipo de hormigón. Estos datos no fueron provistos por el proveedor de los agregados.

Se procedió entonces con la determinación de estos parámetros en el laboratorio de materiales de la USFQ en donde se procedió según la norma ASTM C127-04.

En la sección 8.1 se presenta el cálculo detallado de la densidad, peso específico y Absorción del agregado grueso, basado en la norma ASTM C127-04. A continuación se presentan los datos más relevantes de dicho estudio:

|             | <b>Peso Específico Superficie Saturada Seca</b> [gr/cm <sup>3</sup> ] | <b>% Absorción</b> |
|-------------|---|--------------------|
| <b>3/8"</b> | 2.45  | 2.60               |
| <b>#4</b>   | 2.38  | 2.32               |
| <b>#10</b>  | 2.35  | 2.66               |
| <b>#60</b>  | 2.37  | 1.51               |

Tabla 6.1: Valores de densidad y absorción encontrado para agregados

Los datos obtenidos fueron corroborados por el estudio realizado por Andrés Carpio de la Universidad Central del Ecuador de las distintas canteras del Distrito Metropolitano de Quito; en este estudio se halló los siguientes valores para los agregados de la cantera del Río Guayllabamba:

| Tesis   | Propiedades de los Agregados                        |  |   |   |  |      | Especificación: ASTM C-<br>T.N.M (pulg) - (") |
|---|---|--|---|---|--|------|---|
|   | ASTM C-127 y ASTM C-128                             |  |   | ASTM C-128  |  |      |   |
|   | Agregado Fino                                       |  |   | Agregado Grueso                                     |  |      | Agregado Grueso                               |
| $\delta$ ap.<br>SUELTA<br>(gr/cm <sup>3</sup> ) | $\delta$ ap.<br>COMPACTADA<br>(gr/cm <sup>3</sup> ) | PESO<br>ESPECÍFICO<br>$\gamma$ (gr/cm <sup>3</sup> ) | $\delta$ ap.<br>SUELTA<br>(gr/cm <sup>3</sup> ) | $\delta$ ap.<br>COMPACTADA<br>(gr/cm <sup>3</sup> ) | PESO<br>ESPECÍFICO<br>$\gamma$ (gr/cm <sup>3</sup> ) |      |   |
| TICV/1108                                       | 1.66  | 1.74   | 2.52  | 1.44  | 1.63   | 2.41 | 1   |
| TICV/1110                                       | 1.65  | 1.75   | 2.42  | 1.11  | 1.31   | 2.32 | 1   |
| TICV/1112                                       | 1.63  | 1.73   | 2.51  | 1.52  | 1.64   | 2.51 | 1   |
| TICV/1113                                       | 1.60  | 1.72   | 2.53  | 1.43  | 1.59   | 2.51 | 1   |
| TICV/1114                                       | 1.64  | 1.75   | 2.47  | 1.30  | 1.45   | 2.16 | 1   |
| TICV/1115                                       | 1.67  | 1.78   | 2.51  | 1.27  | 1.42   | 2.50 | 3/4   |
| TICV/1232                                       | 1.42  | 1.55   | 2.49  | 1.38  | 1.47   | 2.57 | 1   |

Figura 6.2: Propiedades de los agregados encontrados en Tesis: "Análisis de los agregados del Distrito Metropolitano de Quito"

Fuente: (Carpio, 2014)

Existen ligeras variaciones respecto a los datos encontrados por Carpio y el actual trabajo de investigación, que puede estar relacionadas al lote de donde fueron escogidas.

Es por ello, que canteras de extracción y venta de material deberían realizar control de densidad y porcentaje de absorción de agregados por cada lote de extracción.

#### 6.1.4. Granulometría de los Agregados para el diseño de hormigones permeables

Para esta investigación se utilizó aproximadamente  $1\text{m}^3$  de material para ser lavado, secado y tamizado. Los tamices utilizados para clasificar el material fueron:

| Descripción                                | Denominación |
|--|--------------|
| Pasante de Tamiz 3/8 retenido en tamiz #4  | 3/8"         |
| Pasante de Tamiz #4 retenido en tamiz #10  | #4           |
| Pasante de Tamiz #10 retenido en tamiz #20 | #10          |
| Pasante de Tamiz #40 retenido en tamiz #60 | #60          |

Tabla 6.2: Descripción y denominación dada a los agregados

Para obtener las granulometrías antes mencionadas se debió realizar un proceso de separación, limpieza y secado del material, es por esto que se construyó un tamiz cilíndrico con capacidad de tamizado de 20kg por carga para lo cual se separan los agregados mayores a 3/8. A continuación se muestra el tamiz cilíndrico:

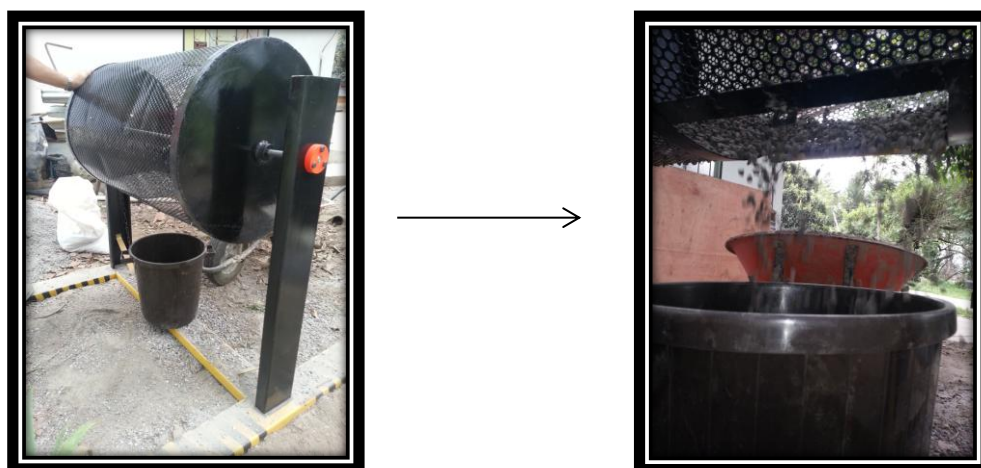
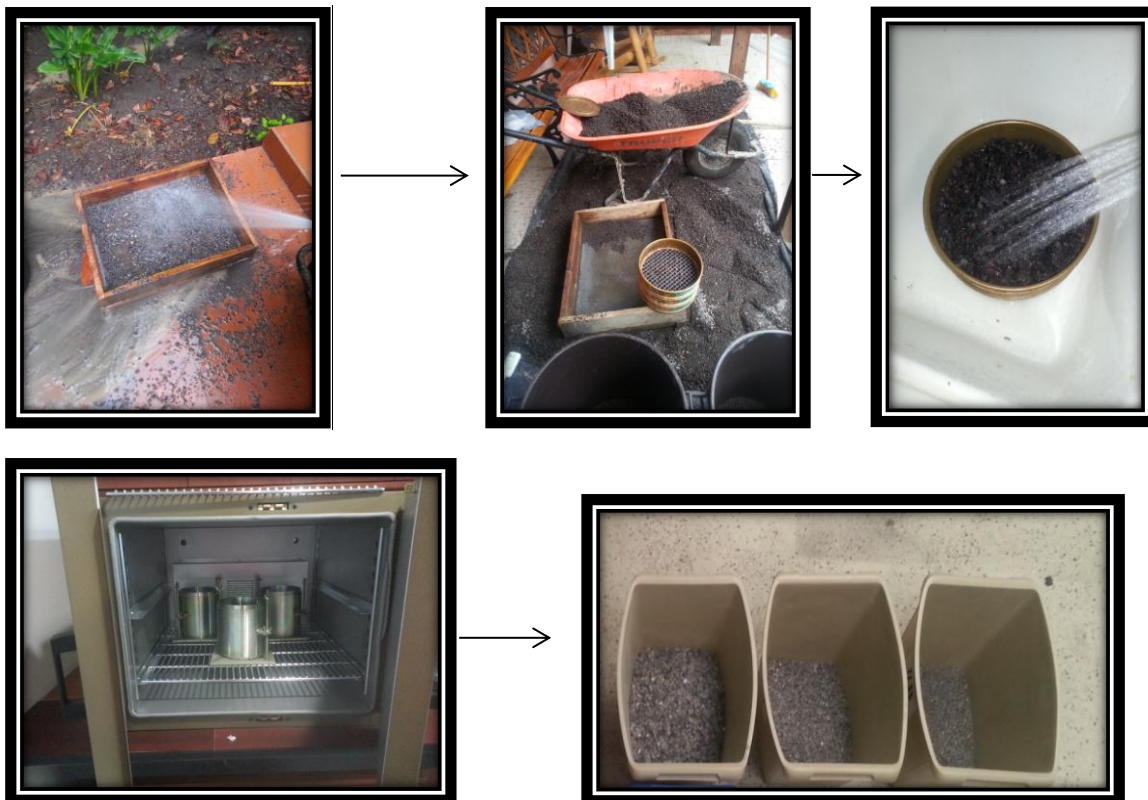


Figura 6.3: Proceso de tamizado en barril

El agregado que se observa escapando por la escotilla es correspondiente a una granulometría de  $3/4$ " y mayor, el cual es almacenado para una posterior investigación ya que no será utilizado en la actual.

Posteriormente a la separación del agregado de  $\frac{3}{4}$ " y mayor, se imponen 2 controles de lavado. Primero se lava todo el agregado una vez separado aquellos mayores a  $\frac{3}{8}$ ", seguido a esto se los procede a secar y tamizar, finalmente se vuelven a lavar, secar y tamizar para así conseguir un mínimo de arena en los agregados además de evitar el exceso de humedad en los mismos.



*Figura 6.4: Proceso de lavado y secado del agregado.*

Una vez secos y tamizados las 4 granulometrías a ser usadas se procedió a almacenarlas en contenedores tapados.

## 6.2. Cementantes

Debido a que en la nomenclatura internacional no ha establecido con exactitud un nombre para todos los tipos de cementos existentes, se adopta en este estudio el enfoque estadounidense actual dado en la norma ASTM C1157, en donde se habla de cementos hidráulicos mezclados (Neville A. , 1999).

### Naturaleza Cementante de Materiales en cementos mezclados

| Material   | Naturaleza cementante   |
|--|---|
| <b>Clinker de cemento portland</b>                     | Plenamente cementante (hidráulico)  |
| <b>Escoria de alto horno granulada y molida (ggbS)</b> | Hidráulica latente, hidráulica algunas veces                                    |
| <b>Puzolana natural (clase N)</b>                      | Hidráulica Latente con cemento portland   |
| <b>Ceniza volante sílicea (pfa) (clase F)</b>          | Hidráulica Latente con cemento portland   |
| <b>Ceniza volante de alta cal (Clase C)</b>            | Hidráulica Latente con cemento portland pero también ligeramente hidráulica     |
| <b>Humo de Sílice</b>                                  | Hidráulica Latente con cemento portland pero pesadamente física en acción.      |
| <b>Relleno calcáneo</b>                                | Física en acción pero con acción hidráulica latente ligera con cemento portland |
| <b>Otros rellenos</b>                                  | Químicamente inerte, física solo en acción.                                     |

*Tabla 6.3: Naturaleza cementante de materiales en cementos mezclados*  
Fuente: (Neville A. , 1999).

Para el caso del cemento Holcim tipo ‘GU’, se lo considera como proveniente de clinker de cemento portland con algunas adiciones, es decir, (hidráulico), y cumple con las especificaciones INEN 2380 y ASTM C1157.

#### 6.2.1. Análisis del cemento Holcim tipo GU (Uso General).

El Cemento Holcim Rocafuerte tipo ‘GU’, es descrito de uso general con aplicaciones en cimentaciones, vigas, pilares, losas, morteros, estabilización de suelos, vías, pisos industriales, tanques y canales de agua no residual (Holcim, 2013).

Las ventajas de este tipo de cemento se describen a continuación:

- Menor calor de hidratación, reducción de segregación, mayor trabajabilidad, resistencia química moderada a sulfatos y cloruros, menos consumo de cemento por metro cúbico de hormigón. (Holcim, 2013)

Según las normas INEN 2380 (cemento tipo ‘GU’), su resistencia a los 28 días debe ser de 28 Mpa, es decir, 286 kg/cm<sup>2</sup>; según datos registrados por el fabricante, el cemento tipo ‘GU’ brinda una resistencia a los 28 días de 32.2 Mpa, es decir, 329 kg/cm<sup>2</sup>.

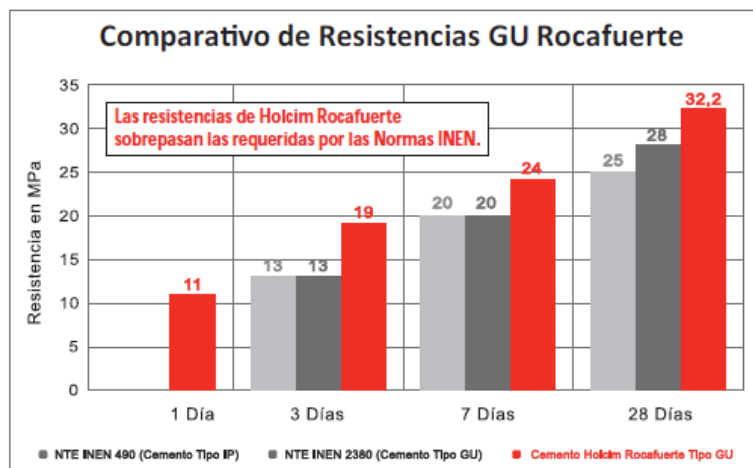


Figura 6.5: Comparativo de resistencia a resistencia a compresión simple de cemento Holcim tipo 'GU'  
Fuente: (Holcim Ecuador S.A., 2013)

Cabe recalcar que el cemento óptimo para este tipo de hormigón es el cemento portland ASTM C150, sin embargo, por su escasa disponibilidad en Ecuador se optó por un cemento hidráulico ASTM C1157.

### 6.2.2. Microsílica

La microsíllica es un material proveniente del dióxido de sílice, es una partícula amorfa poliforme no cristalina (U.S. Department of Transportation, 2011).

Inicialmente fue presentado como una puzolana, sin embargo, debido a sus prestaciones no tan solo como puzolana altamente reactiva sino benéfica en otros aspectos tuvo que ser considerado bajo una nueva categoría. (Neville A. , Tecnología del concreto, 1999) . Para la obtención de microsíllica el SiO gaseoso que escapa, se oxida y se condensa en la forma de partículas extremadamente finas de sílice amorfo (SiO<sub>2</sub>) lo cual lo caracteriza por ser altamente reactivo con lo que se acelera la reacción con el hidróxido de calcio (Neville A. , Tecnología del concreto, 1999). Por causa de esta reactividad, es posible emplear la microsíllica como un reemplazo a una porción pequeña de cemento.

En el proceso de obtención de la microsíllica se pueden encontrar hornos con alta eficiencia de recuperación de calor y otros con baja eficiencia, al tener una baja recuperación de calor las concentraciones de carbono en la microsíllica se elevan, produciendo un color oscuro de la misma; por otro lado, cuando la eficiencia de recuperación de calor es alta los niveles de carbono se mantienen virtualmente inexistentes con lo que la



microsílica tiene un color gris claro. En el caso de la microsíllica a utilizarse su color es claro.

La pequeñez de sus partículas (entre menores a 0.03 y 0.3  $\mu\text{m}$ ) permite un mejor empaqueo de la pasta de cemento lo que eleva la resistencia a compresión. Sin embargo, las propiedades de la microsíllica no solamente se limitan a sus virtudes cementantes. A más de incrementar la adherencia entre la pasta y el agregado, sus partículas extremadamente finas de microsíllica (0.03  $\mu\text{m}$  e inferiores) se localizan sobre la interface de la pasta de cemento y el agregado (Neville A. , Tecnología del concreto, 1999).

Se conoce que el área intersticial entre la pasta del cemento y los micro espacios de las caras de los agregados son una fuente de debilidad para las propiedades mecánicas del hormigón; debido a la finura de la microsíllica, ésta puede alojarse en dichos espacios contribuyendo al empaque entre la pasta del cemento y las caras de los agregados mejorando así la matriz cementante de la mezcla.

A continuación se muestran imágenes comparativas tanto en tamaño del cemento vs. Microsílica (la cual se sabe es alrededor de 100 veces menor) además de las diferencias entre una mezcla de hormigón realizada sin microsíllica y otra realizada con microsíllica.

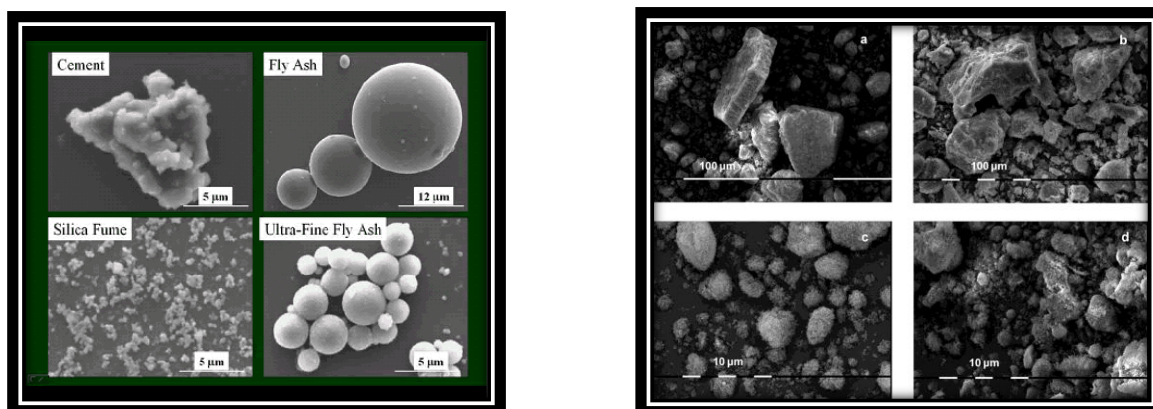


Foto comparativa entre partícula de cemento y partícula de microsíllica

Mezcla sin microsíllica (Izq) y mezcla con microsíllica (Der).

Figura 6.6: Comparación en tamaño entre partícula de cemento y partícula de microsíllica.

Fuente: (GeoScienceWorld, 2014)

Es de vital importancia el uso de la microsíllica en el desarrollo de hormigones permeables, ya que al ser hormigones con cantidades bajas a nulas de arena, las propiedades cementantes se ven considerablemente afectadas con lo que es preponderante el reforzar la matriz adherente entre



la pasta del cemento y los agregados así como mejorar el empaque de la misma pasta de cemento.

Generalmente para la dosificación se considera una proporción entre el 6.5% a 8% en peso de cemento (Neville A. , 1999), sin embargo, dicha proporción para los propósitos del hormigón permeable son muy altas ya que reducen de manera muy considerable los vacíos provocando un hormigón impermeable y por tanto inútil para este propósito.

Para este proyecto se ha considerado un 4% en peso de microsíllica con lo que se previene la oclusión de espacios intersticiales producto de la adhesión de la microsíllica y conlleva a tener como principal variable de permeabilidad a la granulometría escogida así como la relación W/C obtenida, dado a que la relación W/C de diseño fue considerada como 0.25; la relación del agua con el cementante por si solo va a dar como resultado un hormigón muy seco por lo que es indispensable el uso de un aditivo el cual será descrito a continuación.



*Figura 6.7: Microsíllica sobre cemento*

### **6.3. Aditivos**

Los aditivos han surgido a través de la historia como componentes para mejorar las propiedades del hormigón de una manera eficaz y con efectos específicos. Se conoce el uso de leche y lodo en la época romana, así como huevos durante la edad media en Europa o extracto de cacto mezclado con caucho natural en Mesoamérica y Perú (Chemical admixtures for concrete ACI, 2012).

A partir de inicios y mediados del siglo XX, los estudios sobre la química del cemento Portland y el descubrimiento de nuevas soluciones y productos, han permitido el desarrollo de aditivos para la industria del hormigón; hoy en día se encuentran en el mercado aditivos, tanto líquidos como en polvo.

Los avances tecnológicos han permitido establecer efectos cada vez más específicos además de mejorar la consistencia en la reacción logrando así en algunos proyectos utilizar hormigones con  $f'_c=700 \text{ kg/cm}^2$  de resistencia promedio a la compresión simple, como sucedió en la construcción del Hover Dam ByPass en 2005 (Jeff, 2011) .

Algunos efectos específicos que se logran a través del uso de aditivos:

- Incrementar la trabajabilidad sin incrementar el agua o disminuir el agua manteniendo la trabajabilidad.
- Acelerar o retardar el tiempo de reacción.
- Reducción o eliminación de la retracción, o expansión.
- Modificación de la capacidad de sangrado (superplastificante).
- Reducción de Segregación.
- Mayor fluidez.
- Mayores propiedades cohesivas (Disminución en revenimiento)
- Controlar la temperatura de curado
- Obtención de altas resistencias tempranas.

Como se puede observar existe una amplia gama de aditivos para cada tipo de necesidad; es así que en el estudio se escogió un superplastificante que permita obtener una relación W/C baja pero manteniendo buena trabajabilidad y bajo a nulo revenimiento, esto último para lograr una matriz cementante lo más uniforme posible y logrando alta resistencia a la compresión, moderada resistencia a la flexión y aceptable permeabilidad.

Con la experiencia obtenida por parte del equipo USFQ en la Competencia Mundial de Hormigones con Fibras de Vidrio (FRP) realizada por la ACI en el mes de abril 2013 en Minneapolis, se pudo establecer con mayor confianza dos posibles superplastificantes, estos fueron el Glenium 3000 NS y Rheobuild 1000, ambos de la compañía BASF®.

Al tratarse de hormigones permeables, el superplastificante Rheobuild 1000 brinda una propiedad más plástica contrario al Glenium 3000NS; además, el costo disminuye en 2 veces lo cual ayuda al objetivo de realizar hormigones permeables con materias fáciles de adquirir y de bajo costo.

Cabe mencionar que el superplastificante Rheobuild 1000 es catalogado por la norma ASTM C494-92 como de tipo F. Se debe aclarar que el superplastificante catalogado como tipo G también se trata de un superplastificante; sin embargo, este también tiene propiedades retardantes (ASTM C464-92, 1992).

A continuación se describe y profundiza sobre el superplastificante escogido.

### 6.3.1. Rheobuid 1000

Existen cuatro categorías principales de superplastificantes (Neville A. , Tecnología del hormigón, 1999):

:

- Condensados de melamineformaldehído.
- Condensados de naftalenofomraldehido sulfonado.
- Lignosulfatos modificados.
- Ésteres acidosulfónicos.
- Ésteres de carbohidrato.

Entre estas cuatro categorías el superplastificante Rheobuild 1000 es un condensado de naftalenofomraldehido o también llamados superplastificantes con base en naftaleno.

Al superplastificante con base en naftaleno se ha logrado modificarlo con la inclusión de un co-polímero con un grupo funcional sulfónico y un grupo de carboxilo (Young, 2005). Esta modificación permite mantener la carga electrostática sobre las partículas de cemento e impide la floculación por adsorción sobre la superficie de las partículas de cemento; dicho co-polímero es más activo a temperaturas más altas por lo cual es ideal en climas cálidos, donde el calor de reacción no tenga mayor relevancia (Neville A. M., 1999).

Las moléculas grandes producidas por esta carga produce que se doblen entre ellas alrededor de las partículas de cemento, lo cual a su vez produce una carga negativa considerable lo que causa la repulsión de unas con otras; la consecuencia de esta repulsión electrostática es la defloculación y la dispersión de las partículas de cemento (Young, 2005).



*Figura 6.8: Proceso de defloculación y dispersión de las partículas de cemento (Formación de bolas).*

Posteriormente y, según el aprovechamiento deseado, las partículas de cemento dispersadas son hidratadas con el contenido óptimo, lo que produce una hidratación de aceptable a óptima con bajo contenido de agua.



Figura 6.9: Mezcla una vez cumplida la reacción del superplastificante.

El aprovechamiento de este superplastificante puede ser obtenido de dos maneras:

- logrando gran trabajabilidad con baja relación W/C o
- Una resistencia muy alta y trabajabilidad aceptable.

Para este estudio se elige la segunda, ya que se requiere obtener una pasta de cemento uniforme sobre el agregado, para compensar la falta de arena en la mezcla y conservar la permeabilidad.

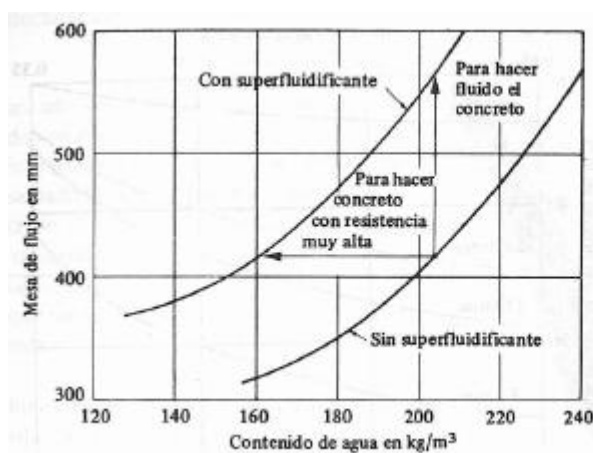


Figura 5.8. Relación entre extensión de mesa de flujo y contenido de agua de concreto con y sin superfluidificante <sup>5.42</sup>

Figura 6.10: Relación entre extensión de mesa de flujo y contenido de agua de hormigón con y sin superplastificante.

Fuente: (Neville A. , 1999)

Cabe recalcar que el superplastificante utilizado o cualquiera en el mercado no modifica de manera fundamental la estructura de la pasta de cemento; su función principal es la de distribuir de manera más uniforme las partículas de cemento para que puedan ser hidratadas de mejor manera.

Rheobuild 1000 es un aditivo superplastificante reductor de agua de alta actividad, por sus características, permite la fabricación de hormigones líquidos partiendo de consistencias secas sin la necesidad de adicionar más agua de amasado y sin provocar retrasos de fraguado, ofreciendo elevadas resistencias iniciales sin pérdida de resistencias finales. (BASF, 2012)

Normado por ASTM C494, el superplastificante Rheobuild 1000 presenta las siguientes propiedades:

| Propiedades  |  |
|--|--|
| <b>Función principal:</b>  | Superplastificante/ Reductor de agua de alta actividad |
| <b>Función Secundaria:</b>   | Acelerador de endurecimiento                           |
| <b>Efecto secundario:</b>  | Riesgo de disgregación a dosificaciones elevadas       |
| <b>Aspecto Físico:</b>   | Líquido marrón oscuro, con olor fuerte.                |
| <b>pH, 20°C:</b>   | 6-9  |
| <b>Densidad, 20°C:</b>   | 1.19±0.03 g/cm <sup>3</sup>                            |
| <b>Contenido en cloruros:</b>  | <0.1%  |
| <b>Los datos técnicos reflejados son fruto de resultados estadísticos y no representan mínimos garantizados.</b> |  |

*Tabla 6.4: Propiedades de Superplastificante Rheobuild 1000*

Fuente: (BASF, 2012)

Conservado de una manera adecuada, es decir, en un ambiente de temperatura constante inferior a 30°C pero mayor a 5°C y un ambiente hermético, Rheobuild 1000 puede conservarse hasta 12 meses.

En el estudio, la fecha de fabricación del superplastificante a utilizarse data de noviembre 2013 con lo que se garantiza el correcto funcionamiento del mismo.

La dosificación utilizada para el diseño fue del 1% de porcentaje en peso. Esta masa brinda adecuada consistencia sin la necesidad de agregar agua o algunas veces disminuyendo la misma.

Además del uso del superplastificante y los cementantes y agregados antes descritos, existe la necesidad externa de uniformizar las superficies de los cilindros a ser probados; es por ello que surgió la necesidad del uso de un 'capping' previo a los ensayos.

La ficha técnica referente al superplastificante Rheobuild 1000 se presente en la sección 15.2.

#### 6.4. Capping

Debido a que el hormigón permeable presenta gran rugosidad en su superficie, es necesario su alisamiento paralelo pues de otra manera, los resultados de los ensayos a compresión pueden variar al producirse momentos sobre la cara superior del cilindro. Para ello se utilizó capping y un molde de base fabricado para las dimensiones del cilindro. Podía haber sido utilizada una capa de resina, pero su costo y la relativa baja resistencia de los cilindros no lo ameritaron.

El capping o empastado, en sí consiste de una solución de ladrillo, azufre y puzolana en proporciones 0.3/2/1, donde al ser calentada a una temperatura constante superior a los 80 °C logra modificar su estado hasta convertirse en una solución líquida. Es importante mencionar que la temperatura para lograr un estado líquido fluido se debe mantener oscilante entre 125 °C y 70 °C ya que si se calienta por encima de dicha temperatura se vuelve espesa como breya y si su temperatura baja se solidifica.

El cocido de estas materias primas deben ser realizados sobre ollas de acero inoxidable con accesorios del mismo material ya que estos no permiten que la mezcla se pegue a ellos lo que hace fácil la limpieza; también se debe realizar la cocción en un área de alta ventilación y alejado de materiales que puedan corroerse debido al desprendimiento y formación de ácido sulfúrico, el cual es altamente corrosivo y venenoso. La resina obtenida es altamente cohesiva lo que permite que se aloje entre los vacíos del hormigón permeable y forme una capa uniforme que ayuda a refinar los resultados; todos los ensayos de permeabilidad fueron realizados antes del empastado.



Figura 6.11: Proceso de cocción

## 7. CAPACIDADES MECÁNICAS

Probablemente las capacidades mecánicas son la parte más importante al momento de diseñar cualquier tipo de estructuras de hormigón, es por ello que hay que poner especial atención en los ensayos a realizarse siguiendo estrictamente las recomendaciones brindadas por organismos como la ACI –ASTM –INEN; sin embargo, al tratarse de hormigones permeables, algunas de las recomendaciones no necesariamente surten un efecto positivo al momento de tomar muestras, estos impedimentos serán detallados más adelante.

Para el diseño de cualquier estructura influyen dos principales fuerzas sobre el hormigón: los esfuerzos a la compresión y aquellos que generan flexión.

A las características antes indicadas para estructuras, se debe agregar la capacidad permeable del hormigón, que es afectado por un elemento disolvente (agua, agua con contaminantes, aguas con bacterias, etc.) fuerzas que normalmente provienen de las condiciones meteorológicas. Otras fuerzas que afectan al hormigón permeable es la abrasión existente por el uso cotidiano.

Para el objetivo tangible de esta tesis, se ha propuesto el diseño de un pavimento de tipo permeable que cubra el área del parqueadero principal de la Universidad San Francisco de Quito; para esto se deben conocer parámetros de carga, área, meteorología, tiempo de vida, serviciabilidad, entre otros parámetros. Cada uno de estos parámetros serán descritos dentro de los capítulos subsiguientes.

### 7.1. Capacidad Compresiva

La capacidad de resistencia a la compresión uniaxial es especialmente importante en elementos como columnas, pilotes o cualquier elemento sometido enteramente a este tipo de fuerza. Como es conocido, el hormigón tiene un gran desempeño a la resistencia a la compresión.

Se supone que la resistencia del hormigón a una determinada edad típicamente aceptada como 28 días para diseños finales, y curado en agua a una temperatura prescrita depende principalmente de dos factores:

- La relación W/C obtenida.
- El grado de compactación.

Se conoce que la relación W/C determina la porosidad de la pasta de cemento endurecida, de igual manera el grado de compactación determina el porcentaje de vacíos realizados en la mezcla.

Si bien en hormigones tradicionales y de alto desempeño tanto el grado de compactación como la relación W/C deben ser cuidadosamente establecidos, la realidad para los hormigones permeables es que el grado de compactación va en contra del propósito fundamental, es decir, a mayor grado de compactación menor

permeabilidad. Por otro lado, relaciones muy bajas de W/C pueden afectar la formación adecuada de una matriz cementante uniforme alrededor de los agregados lo que produce una disminución en resistencia (Dewoolkar & McCain, 2010) .

Debido a que no solamente se puede diseñar una mezcla de hormigón basado en la relación W/C y grado de compactación, también se deben estudiar otros factores los cuales tratan sobre la trabajabilidad del hormigón, desempeño, y uniformidad, estos son:

- Relación C/Agg,
- Granulometría,
- Textura superficial,
- Forma,
- Resistencia y rigidez de las partículas del agregado
- Densidad,
- Tamaño máximo del agregado y forma

La relación C/Agg para hormigones permeables es un factor importante, ya que está ligado directamente con la permeabilidad. Una relación C/Agg inferior a 4 puede ocasionar oclusión permanente en el hormigón produciendo resultados irrelevantes (Ferguson, 2010).

La granulometría es también un factor importante para el diseño de hormigones permeables; de hecho, es uno de los factores más influyentes en la búsqueda de alta resistencia tanto a la flexión como a la compresión sin afectar de manera considerable la permeabilidad. Como se verá más adelante en este trabajo, el cambio de granulometría causa efectos considerables en los resultados realizados.

Tanto la forma como la resistencia y densidad de los agregados es un factor influyente al momento de establecer el costo de producción; un agregado menos denso necesitará mayor cantidad de cemento y mayor cantidad de material para cumplir con especificaciones establecidas. Si se utiliza un agregado denso y resistente se utilizará menor cantidad de cemento y se mejorara las capacidades de resistencia a un menor costo.

El tamaño máximo del agregado de diseño permitirá aumentar o disminuir la resistencia así como tendrá mayor consumo de cementantes y agua al tener mayor superficie. De todas maneras este factor no es significativo en costo, pero si lo es en modificar las propiedades mecánicas del hormigón. La forma del material, como se mencionó anteriormente, (sección 6.1) brinda mejor cohesión con la pasta de cemento y esto influye principalmente al ensayar el hormigón a flexión.

#### **7.1.1. Pruebas a Compresión basadas en ASTM C39**

El método estándar para determinar la resistencia a la compresión, se basa en la capacidad que tiene un espécimen de hormigón a resistir una carga axial aplicada sobre el mismo; la resistencia a la compresión es obtenida dividiendo



dicha carga última para la sección transversal del espécimen en cuestión (ASTM C39, 2004).

Si bien el método ASTM C39 explica el ensayo y la obtención en sí de la resistencia del hormigón, existe complementariamente la norma ASTM C192 -07 referente al mezclado y curado de especímenes en el laboratorio; es aquí en donde se encuentran ciertas diferencias para el hormigón permeable, las cuales serán descritas a continuación.

En la sección 7.4.1 referente a los métodos de consolidación y descrita en la norma ASTM C192-07, se proponen diferentes métodos basado en el tipo de molde, sea este cilíndrico (Norma Americana) o cúbico (Norma Europea), estos métodos incluyen:

- Varillado.
- Vibrado.

En la figura 7.1 se muestran los mismos.

| Specimen Type and Size      | Mode of Consolidation | Numbers of Layers of Approximate Equal Depth |
|-----------------------------|-----------------------|--|
| Cylinders:                  |                       |  |
| Diameter, in. [mm]          |                       |  |
| 3 or 4 [75 to 100]          | rodding               | 2  |
| 6 [150]                     | rodding               | 3  |
| 9 [225]                     | rodding               | 4  |
| up to 9 [225]               | vibration             | 2  |
| Prisms and horizontal creep |                       |  |
| Cylinders:                  |                       |  |
| Depth, in. [mm]             |                       |  |
| up to 8 [200]               | rodding               | 2  |
| over 8 [200]                | rodding               | 3 or more                                    |
| up to 8 [200]               | vibration             | 1  |
| over 8 [200]                | vibration             | 2 or more                                    |

Figura 7.1: Energía de consolidación en función del diámetro de moldes cilíndricos

Fuente: (ASTMC192/C192M-07, 2007)

Dado a que los cilindros utilizados tienen un diámetro de 3” entonces la compactación de los especímenes debe ser dada utilizando una varilla de [Ø=10mm] y 25 golpes por cada para con un total de 2 capas, según ASTM C192.

Estas sugerencias fueron consideradas para las pruebas Beta (I, II, y III). Sin embargo, se constató que la falla por carga axial se concentraba en un 80% de los 27 cilindros probados en la cara superior del cilindro. Se cree que este fenómeno se debió a que la cara externa del espécimen recibió menor energía de compactación. Esto sugiere realizar la compactación en 3 capas, con varilla de acero de  $\Phi = 10\text{mm}$  y 25 golpes por capa. Este aspecto no se encuentra en las normas para hormigones porosos y debería continuarse en los análisis para proponer una norma al respecto.

El varillado de 25 golpes y 2 capas no brindó suficiente consolidación al hormigón. Esto se pudo comprobar ya que las permeabilidades obtenidas en las mezclas antes mencionadas fueron excesivamente altas entre 0.3 y 0.7 cm/seg, cuando se utilizaron granulometrías con predicciones de permeabilidad de normales a bajas ( $<0.3\text{cm/seg}$ ), por lo que se realizó un proceso de consolidación con más energía de compactación, dando 25 golpes pero realizando 3 capas. Adicionalmente a esto, el compactado de la cara superior fue realizado con un rodillo para lograr energías de consolidación aceptables.



*Figura 7.2: Cilindros Beta 1 puestos a secar.*

Los cilindros mostrados en la *figura 7.2* corresponden a la mezcla Beta I, Se puede apreciar que la cara superior es más clara que la inferior, esto debido al escurrimiento del agua, no obstante, debido al proceso de consolidación utilizados en esta mezcla, la cara superior contenía menos energía de compactación, con lo cual su permeabilidad aumentó, acelerando aún más el proceso de escurrimiento.

Este fenómeno no es tan distintivo en las demás mezclas donde se usó el proceso alterno anteriormente descrito.

Cabe mencionar que las mezclas de nombre 'Beta' corresponden a ensayos piloto realizados para refinar procesos antes de empezar con las mezclas analíticamente significativas. Esto no quiere decir que no tengan relación con las mezclas posteriores. Las granulometrías utilizadas en las mezclas Beta subsiguientemente han sido refinadas.



*Figura 7.3: Mezcla 1.*

En la foto donde se muestra la ‘Mezcla 1’ se utilizó el proceso alterno de compactación con lo cual el efecto de escurrimiento en la cara superior es mucho menos visible.

En cuanto a otros procesos de compactación como el vibrado o rodillado para hormigones permeables, no fueron realizados pues con el vibrado los agregados son más propensos a la disgregación atribuida a una disminución en el recubrimiento dado al agregado. Fenómeno contrario se observa en un hormigón tradicional.

Primero, con el vibrado los agregados son más propensos a la disgregación; se cree que esta tendencia se debe a que el recubrimiento dado al agregado es muy bajo en comparación al de un hormigón tradicional.

Para el diseño y producción de hormigón permeable se necesita que los agregados se adhieran entre sí pero que no cierren de manera importante el espacio intersticial ente ellos; este balance es delicado de conseguir.

Se descartó el uso del rodillo ya que no se tenían las condiciones necesarias de laboratorio para rodillar hormigón in situ y extraer núcleos del mismo.

## **7.2. Capacidad Permeable**

La capacidad permeable de un hormigón permeable es la capacidad para evacuar un volumen de agua contenido en una superficie delimitada, el cual se ajusta a los requerimientos pluviales de la zona (Ferguson, 2010).

En la medición de la permeabilidad de un determinado hormigón, no se ha llegado a una aceptación general y hasta la fecha no se han publicado métodos estandarizados por la ASTM u otra institución avalada sobre el tema.

Actualmente el comité 522R-06 de la ACI ha establecido como posibilidad de medición de la permeabilidad un aparato construido y utilizado por Neithalath, N., & Olek, J. (2010). ‘*Predicting the Permeability of Pervious Concrete*’, en donde la muestra cilíndrica de hormigón es confinada y sometida a la presión de

una columna de agua, luego el tiempo es medido y utilizado en la Ley de Darcy para determinar la permeabilidad de la muestra.

### **7.2.1. Pruebas de Permeabilidad basadas en ACI 522R-06**

Como se explicó en la *sección 5.1* el permeámetro fabricado siguió las recomendaciones dadas en ACI 522R. A continuación se describe el proceso realizado para lograr un funcionamiento adecuado del permeámetro.

La estanqueidad externa de la muestra al agua se consiguió envolviéndola en una funda plástica delgada y adherida con cinta adhesiva. En la unión entre la muestra de hormigón y las bases se usó una capa de silicona blanca o negra Abro 1200, que dio muy buenos resultados ya que su secado fue rápido y provee de alto sellado.

Una vez solucionado el problema de fugas de agua por la muestra o por sus extremos, se procedió a llenar el tubo acrílico con agua potable a temperatura ambiente, procediendo a saturar la muestra.

Hay que poner especial atención en la saturación de la muestra. En este caso, se esperó hasta que el agua salga por el tubo inferior de 1" y luego se introdujo por el mismo tubo aire, de tal forma que el agua empuje a las burbujas de aire ocluidas en la muestra y las saque por el lado del tubo acrílico. Con esto se logró saturar la mezcla en corto tiempo.

Si no se satura la muestra correctamente, los tiempos de evacuación son muy diferentes y los resultados para calcular la permeabilidad no son aceptables.

A continuación se muestra un breve resumen gráfico del proceso de preparado de las muestras para el ensayo de permeabilidad.



*Figura 7.4: secuencia que describe gráficamente el proceso de preparación de las muestras para el análisis de permeabilidad.*

La aplicación de la ley de Darcy muy bien descrita en Jumikys ( 1962) de quien se ha obtenido las siguientes ecuaciones, se presenta a continuación.

Si consideramos a 'h' como un punto en cualquier parte del tubo acrílico en un tiempo 't' cualquiera, entonces, si dejamos pasar un instante de tiempo  $dt$  la columna de agua habrá descendido una cantidad  $(-dh)$ , el signo menos significa que la altura disminuye mientras el tiempo aumenta (Jumikis, 1962). Ahora bien, si consideramos el diferencial de volumen  $dQ$  como:

$$dQ = -adh \quad (1)$$

Siendo 'a' igual a la sección transversal del tubo acrílico.

Por el principio de continuidad, durante el intervalo de tiempo  $dt$ , la cantidad de agua  $Q$  que fluye a través de la muestra, esta altura es considerada como  $l$ , es así que:

$$dQ = k * Ai * dt = K * A \frac{h}{l} dt \quad (2)$$

Donde  $\frac{h}{l} = i = \text{gradiente hidráulica}$

Por lo tanto la ecuación (1) puede ser igualada a la (2) y obtener:

$$-adh = k * Ai * dt$$

Si separamos las variables 'h' y 'k' entonces la expresión puede ser resuelta integrando con límites 'h<sub>1</sub>', 'h<sub>2</sub>', 't<sub>1</sub>', y 't<sub>2</sub>' respectivamente es así que:

$$\int_{h_2}^{h_1} \frac{dh}{h} = -\frac{k * A}{L * a} \int_{t_2}^{t_1} dt$$

Dando como resultado:

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

El coeficiente de permeabilidad (K) queda definido entonces como:

$$K = \frac{L}{(t_2 - t_1)} * \frac{a}{A} * \ln \frac{h_1}{h_2}$$

La expresión utilizada en este trabajo será con notación logarítmica en base 10 por lo que el coeficiente de permeabilidad (K) es:

$$K = 2.3 * \frac{A_1 * l}{A_2 * t_{promedio}} * \log\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$$

Dónde:

$A_1$ = área de la sección transversal de la muestra.

$A_2$ = área de la sección transversal del tubo acrílico.

$L$ = Longitud de la muestra

$t_{promedio}$ = tiempo promedio en que demora recorrer el agua desde un punto inicial ( $h_1$ ) y uno final ( $h_2$ ).

$H_1$  = Punto de partida de recorrido del agua.

$H_2$  = Punto final del recorrido del agua.

Para el permeámetro construido se ha establecido los siguientes valores:

| Constantes | Valor                 |
|------------|-----------------------|
| $A_2$      | 47.17 cm <sup>2</sup> |
| $l$        | 15.5cm                |
| $h_1$      | 5cm                   |
| $h_2$      | 15cm                  |

Tabla 7.1: Valores de las características del permeámetro

Por lo tanto, la ecuación para establecer el coeficiente de permeabilidad ( $K$ ) queda como:

$$K = 0.36 * \frac{A_1}{t_{promedio}}$$

Para establecer los valores de  $h_1$  y  $h_2$  se consideró como cero la cara superior del cilindro acrílico con aquello se descendió 5 cm por el tubo acrílico para establecer el punto de partida y posteriormente otros 10 cm para el punto final, facilitándose la correcta medición del tiempo de recorrido del agua entre estos puntos.

Todos los datos encontrados referentes a la permeabilidad son presentados en anexos.

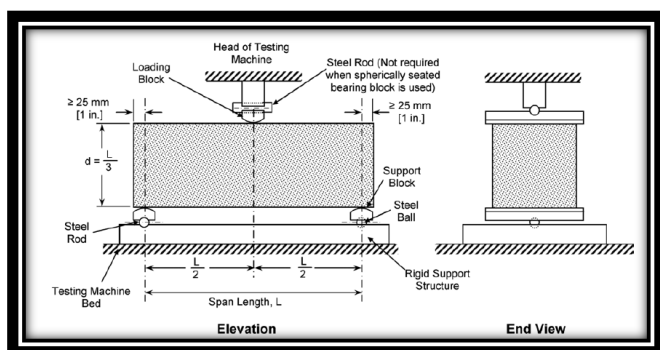
### 7.3. Capacidad de resistencia a Tensión de las viguetas de hormigón permeable ensayadas

Para el diseño de losas de rodadura, pisos de parqueaderos así como de autopistas, es necesario obtener datos acerca de la resistencia a la flexión del hormigón ya que esta resistencia prevalece sobre las demás en un diseño.

Es valioso también el conocimiento de la resistencia a tensión al estimar la carga bajo la cual se desarrollará el agrietamiento (Neville A. , Pruebas para resistencia en tensión, 1999).

Para la resistencia a tensión existen 2 tipos principales de prueba, la prueba a flexión a los tercios normada por ASTM C78-02, y la prueba ASTM C293-04 con aplicación de fuerza a un punto.

Debido a la naturaleza de la prueba ASTM C293-04, al tener concentración puntual en el centro del claro, produce momentos y cortantes máximos en un mismo punto como se puede apreciar a continuación.



Fuente: (C293, 2010)

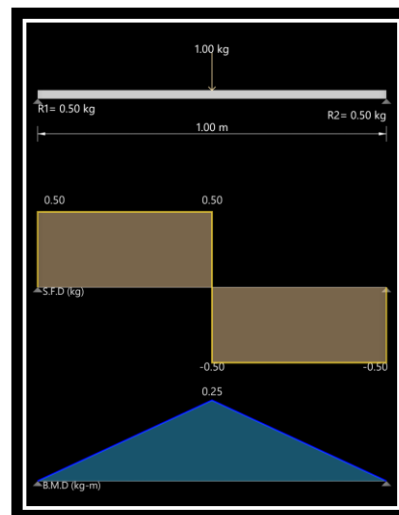


Foto: Diagramas de corte y momento bajo una carga puntual.

Figura 7.5: Diagrama de corte y momento bajo una carga puntual (ASTM C293)

En esta prueba, la falla ocurre cuando se ha agotado la resistencia a la tensión del hormigón en la fibra extrema bajo el punto de carga.

Por otro lado el ensayo dado por la norma ASTM C78-02 produce momentos máximos a lo largo de un tercio de la viga con lo que puede desarrollarse el agrietamiento crítico en cualquier punto de este.



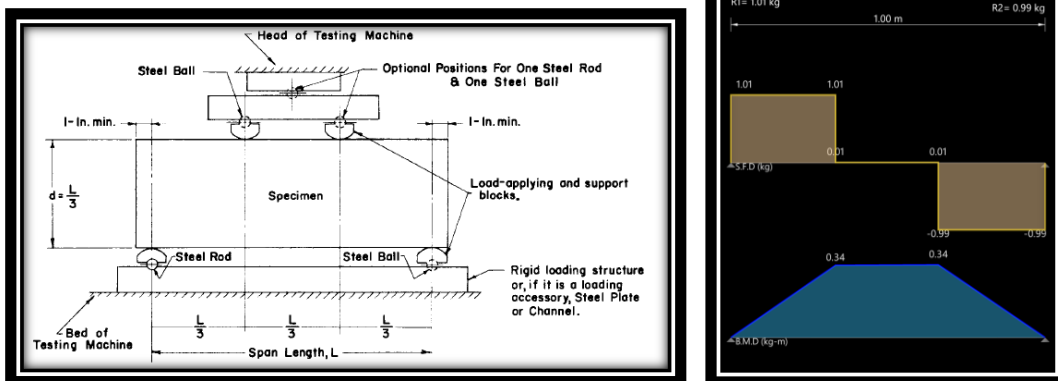


Figura 7.6: Diagrama de corte y momento bajo dos cargas simétricas (ASTM C78)  
Fuente: (ASTM C78, 2002)

Puesto que la probabilidad de que un elemento débil que está sujeto al esfuerzo crítico sea considerablemente mayor bajo carga de dos puntos que cuando actúa una carga en el centro del claro, la prueba de carga en el centro del claro da un mayor valor del módulo de rotura pero más variable (Neville A. , Pruebas para resistencia en tensión, 1999).

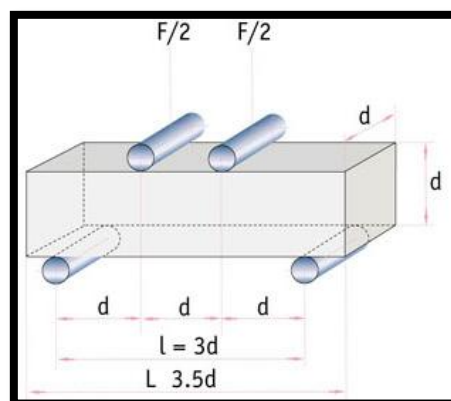
Por la razón antes indicada por Neville, para el análisis de módulo de rotura se ha decidido seguir la norma ASTM C78.

En la siguiente sección se profundizará en dicha norma.

### 7.3.1. Pruebas a Flexión basadas en ASTM C78-02

Si suponemos un espécimen de forma ortoédrica con su largo 3 veces mayor a su altura, al cual se aplica una fuerza a los tercios de su luz, entonces se obtendrá en las fibras inferiores del ortoedro flexión pura .

Si se considera la siguiente vigueta con las cargas mostradas entonces:



$$M = \frac{F}{2} * \frac{L}{3} = \frac{F * L}{6}$$

Si la inercia y el esfuerzo se suponen como :

$$I = \frac{h^4}{12} \text{ y } \sigma = \frac{M*y}{I}$$

Entonces:

$$\sigma = \frac{F * L * y}{6I}$$

En la norma ASTM C78-02 se reduce la expresión antes obtenida a

$$MR = \frac{PL}{bd^2}$$

Donde R es el módulo de rotura.

### 7.3.2. Parámetros de adherencia y compactación que influyen en la resistencia a flexión.

La determinación de la calidad de adherencia de los agregados es bastante difícil y no existen pruebas aceptadas (Neville A. , Adherencia del Agregado, 1999).

Generalmente se considera un hormigón de buena adherencia cuando se presentan las siguientes evidencias al momento de romperlo bajo la norma ASTM C78-04, estas son:

- Evidencia de algunas partículas de agregados fracturados de lado a lado.
- Evidencia de varias partículas de agregados desprendidas completamente de un lado.

Cuando se presentan demasiadas partículas de agregados fracturadas de un lado al otro o completamente cizalladas, puede sugerir que el agregado es muy débil.

La compactación también es una variable clave para mejorar o debilitar la resistencia a flexión.

La norma ASTM C192 en cuanto a la compactación que debe darse a las viguetas de acuerdo con sus dimensiones, recomienda:

| Cylinders   |                          |  |
|---|--------------------------|--|
| Diameter of Cylinder, in. [mm]                                    | Diameter of Rod in. [mm] | Number of Strokes/Layer  |
| 3 [75] to < 6 [150]   | 3/8 [10]                 | 25   |
| 6 [150]   | 5/8 [16]                 | 25   |
| 8 [200]   | 5/8 [16]                 | 50   |
| 10 [250]  | 5/8 [16]                 | 75   |
| Beams and Prisms  |                          |  |
| Top Surface Area of Specimen, in. <sup>2</sup> [cm <sup>2</sup> ] | Diameter of Rod in. (mm) | Number of Roddings/Layer   |
| 25 [160] or less  | 3/8 [10]                 | 25   |
| 26 to 49 [165 to 310]   | 3/8 [10]                 | one for each 1 in. <sup>2</sup> [7 cm <sup>2</sup> ] of surface  |
| 50 [320] or more  | 5/8 [16]                 | one for each 2 in. <sup>2</sup> [14 cm <sup>2</sup> ] of surface |
| Horizontal Creep Cylinders  |                          |  |
| Diameter of Cylinder in. [mm]                                     | Diameter of Rod in. [mm] | Number of Roddings/Layer   |
| 6 [150]   | 5/8 [16]                 | 50 total, 25 along both sides of axis                            |

Figura 7.7: Número de golpes por capa de hormigón para conseguir el apropiado nivel de compactación basado en ASTM C192

Fuente: (ASTMC192/C192M-07, 2007)

Para esta investigación se ha fabricado moldes para viguetas con 35 cm de longitud 10 cm de altura y 10 cm de ancho, lo que genera un área superficial de 350 cm<sup>2</sup>, según las recomendaciones dadas en ASTM C192-07 para un área superficial de 320cm<sup>2</sup> o mayor se necesita una varillas Ø=16mm a ser utilizada para la compactación de un área de 14cm<sup>2</sup> por cada golpe, esto para hormigones tradicionales.

En el desarrollo de hormigones permeables se pudo constatar que la energía de compactación brindada por la varilla y por el número de golpes no fue suficiente.

Las densidades de las viguetas difirieron de la densidad de la misma mezcla pero puesta en un cilindro; si bien, el sistema de compactación anteriormente sugerido brinda suficiente energía de compactación para hormigones tradicionales, en el caso de los hormigones permeables no resulto de esa manera.

Se optó por realizar la compactación de viguetas mediante el uso de un martillo de próctor estándar con 25 golpes por cada capa con un total de 3 capas, más un terminado con rodillo en la última capa. La cantidad de energía de compactación proporcionada ayudó a que la densidad de las viguetas se acerque aquella de los cilindros, además mejoró considerablemente la resistencia a la flexión del hormigón sin afectar la permeabilidad.

En la sección 7.3.1 se demostró que el módulo de rotura  $M_r$  esta expresado como:

$$R = \frac{PL}{bd^2}$$

Sin embargo las consideraciones asumen que:

$$I = \frac{h^4}{12} \quad \text{y} \quad \sigma = \frac{M \cdot y}{I}$$

Si se considera a 'y' como la distancia al eje neutro, medida desde la cara superior de la viga, entonces se está asumiendo que la falla se da en la última fibra inferior.

Como la naturaleza de los hormigones permeables no permite la completa cohesión entre las partículas de agregado y la pasta cementante la matriz que conforma la viga se verá afectada interiormente haciendo que este eje neutro no se encuentre en la mitad de la viga por lo que las fibras inferiores de falla pueden no ser en la última fibra sino considerablemente más arriba.

La condición de este escenario produjo modificaciones en la energía de compactación como antes explicado, además de cambios en el mismo agregado y cementante. Posteriormente se analizarán a detalle estas modificaciones y los beneficios o perjuicios encontrados.

## 8. DOSIFICACIÓN

Como ‘dosificación’ se entiende la medición y proceso de mezcla de los diferentes componentes sólidos y líquidos para la obtención de un producto, en este caso de hormigón permeable.

La dosificación de las mezclas y los materiales utilizados constituyen la parte más importante del actual trabajo y en general, de la preparación de estos materiales, ya que comprende el desarrollo de nuevos conocimientos de hormigones permeables en Ecuador.

Como se mencionó anteriormente, la intención principal de este trabajo es desarrollar hormigones permeables a partir de materias primas ampliamente disponibles en el mercado ecuatoriano. Cabe mencionar, que la materia prima utilizada no es de la mejor calidad, por lo que los resultados pueden mejorar si se refinan los materiales utilizados. De hecho, se realizaron ensayos comparativos con áridos de muy buena resistencia mecánica y de gran adherencia al cemento utilizado; también se emplearon cementos diferentes de mejor calidad de los de mercado, con fines comparativos, cuyos resultados se discutirán más adelante.

Para poder realizar las mezclas de hormigón de una manera adecuada y ordenada se construyó un calendario de mezclas. Las mezclas y los ensayos se iniciaron el día 5 de Enero de 2014, culminando el día 16 de Abril de 2014, es decir, alrededor de 3 meses y 2 semanas de investigación.

Según diversos estudios realizados por autores como Ann Marie Mulligan, Neithalath, Weiss, Olek, Kevern, Crouch, Smith, Walker, entre otros, citados en este trabajo, se ha establecido que una granulometría no uniforme con casi la totalidad de su porcentaje de un mismo tamaño de agregado (es decir, una distribución granulométrica estrecha) produce un hormigón de una permeabilidad en un rango entre moderado a alto, sin embargo este aspecto va en detrimento de las propiedades de resistencia a la compresión simple y flexión.

Una granulometría concebida con gran porcentaje de un agregado mayor y pequeñas cantidades de otro u otros menores, no brindan características buenas ni de permeabilidad ni de resistencia (Crouch, Smith, Adam, & Sparkman, 2007).

Por otro lado, si se considera una matriz sobre varios tamaños diferentes de agregados, es decir, aquella aceptablemente uniforme, se puede obtener un hormigón con características aceptables de permeabilidad y aceptables de resistencia (Mulligan, 2005).

Como la capacidad de resistencia de un hormigón es inversamente proporcional a su capacidad permeable, entonces, la selección de una granulometría adecuada dependerá estrechamente de los parámetros de diseño que se escojan, así como de las características meteorológicas de la zona donde se realice el proyecto.

Para el diseño planteado, se encontraron los siguientes valores de diseño para resistencias y permeabilidad a ser cumplidos. Los cálculos para obtener dichas variables se muestran en las secciones 10 y 11.

| Variables de Diseño [valores mínimos] |                        |
|---------------------------------------|------------------------|
| <b>F'c [kg/cm<sup>2</sup>]=</b>       | 140 kg/cm <sup>2</sup> |
| <b>Mr [kg/cm<sup>2</sup>]=</b>        | 20 kg/cm <sup>2</sup>  |
| <b>K [ cm/seg]=</b>                   | 0.13 cm/seg            |

El cálculo de los valores de diseño se muestra en las secciones 10 y 11.

En hormigones permeables un diseño de dosificación que dé como resultado una resistencia superior a 150kg/cm<sup>2</sup> se considera como un diseño aceptable, y encontrar un diseño para un hormigón de 180kg/cm<sup>2</sup> o superior se considera como un diseño superlativo (Neville A. , Tecnología del concreto, 1999) & (Henderson, Tighe, & Norris, 2009).

El conseguir resistencias a la compresión simple y flexión alta y simultáneamente una permeabilidad adecuada, es un proceso delicado que requiere de un refinamiento controlado de la dosificación de sus componentes. Además, se vuelve un proceso en el cual la parte visual, táctil, y olfativa juegan un papel importante al momento de definir si una mezcla esta lista o no. Vale entonces resaltar que es importante la experiencia en estas labores.

El perfeccionar las dosificaciones de hormigón es un proceso en donde tanto la parte teórica se complementa con la parte práctica, en donde, esta última es la que define los valores definitivos para una dosificación.

### 8.1. Dosificaciones 'Beta'

Para este trabajo se empezó realizando dosificaciones del tipo 'Beta'.

Las mezclas 'Beta' permiten perfeccionar procesos y corregir errores para evitarlos en la etapa formal de experimentación. Una adecuada planificación de la dosificación ayuda a disminuir incertidumbres y variables, asu como, evita contratiempos. Además, este tipo de ensayos permite obtener rangos posibles de valores a encontrarse.

Los ensayos 'Beta' fueron escogidos utilizando posibles granulometrías que brinden características suficientes para cumplir con los parámetros de diseño.

Para las mezclas Beta se elaboraron tan solo cilindros de D = 3" y L = 6" en un número de nueve (9) por cada mezcla, para ensayarlos a la compresión simple a los 3, 7 y 28 días. Ensayos de permeabilidad con los cilindros se realizaron en base al periodo de prueba de los cilindros a compresión.

Los resultados de estas mezclas se muestran a continuación:

| Id. Mezcla      | % 3/8                       | % #4 | % #10                              | % #60 | Agua [m3]            | Cemento [kg] | Aditivo [m3]  | Microsílica [kg] | Densidad Cilindros [gr/cm3] |
|-----------------|-----------------------------|------|------------------------------------|-------|----------------------|--------------|---|------------------|-----------------------------|
| <b>Beta I</b>   | 80                          | 20   | ---                                | ---   | 0.142                | 126.23       | 0.004   | 7                | 1.805                       |
| <b>Beta II</b>  | 20                          | 80   | ---                                | ---   | 0.150                | 124.12       | 0.004   | 7                | 2.082                       |
| <b>Beta III</b> | 54                          | 36   | 10                                 | ---   | 0.134                | 125.03       | 0.004   | 7                | 1.879                       |
|                 | Relación Agua/Cemento [W/C] |      | Relación Agregado /Cemento [Agg/C] |       | Permeabilidad [cm/s] |              | Resistencia a la compresión f'c (28 días) [kg/cm <sup>2</sup> ] |                  |                             |
| <b>Beta I</b>   | 0.351                       |      | 4.627                              |       | 0.6753               |              | 71.23   |                  |                             |
| <b>Beta II</b>  | 0.378                       |      | 4.689                              |       | 0.140                |              | 69.53   |                  |                             |
| <b>Beta III</b> | 0.335                       |      | 4.610                              |       | 0.390                |              | 74.06   |                  |                             |

*Tabla 8.1: Resultados de mezclas 'Beta'*

Como se puede apreciar, los valores tanto de resistencia a la compresión simple como de la permeabilidad, difieren de manera considerable con los valores de diseño.

La resistencia a compresión en promedio de las 3 mezclas 'Beta' es  $f'c = 71.6 \text{ kg/cm}^2$ , la menor permeabilidad encontrada  $K = 0.14 \text{ cm/s}$  se acerca bastante al valor de diseño, sin embargo, su resistencia a la compresión es muy baja.

Tanto las granulometrías utilizadas en la mezcla 'Beta I' como 'Beta II' son no uniformes. En la primera, con 80% de agregado 3/8" y 20% de agregado #10 y en la segunda, con tan solo 20% de agregado 3/8" y 80% de agregado #10 es decir, contraponiéndose entre sí.

La razón por la que se escogieron granulometrías tan diferentes entre sí fue para determinar en qué factor es afectado la permeabilidad al utilizar granulometrías con agregados más finos. Como se esperaba, la mezcla 'Beta II' obtuvo una permeabilidad menor con diferencias encontradas de 35% menos que 'Beta III' y 70% menos que 'Beta I' confirmando esta hipótesis.

Por otro lado, la granulometría utilizada en la mezcla "Beta III" es "moderadamente uniforme" con lo que se esperaba un valor más alto en resistencia a la compresión y con una permeabilidad relativamente baja ( $K < 0.25 \text{ cm/s}$ ).

Comparativamente la mezcla 'Beta III' tiene mejor desempeño tanto en resistencia a la compresión como permeabilidad; sin embargo, esta discrepancia frente a las otras dos mezclas no es concluyente. Debido a su escasa diferencia.

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Las tres mezclas están muy lejos de los valores de diseño. Esto se debe a dos factores principales: el primero de carácter de cálculo y el segundo de carácter de proceso de mezcla.

El carácter analítico que afectó el desempeño de las mezclas fueron los valores de las densidades utilizados para los 3 agregados, según (Carpio, 2014), y los ensayos de laboratorio realizados posteriores a las mezclas 'Beta', concluyen que los agregados de las canteras del Río Guayllabamba tienen una densidad promedio de  $2.32 \text{ gr/cm}^3$ . El valor utilizado en las mezclas 'Beta' fue de  $2.73 \text{ gr/cm}^3$  a datos iniciales incorrectos obtenidos en campo.

De igual manera, los porcentajes de absorción utilizados fueron considerados como 1%, muy diferentes a los valores reales que en promedio tienen un valor 2.27%, igualmente se debieron a datos incorrectos obtenidos en campo.

La variación en densidad afecta analíticamente en el cálculo del volumen teórico calculado ya que el mismo depende de la densidad, el porcentaje de absorción y la cantidad real puesta.

Por su parte, la cantidad real puesta se ve afectada por la absorción ya que considera una mayor cantidad de agua y por ende una mayor relación W/C.

Los dos factores analíticos antes mencionados influyeron mucho en el desempeño del hormigón permeable ya que los errores en estos valores son más sensibles si hablamos de un hormigón con espacios intersticiales muy grandes ( $>0.5 \text{ mm}$ ).

Como conclusión valiosa de los errores cometidos, se puede afirmar que en la dosificación de hormigones permeables, es muy importante el conocimiento real de los parámetros básicos de los materiales.

El Segundo factor referente al **proceso de mezcla**, se debió a la utilización del superplastificante.

Los aditivos del hormigón no suelen actuar de manera inmediata y consistente cuando se encuentran las siguientes características antes del mezclado:

- Arenas sobre la superficie del agregado (agregado sucio),
- Agregado húmedo,
- Alta humedad en el ambiente,
- Cemento con poca humedad o cemento muy fino (Neville A. , Adherencia del Agregado, 1999),

Entonces la reacción puede volverse variada e impredecible.



Al momento de realizar las mezclas 'Beta', sus agregados estuvieron expuestos a la humedad; se disminuyó la cantidad de agua de mezcla para compensar este efecto; sin embargo, no se consideró los tiempos de reacción del superplastificante. Al momento de introducir el superplastificante, su efecto demoró alrededor de 5 minutos tiempo, en el cual se añadió agua producto de la aparente sequedad de los agregados. Sin embargo, el efecto retardado del superplastificante causó un exceso de agua de mezcla y en consecuencia una reducción considerable en la resistencia del hormigón.

Ninguna de las 3 mezclas realizadas está cerca de los valores de diseño, por lo que se las volvió a realizar en la etapa de mezclas de refinación, las que serán analizadas a detalle posteriormente.

## **8.2 Dosificaciones para Diseño**

Con la experiencia obtenida de las mezclas 'Beta', se corrigieron tanto los valores de densidad como de absorción y se almacenaron de mejor manera los agregados para evitar acumulación de humedad.

Con los factores corregidos que afectaron negativamente las primeras mezclas realizadas, se procedió a realizar 15 mezclas con algunas distribuciones granulométricas diferentes a las realizadas en las mezclas 'Beta' y con otras usando granulometrías iguales o semejantes a aquellas, las mismas que permitieron el refinamiento de la dosificación.

En la tabla 8.2 cuadro siguiente se resume los resultados experimentales obtenidos de las mezclas realizadas:

| IDENTIFICACIÓN | % AGREGADO |    |     |     | Agua [Litros] | Cemento [kg] | Aditivo [Litros] | Microslica [kg] | Densidad Cilindros [gr/cm <sup>3</sup> ] | Densidad Viguetas [gr/cm <sup>3</sup> ] | Relación W/C | Relación Agg /C | Permeabilidad k [cm/s] | Resistencia a compresión [kg/cm <sup>2</sup> ] | Resistencia a la flexión [kg/cm <sup>2</sup> ] | Costo por metro cúbico de hormigón [€] |
|----------------|------------|----|-----|-----|---------------|--------------|------------------|-----------------|--|---|--------------|-----------------|------------------------|--|--|--|
|                | 3/8"       | #4 | #10 | #60 |               |              |                  |                 |  |   |              |                 |                        |  |  |  |
| Mezcla 1       | 20         | 80 | 0   | 0   | 152.43        | 423.52       | 3.87             | 16.94           | 2.017                                    | ----                                    | 0.351        | 3.703           | 0.117                  | 129.02   | ----   | 100.79                                 |
| Mezcla 2       | 54         | 36 | 10  | 0   | 117.32        | 390.14       | 3.87             | 16.94           | 1.973                                    | ----                                    | 0.295        | 4.323           | 0.360                  | 113.32   | ----   | 98.47                                  |
| Mezcla 3       | 10         | 70 | 20  | 0   | 98.56         | 110.20       | 3.87             | 6.03            | 1.925                                    | ----                                    | 0.279        | 4.503           | 0.188                  | 69.65  | ----   | 92.48                                  |
| Mezcla 4       | 20         | 60 | 20  | 0   | 82.36         | 354.20       | 3.87             | 6.03            | 1.905                                    | ----                                    | 0.228        | 5.022           | 0.384                  | 72.17  | ----   | 94.60                                  |
| Mezcla 5       | 5          | 70 | 25  | 0   | 151.33        | 110.34       | 3.87             | 6.03            | 1.909                                    | ----                                    | 0.425        | 4.689           | 0.295                  | 73.69  | ----   | 91.24                                  |
| Mezcla 6       | 54         | 36 | 10  | 0   | 134.13        | 115.21       | 3.87             | 7.22            | 2.054                                    | ----                                    | 0.361        | 4.610           | 0.169                  | 140.175  | ----   | 95.50                                  |
| Mezcla 7       | 39         | 36 | 25  | 0   | 105.32        | 367.43       | 5.01             | 15.32           | 2.031                                    | ----                                    | 0.282        | 4.689           | 0.136                  | 143.608  | ----   | 96.90                                  |
| Mezcla 8       | 54         | 36 | 10  | 0   | 113.06        | 116.21       | 3.87             | 7.22            | 2.041                                    | ----                                    | 0.303        | 4.689           | 0.266                  | 143.370  | ----   | 96.60                                  |
| Mezcla 9       | 54         | 36 | 10  | 0   | 122.41        | 115.31       | 3.87             | 7.22            | 1.912                                    | 1.724                                   | 0.332        | 4.689           | 0.117                  | 103.839  | 3.568  | 95.55                                  |
| Mezcla 10      | 49         | 36 | 10  | 5   | 123.05        | 115.41       | 3.87             | 7.22            | 2.049                                    | 1.869                                   | 0.336        | 4.445           | 0.225                  | 103.534  | 5.302  | 95.27                                  |
| Mezcla 11      | 49         | 36 | 10  | 5   | 117.0         | 115.21       | 3.87             | 7.22            | 2.128                                    | 1.970                                   | 0.317        | 4.455           | 0.211                  | 198.70   | 12.304   | 95.94                                  |
| Mezcla 12      | 46         | 36 | 10  | 8   | 127.51        | 114.36       | 3.87             | 7.22            | 1.960                                    | 1.907                                   | 0.346        | 4.314           | 0.200                  | 152.36   | 10.31  | 94.83                                  |
| Mezcla 13      | 46         | 36 | 10  | 8   | 119.21        | 129.12       | 3.87             | 7.22            | 2.217                                    | 2.219                                   | 0.287        | 4.264           | 0.05                   | 200  | 12.23  | 107.32                                 |
| Mezcla 14      | 49         | 36 | 10  | 5   | 116.36        | 116.22       | 3.87             | 7.22            | 2.059                                    | 2.00                                    | 0.313        | 4.455           | 0.170                  | 190.5  | 12.30  | 96.07                                  |
| Mezcla 15      | 49         | 36 | 10  | 5   | 126.52        | 127.34       | 3.87             | 7.22            | 2.100                                    | 2.050                                   | 0.308        | 4.455           | 0.165                  | 195.35   | 16.263   | 105.67                                 |
| Mezcla 16      | 49         | 36 | 10  | 8   | 119.20        | 129.19       | 3.87             | 7.22            | 2.217                                    | 2.219                                   | 0.287        | 4.264           | 0.145                  | 196.33   | 20.630   | 105.87                                 |

Tabla 8.2: Resultados obtenidos en mezclas de diseño.

### 8.2.1. Dosificaciones de Mezcla 1 a Mezcla 5

Las primero cinco mezclas realizadas incluyeron granulometrías no uniformes y uniformes. La razón para la variación de la granulometría fue realizada para conocer el comportamiento de distintas mezclas y así poder descartar las de menor desempeño.

En los siguientes párrafos se explican los aspectos más relevantes encontrados en esta primera fase.

Entre las mezclas 1 y 5 no se realizaron viguetas para analizar resistencia a flexión. Esto se debió a que los valores de resistencia a compresión debían ser refinados para conseguir valores moderadamente altos de resistencia a flexión.

Normalmente, la resistencia a la flexión del hormigón, es del 15% al 30% del valor a la resistencia a compresión (Neville A. , Tecnología del hormigon, 1999)

Con los valores de densidad y porcentaje de absorción corregidos, se procedió al mezclado.

Las mezclas resaltadas en color rojo son aquellas que no cumplen los requisitos de diseño. Los valores tanto de resistencia a compresión como permeabilidad están alejados de los valores de diseño.

Las granulometrías escogidas de la Mezclas # 1, 3, 4, y 5 son no uniformes, mientras que la ‘Mezcla 2’ es parcialmente uniforme.

Se aprecia que la ‘Mezcla 1’ (igual a Mezcla ‘Beta II’), ha ganado en resistencia a la compresión aproximadamente en un 54% más que la misma mezcla en su versión beta, atribuido a que los valores correctos de densidad y porcentaje de absorción brindaron un aumento considerable en la resistencia.

No obstante, ambas permeabilidades permanecen bajas, siendo sus valores de 0.119[cm/seg] y 0.140 [cm/seg] respectivamente, contrariamente a lo esperado pero justificado debido al alto porcentaje agregado #4. Esta condición no es deseable, ya que al estar muy cerca del límite de diseño se pueden generar problemas secundarios como el obturamiento de espacios intersticiales por partículas pequeñas como arena o desechos pequeños lo que en consecuencia pueden generar el colapso del sistema de evacuación de agua.

Las propiedades descritas podrían llevar a la ‘Mezcla 1’ a ser refinada posteriormente.

La Mezcla 2 (igual a Mezcla ‘Beta III’) por su parte, consiguió incrementar su resistencia a la compresión aproximadamente un 65.5% en comparación a su mezcla beta, con lo que su porcentaje de incremento es mayor a la Mezcla 1 pero no de una manera significativa.

Sin embargo, Su permeabilidad con valores encontrados de 0.36 [cm/s] y 0.39[cm/s] respectivamente, otorga un margen holgado de cumplimiento del valor del diseño ( 0.13 [cm/s]) lo que sugiere que esta mezcla debe ser refinada ya que probablemente dará mejores resultados.

### **8.2.2. Dosificación Mezcla 6- Mezcla 10**

La naturaleza de una matriz uniforme brinda mejores capacidades de resistencia a la compresión y flexión ya que los espacios intersticiales entre las partículas disminuyen. (Neville A. , Adherencia del Agregado, 1999)

Bajo este razonamiento se escogió de las primeras cinco mezclas la segunda.

La ‘Mezcla 2’ demostró mejorar sus capacidades de resistencia en un 65% tan solo con la corrección de los parámetros de densidad y porcentaje de absorción, entonces, perfeccionando su dosificación se pueden obtener valores que cumplan las propiedades de diseño. Además, con su característica de poseer una matriz de naturaleza uniforme se puede utilizar agregado más fino haciendo pequeñas modificaciones a la dosificación principal lo que permite ajustar de manera precisa los requerimientos de diseño.

A partir de la mezcla 5 en adelante se refinaron los parámetros de diseño, realizándose pequeñas variaciones entre los agregados y obteniendo resultados que cumplieron las condiciones de diseño; éstos están subrayados de color verde.

Como diseño base se escogió la granulometría con 54% agregado 3/8, 36% agregado #10 y 10% de agregado #20, De esta manera y de ser necesario posteriormente se puede añadir un agregado menor (#60 en este caso), en pequeños porcentajes de cada agregado base con lo que la permeabilidad no es afectada significativamente.

Se puede apreciar que la ‘Mezcla 9’ a pesar de tener igual granulometría que las muestras con resultados positivos, no tuvo un buen desempeño debido a problemas en el proceso de mezclado pues accidentalmente la rotura de un contenedor dejó escapar parte de la pasta de cemento ya mezclada.

En la ‘Mezcla 9’, se empezó con la fabricación de viguetas.

Al ya tener valores de resistencia a compresión que cumplan con el diseño impuesto, se empezó a analizar el factor de resistencia a la flexión por medio de viguetas.

En cuanto a la ‘Mezcla 10’, se puede observar que contiene un 5% de agregado #60. Al utilizar este agregado muy fino no se tomó en cuenta que su absorción es significativamente menor (1.5 %) a los otros agregados por lo que se introdujo agua en exceso lo que estropeó la mezcla.

La ‘Mezcla 10’ es importante ya que incluye un cuarto agregado: Arena, como se discute a continuación:

### **INCLUSIÓN DE ARENA EN LAS MEZCLAS**

Al observar los valores de permeabilidad de las Mezclas 6 a la 10, se puede concluir que mientras mayor porcentaje de agregado fino se incluya a la mezcla, la permeabilidad bajara considerablemente.

Al añadir arena a la mezcla, este sensible balance entre la resistencia a la compresión y la permeabilidad es afectado negativamente.

Es por ello que se empezó con un 5% en peso de arena, para poder medir el efecto en la permeabilidad. El objetivo es llegar a un máximo del 8% en peso de arena, lo que brindará mejores capacidades de resistencia .

Este diseño modificado es tratado en las últimas cinco mezclas.

#### **8.2.3 Dosificación Mezcla 11-12**

A partir de la ‘Mezcla 10’ a la ‘Mezcla 15’ se adicionó agregado #60 en porcentajes de 5% y 8% con lo que se obtuvo un aumento muy significativo en resistencia a compresión sin afectar la permeabilidad de manera significativa. Los resultados obtenidos permitieron sobrepasar ampliamente el requisito de diseño impuesto de  $140\text{kg}/\text{cm}^2$  de resistencia a compresión.

Por otro lado, la resistencia a flexión en donde el parámetro de diseño impone  $20\text{kg}/\text{cm}^2$  no fue alcanzado con los agregados procedentes del Río Guayllabamba y con uso del cemento Holcim tipo ‘GU’, con una resistencia máxima encontrada utilizando estos materiales de  $M_r \approx 12\text{kg}/\text{cm}^2$ .

Debido a esta realidad se modificaron los factores que implican la resistencia a flexión, encontrando como principales variables al tipo de cemento y agregado utilizado.

#### **8.2.4 Dosificación Mezcla #13 a # 16**

Las mezclas 13, 14, 15, y 16 se realizaron con modificaciones realizadas partiendo de una granulometría establecida pero cambiando sus componentes por otros de mejor calidad.

Las últimas tres dosificaciones de este estudio tratan de solucionar el problema de carencia de resistencia a la flexión modificando tanto los agregados como el cemento.

Las mezclas con constituyentes diferentes a los originales, están marcadas de color celeste en el Cuadro de Resultados antes indicado.

## USO DE ÁRIDOS DE BUENA CALIDAD

En la 'Mezcla 13' se cambiaron los agregados del Río Guayllabamba por agregados procedentes de la cantera 'San Martín' ubicado en La Pamba, provincia del Tungurahua.

Estos agregados se caracterizan por ser de origen basáltico con alta densidad ( $\rho > 2.7 \text{ gr/cm}^3$ ), gran resistencia mecánica y alta angulosidad con lo que permite una mejor adherencia con el cemento. Los mismos fueron utilizados para el concurso mundial de hormigón con fibras reforzadas realizado en Minneapolis-EU.

La consecuencia sobre la resistencia a la compresión al cambiar el agregado en la mezcla # 13 manteniendo el cemento Holcim tipo 'GU' fue notable. Los valores de resistencia a compresión dieron un promedio a los 28 días de  $200 \text{ kg/cm}^2$ , pero sobre todo la resistencia a flexión subió a  $15 \text{ kg/m}^2$ , sin afectar de forma significativa la permeabilidad.

Ahora bien, como tan solo mejorando la calidad del agregado no fue suficiente para obtener valores que cumplan con la resistencia a flexión del diseño, se debió entonces utilizar en la experimentación, otro cemento de tipo Portland Tipo I (ASTM C150).

Las Mezclas 14, Mezcla 15, y Mezcla 16 muestran las diferencias obtenidas con esta variación.

Para la Mezcla # 14, se cambió el cemento Holcim tipo 'GU' por cemento Tolteca Portland tipo I pero manteniendo el agregado de la cantera del Río Guayllabamba. La intención de esta experimentación es determinar las diferencias de desempeño de la resistencia a flexión mejorando la calidad del agregado y mantener el tipo de cemento (Mezcla # 13) y mantener el tipo de agregado y mejorar la calidad del cemento (Mezcla # 14).

La diferencia de granulometría entre la mezcla 13 y mezcla 14 radica en que en la mezcla 13 se utilizó un 3% más de arena, un aumento significativo en hormigones permeables por la reducción en capacidad permeable.

Como se puede apreciar la mezcla 14 tiene aproximadamente la misma resistencia a la flexión que la mezcla 13, sin embargo, la permeabilidad de la mezcla 14 es mayor a la mezcla 13.

La mezcla 13 no puede ser considerada como un hormigón permeable ya que su permeabilidad es inferior a  $1 \text{ cm/s}$ .

Se puede decir que simplemente con el cambio de cemento no se logra ganar una resistencia significativa a flexión.

Por lo indicado, en las siguientes dos muestras se cambiará los agregados y cemento con lo que se podrá identificar que variable es la que tiene mayor impacto al momento de incrementar la resistencia.

En las Mezcla # 15 como la #16 se cambiaron los agregados como el cemento. La diferencia entre estas mezclas radica en que la Mezcla # 16 tiene un 3 % más de arena que la Mezcla # 15 Este cambio porcentual que es bajo para hormigones tradicionales, es alto para hormigones permeables pero permitió encontrar la resistencia a flexión de diseño necesitada.

La resistencia a la compresión encontrada para ambas mezclas son aproximadamente similares (195.35 y 196.33) kg/cm<sup>2</sup> respectivamente. Sin embargo, se puede apreciar que el aumento en 3% de arena en la Mezcla 16 genera un aumento significativo en la resistencia a flexión (aproximadamente 20% más que sin ese porcentaje de arena).

De los resultados experimentales se puede afirmar que con el uso de cemento hidráulico y agregados de moderada calidad, no permiten obtener valores de resistencia a la flexión capaces de cumplir con el diseño impuesto para hormigones permeables.

### **ADHERENCIA PASTA-AGREGADO**

De los ensayos realizados se considera que la adherencia entre la pasta y agregado fue mayor al utilizar cemento Portland y agregado de alta calidad, aunque los valores de resistencia apenas cumplen con los límites mínimos de diseño.

Para conseguir mejores resultados se propone estudiar el desempeño del hormigón permeable con malla biaxial, para así obtener mayores valores de resistencia a flexión, manteniendo valores de permeabilidad altos.

### **8.3 Dosificación escogida**

Se deben cumplir los siguientes parámetros de diseño:

- Permeabilidad [ $K > 0.13 \text{ cm/s}$ ],
- Resistencia a la compresión simple [ $f'c > 140 \text{ kg/cm}^2$ ],
- Resistencia a la flexión simple [ $MR > 20 \text{ kg/cm}^2$ ].

\*El cálculo de los valores de diseño se muestra en las secciones 10 y 11.

La dosificación que cumple con estos parámetros es la Mezcla 16, con las siguientes características:

|   |                           |
|---|---------------------------|
| Resistencia a la compresión simple [ $f'c$ ]: | 196.33 kg/cm <sup>2</sup> |
| Resistencia a la flexión simple [ $MR$ ]:     | 20.63 kg/cm <sup>2</sup>  |
| Permeabilidad [ $K$ ]:                        | 0.145 cm/s                |
| Costo por m <sup>3</sup> :                    | \$ 105.87                 |

## 9. RESULTADOS

Los resultados aquí expuestos resumen de manera gráfica los datos obtenidos de la etapa de dosificación y mezclado, pudiendo visualizarse de manera más profunda los comportamientos encontrados tras variar en primera instancia la granulometría, seguida por el agregado y finalmente por el cemento.

Las normas que regulan los ensayos realizados para obtener dichos valores son ASTM C39-04, ASTM C78-02, ASTM C1754-12, y ACI 522-R06.

### 9.1 Resultados basados en la resistencia a compresión simple:

Los resultados basados en la resistencia a la compresión simple han sido relacionados con su evolución en el Tiempo; en su relación con la permeabilidad, densidad y resistencia a la flexión.

#### 9.1.1 Resultados Tiempo vs. Resistencia a la Compresión simple:

La correlación evolutiva entre la resistencia a la compresión simple y el tiempo, es importante para distinguir el tipo de endurecimiento que tiene el cemento utilizado y la dosificación empleada. En el gráfico siguiente se presenta el proceso de Resistencia vs. Tiempo para las dosificaciones realizadas.

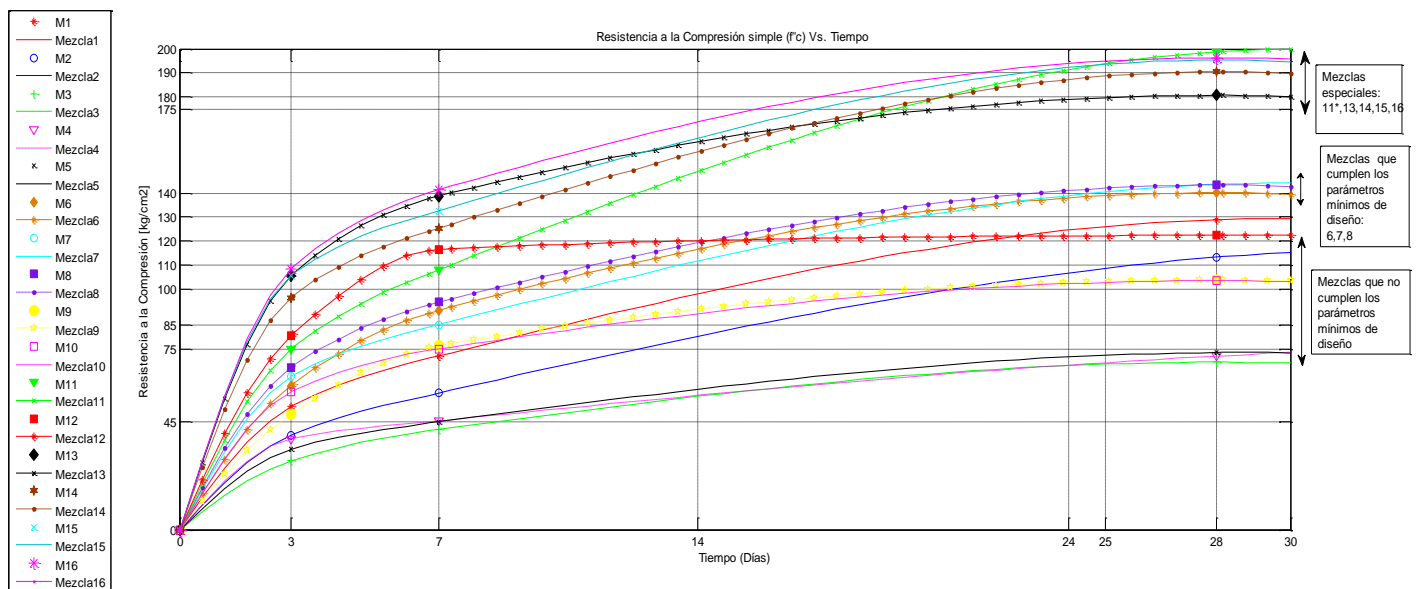


Figura 9.1: Tiempo (Días) Vs. Resistencia a la compresión simple [kg/cm<sup>2</sup>]

Para el desarrollo del gráfico anterior, se ensayaron 9 cilindros por cada dosificación durante los 3, 7 y 28 días posteriores a la mezcla, con lo que se obtuvo 135 datos que brindan una tendencia de endurecimiento de este tipo de hormigón en el tiempo.



El cemento utilizado es un cemento hidráulico de la marca Holcim tipo 'GU' el cual brinda propiedades favorables para el endurecimiento.

La tendencia de las curvas es de crecimiento uniforme con una pendiente importante hasta el día 3ro. del fraguado, para luego declinar en su pendiente hasta aproximadamente el día 6to, y luego, la curva crece moderadamente hasta los 28 días analizados. Esta forma del crecimiento de la resistencia de las mezclas puede ser calificada de normal.

Un caso particular se registra en la Mezcla 12 donde la curva de endurecimiento es normal hasta el día 7 para luego prácticamente no crecer hasta los 28 días de análisis. Este fenómeno se atribuye a una dosificación defectuosa.

Como se puede apreciar en casi todas las mezclas, el endurecimiento es constante durante los 28 días con lo que se deduce que no existe presencia excesiva de álcalis en el cemento (Neville A. , Tecnología del concreto, 1999).

A partir de la mezcla 13 hasta la 16, la dosificación fue modificada, tanto con el cambio en el agregado como en el tipo de cemento.

Como se puede apreciar en el gráfico anterior, el endurecimiento de las mezclas # 14, 15 y 16 es mayor en comparación al resto de mezclas, lo que se atribuye al uso de cemento Portland tipo I, cuyas propiedades de endurecimiento son superiores a otros cementos, como por ejemplo los cementos hidráulicos.

De las 16 muestras realizadas, la mitad cumple con los parámetros mínimos de diseño de resistencia a compresión simple para hormigones permeables, el cual es de  $140 \text{ kg/cm}^2$  y 5 de ellas cumplen holgadamente con este requisito.

Todas las mezclas especiales (las # 13, 14, 15, y 16) tienen resistencias a la compresión simple de  $175 \text{ kg/cm}^2$  y valores superiores, con lo que se demuestra que las mezclas con mejores áridos y tipo de cemento, adquieren mayor resistencia.

### 9.1.3 Resultados de Densidad Vs. Resistencia a la compresión simple:

A continuación se muestran los resultados obtenidos:

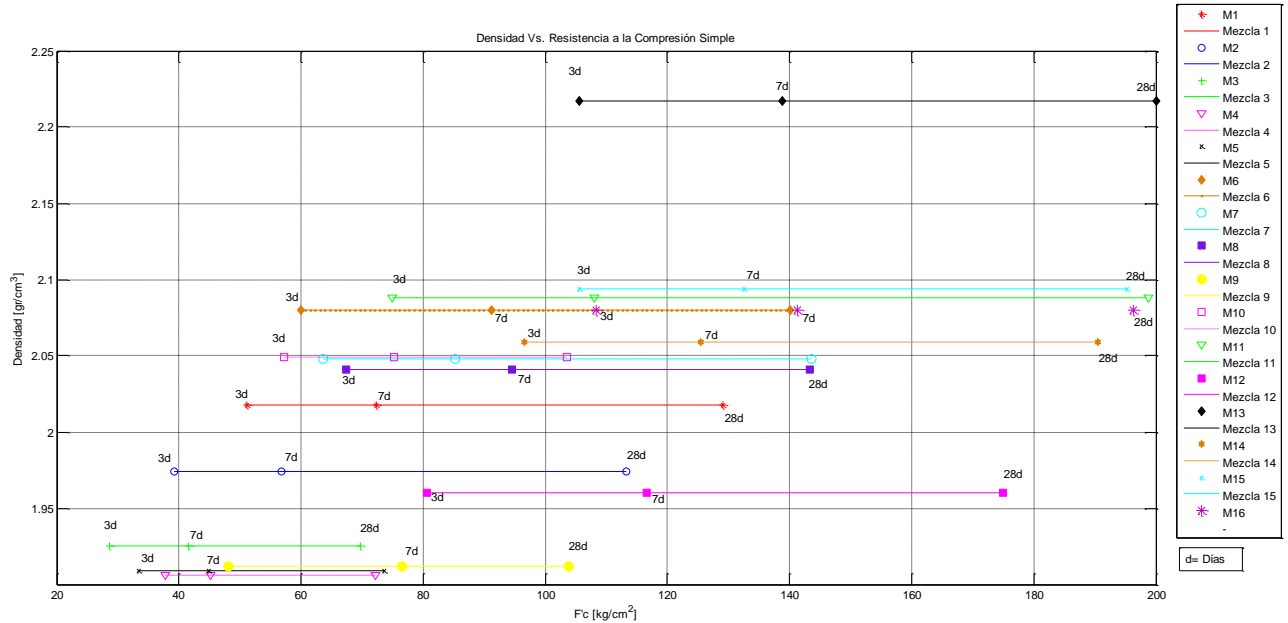


Figura 9.2: Densidad [gr/cm<sup>3</sup>] Vs. Resistencia a la compresión simple.

Como tendencia principal se puede apreciar que en hormigones permeables, a mayor densidad del hormigón mayor su resistencia a la compresión simple.

La densidad en el hormigón en general, depende de los compuestos utilizados y de su dosificación. No obstante, entre una mezcla y otra puede ocurrir una mayor o menor relación W/C la cual afecta levemente la densidad pero influye en la resistencia.

Las muestras que presentan mayor resistencia a la compresión simple son las mezclas 11, 13, 14, 15 y 16. Sus densidades varían entre 2.07gr/cm<sup>3</sup> y 2.1 gr/cm<sup>3</sup> con la excepción de la mezcla 13 la cual tiene una densidad de 2.23 gr/cm<sup>3</sup>.

La mezcla 12 es diferente a las demás teniendo una densidad baja de 1.97gr/cm<sup>3</sup> pero con una resistencia a la compresión alta. En todo caso, como una guía se puede decir que una densidad superior a los 2gr/cm<sup>3</sup> brindará una resistencia a la compresión significativamente mayor.

### 9.1.4. Resultados Relación Agua/Cementante Vs. Resistencia a la Compresión Simple

En hormigones, la relación W/C de la mezcla influye en la resistencia final del hormigón.

La relación W/C Vs. Resistencia a la compresión simple de las mezclas realizadas de hormigones porosos, permite observar que a menor relación W/C mayor será la resistencia a la compresión. Sin embargo, también se puede observar que las relaciones W/C que mejor resistencia a la compresión brindan están en los rangos de 0.28 a 0.35.

Con relaciones W/C menores a 0.28 como visto en la mezcla # 4, la resistencia a la compresión es baja, debido a que la pasta no se adhiere a los agregados y siendo poroso, el hormigón resultante es de débil resistencia. Puede argumentarse que al tener mayor relación W/C la matriz de cemento puede adherirse de mejor manera al agregando mejorando sus propiedades en hormigones permeables.

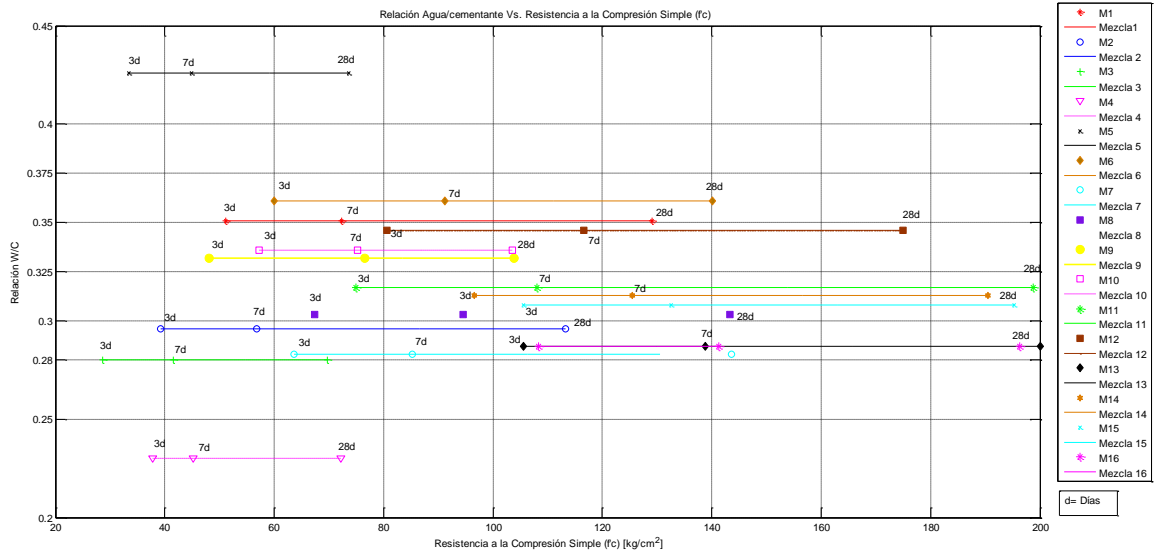


Figura 9.3: Resistencia a la compresión simple [kg/cm<sup>2</sup>] Vs. Relación W/C

En los ensayos realizados, las muestras que presentan mayor resistencia a la compresión tienen una relación W/C entre 0.29 a 0.31, con lo que se sugiere empezar con este rango de valores para el diseño de hormigones permeables.

## 9.2 Resultados basados en la permeabilidad

Con los datos obtenidos de la permeabilidad de las mezclas a los 3, 7, y 28 días se encontraron relaciones importantes con las otras variables analizadas.

### 9.2.1 Resultados Permeabilidad Vs. Resistencia a la compresión simple

Como se describió anteriormente, a mayor resistencia a la compresión simple obtenida menor será la permeabilidad. Los resultados obtenidos no son la excepción y se presentan en el gráfico siguiente.

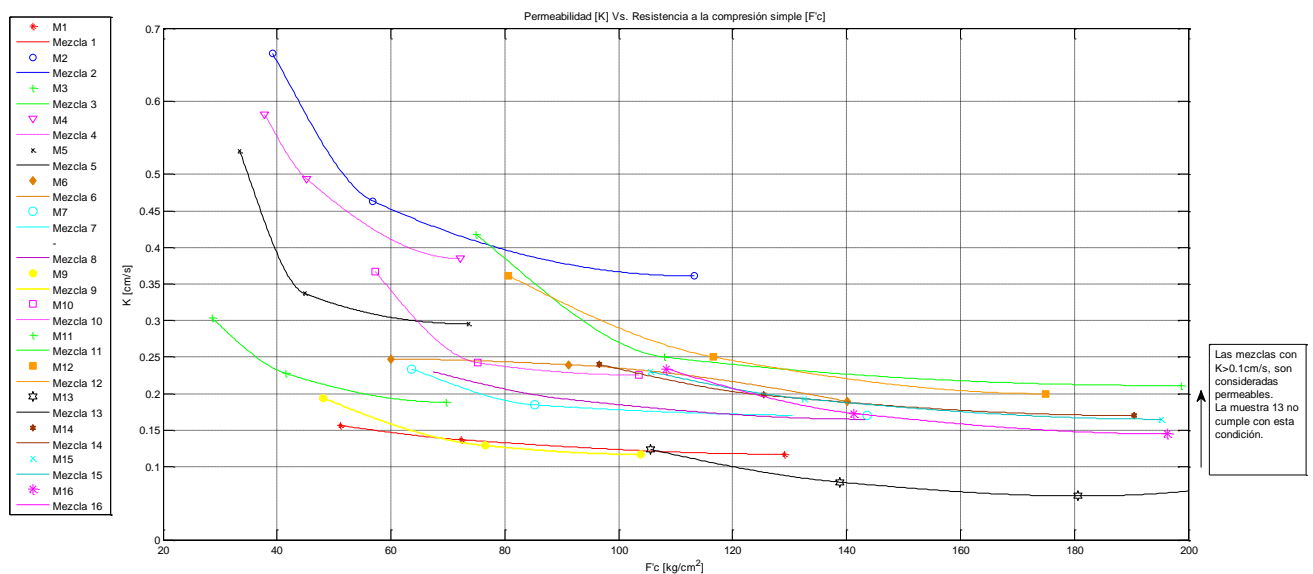


Figura 9.4: Resistencia a la compresión simple  $[\text{kg/cm}^2]$  Vs. Permeabilidad  $[\text{cm/s}]$

La permeabilidad (K) es una variable importante en obras destinadas al drenaje. Por tanto, los valores básicos a ser empleados para la obra, son una función de las condiciones pluviométricas de la zona.

En este estudio, para el diseño de pavimentos se consideró una permeabilidad de  $0.13 \text{ cm/s}$ . Tan solo tres mezclas no cumplen este parámetro, y son las # 1, 9 y 13.

Las mezclas especiales (# 14, 15, y 16) tiene una permeabilidad que oscila entre  $0.14$  y  $0.23$ , con lo que cumplen con el valor de diseño por permeabilidad, aunque no sobrepasan este valor de una manera holgada.

### 9.2.2 Relación Permeabilidad Vs. Tiempo

En este estudio se indica el proceso evolutivo de la permeabilidad de los hormigones porosos en función del tiempo. Las reacciones químicas de los componentes de la mezcla, se manifiestan en el proceso de fraguado, lo cual se visualiza muy bien en los gráficos siguientes. Cabe señalar que estas curvas son una función del tipo de mezclas y de los tipos de agregados y del cemento.

A continuación se muestran los resultados obtenidos:

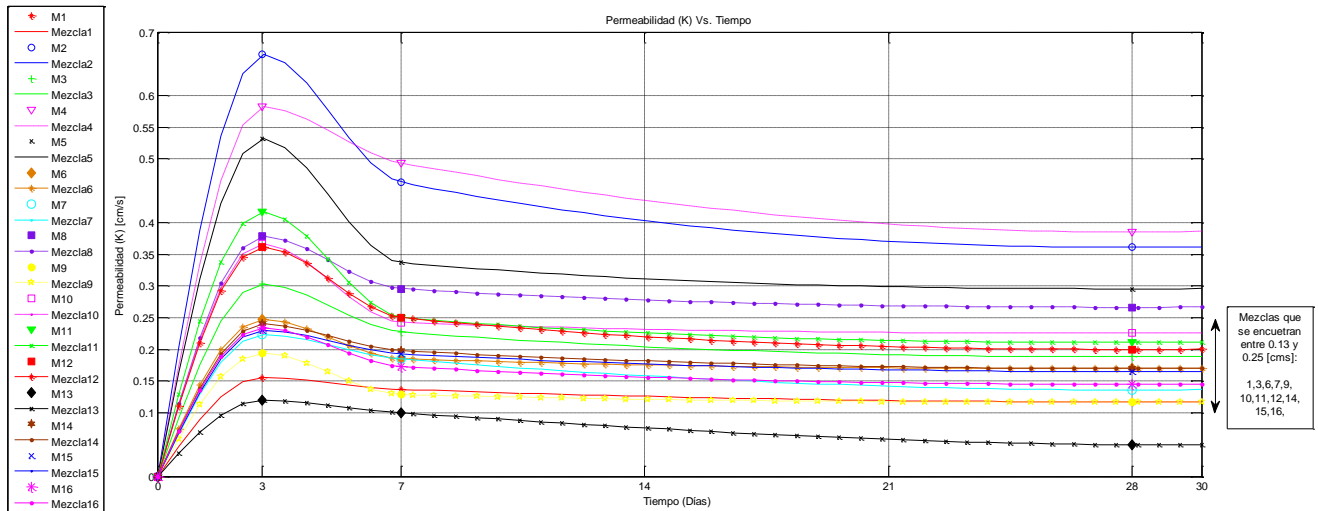


Figura 9.5: Relación Tiempo [Días] Vs. Permeabilidad [cm/s]

La relación que existe entre la permeabilidad y el tiempo de curado del hormigón es una propiedad que debe ser analizada con detalle ya que la permeabilidad cambia con el tiempo.

Lo ideal sería encontrar el método que permita que la permeabilidad del hormigón se mantenga a los valores máximos iniciales. Ese propósito supera los objetivos de este estudio de pregrado pues debería analizarse la química de las mezclas con mediciones de la cantidad de gases generado, entre muchos otros análisis.

En el estudio desarrollado, en los primeros 3 días de curado el hormigón brinda el valor máximo de permeabilidad, entre los días 3 y 7 la permeabilidad disminuye a razón de un 15 %, finalmente entre los días 7 y 28 la permeabilidad disminuye entre un 5% a un 15%.

Se puede decir que entre la permeabilidad encontrada a los 3 días y la encontrada a los 28 días existe una disminución situada entre un 15% y un 30% valores importantes para los objetivos planteados.

La disminución en el tiempo de los espacios intersticiales entre los áridos (lo cual genera la permeabilidad del hormigón) posiblemente se debe a una reacción múltiple de acciones químicas del cemento (con emisión de gases) y los aditivos (con formación de hidróxido de calcio en la reacción) y un proceso mecánico simultáneo y progresivo de endurecimiento paulatino.

Cuando empieza la reacción de  $C_2S$ , la formación de láminas de hidróxido de calcio empieza a suceder entre el agregado y la pasta (Neville A. , Tecnología del hormigón, 1999). Al trascurrir el tiempo y con el agua sin agitarse (proceso de curado in situ), las láminas de hidróxido de calcio se agrupan, esta aglomeración ocasiona la disminución de permeabilidad en la mezcla.

## Relación Tiempo vs. Permeabilidad y Resistencia a la compresión simple

Se puede exponer estos fenómenos de mejor manera sobreponiendo los gráficos de las relaciones Permeabilidad Vs. Tiempo y Resistencia a la compresión Vs. Tiempo que se indican a continuación.

A continuación se muestra esta relación:

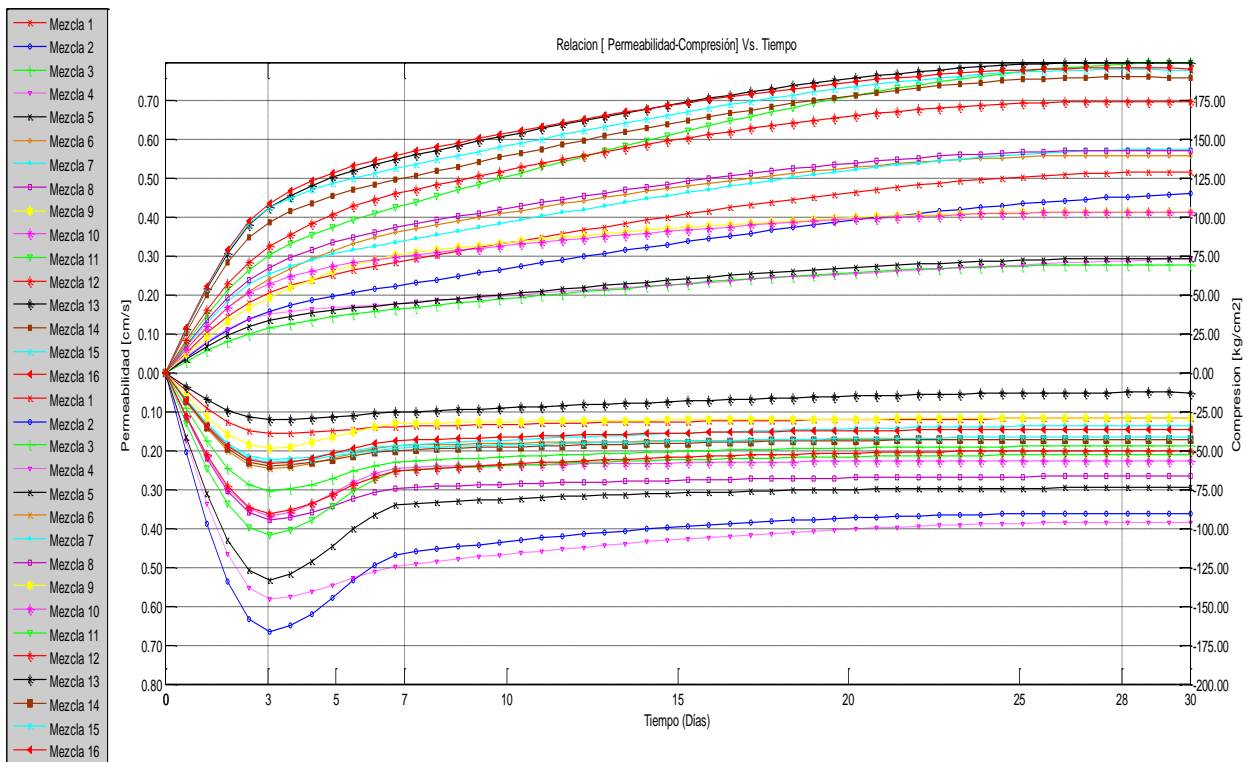


Figura 9.6: Comparación entre la Permeabilidad (Izquierda) y Resistencia a la compresión simple (Derecha) Vs. Tiempo

El origen de estas curvas está en el punto cero (0). El gráfico de la Permeabilidad vs. Tiempo ha sido invertido pero sus valores son positivos.

Partiendo del eje de las abscisas, se puede observar que en la parte superior a este eje está la tendencia que genera la resistencia a la compresión vs. Tiempo, mientras que por debajo del eje de las abscisas se puede apreciar la permeabilidad vs. Tiempo.

Al invertir las curvas generadas por la relación entre la permeabilidad y el tiempo se puede apreciar claramente la relación inversa existente entre estas propiedades.

A manera de ejemplo, si se analiza por ejemplo la mezcla #13 (en gráfico, línea negra con asteriscos), llega a una resistencia a la compresión simple de  $200\text{kg/cm}^2$ . Su respectiva curva de permeabilidad vs tiempo da como resultado  $0.05\text{cm/s}$  con lo que se demuestra esta relación inversa

Mientras mayor crecimiento tenga la curva de Resistencia a la compresión, la línea de Permeabilidad tendrá una tendencia a cero.

Desde el inicio de las medidas hasta el día 3ro., los valores de la permeabilidad de las mezclas aumenta notablemente, al igual que la resistencia a la compresión simple que aumenta en forma manifiesta. A partir del día 3ro. La permeabilidad inicia su disminución (es decir, existe un cierre de vacíos entre los áridos) mientras que la resistencia a la compresión aumenta (consecuencia del endurecimiento de la pasta) pero en una etapa de crecimiento mucho menor. A partir del día 7mo., la permeabilidad disminuye lentamente con tendencia asintótica con el tiempo mientras que la resistencia a la compresión simple crece lentamente con tendencia asintótica igualmente. A partir del día 7mo., ambas curvas son asintóticas.

### Símil con la presión de expansión en arcillas vs. Tiempo

Cabe señalar el símil existente entre la presión de expansión de las arcillas en agua vs. Tiempo.

En arcillas esmectíticas, es decir, arcillas con componentes montmorilloníticos, la presión de expansión es máxima al poco tiempo de saturado el suelo (entre 0,7 días hasta 3,5 días) y luego, al igual que la permeabilidad del hormigón, disminuye (algunas en forma brusca) hasta ser asintótica al tiempo. En las arcillas, la estructura de los componentes microscópicos cambia con el ingreso del agua y permite el desarrollo de la presión, hasta un valor máximo que disminuye bruscamente y luego se torna asintótica.

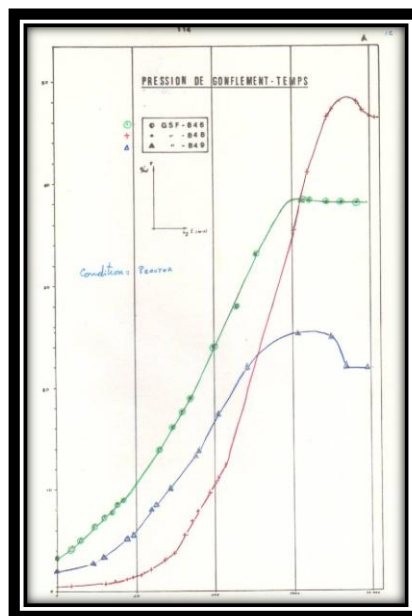


Figura 9.7 : la presión de expansión en arcillas vs. Tiempo  
Fuente : (Jativa Sevilla Vladimir, 1988)

Dada la gran similitud entre la permeabilidad del hormigón vs. Tiempo y la presión de expansión de arcillas vs. Tiempo, las leyes de comportamiento que las rigen podrían ser una guía para comprender el fenómeno de permeabilidad en los hormigones, en particular de los denominados permeables.

### 9.2.3 Relación Densidad – Permeabilidad

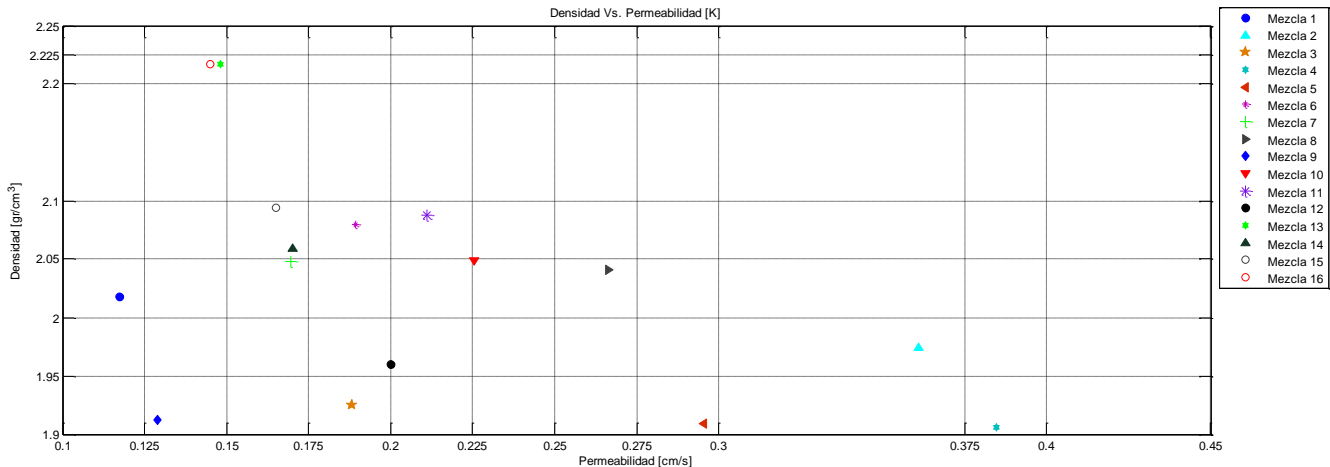


Figura 9.8: Relación Permeabilidad [cm/s] Vs. Densidad [gr/cm<sup>3</sup>]

Se puede apreciar que a mayor densidad menor permeabilidad. Esta tendencia es de esperarse ya que una mezcla con mayor densidad contiene mayor masa para un mismo volumen lo que en consecuencia disminuye espacios entre partículas afectando así a la permeabilidad.

Las mezclas con mejor desempeño son aquellas con una densidad superior a 2 gr/cm<sup>3</sup>. Las mezclas con densidades inferiores generaron un mal desempeño en resistencia tanto a la compresión como a la flexión, aunque su permeabilidad fue alta.

## 9.3 Resultados basados en la resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión, medida en barras de hormigón de 10cm de sección por 60cm de largo, está relacionada con parámetros de compresión simple, permeabilidad, y tiempo de análisis.

Los ensayos realizados siguieron la norma ASTM C78.

Estos ensayos son valiosos para aplicarlos en los diseños de capas de rodadura porosas.

### 9.3.1 Relación Resistencia a la Compresión simple vs. Resistencia a la Flexión

Para el caso de hormigones normales, existe una relación directamente proporcional entre la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión. Dado que los hormigones son porosos, las resistencias son inferiores a las de hormigones tradicionales. sin embargo, el estudio experimental desarrollado ha permitido encontrar las siguientes relaciones:



A continuación se presenta la relación encontrada:

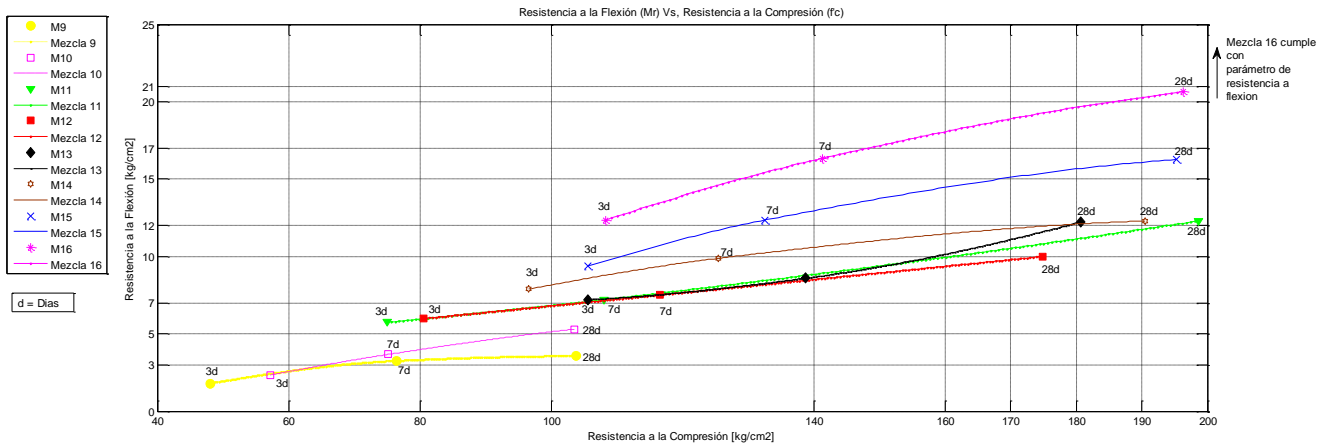


Figura 9.9: Relación Resistencia a la Compresión simple vs. Resistencia a la Flexión

Cuando se realiza el ensayo a flexión se está aplicando cargas a espaciamientos de un tercio del claro libre.

El esfuerzo a tensión máximo teórico alcanzado en la fibra inferior de la viga de prueba es conocido como el módulo de ruptura. (Neville A. , Pruebas para resistencia en tensión, 1999)

A continuación se muestran algunas relaciones encontradas en la bibliografía, para hormigones tradicionales y para hormigones permeables.

Se destaca que este tipo de relaciones son muy escasas.

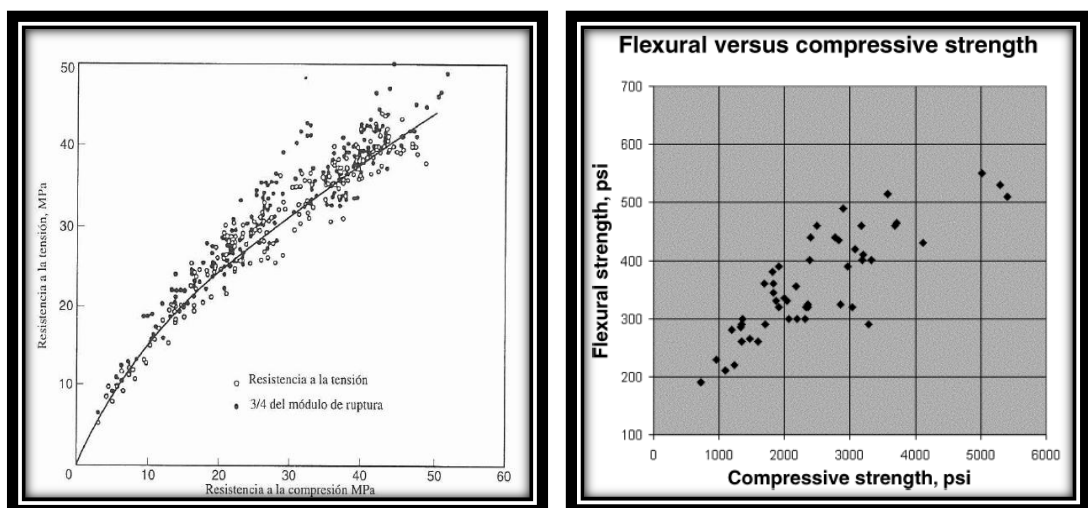


Gráfico (a) : (Tanzil, 2002)

Gráfico (b): (ACI-522/06, 2006)

Figura 9.10: Comparación de comportamiento entre hormigones tradicionales y permeables con relación a la resistencia a flexión Vs. Compresión.

El Gráfico (a), representa la resistencia a la tensión indirecta y de  $\frac{3}{4}$  del Módulo de Ruptura entre la resistencia a la compresión del hormigón (Tanzil, 2002); mientras que el Gráfico (b) representa la relación entre la resistencia a la flexión y compresión del hormigón permeable (ACI-522/06, 2006).

Como se observa la relación de resistencias entre flexión y compresión encontrada por Neithalath, Weiss y Olek (grafico (b)), sugiere que la relación de  $\frac{3}{4}$  del módulo de ruptura entre la resistencia a la compresión no necesariamente se cumple (gráfico a).

Si consideramos por ejemplo un hormigón con resistencia a la compresión simple de 3000 psi  $\approx$  20.7 Mpa, entonces, siguiendo la relación resistencia a la compresión Vs. Flexión proporcionada por el grafico (a), para este hormigón correspondería una resistencia a la flexión aproximada de 5 Mpa  $\approx$  725 psi.

Por otro lado, si se considera el mismo hormigón pero permeable, entonces, teniendo con una resistencia a la compresión de 3000 psi  $\approx$  20.7MPa y siguiendo el gráfico (b) la resistencia a la flexión sería igual a 400psi  $\approx$  2.7 Mpa.

Con esto, se necesitará un hormigón con mayor resistencia a la compresión para lograr la flexión deseada.

Si se compara el grafico (b), con la relación encontrada en este trabajo, se puede observar que los puntos encontrados por Neithalath, Weiss y Olek tienen una pendiente más pronunciada.

Según su comparación al conseguir un hormigón permeable de (3000psi  $\approx$  210kg/cm<sup>2</sup>) su resistencia a la flexión se encontrara en alrededor de (400 psi  $\approx$  28kg/cm<sup>2</sup>), es decir un 13% de su resistencia a compresión.

Ahora bien, para esta investigación se puede observar que tan solo la Mezcla 16 cumple con el parámetro de diseño impuesto para el diseño de hormigón permeable a ser utilizado en el parqueadero de la USFQ, aunque la misma no fue realizada con los materiales originalmente escogidos como ha sido explicado anteriormente.

Si escogemos una mezcla con materiales originales se puede observar que la mezcla #11 es la que mejor desempeño obtuvo con una resistencia a la flexión de 12kg/cm<sup>2</sup> y resistencia a compresión de 195 kg/cm<sup>2</sup>, si se comprara la resistencia a compresión encontrada con el grafico (b), entonces tenemos que la resistencia a flexión debería ser de alrededor de 20kg/cm<sup>2</sup>.

Se puede decir que la resistencia a flexión del hormigón dosificado con materiales originales es aproximadamente un 60% inferior a los realizados con material mejorado y cemento Portland Tipo I.

Los valores que generan la tendencia encontrada para la relación de resistencia a compresión Vs. Flexión en este trabajo son inferiores de aquellos que generan la tendencia mostrada por ACI 522-06 (gráfico b).

## DISCUSIÓN

El Gráfico de la relación de resistencias de Compresión vs. Flexión mostrados en ACI 522-06 y encontrados originalmente en por Neithalath, Weiss, & Olek, en Predicting the Permeability of Pervious Concrete (Enhanced Porosity Concrete) from Non-Destructive Electrical Measurements, 2008, muestra mezclas realizadas con cemento Portland y materiales graníticos y basaltos de gran resistencia y angulosidad; es decir, fueron realizados con muy buenos áridos.

En el caso del mercado ecuatoriano, es muy difícil la disponibilidad de cemento portland puzolánico ASTM C595 y cemento portland ASTM C150 por sacos. Entonces, ya que el cemento empleado en los ensayos (cemento hidráulico ASTM C1157) no se compara con las resistencias y prestancias de uno Portland, los resultados de la resistencia a la flexión serán inferiores.

Igualmente, el agregado originalmente utilizado no traía certificado alguno sobre sus características, con lo que su calidad puede depreciarse fácilmente.

En el Distrito Metropolitano de Quito tan solo la empresa Holcim emite certificados sobre las características de sus agregados aunque la compra de los mismos no es sencilla.

La Mezcla 16 realizada con cemento Portland y agregado basáltico de gran calidad, encontró una resistencia a la flexión de  $21 \text{ kg/cm}^2$  y una resistencia a la compresión de  $195 \text{ kg/cm}^2$  es decir, un 11% de su resistencia a la compresión. Con el uso de áridos de buena resistencia y angulosidad y un cemento de alta calidad, se cumple en gran manera con las tendencias encontradas en ACI522-06.

### 9.3.2 Relación de Resistencia a la Flexión Vs. Permeabilidad

A continuación se muestra la relación encontrada:

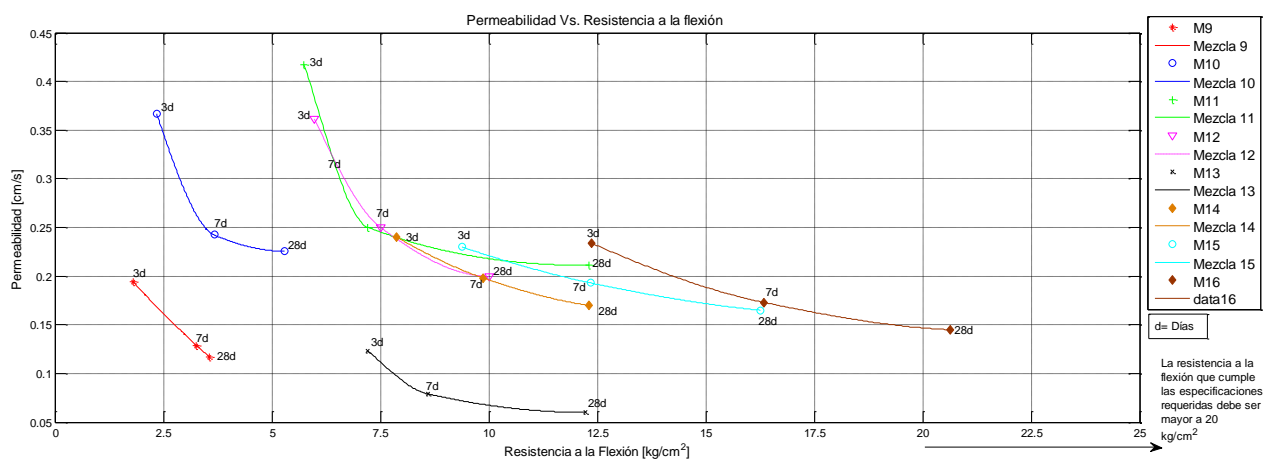


Figura 9.11: Relación resistencia a la Flexión [kg/cm<sup>2</sup>] Vs. Permeabilidad [cm/s]

Se puede apreciar que la resistencia a la flexión aumenta conforme la permeabilidad disminuye, igual que lo ocurrido con la relación resistencia a compresión vs. Permeabilidad.

Debido a que las mezclas con las cuales se calculó la permeabilidad provienen del permeámetro de carga variable construido para estos estudios, (sección 7.2.1) se asume que la permeabilidad en las viguetas para las pruebas a flexión es la misma que la de los cilindros.

El argumento dado es válido cuando la energía de compactación dada al cilindro es la misma que la dada a la vigueta. Se debe poner énfasis en esto, ya que la densidad de una vigueta de hormigón permeable puede variar ampliamente a la de un cilindro y con ello la permeabilidad se verá afectada.

Ann Marie Mulligan (Mulligan, 2005) habla de la diferencia en permeabilidad existente entre muestras compactadas por el Método Próctor estándar y Próctor modificado, dando cambios significativos en compresión y permeabilidad.

Se debe analizar a más profundidad la energía de compactación brindada a una muestra, ya que para hormigones permeables un leve aumento de esta generará un impacto negativo en la permeabilidad.

No existe norma que establezca el método de ensayos que permita relacionarlos.

### 9.3.3 Relación de Resistencia a la flexión Vs. Tiempo

A continuación se muestra la relación encontrada:

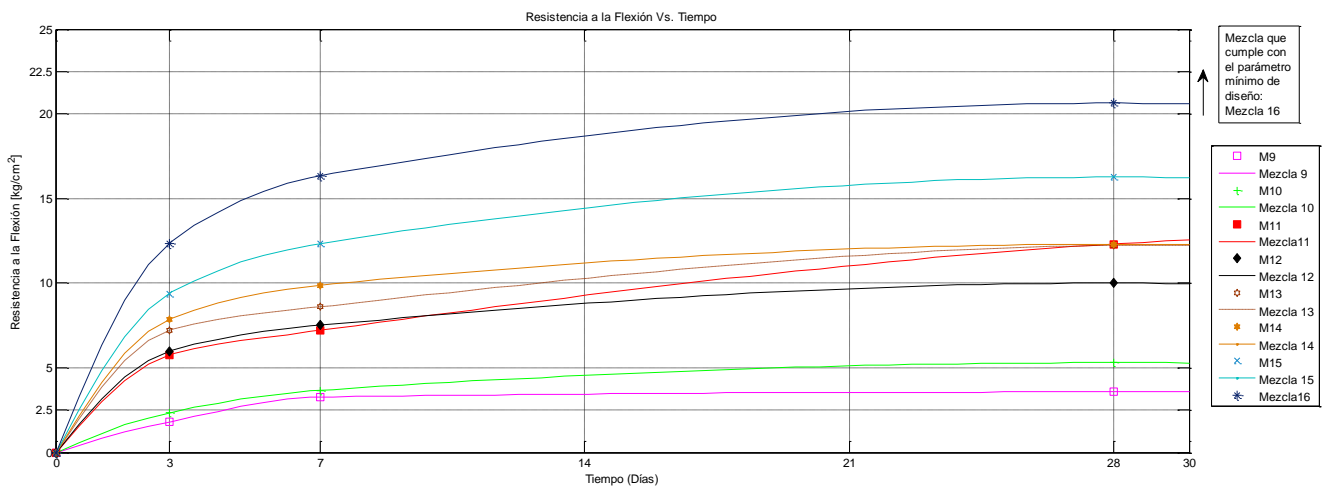


Figura 9.12: Relación Tiempo [Días] Vs. Resistencia a la Flexión [kg/cm<sup>2</sup>]

Se puede observar que la resistencia a la flexión tiene una curva similar a la encontrada en la relación de resistencia a la compresión Vs. Tiempo.

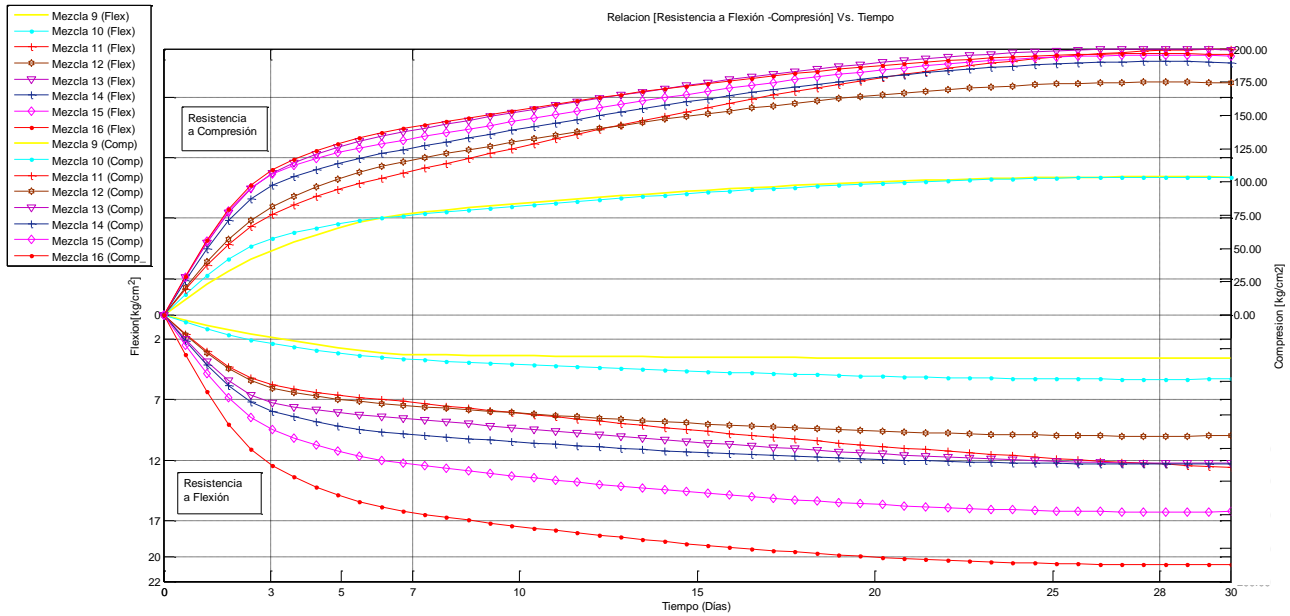


Figura 9.13: Comparación entre la Resistencia a la Flexión (Izquierda) y Resistencia a la compresión simple (Derecha) Vs. Tiempo

Al contrario de lo analizado en la comparación entre la Permeabilidad y Resistencia a la compresión simple Vs. Tiempo, aquí mientras mayor sea el valor de resistencia a la compresión, mayor será la resistencia a la flexión adquirida.

Cabe señalar que en los estudios experimentales de los hormigones porosos aplicados a una vía, la resistencia a la flexión y el desempeño general pueden ser incrementados notablemente con el uso de mallas biaxiales ó refuerzos metálicos de malla hexagonal con o sin refuerzos, pues debido a sus características físicas de alta permeabilidad, alta resistencia y alta durabilidad, garantizan una vida útil de la superficie de rodadura permeable.

Ensayos sobre este tipo de refuerzos en hormigones porosos no han sido contemplados en el presente estudio y es un campo amplio de investigaciones teórico – prácticas.

#### 9.4 Resultados basados en el costo

Se ha calculado el costo de un metro cúbico de hormigón utilizando los siguientes parámetros:

| MATERIALES                                       | PRECIO UNITARIO | UNIDAD |
|--|-----------------|--------|
| Agregado Grueso (3/8")                           | 10              | Ton    |
| Arena gruesa(#4)                                 | 10              | Ton    |
| Arena Fina (#8)                                  | 10              | Ton    |
| Arena UltraFina (#16)                            | 10              | Ton    |
| Cemento NTE INEN 2380 (ASTM C 1157), tipo "GU"   | 125             | Ton    |
| Microsílice ASTM C240                            | 750             | Ton    |
| Agua   | 2               | Ton    |
| Reductor de Agua de alto rango (polycarboxylate) | 5.7             | Litro  |

Tabla 9.1: Precio unitario de materiales utilizados.

A continuación se compara el costo tanto con la resistencia a compresión como con la resistencia a flexión:

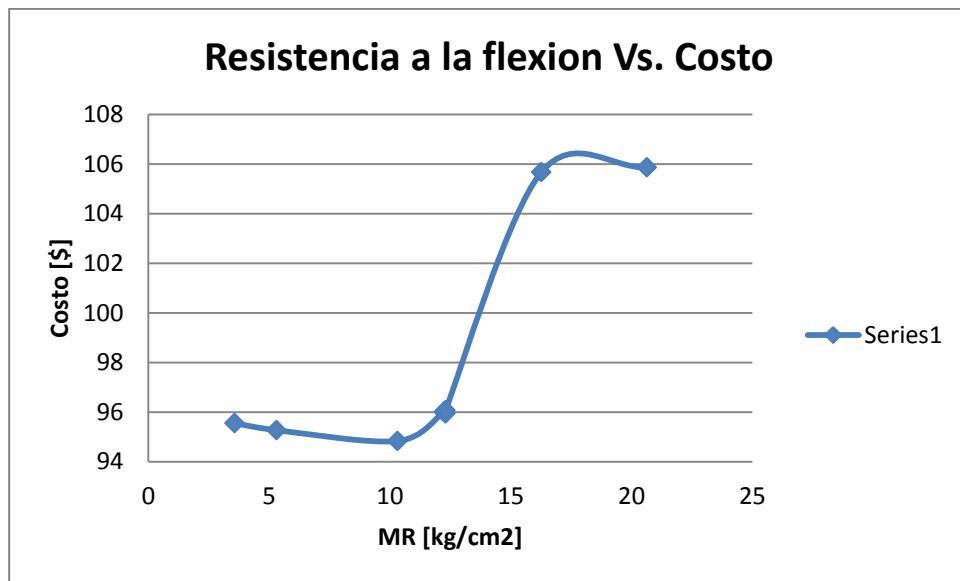


Figura 9.14: Relación entre el costo y la resistencia a la flexión simple.

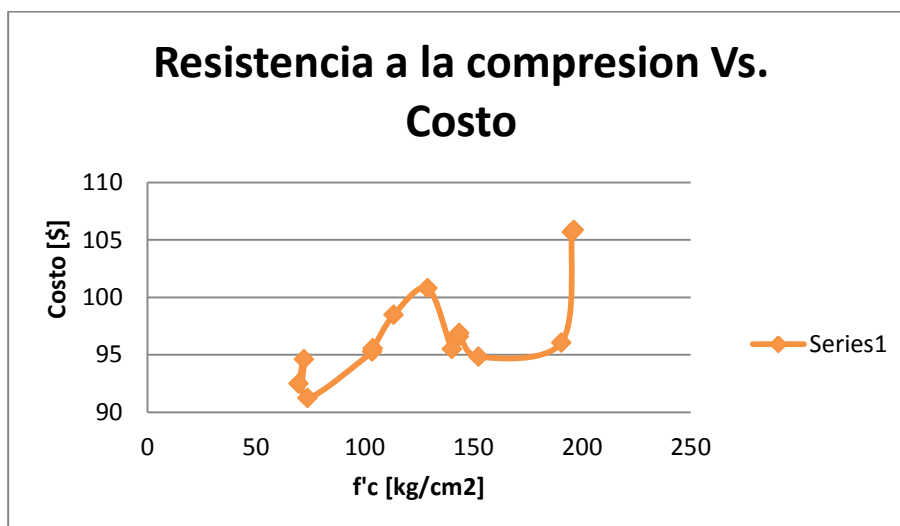


Figura 9.15: Relación entre el costo y la resistencia a la compresión simple.

Ya que en el mercado ecuatoriano el costo del cemento Portland Tipo I es mucho mayor en comparación al cemento Holcim tipo 'GU' entonces se puede observar que para conseguir mayores resistencias se necesitará mayor inversión.

## 10. DISEÑO DE PAVIMENTOS

### 10.1 Antecedentes

Las investigaciones conducentes a la obtención de un hormigón poroso empleando áridos, cementos y aditivos que se comercializan en nuestro medio, puede tener aplicación práctica en la pavimentación del área de estacionamientos de la Universidad San Francisco, donde aparcan 152 vehículos / día.

Las dimensiones del estacionamiento y la distribución del espacio, fueron proporcionadas por la Universidad.

La proyección para la vida del proyecto, está determinada en 10 años y el área a ser cubierta de hormigón permeable será de aproximadamente 6700 m<sup>2</sup>

El uso de hormigón poroso es ideal para áreas donde se necesita que la superficie permanezca casi seca y sin ningún anegamiento, aún en condiciones de lluvia muy intensa. Una de esas zonas es un estacionamiento vehicular descubierto como el existente en la USFQ.

En nuestro País existen zonas urbanas con precipitaciones pluviales muy intensas (isoyetas entre 4000 y 5000 mm anuales) como es en las ciudades de Puyo, Tena, Lago Agrio, Quinindé y otras, donde el anegamiento es una constante después de una lluvia intensa que es normal en esas regiones. Igualmente en ciudades como Quito, Guayaquil, Esmeraldas, Quevedo, Babahoyo, precipitaciones de gran intensidad y corta duración generan anegamientos importantes que podrían ser evitados.

### 10.2 Introducción

El presente diseño ha sido elaborado con la metodología AASHTO-93 la cual ha sido aceptada como válida por el Ministerio de Obras Públicas y Transporte (MOPT) de Ecuador.

El presente diseño de pavimento de hormigón permeable para el estacionamiento referido, ha sido dimensionado para soportar los esfuerzos a los que estará sometido por el Tráfico Vehicular Proyectado para una Vida útil de 10 años y para que rinda satisfactoriamente y económicamente los servicios que deben esperarse del mismo.

Para el dimensionamiento se ha tomado en consideración 4 factores importantes:

- a) Cantidad, peso y tipo de vehículos del tránsito actual y futuro.
- b) Capacidad portante del suelo de la sub-rasante;
- c) Condiciones de resistencia, y de durabilidad del hormigón permeable;
- d) Características climáticas de la región en la que se construirá el pavimento.

Para el último factor expuesto, el diseño de pavimentos con hormigones permeables dispone de valores propios diferentes a aquellos para hormigones 'normales' (American Concrete Pavement Association, 2010).



### **10.3 Características Geotécnicas del suelo de fundación del pavimento permeable**

De acuerdo con los datos proporcionados por constructores viales próximos al aparcamiento de la USFQ, el suelo es del tipo “cangahua”; es decir, un limo arenoso con eventuales gravas volcánicas, cuya clasificación SUCS varía de ML a SM; es decir, limos arenosos a arenas con limo.

Este suelo tiene un origen volcánico con transporte por vientos y deposición ‘periclinal’ (es decir, paralela a la paleotopografía) de cenizas, arenas y piroclastos en general. Al ser material volcánico fino, tiene propiedades puzolánicas.

Investigaciones del U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vi., Mississippi, 1969 reflejan un amplio paralelismo en la composición y comportamiento mecánico de la cangahua con suelos loésicos de EE.UU.

Estos suelos son considerados de buenas características geotécnicas para vía. Sin embargo, deben ser protegidos del humedecimiento intenso pues su comportamiento cambia bruscamente de suelo resistente a suelo colapsable.

Por la buena resistencia mecánica y las bajas cargas actuantes, no es necesario un reemplazo del suelo de la subrasante.

La naturaleza permeable del hormigón poroso plantea un diseño adicional para la conducción del agua de escorrentía originada en la lluvia principalmente o en derrames.

### **10.4 Diseño del pavimento de hormigón permeable sin mejoramiento de la subrasante**

Las variables que tiene en cuenta el método AASHTO’93 para el diseño de pavimentos rígidos son:

#### **a. Tiempo**

El tiempo se refiere al tiempo de vida útil del pavimento. Para pavimentos a ser utilizados en parqueaderos y accesos de bajo tráfico se recomienda una vida útil entre los 10 a 20 años. Para este diseño se ha considerado un período de 10 años.

#### **b. Tránsito**

El tránsito en los parqueaderos disponibles dentro de la Universidad no crecerá con el tiempo ni tampoco incrementará su capacidad. El parqueadero en cuestión abarca un área de 6714 m<sup>2</sup> con una capacidad de 152 parqueaderos.

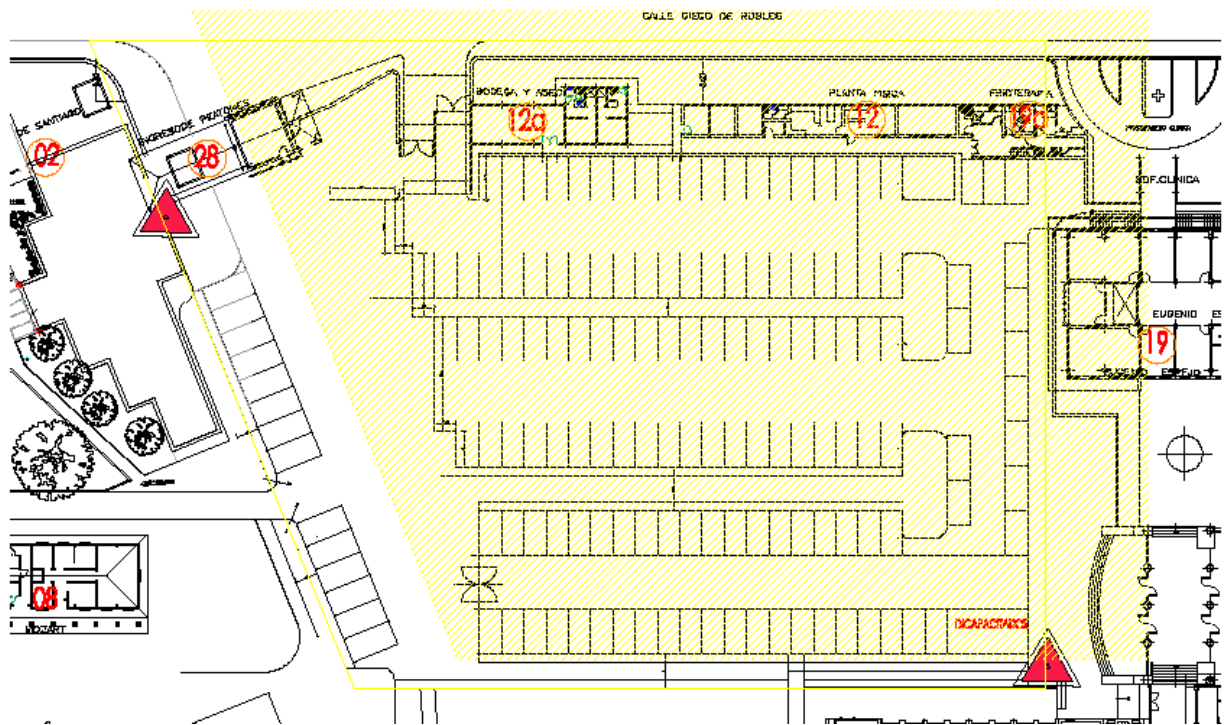


Figura 10.1: Vista en planta del parqueadero USFQ.

Fuente: (Echeverria, 1998)

Para determinar el tráfico promedio diario (ADT) se ha realizado el siguiente cálculo:

$$ADT = \#parqueaderos * \#veces \text{ al dia que se usa cada parqueadero} * \#dias$$

- ADT en días normales de clase:

$$ADT_{DN} = 152 * 2.5 * 5 * 30 \text{ semanas de clase} \\ = 57000 \text{ Vehiculos en 44 semanas de clase normal}$$

- ADT en días de clase de verano:

$$ADT_{CV} = 152 * 0.5 * 4 * 9 \text{ semanas de clase de verano} \\ = 2736 \text{ Vehiculos en 9 semanas de clase de verano}$$

- ADT en fines de semana:

Relativo a la certeza de que el diseño pueda llegar al fin de su período de análisis en buenas condiciones. Se emplearán los siguientes valores:

$$ADT_{FS} = 152 * 0.25 * 2 * 14.85 \text{ semanas en fines de semana} \\ = 1128 \text{ Vehiculos en que asisten en 52 fines de semana}$$

Entonces,

$$ADT = ADT_{DN} + ADT_{CV} + ADT_{FS} = 57000 + 2736 + 1064 \\ = 60864 \text{ vehiculos en 1 año}$$

$$ADT = 169 \frac{\text{Vehiculos}}{\text{día}}$$

$$\%Camiones = 1\%$$

**c. Valores de distribución de carga usados:**

Los valores mostrados a continuación, son basados en el diseño de parqueaderos y áreas residenciales, y están compuestos de valores promedio de tablas de carga recopiladas por AASHTO y acogidas en el programa PerviousPave (American Concrete Pavement Association, 2010):

| Carga por Eje [kips] | Ejes/1000 camiones | Carga por Eje [kips] | Ejes/1000 camiones |
|----------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| <b>Ejes Simple</b>   |                    | <b>Ejes Tandem</b>   |                    |
| 22                   | 0.96               | 36                   | 4.19               |
| 20                   | 4.23               | 32                   | 69.59              |
| 18                   | 15.81              | 28                   | 68.48              |
| 16                   | 38.02              | 24                   | 39.18              |
| 14                   | 56.11              | 20                   | 57.1               |
| 12                   | 124                | 16                   | 75.02              |
| 10                   | 204.96             | 12                   | 139.3              |
| 8                    | 483.1              | 8                    | 85.59              |
| 6                    | 732.28             | 4                    | 31.9               |
| 4                    | 1693.31            | 0                    | 0                  |

*Tabla 10.1: Valores de distribución de carga utilizados*

De la superficie total a ser recubierta por hormigón permeable, aproximadamente 5% de la misma no estará expuesta directamente al marco de carga (e.j., aceras). Se considera al crecimiento de camiones en 2%, se prevee el arribo de camiones con mayor frecuencia.

- **Desviación Estándar ( $S_0$ ):**

Debido a que la variación en la predicción del comportamiento del pavimento no tiene errores en el tráfico (ya que este no tiene planeado aumentar) se toma el siguiente valor:

$$S_0=0.34$$

- **Desviación Estándar basado en la confiabilidad:**

Debido a que la tecnología utilizada para la construcción de un parqueadero a base de hormigón permeable está todavía en etapa de investigación, entonces la confiabilidad disminuye.

Para este diseño se ha tomado un 75% de confiabilidad lo que brinda da una desviación estándar normal ( $Z_R$ ) de:

$$Z_r = -0.674 \quad (R=75\%)$$

**d. Criterios de adopción de niveles de serviciabilidad:**

La serviciabilidad del pavimento es la capacidad de servir al tránsito para el cual se ha diseñado. (Guide for Design of Pavement Structures , 1993)

Así se define un índice de serviciabilidad presente PSI (Present Serviciability Index) mediante el cual el pavimento es clasificando entre muy malo (0) y perfecto (5). (Guide for Design of Pavement Structures , 1993)

El Índice de Serviciabilidad inicial se ha considerado como:

$P_0 = 4.5$  (Serviciabilidad inicial del pavimento con muy buena calidad de construcción)

El índice de serviciabilidad final es considerado para un parqueadero por lo que se considera como:

$P_t = 2.0$  (Serviciabilidad terminal, para estacionamientos y calles residenciales).

**e. Cambio en el Índice de Serviciabilidad**

También llamado pérdida en serviciabilidad, se define como la diferencia del servicio del pavimento entre la etapa inicial y la final al término del periodo de diseño (AASHTO, AASHTO'93 Diseño de pavimentos, 1993).

$$\begin{aligned} \Delta PSI &= P_0 - P_t \\ \Delta PSI &= 2.5 \end{aligned}$$

**f. Módulo de reacción de la sub-rasante ( $K_{rs}$ ) y Módulo Resiliente (MRS<sub>G</sub>)**

Para considerar el valor dado al módulo de reacción de la sub-rasante ( $K$ ), se ha tomado en cuenta el valor de CBR (Relación de valor soporte California) conocido para esta zona. Cabe señalar que estos parámetros no han sido obtenidos de datos de ensayos del subsuelo del parqueadero de la USFQ. Han sido interpolados de estudios para construcciones en zonas geotécnicas similares.

El ensayo de CBR mide la resistencia a la penetración de un pistón de 3 in<sup>2</sup> de área de una probeta de 6" de diámetro y 5" de altura, con una velocidad de 0.05in/min. (AASHTO, 1993).

Para el suelo del parqueadero de la USFQ se ha considerado un valor de CBR = 20%, considerada sub-rasante buena.

Existen tablas, ábacos y ecuaciones que permiten estimar los valores del Módulo de Reacción y con el CBR. Una de estas Tablas se indica a continuación.

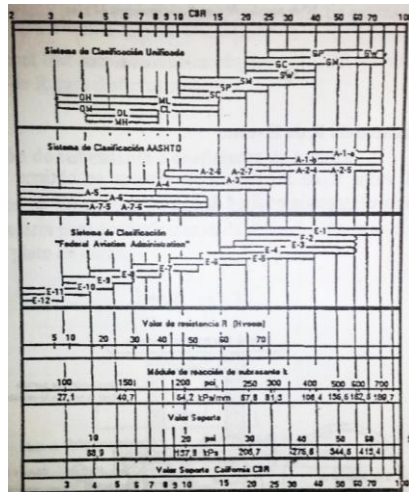


Figura 10.2: Clasificación de suelos relacionada con parámetros de resistencia  
Fuente: (AASHTO A. A., 1993)

Si se tratara de hormigones tradicionales, entonces el ensayo de CBR es suficiente para determinar las características de la subrasante, sub-base y base (Grafico 1). Sin embargo, debido a que la capa de subrasante estará sometida a amplias variaciones de humedad durante su tiempo de vida, entonces es necesario conocer adicionalmente el módulo resiliente.

El módulo resiliente es un ensayo desarrollado con la finalidad de estudiar de mejor manera el comportamiento del suelo ante cargas dinámicas. Se trata de muestras cilíndricas que se confinan y someten a cargas triaxiales que permite una gran variedad de presiones de confinamiento y con esto se registra la deformación sufrida (AASHTO, Características de la Subrasante, 1993).

A continuación se muestra la figura utilizada para correlacionar el valor de CBR, MRSG, y  $E_{sb}$  (módulo elástico de la sub-base).

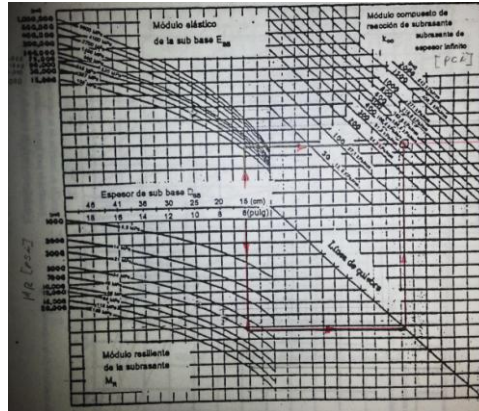


Figura 10.3: Abaco para estimar el módulo compuesto de reacción de subrasante, considerando una profundidad infinita de capa.  
Fuente: (AASHTO, Características de la Subrasante, 1993)

Entonces, considerando un CBR=20%

$$K_{rs} = 176 \text{ p.c.i} \quad (MR_{sub} = 20000 \text{ psi})$$

$$MRSD = 3200 \text{ psi}$$

#### g. Caracterización de los materiales que conformarán las losas

- **Módulo de rotura del hormigón**

No existe un método formal para conducir los ensayos de compresión y flexión establecido por ASTM u alguna otra organización certificada para hormigones permeables (American Concrete Pavement Association, 2010).

Las ecuaciones de fatiga utilizada en este diseño y en el programa PerviousPave, asume que las expresiones encontradas para determinar la resistencia en hormigones tradicionales se comparan en naturaleza pero no en magnitud a hormigones permeables. Se han utilizado los parámetros sugeridos por ASTM C78, en donde se encuentra que :

| Resistencia a la compresión simple (f'c)<br>[ASTM C39]<br>Psi | Resistencia a la flexión (MR)<br>[ASTM C78]<br>Psi |
|---|--|
| <b>2000</b>   | 300-450  |
| <b>3000</b>   | 400-550  |
| <b>4000</b>   | 500-650  |

Tabla 10.2: Resistencia a la flexión (MR) en relación a la resistencia a la compresión simple, basado en ASTM C78.

La resistencia a la flexión simple obtenida de ensayos de laboratorio es:

$$Mr=299.11 \text{ psi con } f'c=2790 \text{ psi}$$

### • Módulo de elasticidad del hormigón ( $E_c$ )

Para hormigones permeables el módulo de elasticidad difiere de las ecuaciones dadas por AASTHO' 93; se ha observado que al tener una característica porosa el agrietamiento inicial producido se acerca al eje neutro en vez de ocurrir en las fibras externas sometidas a flexión.

Por el momento no se ha encontrado de manera concluyente una expresión para determinar el módulo de elasticidad en hormigones permeables. Se conoce que es menor pero no en que magnitud.

La ACPA en el año 2010 presentó un programa llamado PerviousPave (American Concrete Pavement Association, 2010), el cual está enfocado al diseño de calzadas de hormigón permeable.

PerviousPave utiliza las recomendaciones dadas por ASTM C469, referente al módulo de elasticidad en el hormigón, tomando al módulo de elasticidad como:

$$E = 6750 * Mr$$

Dónde: E= módulo de elasticidad en [psi] y Mr=Resistencia a flexión simple del hormigón permeable a los 28 días.

A continuación se muestran los valores expuestos por ASTM C469:

| Resistencia a la flexión simple ( $M_r$ )<br>[psi] a los 28 días | Módulo de Elasticidad ( $E_c$ ) [ASTM C469]<br>[psi] a los 28 días |
|--|--|
| 250  | 1678500  |
| 300  | 2025000  |
| 350  | 2362500  |
| 400  | 2799000  |
| 450  | 3037500  |
| 500  | 3375000  |
| 550  | 3712500  |

Tabla 10.3: Modulo de elasticidad en función a la resistencia a la flexión simple ( $M_r$ ), basado en ASTM C469.

En este trabajo se tomarán las recomendaciones realizadas por ACPA y ASTM para determinar el módulo de rotura en función de la resistencia a flexión utilizada, es así que se utilizó la resistencia la flexión de la Mezcla 16:

$$M_r = 299.11psi$$

$$E = 2018992.5psi$$

### g. Drenaje

Debido a que se trata de un hormigón permeable, es corto el tiempo en el que el agua es removida de su superficie y es bajo el porcentaje del tiempo en que la superficie alcanza límites de saturación. Por estas razones el coeficiente de drenaje fue considerado como:

$$C_j = 1.2$$

### h. Transferencia de carga (J)

El factor de transferencia de carga J tiene en cuenta la capacidad de la estructura de la losa de hormigón para transmitir las cargas a través de las juntas.

El factor de transferencia de carga está ligado al valor de ESAL (equivalente de unidades de carga) encontrado. Ya que el valor encontrado es inferior a 0.3 millones entonces:

$$J=2.8$$

## 10.5 Diseño de Losa

Se diseña el pavimento consistente en una losa de hormigón permeable.

### 10.5.1 Espesor (D) de las losas

De la ecuación que se indica a continuación, se calcula en forma iterativa y por medio de un programa de EXCEL, el valor del espesor D de la losa.

$$\log W_j = Z_r * S_0 + 7.35 * \log D + 1 - 0.06 + \frac{\log \frac{\Delta PSI}{1.625e7}}{1 + \frac{4.5-1.5}{D+1} \frac{8.46}{8.46}} + 4.22 - 0.32P_t * \log \left\{ \frac{S'_c * Cd * (D^{0.75} - 1.132)}{[215.63 * J * D^{0.75} - \frac{18.82}{(\frac{E_c}{K})^{0.25}}]} \right\}$$

Datos de Entrada:

| Datos        | Valor         |
|--------------|---------------|
| $Z_r$        | -0.674        |
| $S_0$        | 0.34          |
| $P_t$        | 2             |
| $\Delta PSI$ | 2.5           |
| $S'_c$       | 511.59 [psi]  |
| $J$          | 2.8           |
| $M_r$        | 299.11 psi    |
| $C_d$        | 1.2           |
| $E_c$        | 2018.99 [ksi] |
| $K$          | 176 p.c.i     |
| $M_{RSG}$    | 3200 [psi]    |

Tabla 10.4: Datos para diseño de losa de hormigón permeable

Dato de Salida:  $D=9.5$  pulgadas = 24.13cm  $\approx$  25 cm.



## 11. DISEÑO HIDROLÓGICO PARA EL HORMIGÓN PERMEABLE

### 11.1 Introducción:

El método AASTHO para diseño de calzadas de hormigón rígido no prevee ningún tipo de reservorio de agua de escorrentía debido a que ésta es conducida hacia cunetas y posteriormente enviada a sistemas de alcantarillado, ríos, y quebradas.

Sin embargo, el hormigón permeable por su naturaleza conduce directamente el agua hacia el espacio entre la sub-base y la capa de hormigón (ver gráfico); entonces, se debe considerar la construcción de un reservorio para evacuar dicha agua.

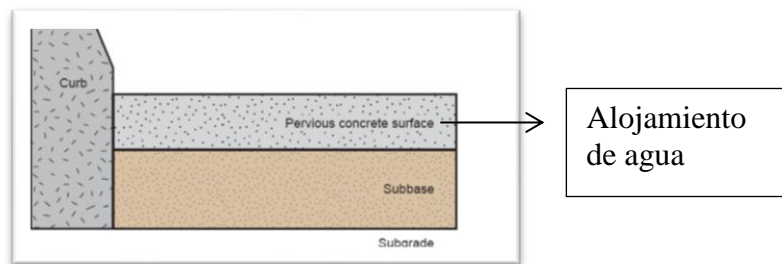


Figura 11.1: Corte transversal típico de hormigón permeable. Alojamiento de agua con subbase impermeable (sin mejoramiento).

### 11.2 Determinación del volumen de agua a ser drenada:

El volumen de agua a ser drenada por el hormigón permeable se puede expresar como:

$$V = A_p + A_b * \frac{I}{12}$$

Dónde:

V= Volumen de agua [ft<sup>3</sup>];

A<sub>p</sub>=Área a ser recubierta de hormigón permeable [ft<sup>2</sup>];

A<sub>b</sub>= Área no permeable a ser drenada (e.j.,Techos, veredas Impermeables, etc.), [ft<sup>2</sup>];

I= Intensidad de lluvia, [in];

Tanto el área a ser recubierta de hormigón como el área no permeable a ser drenada son conocidas, sin embargo la intensidad de lluvia es un dato a ser encontrado.

#### a. Intensidad de lluvia

Para monitorear la climatología del sector del valle de Cumbaya y Tumbaco se han tomado datos proporcionados por el INAMHI, sobre la estación meteorológica: Quito-Iñaquito.

La pluviosidad, está representada por una precipitación promedio de 1086.6mm al año, la cual se manifiesta en su mayor parte de corta duración y en épocas de invierno.

| AÑOS | ENE    | FEB   | MAR   | ABR    | MAY   | JUN    | JUL   | AGO  | SEP   | OCT   | NOV   | DIC   |
|------|--------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 1990 | 46,6   | 150,2 | 79,7  | 123,3  | 19,7  | 21,1   | 15,4  | 37,1 | 27,8  | 246,8 | 39,9  | 46,8  |
| 1991 | 96,7   | 48,6  | 232,9 | 84     | 104,9 | 30     | 16,1  | 2,9  | 69    | 37,2  | 134,9 | 44,3  |
| 1992 | 51,3   | 68,7  | 105   | 96,1   | 127,6 | 14,3   | 17,9  | 14,7 | 109,9 | 78,3  | 107,4 | 45,2  |
| 1993 | 111,4  | 219,3 | 235,2 | 228,1  | 94,6  | 12,7   | 8,2   | 3,3  | 96    | 72    | 128,5 | 177   |
| 1994 | 193,4  | 112,2 | 244,4 | 201,1  | 103,2 | 0,9    | 2,9   | 3,4  | 27,9  | 90,2  | 186,8 | 79,9  |
| 1995 | 14,9   | 85,2  | 118,7 | 158,4  | 155,4 | 97,5   | 42,5  | 83,9 | 5,7   | 152,7 | 232,4 | 77,8  |
| 1996 | 146,5  | 138,3 | 181,8 | 199,4  | 189,4 | 37,2   | 29    | 83,2 | 84,5  | 169,4 | 14,4  | 47,7  |
| 1997 | 140,9  | 13,2  | 167,7 | 83,2   | 65,9  | 58,8   | 0     | 0    | 108,6 | 152,7 | 219,2 | 120,3 |
| 1998 | 58,1   | 86,5  | 127,5 | 143,9  | 193,9 | 14,5   | 32,2  | 18,8 | 58,8  | 103,6 | 138,6 | 32,6  |
| 1999 | 81,6   | 237,2 | 185,3 | 234,1  | 70,1  | 126,6  | 25,1  | 24,8 | 136,3 | 87,1  | 101   | 221,2 |
| 2000 | 177,3  | 165,8 | 149,5 | 187,6  | 123,8 | 66,4   | 22,1  | 9,7  | 67,3  | 43,8  | 16,7  | 76,1  |
| 2001 | 84,1   | 63,9  | 186,4 | 63,1   | 88,8  | 8,5    | 35    | 0    | 94,6  | 9,3   | 113,6 | 118,1 |
| 2002 | 36,6   | 59,1  | 123,1 | 256,6  | 133,1 | 37,3   | 8,2   | 9,8  | 19,2  | 144,6 | 95    | 152,9 |
| 2003 | 25,4   | 79,1  | 100,9 | 244,6  | 28,7  | 54,1   | 15,7  | 5,2  | 67,8  | 117,7 | 159,4 | 103,2 |
| 2004 | 56     | 34,4  | 75,2  | 156,3  | 113,8 | 11     | 6,7   | 0,6  | 97,6  | 98,8  | 125,5 | 94,8  |
| 2005 | 37,9   | 150,6 | 134,3 | 84,2   | 37,7  | 31,8   | 53,4  | 26,8 | 35,6  | 116   | 58,4  | 115,1 |
| 2006 | 52,3   | 105,2 | 202,5 | 209,5  | 113,6 | 50,2   | 3,1   | 3,5  | 35,6  | 109,5 | 182,4 | 183   |
| 2007 | 66,2   | 67,5  | 177,2 | 188,1  | 101   | 22,2   | 12,5  | 33,4 | 3     | 160,1 | 194,7 | 95,24 |
| 2008 | 156,5  | 218,4 | 188,8 | 203,8  | 171   | 56,5   | 12,3  | 37   | 58,7  | 235,3 | 72,4  | 121,2 |
| 2009 | 165,8  | 141,5 | 173,8 | 161,3  | 62,7  | 35     | 2,6   | 1    | 7,4   | 69,4  | 71,3  | 120   |
| 2010 | 4,6    | 46    | 26,5  | 220,4  | 58,95 | 34,5   | 93,6  | 59,4 | 87,8  | 51,8  | 167,6 | 181,7 |
| 2011 | 82,4   | 182,5 | 145,8 | 372,9  | 55,2  | 28,5   | 117,2 | 48,9 | 73,3  | 54,8  | 65,7  | 107   |
| 2012 | 187,15 | 125,3 | 144,3 | 283,4  | 74,08 | 14,375 | 58,98 | 12,5 |       |       |       | 99,1  |
| 2013 | 42,7   | 195,1 | 82,7  | 131,57 | 92,96 | 0,25   | 0,76  |      |       |       |       |       |

Tabla 11.1: Precipitaciones registradas entre (Año 1990-2013) en milímetros.  
Fuente: (INAMHI, 2013)

\*Máxima precipitación mensual en Quito: 372.9mm.

### 11.3.1 Curvas de Intensidad, duración y frecuencia (I-D-F)

Las curvas I-D-F tienen como objetivo el cálculo de la intensidad de lluvia para diferentes periodos de retorno.

Para el presente diseño se tomará en consideración un periodo de retorno de 10 años.

El INAMHI por medio del Departamento de Hidrometría ha zonificado el Ecuador 35 zonas.

El parqueadero de la USFQ está ubicado en la Zona 12 (Quito-INAMHI M024), con lo que se procede a utilizar las isoclinas de intensidades de precipitación para periodos de retorno (TR) de 5 y 10 años encontradas en el Mapa N°2 referentes a “Isoclinas de intensidades de precipitación para varios periodos de retorno en función de la máxima en 24 horas registro de información 1967-1998”. Los mismos son encontrados en la sección 15.4.

A continuación se resumen los valores encontrados:

| TR [años] | $I_{dTR}$ |
|-----------|-----------|
| 5         | 2.1       |
| 10        | 2.8       |

El INAMHI ha encontrado ecuaciones representativas para determinar la intensidad de lluvia en cualquier período de retorno dependiendo de la zona en la que se encuentre. Para la zona 12 (Quito-INAMHI) las ecuaciones son las siguientes:

| Zona | Duración       | Ecuación                                  |
|------|----------------|---|
| 12   | 5min<130min    | $I_{TR} = 138.01 * t^{-0.4882} * T_{dTR}$ |
|      | 130min<1440min | $I_{TR} = 674.13 * t^{-0.8935} * T_{dTR}$ |

Tabla 11.2: Ecuaciones representativas para determinar la intensidad de lluvia en cualquier período de retorno (Quito-Inamhi).

Fuente: (INAMHI, 2013)

A partir de las ecuaciones antes mencionadas se encontraron la curva I-D-F con un tiempo de retorno de 5 y 10 años.

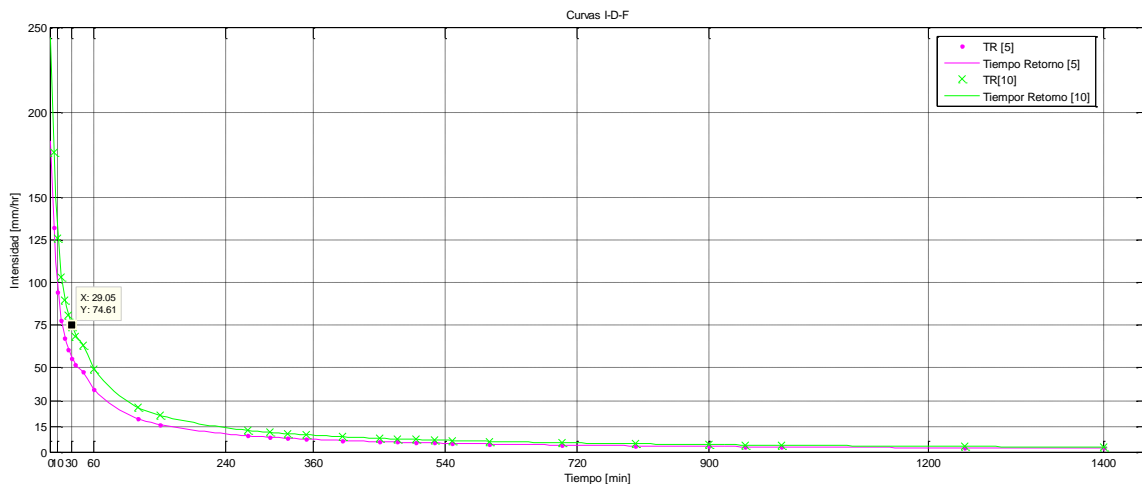


Figura 11.2: Curvas I-D-F con tiempo de retorno de 5 años (Magenta) y 10 años (verde).

Típicamente, en la región interandina del Ecuador las intensidades máximas de lluvias han sido reportadas en períodos de tiempo cortos entre 15 y 30 minutos. Si consideramos un tiempo de 30 minutos en un periodo de retorno de 10 años, se encontrará una intensidad de lluvia equivalente a:

$$I_{10} = 76.61 \text{ mm} = 3.01''$$

Una vez determinada la intensidad de lluvia en un período de retorno de 10 años, se procede a calcular el volumen de agua a ser drenada por el hormigón permeable:

El volumen encontrado es:

$$V = (20500.95 + 1526.6) \text{ ft}^2 * \frac{3.01 \text{ in}}{12} = 5525.243 \text{ ft}^3 \\ = 156.45 \text{ m}^3$$

### 11.3 Espesor de la capa de drenaje

Ya que en la actualidad no existe consenso acerca de cuál método es el más apropiado a utilizarse para determinar el espesor de la capa de drenaje considerando propiedades mecánicas del hormigón y meteorológicas de la zona, la ACPA ha analizado y comparado métodos como: “Soil Conservation Service” (SCS), “the Rational Method”, y “Los Angeles County Method” para determinar el más apropiado.

Según, ACPA el método “Los Angeles County” es el más apropiado por que asume que el volumen total de agua que cae sobre la superficie de hormigón permeable va a ser contenida entre y procesada por la capa de subbase o de reservorio.

Así:

$$A_p = \frac{12*V}{h_{curb} + r_c * h_c + r_s * h_s} \quad (1)$$

Dónde:

$A_p$ =Área a ser recubierta de hormigón permeable [ft<sup>2</sup>];  
 $H_{curb}$ =Altura de permitida de encharcamiento [in];  
 $r_c$ = porcentaje de vacíos en el hormigón permeable [%];  
 $h_c$ =Espesor de hormigón permeable [in];  
 $r_s$ =Porcentaje de vacíos en la capa de subbase/reservorio [%];  
 $h_s$ = Espesor de la capa de subbase/reservorio [in]

Entonces, con el dato de  $h_c$  encontrado en el análisis estructural del hormigón se procede a despejar la formula (1) en función del espesor de la capa de subbase/reservorio [ $h_s$ ]:

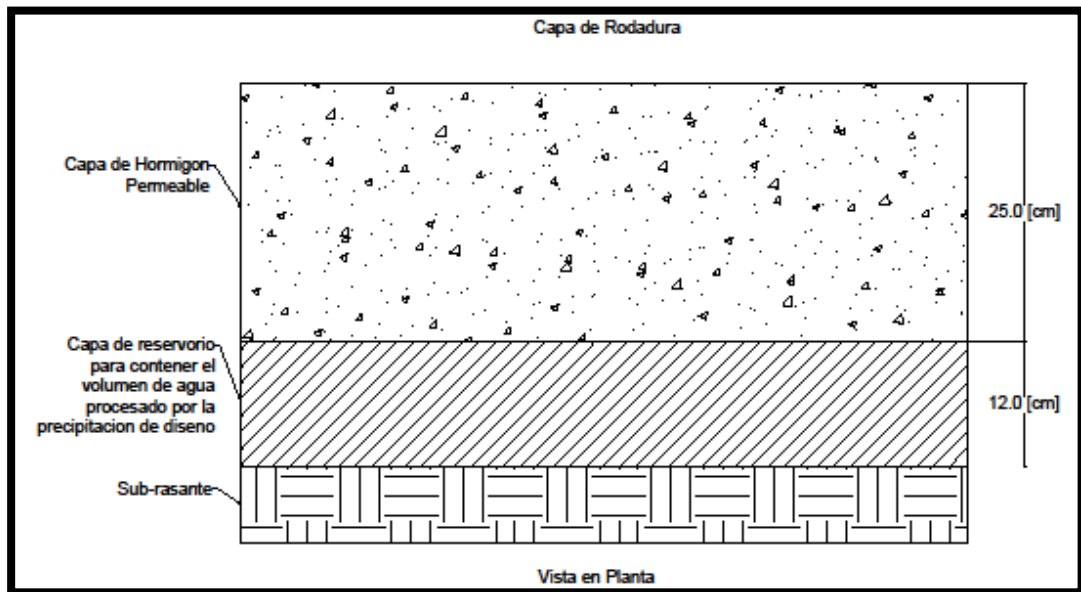
$$h_s = \frac{1}{r_s} * \left( \frac{12*V}{A_p} - h_{curb} - r_c * h_c \right) \quad (2)$$

Datos de Entrada:

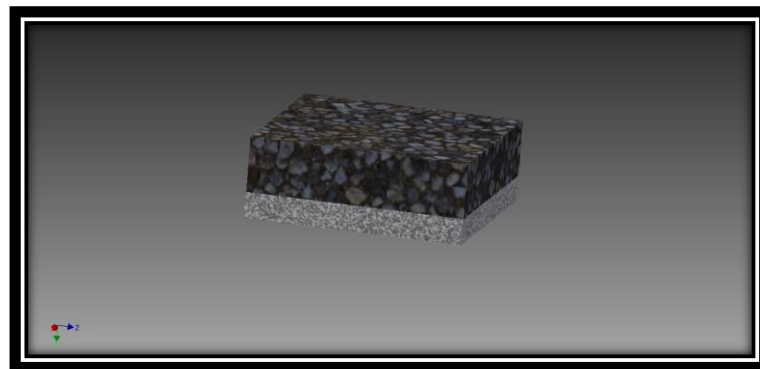
| Dato  | Valor                       | Valor                   |
|-------|-----------------------------|-------------------------|
| $A_p$ | 20500.95 [ft]               | 6248.70[m]              |
| $V$   | 5525.243 [ft <sup>3</sup> ] | 156.45[m <sup>3</sup> ] |
| $h_c$ | 9.5 [in]                    | 24.15[cm]               |
| $r_c$ | 19[%]                       | 19%                     |
| $r_s$ | 30[%]                       | 30%                     |

Tabla 11.3: Valores para el diseño de capa de drenaje

$$h_s = 4.4 \text{ in} = 11.17 \text{ cm} \approx 12 \text{ cm}$$



*Figura 11.3: Vista en planta de la capa de hormigón permeable y reservorio.*



*Figura 11.4: Vista 3D. de la capa de rodadura y reservorio.*

## 12. DISEÑO DE UN RESERVORIO DE AGUA DE LLUVIA

Aprovecha el agua de lluvia para usos tales como el riego de plantas, uso en baños y consumo, creando ahorro y optimizando espacio.

En el diseño de evacuación de agua se puede proceder de dos maneras:

- a. Creando una capa de retención y almacenamiento momentáneo;
- b. Creando un reservorio permanente.

Debido a que una de las finalidades de este trabajo es conseguir un menor impacto ambiental, entonces al crear un reservorio permanente con agua de lluvia, ayudará a disminuir el consumo de agua utilizada para el riego de jardines, baños y piletas, dentro de la universidad u otro lugar.

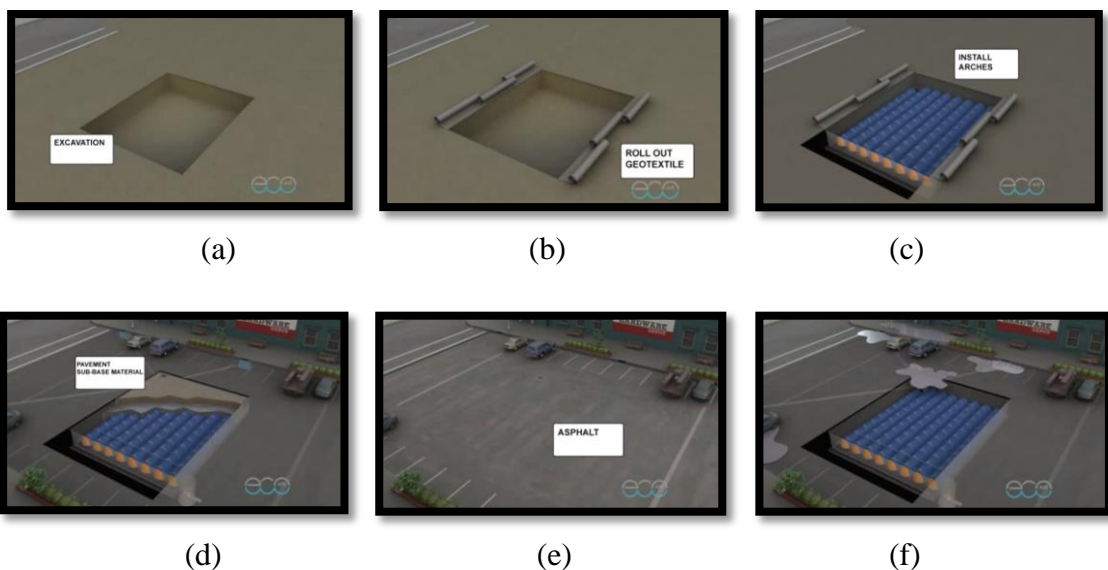
### 12.2 Tecnología ECOaid<sup>®</sup>

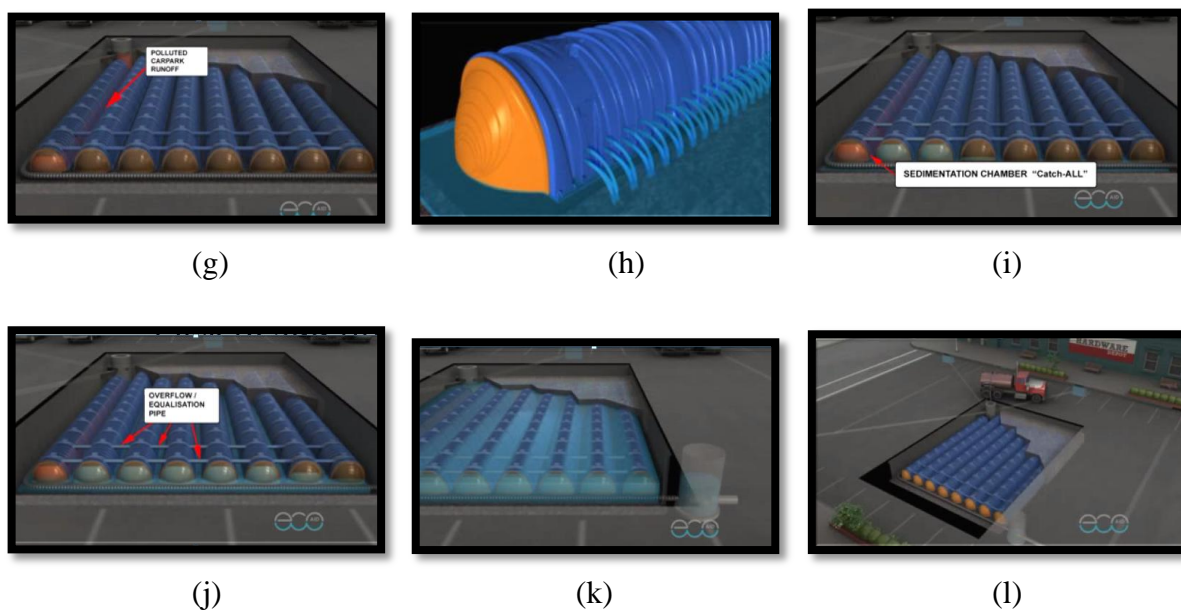
En este diseño se va a utilizar un tipo de reservorio denominado EC-1000 desarrollado por ECOAID Pty Ltd<sup>®</sup>.

La compañía ECOAID tiene sus instalaciones en Australia y provee a países como Canadá y Estados Unidos. Se escogió este tipo de tecnología por sus facilidades de construcción, rendimiento y facilidad de limpieza.

ECO Aid ha diseñado el sistema EC-1000 el cual permite la evacuación de agua, almacenamiento, depósito de sedimentos y sistema de salida de agua.

A continuación se muestra una serie de gráficos que indican el proceso de construcción y evacuación de agua.





*Figura 12.1: Proceso de evacuación de agua lluvia.*  
 Fuente: (ECOaid, About Us: ECOaid Pty Ltd, 2014)

Se inicia con la excavación en donde va a ser construido el reservorio [grafico (a)]. Una vez realizada la excavación, se cubre la superficie con geomembrana impermeable [grafico (b)]. Posteriormente se ensamblan los tubos tipo EC-1000 sobre la geomembrana [grafico (c)]. Seguidamente se procede a taparlos con una capa de grava con un porcentaje de porosidad mayor al 30% [gráfico (d)] y luego se coloca la capa de rodadura (hormigón permeable) [gráfico (e)].

Una vez terminado el proceso constructivo, se muestra el funcionamiento de evacuación de agua en caso de una precipitación.

Una vez que se produce la precipitación [gráfico (f)], los tubos tipo EC-1000 empiezan a llenarse con agua y sedimentos [gráfico (g)].

Conforme se dilata el tiempo de precipitación, el agua en los tubos empieza a subir de nivel hasta llegar a orificios de control de nivel [gráfico (h)] y tuberías transversales de conexión entre los tubos [gráficos (i) y (j)].

Cuando el reservorio alcanza su máxima capacidad, el agua es llevada hacia su destino final [gráfico (k)].

Finalmente, en un periodo de entre 2 y 5 años, debe removerse los sedimentos de los depósitos (Dim Mik, 2014) , mediante un jet de agua de lavado [gráfico (l)].

### 12.3 Consideraciones del diseño

Si se considera un volumen de agua de  $156.45 \text{ m}^3$  (Dato obtenido en sección 11.3.1) en un lapso de 30 minutos en un área de  $6714 \text{ m}^2$  en un periodo de retorno de 10 años, se puede diseñar un reservorio rectangular que se adapte a estas necesidades.



El diseño del sistema EC-1000 toma en cuenta las siguientes variables:

- Tipo de carga que se aplicará sobre el sistema;
- El volumen de agua a ser almacenada;
- Ángulo de excavación permitido;
- Geometría del reservorio
- Permeabilidad de la subbase.
- Diámetro de tubo escogido (en este caso EC-1000)

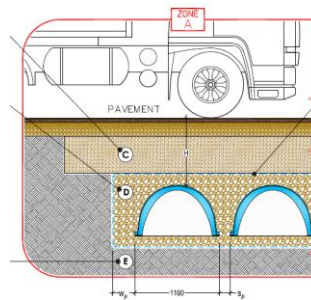


Figura 12.2: Corte Transversal de reservorio.  
Fuente: (EcoAID, 2011)

### 12.3.1 Diseño Geométrico del reservorio

A continuación se muestra la figura correspondiente a las variables de diseño geométrico:

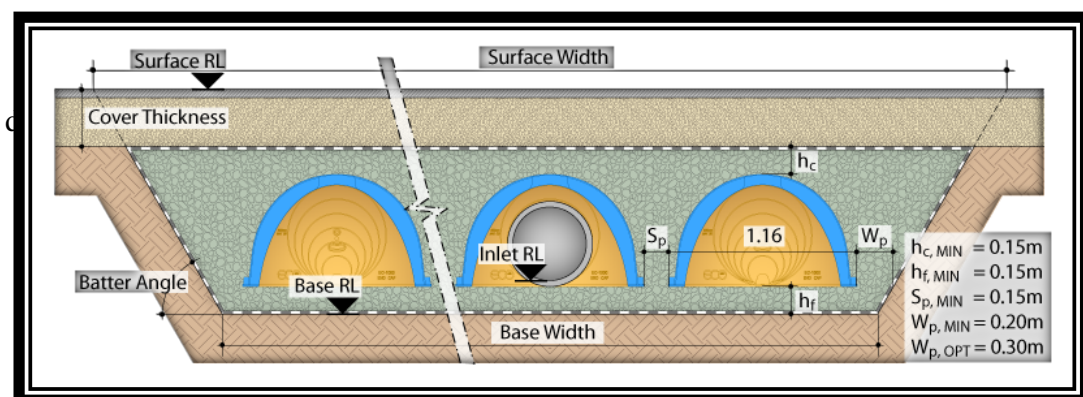


Figura 12.3: Variables geométricas de entrada para el diseño de reservorio.  
Fuente: (ECOaid, About Us: ECOaid Pty Ltd, 2014)

Debido a que el hormigón permeable va a ser sometido a cargas relativamente bajas, el espesor de la capa de cobertura ( ubicada entre la capa de hormigón permeable y los tubos ) no será muy alto [figura 11.5].

ECOaid recomienda un valor del espesor de la capa de cobertura entre  $30\text{cm} < d < 250\text{cm}$ , se escogió un valor de:

$$d = 40\text{cm}$$



El ángulo de excavación escogido es:

$$Ex_{<} = 90^{\circ}$$

La permeabilidad de la capa de cobertura será alta tratándose de grava con un único tamaño de agregado, brindado una contenido de vacíos aproximadamente igual a:

$$V_c = 35\%$$

El semicilindro tipo EC-1000 es fabricado por ECOaid y tiene las siguientes características:

- Diámetro: 1160mm
- Altura del arco: 680mm
- Material: PVC de alta resistencia mecánica

En el gráfico siguiente se observa el semicilindro tipo EC -1000

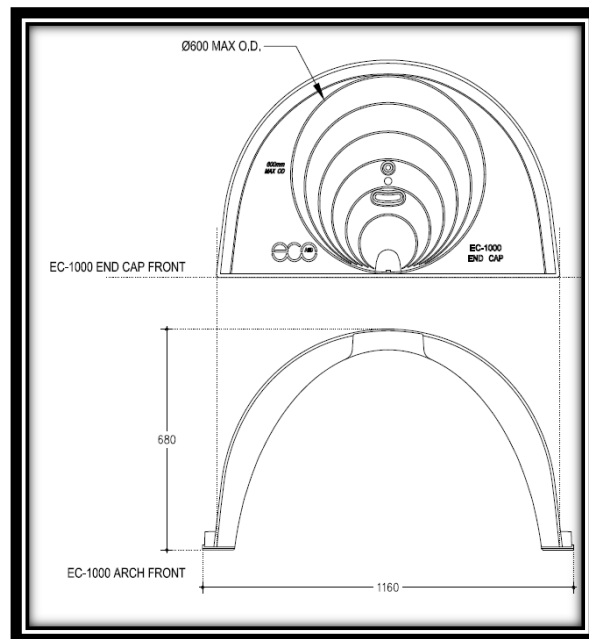


Figura 12.4: Características semicilindro tipo EC-1000.

Fuente: (ECOaid, About Us: Ecoaid Pty Ltd, 2014)

En vista a que el objetivo principal de este trabajo es el análisis de diseño de hormigones permeables, se ha optado por utilizar un software provisto por la misma compañía ECOaid, con el cual se puede calcular las características del reservorio con los parámetros de entrada antes explicados .

A continuación se muestra la ventana de entrada de datos del programa ECOaid Tank Calculator.

**ecoAID Tank Calculator**

### Storage Characteristics

Storage Volume:  m<sup>3</sup>      ecoAID Product:

Vehicle Loading:       Fill Media:

"Catch All" Rows:       Porosity (%):

### Excavation Geometry

|       |             |
|-------|-------------|
| $h_c$ | MIN = 0.15m |
| $h_f$ | MIN = 0.15m |
| $S_p$ | MIN = 0.15m |
| $W_p$ | MIN = 0.20m |
| $W_p$ | OPT = 0.30m |

Excavation Batter Angle:

Cover Thickness:  optim. m

Inlet Pipe Wall Thickness:  m

Arches Layout:

| Ref.    | Width <input type="checkbox"/>   | Length <input checked="" type="checkbox"/> | RL   |
|---------|----------------------------------|--|--|
| Surface | <input type="radio"/>            |  | <input type="text" value="0.00"/>          |
| Inlet   | <input type="radio"/>            |  | optim. <input checked="" type="checkbox"/> |
| Base    | <input checked="" type="radio"/> | <input type="text" value="35.15"/>         | optim. <input checked="" type="checkbox"/> |

*Provide all required dimensions in meters.*

Optimise System

© ecoAID, 2014

Figura 12.5: ventana de entrada de datos del programa ECOaid Tank Calculator.

Los datos de salida se muestran a continuación:



## Storage Calculation Report

**Project:** Características reservorio USFQ

**Storage:** 156.45 m<sup>3</sup>

### Summary

**Required Storage:** 156.45 m<sup>3</sup>  
**Fill Media - Porous:** - Other Rock- - 35 %  
**Vehicle Loading:** Sealed roadway  
  
**System Applied:** EC-1000  
**Rows of Arches:** 5  
**Arches per Row:** 38  
**Total of Arches:** 190  
**Storage Achieved:** 157.73 m<sup>3</sup>  
  
**Excess of Arches:** 3  
**Excess of Storage:** 0.82 %

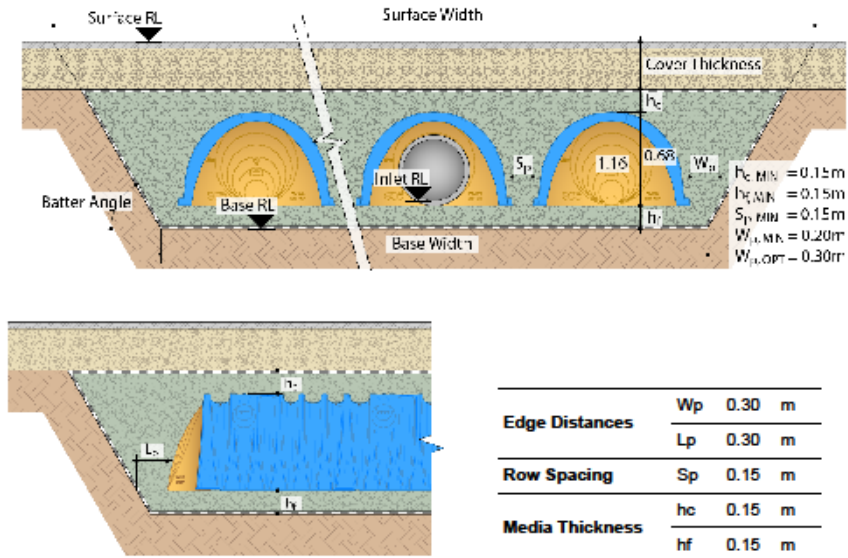
### Storage Geometry

| Level           | Width | Length | RL    | Layer Depth |      | Depth |
|-----------------|-------|--------|-------|-------------|------|-------|
| Surface         | 7     | 39.15  | 0.00  | 0.45        |      | 1.43  |
| Top of Storage  | 7     | 39.15  | -0.45 | 0.15        | 0.98 |       |
| Top of Arches   | 7     | 39.15  | -0.6  | 0.68        |      |       |
| Inlet           | 7     | 39.15  | -1.23 | 0.68        |      |       |
| Base of Arches  | 7     | 39.15  | -1.28 | 0.15        |      |       |
| Excavation Base | 7     | 39.15  | -1.43 |             |      |       |

**Excavation Batter Angle:** 90°

**Physical Volume:** 288.57 m<sup>3</sup>

## Detailing



## Bill of Quantities

|   |                          |        |                |
|---|--------------------------|--------|----------------|
| 1 | Arches                   | 190    | pcs            |
| 2 | End Caps                 | 10     | pcs            |
| 3 | Catch All Cover Filter   | 752.40 | m <sup>2</sup> |
| 4 | Catch All Base Filter    | 486.11 | m <sup>2</sup> |
| 5 | Wrap                     | 734.34 | m <sup>2</sup> |
| 6 | Rock                     | 170.53 | m <sup>3</sup> |
| 7 | Excavation (Cover incl.) | 391.89 | m <sup>3</sup> |

### DISCLAIMER:

The calculations and information provided in this document are only given as an aid in system sizing, detailing and materials estimation. It is the user's responsibility to ensure that values entered are correct and appropriate for their particular site conditions and constraints, and check calculations for accuracy and errors. EcoAID Pty Ltd does not take any responsibility for inappropriate use of this document. This document is not a replacement for a Design Engineer's input. The values and calculations are not transferrable to other systems.

Figura 12.6: ventana de salida de datos del programa ECOaid Tank Calculator.

Los precios de estos componentes dependerán del lugar de compra y transporte de los mismos. Este tema no es discutido en este trabajo.

### 13. CONCLUSIONES

Para el desarrollo de la presente Tesis de investigación, fue necesaria la construcción de un tamizador de tambor la para selección granulométrica de agregados; moldes para la fabricación de muestras cilíndricas de hormigón de  $\varnothing = 3''$  y  $L = 6''$ ; moldes para viguetas de sección cuadrada (10cm x 10cm x 30cm) y un permeámetro basado en ACI 522 a más de la creación de un pequeño laboratorio que incluye una mezcladora de 140 litros de capacidad.

Del trabajo de investigación y experimentación para la elaboración de hormigones permeables, se han obtenido las siguientes conclusiones:

- Todos los trabajos para la elaboración y pruebas de hormigones permeables, se han basado en las normas ACI, ASTM e INEN. Estas normas se aplican para hormigones comunes, no son específicas para hormigones permeables;
- Para el desarrollo de la presente tesis, se elaboraron 144 cilindros y 63 viguetas; se realizaron 144 ensayos de compresión simple, 64 ensayos de permeabilidad y 63 ensayos a la flexión, todos en un lapso de 100 días. Las conclusiones emitidas se basan en los resultados de estos ensayos;
- La norma ASTM C192 referente a la preparación y curado de especímenes de hormigón, indica una energía de compactación para cilindros, establecida en 2 capas compactadas con 25 golpes de una varilla lisa de  $\varnothing = 10\text{mm}$  (3/8") En los ensayos realizados siguiendo la norma antedicha, se observó que los cilindros tenían una compactación heterogénea lo que fue corregido con la compactación de los especímenes con 3 capas e igual número de golpes por capa, con lo que se consiguió especímenes homogéneos;
- La norma ASTM C 78 referente al ensayo a flexión simple de viguetas, recomienda una compactación en 3 capas y 43 golpes de varilla lisa de  $\varnothing=10\text{cm}$  por capa. Se observó una variación importante entre las densidades de las viguetas y de los cilindros, lo que sugería la necesidad de incrementar la energía de compactación en las viguetas. Este incremento fue conseguido al usar un martillo de compactación Próctor y 25 golpes por capa, con lo cual se consiguió densidades aproximadamente similares a los de los cilindros;
- Los hormigones permeables son una alternativa válida para su uso en zonas de tránsito de personas y de vehículos livianos principalmente, en áreas geográficas de alta pluviosidad;
- El uso de hormigones permeables en vías de tránsito pesado intenso, no es recomendado por su baja resistencia mecánica; sin embargo, el uso de mallas biaxiales podrían mejorar el desempeño del hormigón permeable sin menoscabar sus propiedades de permeabilidad;

- La elaboración de hormigones permeables con agregados obtenidos en la mina en la cual se compró el material (Canteras y mina del río Guayllabamba) tuvieron los siguientes inconvenientes:
  - Los materiales vendidos no son calificados ni existe control de calidad;
  - No se puede comprar un material de una determinada granulometría pues es vendido en mezcla. En canteras y minas con selección granulométrica (pero sin calificación de calidad) los costos son exorbitantes (\$ 95 / m<sup>3</sup>);
  - La densidad del material entre un lote y otro varía, dependiendo de la mayor o menor presencia de pómez y otras impurezas acarreadas por el río, según la época del año;
- En la elaboración de hormigón permeable, es de mucha importancia que el agregado esté libre de finos (debe estar lavado) y apropiadamente seco, pues los cambios de humedad en el agregado pueden afectar significativamente la relación W//C incidiendo negativamente en su resistencia;
- La mayor resistencia del hormigón permeable ( $F'_c = 196,33 \text{ kg/cm}^2$ ) se encontró con una relación W/C = 0.287 y con un proporción Agg / C = 4,264 y con uso de aditivos;
- La resistencia del hormigón permeable es inversamente proporcional a su permeabilidad y directamente proporcional a la resistencia de los agregados, a la buena calidad del cemento y a la buena preparación de las mezclas;
- La resistencia del hormigón permeable radica fundamentalmente en la adhesión entre la pasta de cemento y el agregado; por tanto, las características de los agregados son fundamentales para la obtención de la mayor resistencia posible, debiendo ser, anguloso y de la mayor resistencia mecánica posible;
- Experimentalmente ha sido comprobado que la resistencia del hormigón permeable con uso de agregados de calidad media (materiales de la mina del río Guayllabamba) y cemento Holcim tipo GU, no se alcanza la resistencia a la flexión de diseño mínima impuesta. Con el uso de agregados de la cantera San Martín (de alta resistencia mecánica) y cemento Portland Tipo1 (de gran calidad) se cumple la resistencia al flexión mínima impuesta, así como la resistencia a la compresión simple y la permeabilidad;
- Experimentalmente se comprobó que añadir arena influye negativamente en la permeabilidad del espécimen pero mejora sustancialmente las prestaciones de resistencia a la compresión simple y flexión. Un cambio mínimo de solo un 3% en peso de arena entre 2 mezclas similares en materiales (agregados, cemento, agua y aditivos) marca la diferencia entre cumplir o no los parámetros mínimos de diseño. Vale resaltar que la preparación de las mezclas es un tópico sensible en hormigones permeables;
- Para alcanzar los mayores valores de resistencia a la compresión simple y flexión, se hace necesario el uso de hasta el 8% de arena fina (# 60) Un uso superior al 8% en arena fina, disminuye la permeabilidad hasta valores que lo consideran no permeable ( $k < 0.1 \text{ cm/s}$ );

- Los hormigones permeables ensayados indican un crecimiento acelerado de su resistencia a la compresión simple hasta el 3er día de curado. Posteriormente, el crecimiento en su resistencia disminuye en su aceleración pero no mantiene su tendencia de endurecimiento constatado hasta los 28 días;
- La permeabilidad del hormigón tiene un comportamiento singular en el tiempo: en los primeros 3 días de fraguado, se obtiene el máximo valor y disminuye hasta aproximadamente el 7mo día para tomar una tendencia asintótica hasta los 28 días de fraguado. Se atribuye la disminución de permeabilidad a que las paredes generadas por el hidróxido de calcio se agrupan, aumentan su volumen y disminuyen los espacios interagregado. Este fenómeno debe ser más estudiado y sale del propósito de esta tesis de grado;
- Dentro de la norma ACI 522 R – 06 se indica una relación directa entre la resistencia a la compresión y a la flexión de hormigones permeables, lo cual se cumple en los ensayos realizados pero difiere en los valores entre hormigones con agregados y cementos de baja calidad y aquellos de altas calidades;
- La presente tesis comprende aplicaciones prácticas aplicables como son el diseño de un pavimento permeable para el estacionamiento de la USFQ y también un ecológico diseño de aprovechamiento con un reservorio sub superficial.

#### 14. RECOMENDACIONES

- Se recomienda el diseño y mezclas de hormigones permeables para uso con mallas biaxiales que permitan mejorar las propiedades mecánicas, especialmente para mejorar el desempeño de la resistencia a la flexión simple para avizorar el uso de hormigones permeables en vías de tránsito pesado;
- De los resultados experimentales y uso de normas para hormigones comunes, se recomienda el desarrollo de trabajos de experimentación para proponer el desarrollo de normas específicas para hormigones permeables, las cuales ,hasta la fecha, no existen en la ASTM o en la ACI;
- Estudiar el fenómeno de disminución de permeabilidad del hormigón con fines de conocimiento del comportamiento de la pasta cementante entre agregados y de la reacción del gel C-S-H con lo cual podría obtenerse mejores permeabilidades y mayores resistencias mecánicas;
- Para la elaboración de hormigones permeables se recomienda el uso de agregados de alta resistencia mecánica, cemento Portland y aditivos súper plastificantes con experimentación detallada sobre sus dosificaciones y resistencias.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. (1993). *AASHTO'93 Diseño de pavimentos*. Atlanta: AASHTO.
- AASHTO. (1993). Características de la Subrasante. En AASHTO, *Design of Pavement Structures* (pág. 65). Washington: AASHTO.
- AASHTO, A. A. (1993). Guide for Design of Pavement Structures . En AASHTO, *Diseño de pavimentos flexibles* (pág. 160). Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (1993). Características de Subrasante. En AASHTO, *Design of Pavment Structures* (pág. 59). Washington: AASHTO.
- ACI 3.18. (2008). ACI 3.18;. En American Concrete Institute, *Analisis de resistencia a la rotura* (pág. 10.2.7.1). Minneapolis: ACI.
- ACI-522/06, C. 5. (2006). *Pervious Concrete*. Minneapolis: American Concrete Institute.
- Aguirre, M. J. (2013). *Diseño de un sistema de ahorro sustentable de agua y energía eléctrica en el "Campus Juan Montalvo" De la Universidad Internacional Sek*. . Quito: Universidad Internacional Sek.
- Aitcin, P.-C., & Neville, A. (2003). How the Water-Cement Ratio Affects Concrete Strength. En P.-C. Aitcin, & A. Neville, *How the Water-Cement Ratio Affects Concrete Strength* (págs. 51-58). Chicago: Concrete International.
- American Concrete Pavement Association. (2010). *Pervious Pave*. Portland: American Concrete Pavement Association.
- ASTM C127-04, A. S. (2004). *Metodo para determinar peso específico y absorcion del agregado grueso*. West Conshohocken: ASTM.
- ASTM C39. (2004). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. West Conshohoken: ASTM International.
- ASTM C464-92. (1992). *Materials Amercian Society of Testing*. West Conshohoken: ASTM.
- ASTM C78. (2002). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point-Loading)*. West Conshohocken: ASTM International.
- ASTMC192/C192M-07. (2007). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. Pennsylvania: ASTM International.
- BASF, T. C. (2012). *Rheobuild 1000*. Basters: BASF.
- C293, A. (2010). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Center-Point Loading)*. West Conshohocken: ASTM.
- Carpio, A. (2014). *Analisis de loa agregados del Distrito Metropolitano de Quito*. Quito: N/A.
- Chemical admixtures for concrete ACI. (2012). *American Concrete Institute*. Farmington Hills: ACI.
- Crouch, L., Smith, N., Adam, W. D., & Sparkman, A. (2007). *Determining Pervious PCC Permeability with a Simplre Triaxial Flexible-Wall Constant Head Permeameter*. Tennessee: Tennessee Concrete Association & Tennessee Techonogical University.
- Dewoolkar, M., & McCain, G. (2010). *Pourous Concrete Pavements: Mechanical and Hydraulic Properties*. Burlington: The University of Vermont.
- Dim Mik. (2014). *ECOaid Pty Ltd*. Recuperado el Marzo de 25 de 2014, de Ecoaid: [www.ecoaid.com.au/index.php/public\\_pages/resources\\_full\\_entry/ecoaid\\_tank\\_calculator/](http://www.ecoaid.com.au/index.php/public_pages/resources_full_entry/ecoaid_tank_calculator/)
- Echeverria, F. (noviembre de 1998). Campus Cumbaya. Cumbaya, Pichincha, Ecuador.
- EcoAID. (2011). *eco AID*. Recuperado el 02 de 03 de 2014, de [www.ecoaid.com.au](http://www.ecoaid.com.au)
- ECOaid. (2014). *About Us: ECOaid Pty Ltd*. Recuperado el 22 de Marzo de 2014, de ECOaid: <http://www.ecoaid.com.au/>
- ECOaid. (2014). *Patente nº eco-AID EC-1000 CHAMBER*. Australia.

- Environmental Protection Agency. (2005). *Stormwater Phase II final rule*. Chicago: EPA.
- Ferguson, B. (2010). *Porous Pavements: The Overview*. Athens: University of Georgia School of Environmental Design.
- GeoScienceWorld. (01 de Enero de 2014). *GeoScienceWorld*. Recuperado el 29 de Marzo de 2014, de Mineralogical : claymin.geoscienceworld.org
- Ghafoori, N., & Dutta, S. (1995). History of pervious concrete. En N. Ghafoori, & S. Dutta, *Laboratory Investigation of Compacted No-Fines Concrete for Paving Materials* (págs. 183-191). Skokie: Journal of Materials in Civil Engineering.
- Ghafoori, N., & Dutta, S. (1995). *Laboratory Investigation of Compacted No-Fines Concrete for Paving Materials*. Linchester: Journal of Materials in Civil Engineering.
- Goede, W. (2009). *Investigation into structural performance and evaluation of the applicability of existing thickness design methods*. Washington: Washington State University.
- Guillén, M. (2013). *Certificado de calidad del agregado grueso*. Pifo: Holcim PLanta Pifo.
- Gupta, A., Desai, D., & Patil, V. (2009). Use of Pervious Concrete in Construction of Pavement for Improving their Performance. *Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 54-56.
- Henderson, V., Tighe, S. L., & Norris, J. (2009). *Pervious Concrete Pavement: An Integrated Laboratory and Field Study*. Washington D.C: Transportation Research Board Annual Meeting.
- Holcim. (2013). *Holcim Rocafuerte tipo 'GU'*. Guayaquil: Holcim Ecuador.
- Holcim Ecuador S.A. (2013). *Evolucion de las Normas para la fabricacion de cemento y características de sus aplicaciones*. Guayaquil: Holcim Ecuador.
- Huang, D. (2003). *Pavement Analisis and Design*. 580.
- INAMHI, I. N. (2013). *Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología*. Recuperado el 06 de Enero de 2013, de INAMHI: [www.serviciometeorologico.gob.ec](http://www.serviciometeorologico.gob.ec)
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011). *Cemento Hidráulico. Requisitos de Desempeno para Cementos Hidraulicos*. Quito: INEN.
- Jativa Sevilla Vladimir. (1988). *Contibution a l'etude des argiles gonflantes de l'Equateur*. Bruxelles: Universite Libre de Bruxelles.
- Jeff, S. (2011). *Construction of the Hoover Dam Bypass*. Chicago: Concrete International.
- Jumikis, A. R. (1962). Soil Mechanics. En A. R. Jumikis, *Soil Mechanics* (págs. 268-270). Princeton: Van Nostrad Company.
- Kervern, J. (2008). *Advancements in Pervious Concrete Technology*. Ames, Iowa: Iowa State University.
- MacDonald, K., Khazanovich, L., & Vancura, M. (2011). Structural Analysis of Pervious Concrete Pavement. *Trasportation Research Board 90th Annual Meeting*, 3.
- Mulligan, A. M. (2005). Aggregate Type and Size. En A. M. Mulligan, *Attainable Compressive Strenght of Pervious Concrete Paving Systems* (págs. 42-45). Florida: University of Central Florida.
- Naciones Unidas. (1 de mayo de 2010). *UNFPA México*. Recuperado el 30 de Noviembre de 2013, de UNFPA México: [http://www.unfpa.org.mx/pyd\\_migraciones.php](http://www.unfpa.org.mx/pyd_migraciones.php)
- Neithalath, N., & Olek, J. (2010). *Predicting the Permeability of Pervious Concrete (Enhanced Porosity Concrete) from Non-Destructive Electrical Measurements*. New York - Indiana: Clarkson University, Purdue University.
- Neithalath, N., Weiss, J., & Olek, J. (2008). *Predicting the Permeability of Pervious Concrete (Enhanced Porosity Concrete) from Non-Destructive Electrical Measurements*. Potsdam: Clarkson University, Department of Civil and Environmental Engineering.
- Neville, A. (1999). Adherencia del Agregado. En A. Neville, *Teconología del Hormigón* (pág. 82). Mexico.

- Neville, A. (1999). Pruebas para resistencia en tensión. En A. Neville, *Tecnología del concreto* (págs. 415-417). Mexico.
- Neville, A. (1999). Tecnología del concreto. En A. Neville, *Tecnología del concreto* (pág. 4). Mexico.
- Neville, A. (1999). Tecnología del concreto. En A. Neville, *Tecnología del concreto* (pág. 60). Mexico.
- Neville, A. (1999). Tecnología del Concreto. En A. Neville, *Tecnología del Concreto* (pág. 60). Mexico D.F: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.
- Neville, A. (1999). Tecnología del hormigon. En A. Neville, *Tecnología del hormigon* (pág. 176). Mexico: INM.
- Neville, A. M. (1999). Tecnología del concreto. En A. M. Neville, *Tecnología del concreto* (págs. 6-7). México: Instituto Mexicano del cemento y del Concreto, A.C.
- Rodden, R., & Smith, T. (2011). *Structural and Hydrological Design of Sustainable Pervious Concrete Pavements*. Ontario: American Concrete Pavement Association.
- Tanzil, J. (2002). *Estimation of tensile strenght of early aged mass concrete using uniaxial tensile test method*. Singapore: Singapore Concrete Institute.
- Tennis, P., Leming, M., & Akers, D. (2004). *Pervious Concrete Pavments*. Portland: Portland Cement Association.
- The Concrete Countertop Institute. (2014). *The Concrete Countertop Insitute*. Recuperado el 6 de Abril de 2014, de The Concrete Countertop Insitute:  
<http://www.concretetopinstitute.com/>
- U.S. Department of Transportation. (Febrero de 2011). *Federal Highway Administration*. Recuperado el 02 de Diciembre de 2013, de FHWA:  
<http://www.fhwa.dot.gov/infrastructure/materialsgrp/silica.htm>
- Wanielista, M., & Chopra, M. (2007). *Performance Assessment of Portland Cement Pervious Pavement*. Orlando: State of Florida Department of Trasportation.
- Young, J. (2005). *High Range Superplastifiers*. Portland: Oregon Highway Association.

## 15. ANEXOS

### 15.1 Determinación de Densidad, peso específico y Absorción del agregado grueso en laboratorio.

Se utilizó la norma ASTM C127-04 referente al Método de Ensayo Normalizado para determinar la Densidad, la Densidad Relativa (Gravedad Específica), y la Absorción de Agregados Gruesos.

Se tamizó cada material en una tamizadora automática durante un periodo de 5 min cada una. Posteriormente se lavó cada muestra de manera profunda para eliminar la mayor cantidad de arena y se puso el material en contenedores para ser secado al horno a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  por un período de 2 hrs y 15 min. Una vez transcurrido ese tiempo se procedió a sumergir el agregado por 28 hrs. Según esta norma, para los agregados 3/8, #4, #10, y #60 se debe utilizar como mínimo 2 kg de cada material.

Siendo:

A= Masa de la muestra secada al horno en aire [gr].

B= Masa en estado de superficie saturada seca en aire [gr].

C= Masa aparente de muestra saturada pesada en agua [gr].

Entonces:

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

$$\text{Densidad Relativa superficie saturada seca SSD} = \frac{B}{B - C}$$

$$\text{Densidad relativa aparente} = \frac{A}{A - C}$$

Los resultados encontrados se muestran a continuación:

| PESO ESPECIFICO Y ABSORCION DE AGREGADO GRUESO (3/8") |   |         |
|---|---|---------|
| I.- DATOS   |   |         |
| A   | PESO EN EL AIRE DE LA MUESTRA SECADA AL HORNO [gr]  | 2000.00 |
| B   | PESO EN EL AIRE DE LA MUESTRA SATURADA [gr]         | 2052.00 |
| C   | PESO EN EL AGUA DE LA MUESTRA SATURADA [gr]         | 1213.00 |
| II.- RESULTADOS                                       |   |         |
| 1   | GRAVEDAD ESPECIFICA DE MASA<br>$\frac{A}{(B - C)}$  | 2.38    |
| 2   | GRAVEDAD ESPECIFICA DE S.S.S<br>$\frac{B}{(B - C)}$ | 2.45    |
| 3   | GRAVEDAD ESPECIFICA APARENTE<br>$\frac{A}{(A - C)}$ | 2.54    |
| 4   | % DE ABSORCION DE AGUA<br>$\frac{100*(B - A)}{A}$   | 2.60    |

| PESO ESPECIFICO Y ABSORCION DE AGREGADO GRUESO (#4) |   |         |
|---|---|---------|
| I.- DATOS   |   |         |
| A   | PESO EN EL AIRE DE LA MUESTRA SECADA AL HORNO [gr]  | 2055.30 |
| B   | PESO EN EL AIRE DE LA MUESTRA SATURADA [gr]         | 2103.00 |
| C   | PESO EN EL AGUA DE LA MUESTRA SATURADA [gr]         | 1218.00 |
| II.- RESULTADOS                                     |   |         |
| 1   | GRAVEDAD ESPECIFICA DE MASA<br>$\frac{A}{(B - C)}$  | 2.32    |
| 2   | GRAVEDAD ESPECIFICA DE S.S.S<br>$\frac{B}{(B - C)}$ | 2.38    |
| 3   | GRAVEDAD ESPECIFICA APARENTE<br>$\frac{A}{(A - C)}$ | 2.45    |
| 4   | % DE ABSORCION DE AGUA<br>$\frac{100*(B - A)}{A}$   | 2.32    |

| PESO ESPECIFICO Y ABSORCION DE AGREGADO GRUESO (#10) |  |         |
|--|--|---------|
| I.- DATOS  |  |         |
| A  | PESO EN EL AIRE DE LA MUESTRA SECADA AL HORNO [gr] | 2046.50 |

|                        |   |         |
|------------------------|---|---------|
| B                      | PESO EN EL AIRE DE LA MUESTRA SATURADA [gr]         | 2101.00 |
| C                      | PESO EN EL AGUA DE LA MUESTRA SATURADA [gr]         | 1207.00 |
| <b>II.- RESULTADOS</b> |   |         |
| 1                      | GRAVEDAD ESPECIFICA DE MASA<br>$\frac{A}{(B - C)}$  | 2.29    |
| 2                      | GRAVEDAD ESPECIFICA DE S.S.S<br>$\frac{B}{(B - C)}$ | 2.35    |
| 3                      | GRAVEDAD ESPECIFICA APARENTE<br>$\frac{A}{(A-C)}$   | 2.44    |
| 4                      | % DE ABSORCION DE AGUA<br>$\frac{100*(B - A)}{A}$   | 2.66    |

|   |   |         |
|---|---|---------|
| <b>PESO ESPECIFICO Y ABSORCION DE AGREGADO GRUESO (#60)</b> |   |         |
| <b>I.- DATOS</b>  |   |         |
| A   | PESO EN EL AIRE DE LA MUESTRA SECADA AL HORNO [gr]  | 2128.00 |
| B   | PESO EN EL AIRE DE LA MUESTRA SATURADA [gr]         | 2160.23 |
| C   | PESO EN EL AGUA DE LA MUESTRA SATURADA [gr]         | 1250.03 |
| <b>II.- RESULTADOS</b>                                      |   |         |
| 1   | GRAVEDAD ESPECIFICA DE MASA<br>$\frac{A}{(B - C)}$  | 2.34    |
| 2   | GRAVEDAD ESPECIFICA DE S.S.S<br>$\frac{B}{(B - C)}$ | 2.37    |
| 3   | GRAVEDAD ESPECIFICA APARENTE<br>$\frac{A}{(A-C)}$   | 2.42    |
| 4   | % DE ABSORCION DE AGUA<br>$\frac{100*(B - A)}{A}$   | 1.51    |

## 15.2 Ficha Técnica Rheobuild 1000



The Chemical Company

# RHEOBUILD 1000

FT 1.1.12

**Aditivo superplastificante / reductor de agua de alta actividad para hormigón.**

### Campo de aplicación

RHEOBUILD 1000 es un aditivo superplastificante reductor de agua de alta actividad indicado para los sectores del hormigón prefabricado, obra civil y hormigón para túneles (hormigón proyectado y hormigonado de túneles). Por sus características, permite la confección de hormigones líquidos partiendo de consistencias secas sin la necesidad de adicionar más agua de amasado y sin provocar retrasos de fraguado, ofreciendo elevadas resistencias iniciales sin pérdida de resistencias finales.

Especialmente diseñado para:

- Hormigón prefabricado de todo tipo (armado, pretensado y postensado).
- Hormigón para obra civil de elevadas prestaciones.
- Hormigón proyectado.
- Hormigonado de túneles.

Consultar con el Departamento Técnico cualquier aplicación no prevista en esta relación.

### Propiedades

- Elevado poder plastificante.
- Mejora las resistencias iniciales y finales del hormigón.
- Mejora la impermeabilidad y la durabilidad del hormigón.
- No provoca retrasos de fraguado.

### Modo de utilización

En las plantas amasadoras, RHEOBUILD 1000 debe adicionarse juntamente con la última parte del agua de amasado. No debe adicionarse sobre cemento o áridos secos. Puede adicionarse a pie de obra directamente al camión hormigonera, asegurando un tiempo de mezclado suficiente para su perfecta homogeneización.

Para más información, consultar la Hoja de seguridad del producto.

### Dosificación

La dosificación habitual se encuentra entre el 0,8% y el 2% sobre peso de cemento según incremento de trabajabilidad y reducción de agua deseada.

Dosificaciones superiores son posibles para la obtención de hormigones de elevada fluidez y elevada resistencia.



Se recomienda en cada caso realizar los ensayos oportunos para determinar la dosificación óptima.

### Limpieza de herramientas

Los equipos y herramientas sucias de RHEOBUILD 1000 pueden limpiarse simplemente con agua.

### Presentación

RHEOBUILD 1000 se presenta a granel en cisternas, en contenedores de 1200 Kg y en garrafas de 30 Kg.

### Condiciones de almacenamiento/

#### Tiempo de conservación

Almacenar en sus envases originales herméticamente cerrados y protegidos de temperaturas extremas. Evitar su congelación. Almacenado correctamente, RHEOBUILD 1000 puede conservarse hasta 12 meses.

### Manipulación y transporte

Para su manipulación deberán observarse las medidas preventivas usuales para el manejo de productos químicos, por ejemplo usar gafas y guantes. Lavarse las manos antes de una pausa y al término del trabajo. No comer, beber y fumar durante la aplicación.

La eliminación del producto y su envase debe realizarse de acuerdo con la legislación vigente y es responsabilidad del poseedor final.

Para más información, consultar la Hoja de Seguridad del producto.

Rheobuild 1000 Página 1 de 2

*Adding Value to Concrete*





The Chemical Company

## RHEOBUILD 1000

### Hay que tener en cuenta

- Se recomienda siempre la realización de ensayos previos a la utilización del aditivo.
- No emplear dosificaciones inferiores ni superiores a las recomendadas sin previa consulta con el Departamento Técnico.
- Consulta la compatibilidad entre aditivos antes de su utilización.

| Propiedades   |  |
|---|--|
| Función principal:  | Superplastificante / Reductor de agua de alta actividad. |
| Función secundaria:   | Acelerador de endurecimiento.                            |
| Efecto secundario:  | Riesgo de disgregación a dosificaciones elevadas.        |
| Aspecto físico:   | Líquido marrón oscuro.                                   |
| pH, 20° C:  | 6 – 9  |
| Densidad, 20° C:  | 1,200 ± 0,03 g/cm <sup>3</sup>                           |
| Contenido en cloruros:  | < 0,1%   |
| Los datos técnicos reflejados son fruto de resultados estadísticos y no representan mínimos garantizados. Si se desean los datos de control, pueden solicitarse las "Especificaciones de Venta" a nuestro Departamento Técnico. |  |

#### NOTA:

La presente ficha técnica sirve, al igual que todas las demás recomendaciones e información técnica, únicamente para la descripción de las características del producto, forma de empleo y sus aplicaciones. Los datos e informaciones reproducidos, se basan en nuestros conocimientos técnicos obtenidos en la bibliografía, en ensayos de laboratorio y en la práctica.

Los datos sobre consumo y dosificación que figuran en esta ficha técnica, se basan en nuestra propia experiencia, por lo que estos son susceptibles de variaciones debido a las diferentes condiciones de las obras. Los consumos y dosificaciones reales, deberán determinarse en la obra, mediante ensayos previos y son responsabilidad del cliente.

Para un asesoramiento adicional, nuestro Servicio Técnico, está a su disposición. BASF Construction Chemicals España, S.L. se reserva el derecho de modificar la composición de los productos, siempre y cuando éstos continúen cumpliendo las características descritas en la ficha técnica.

Otras aplicaciones del producto que no se ajusten a las indicadas, no serán de nuestra responsabilidad.

Otorgamos garantía en caso de defectos en la calidad de fabricación de nuestros productos, quedando excluidas las reclamaciones adicionales, siendo de nuestra responsabilidad tan solo la de reintegrar el valor de la mercancía suministrada.

Debe tenerse en cuenta las eventuales reservas correspondientes a patentes o derechos de terceros.

Edición 11/08/2010

La presente ficha técnica pierde su validez con la aparición de una nueva edición



NATADO CE DE PRODUCTO BAJO LA  
LINEA DE PRODUCTOS DE LA  
CONSTRUCCIÓN DE UNIÓN EUROPEA

Rheobuild 1000 Página 2 de 2

**BASF Construction  
Chemicals España, S.L.**

Basters, 15  
08184 Palau-Solità i Plegamans  
Tel.: 93 862 00 00 - Fax: 93 862 00 20  
www.basf-cc.es • basf-cc@basf-cc.es

Fuente: (BASF, 2012)

## 15.3 Descripción cemento Holcim Tipo ‘GU

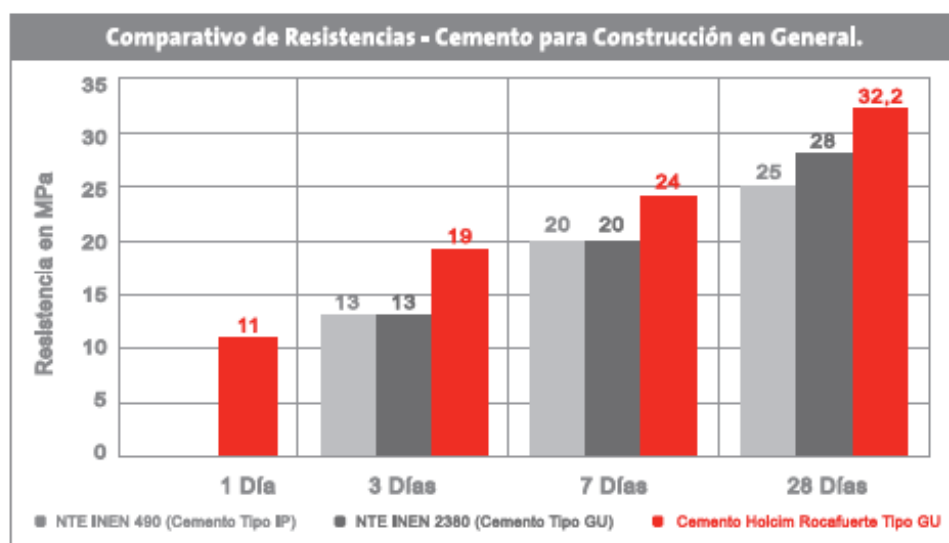
### Descripción

El Cemento Holcim Rocafuerte Tipo GU por su gran **durabilidad, resistencia y calidad** es ideal para todo tipo de construcción: albañilería en general, cimentaciones, columnas, vigas, pilares, losas, morteros, estabilización de suelos, vías, pisos industriales, tanques y canales de agua no residual, prefabricados livianos tales como bloques, adoquines, tuberías, postes, etc.

### Ventajas

- Mejora la trabajabilidad de las mezclas y reduce la segregación y exudación.
- Reduce el calor de hidratación y por consiguiente, la tendencia a la fisuración.
- Buen desempeño de fraguado y resistencia, adecuada para la construcción de edificaciones.
- Proporciona resistencia química moderada al agua de mar, difusión de cloruros y ataque de sulfatos, lo que aumenta su durabilidad.
- Ahorros significativos en el consumo de cemento por metro cúbico de hormigón.

**El Cemento Holcim Rocafuerte Tipo GU produce resistencias a la compresión superiores a las especificadas en las normas NTE INEN 490 y NTE INEN2380.**



Los valores tomados para la medición de las resistencias de Holcim Rocafuerte Tipo GU obedecen a valores promedios de producción continua.

### Certificaciones

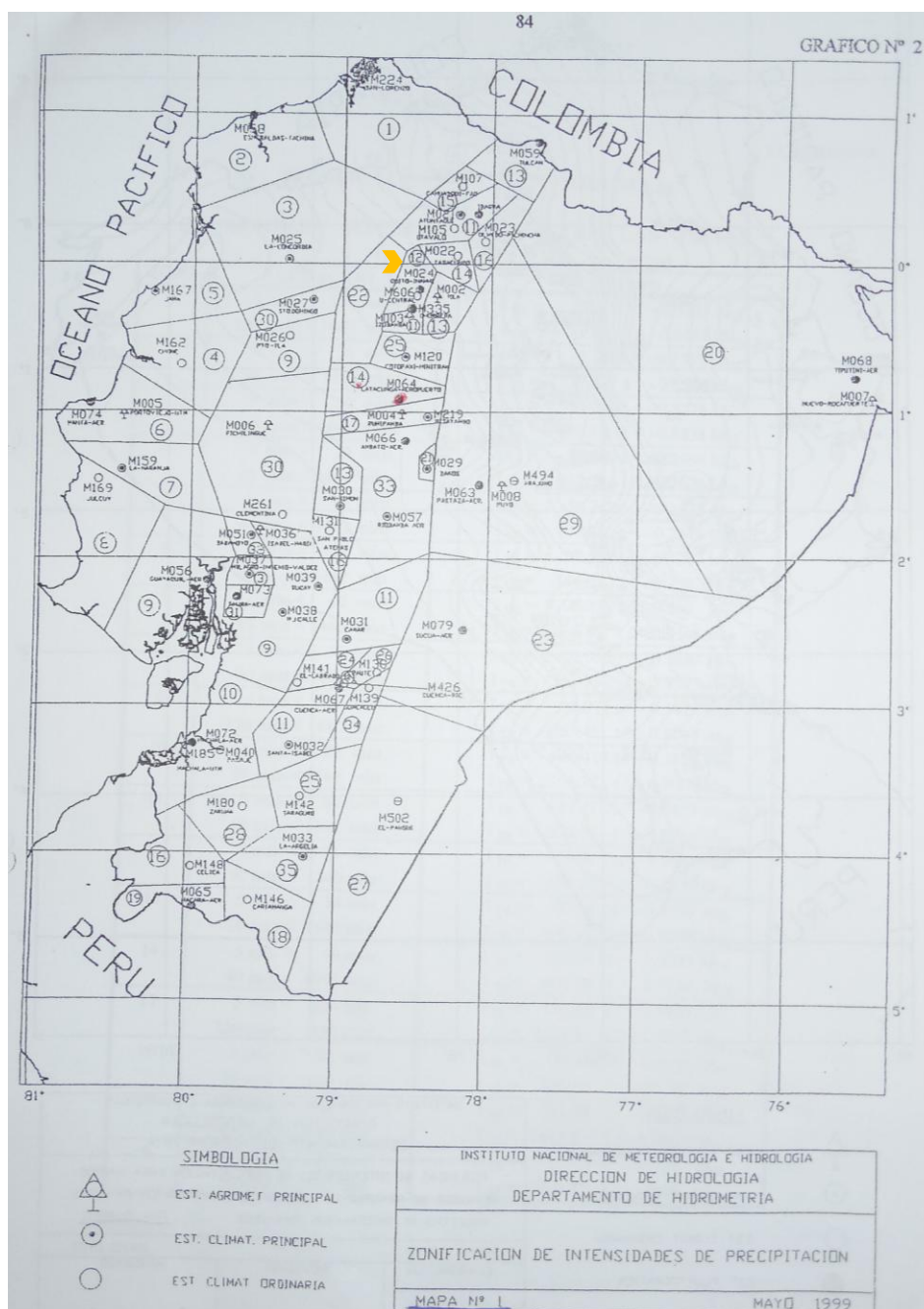
El Cemento Holcim Rocafuerte Tipo GU cuenta con certificados de calidad INEN, que garantizan su excelencia. Además todos nuestros procesos de fabricación de cementos, hormigones y agregados cuentan con las certificaciones internacionales de Calidad (ISO 9001:2000), Medio Ambiente (ISO 14001:2004) y Seguridad y Salud Ocupacional (OHSAS 18001:1999).

Así, Holcim Ecuador ratifica su compromiso de brindar los mejores productos, cuidando la naturaleza, velando por el bienestar de nuestros colaboradores y la satisfacción de nuestros clientes.

# El Cemento del Ecuador

Fuente: (Holcim, 2013)

**15.4 Zonificación, ecuaciones representativas de cada zona e Isolneas de intensidades de precipitación para varios periodos de retorno en función de la máxima en 24 horas registro de información 1967-1998**



Fuente: (INAMHI, 2013)

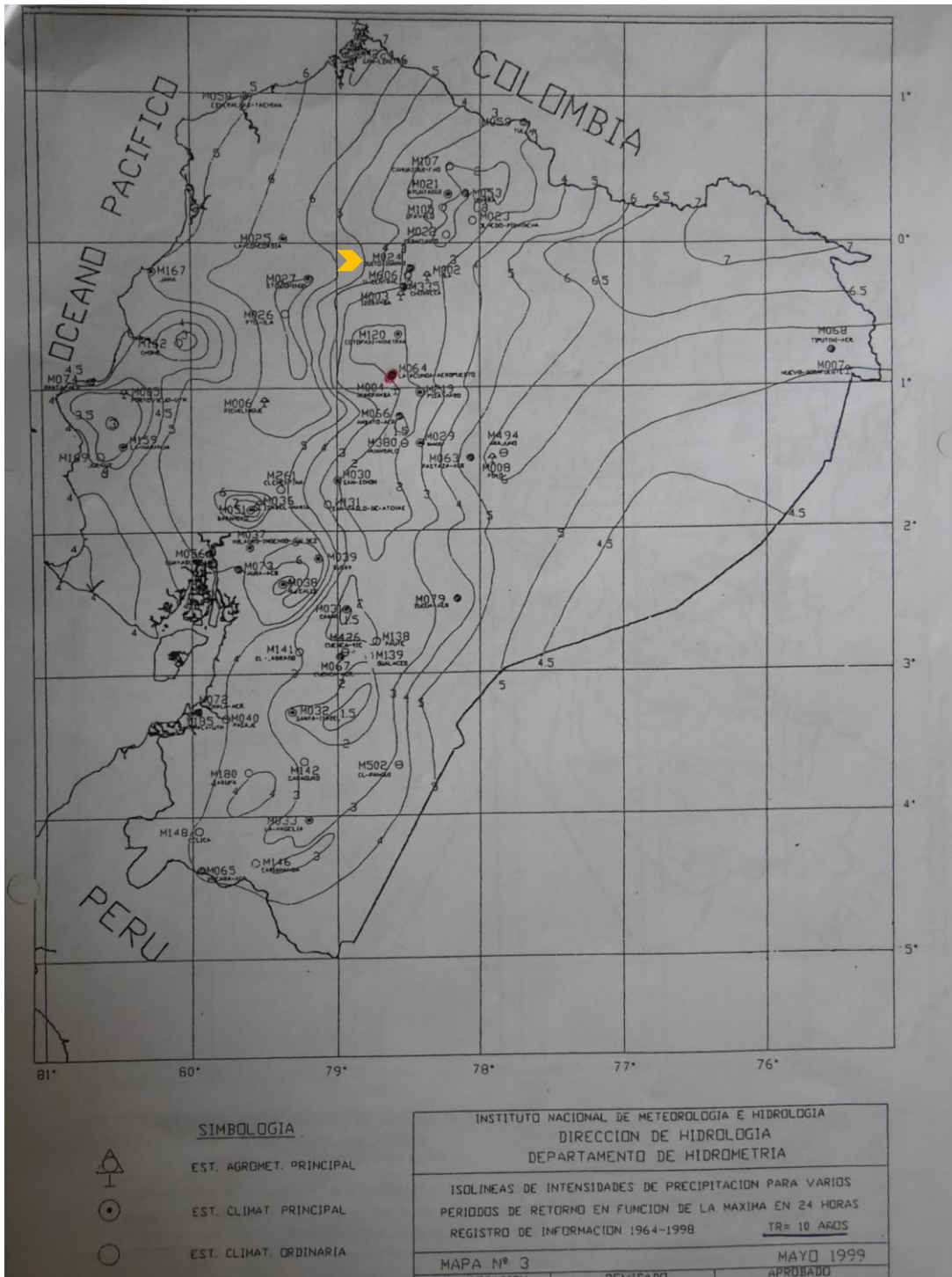
**ZONIFICACION DE INTENSIDADES**

**ECUACIONES REPRESENTATIVAS DE LAS ZONAS**

| ZONA | DURACION           | ECUACION                                      |
|------|--------------------|---|
| 1    | 5 min < 130 min    | $I_{TR} = 47.926 t^{\wedge} - 0.3387 Id_{TR}$ |
|      | 130 min < 1440 min | $I_{TR} = 787.57 t^{\wedge} - 0.9154 Id_{TR}$ |
| 2    | 5 min < 30 min     | $I_{TR} = 19.305 t^{\wedge} - 0.1332 Id_{TR}$ |
|      | 30 min < 1440 min  | $I_{TR} = 115.4 t^{\wedge} - 0.6546 Id_{TR}$  |
| 3    | 5 min < 90 min     | $I_{TR} = 53.369 t^{\wedge} - 0.3278 Id_{TR}$ |
|      | 90 min < 1440 min  | $I_{TR} = 639.52 t^{\wedge} - 0.8838 Id_{TR}$ |
| 4    | 5 min < 20 min     | $I_{TR} = 56.507 t^{\wedge} - 0.2694 Id_{TR}$ |
|      | 20 min < 1440 min  | $I_{TR} = 247.71 t^{\wedge} - 0.7621 Id_{TR}$ |
| 5    | 5 min < 40 min     | $I_{TR} = 54.719 t^{\wedge} - 0.3875 Id_{TR}$ |
|      | 40 min < 1440 min  | $I_{TR} = 197.81 t^{\wedge} - 0.7378 Id_{TR}$ |
| 6    | 5 min < 120 min    | $I_{TR} = 57.598 t^{\wedge} - 0.4267 Id_{TR}$ |
|      | 120 min < 1440 min | $I_{TR} = 344.08 t^{\wedge} - 0.7982 Id_{TR}$ |
| 7    | 5 min < 60 min     | $I_{TR} = 97.055 t^{\wedge} - 0.403 Id_{TR}$  |
|      | 60 min < 1440 min  | $I_{TR} = 869.87 t^{\wedge} - 0.9346 Id_{TR}$ |
| 8    | 5 min < 30 min     | $I_{TR} = 80.068 t^{\wedge} - 0.3683 Id_{TR}$ |
|      | 30 min < 1440 min  | $I_{TR} = 351.73 t^{\wedge} - 0.7977 Id_{TR}$ |
| 9    | 5 min < 116 min    | $I_{TR} = 40.035 t^{\wedge} - 0.341 Id_{TR}$  |
|      | 116 min < 1440 min | $I_{TR} = 355.49 t^{\wedge} - 0.8043 Id_{TR}$ |
| 10   | 5 min < 88 min     | $I_{TR} = 40.414 t^{\wedge} - 0.3124 Id_{TR}$ |
|      | 88 min < 1440 min  | $I_{TR} = 356.17 t^{\wedge} - 0.8009 Id_{TR}$ |
| 11   | 5 min < 60 min     | $I_{TR} = 137.27 t^{\wedge} - 0.5153 Id_{TR}$ |
|      | 60 min < 1440 min  | $I_{TR} = 578.56 t^{\wedge} - 0.8736 Id_{TR}$ |
| 12   | 5 min < 50 min     | $I_{TR} = 138.01 t^{\wedge} - 0.4882 Id_{TR}$ |
|      | 50 min < 1440 min  | $I_{TR} = 674.13 t^{\wedge} - 0.8935 Id_{TR}$ |
| 13   | 5 min < 36 min     | $I_{TR} = 76.96 t^{\wedge} - 0.2953 Id_{TR}$  |
|      | 36 min < 1440 min  | $I_{TR} = 642.11 t^{\wedge} - 0.8898 Id_{TR}$ |
| 14   | 5 min < 40 min     | $I_{TR} = 133.83 t^{\wedge} - 0.4283 Id_{TR}$ |
|      | 40 min < 1440 min  | $I_{TR} = 800.89 t^{\wedge} - 0.9189 Id_{TR}$ |
| 15   | 5 min < 230 min    | $I_{TR} = 110.85 t^{\wedge} - 0.4943 Id_{TR}$ |
|      | 230 min < 1440 min | $I_{TR} = 3197.1 t^{\wedge} - 1.1077 Id_{TR}$ |
| 16   | 5 min < 25 min     | $I_{TR} = 76.946 t^{\wedge} - 0.4583 Id_{TR}$ |
|      | 25 min < 1440 min  | $I_{TR} = 174.47 t^{\wedge} - 0.7143 Id_{TR}$ |
| 17   | 5 min < 40 min     | $I_{TR} = 201.28 t^{\wedge} - 0.4573 Id_{TR}$ |
|      | 40 min < 1440 min  | $I_{TR} = 1415.8 t^{\wedge} - 0.9947 Id_{TR}$ |
| 18   | 5 min < 50 min     | $I_{TR} = 69.036 t^{\wedge} - 0.335 Id_{TR}$  |
|      | 50 min < 1440 min  | $I_{TR} = 510.71 t^{\wedge} - 0.849 Id_{TR}$  |

Fuente: (INAMHI, 2013)





Fuente: (INAMHI, 2013)