



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**CONCRETO PERMEABLE CON ADICIÓN DE TIRAS DE PLÁSTICO Y SU
APLICACIÓN EN PAVIMENTOS RÍGIDOS DE TRÁFICO LIVIANO**

Marlon Estuardo Hernández Rivera
Asesorado por Ing. Luis Mariano Álvarez Muralles

Guatemala, abril de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CONCRETO PERMEABLE CON ADICIÓN DE TIRAS DE PLÁSTICO Y SU
APLICACIÓN EN PAVIMENTOS RÍGIDOS DE TRÁFICO LIVIANO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

MARLON ESTUARDO HERNÁNDEZ RIVERA

ASESORADO POR ING. LUIS MARIANO ÁLVAREZ MURALLES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, ABRIL DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|--|
| DECANO | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |
| VOCAL I | Ing. Angel Roberto Sic García |
| VOCAL II | Ing. Pablo Christian de León Rodríguez |
| VOCAL III | Ing. José Milton de León Bran |
| VOCAL IV | Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez |
| VOCAL V | Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez |
| SECRETARIA | Inga. Lesbia Magalí Herrera López |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|-------------|------------------------------------|
| DECANO | Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos |
| EXAMINADORA | Inga. Carmen Marina Mérida Alba |
| EXAMINADOR | Ing. Juan Ramón Ordoñez Hernández |
| EXAMINADOR | Ing. Luis Estuardo Saravia Ramírez |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

CONCRETO PERMEABLE CON ADICIÓN DE TIRAS DE PLÁSTICO Y SU APLICACIÓN EN PAVIMENTOS RÍGIDOS DE TRÁFICO LIVIANO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 27 de septiembre de 2013.

Marlon Estuardo Hernández Rivera

Guatemala, 29 de noviembre de 2016

Ingeniero
José Gabriel Ordoñez Morales
Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos
Guatemala

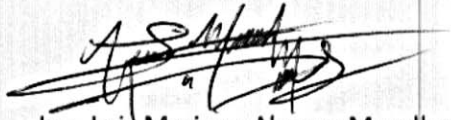
Ingeniero Ordoñez

Por este medio me dirijo a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación **CONCRETO PERMEABLE CON ADICIÓN DE TIRAS DE PLÁSTICO Y SU APLICACIÓN EN PAVIMENTOS RÍGIDOS DE TRAFICO LIVIANO**, elaborado por el estudiante **Marlon Estuardo Hernández Rivera**, quien contó con la asesoría del suscrito.

Considerando que el trabajo desarrollado por el estudiante Hernández Rivera satisface los requisitos exigidos en el reglamento de graduación, por lo que recomiendo su aprobación.

Atentamente,

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Ing. Luis Mariano Alvarez Muralles
Colegiado 10253
Asesor

Luis Mariano Alvarez Muralles
INGENIERO CIVIL
Colegiado No. 10253



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Guatemala,
27 de febrero de 2017

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **CONCRETO PERMEABLE CON ADICIÓN DE TIRAS DE PLÁSTICO Y SU APLICACIÓN EN PAVIMENTOS RÍGIDOS DE TRAFICO LIVIANO** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Marlon Estuardo Hernández Rivera quien contó con la asesoría del Ing. Luis Mariano Álvarez Muralles.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Civil José Gabriel Ordóñez Morales
Coordinador del Área de Materiales y
Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

/mrrm.



Mas de 136 años de Trabajo y Mejora Continua



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Luis Mariano Álvarez Muralles y del Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles Ing. José Gabriel Ordóñez Morales, al trabajo de graduación del estudiante Marlon Estuardo Hernández Rivera titulado CONCRETO PERMEABLE CON ADICIÓN DE TIRAS DE PLÁSTICO Y SU APLICACIÓN EN PAVIMENTOS RÍGIDOS DE TRÁFICO LIVIANO da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, abril 2017
/mrrm.



Más de 136 años de Trabajo y Mejora Continua

Universidad de San Carlos
de Guatemala

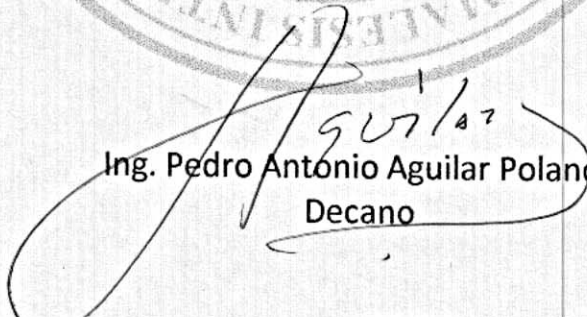


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 167.2017

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **CONCRETO PERMEABLE CON ADICIÓN DE TIRAS DE PLÁSTICO Y SU APLICACIÓN EN PAVIMENTOS RÍGIDOS DE TRÁFICO LIVIANO**, presentado por el estudiante universitario: **Marlon Estuardo Hernández Rivera**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, abril de 2017

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

| | |
|---------------------|--|
| Dios | Porque sin Él nada sería posible. Por guiarme en el buen camino y bendecirme a lo largo de toda mi vida. |
| Mis padres | Ingrid Rivera y Lee Hernández. Por su amor incondicional, sus sabios consejos y enseñarme a luchar por los sueños. |
| Mis hermanos | Lee Stevens y Marcos Javier Hernández Rivera por su amor y apoyo. |
| Mis abuelas | María Amparo Conde por ser una fuente de inspiración y Fidelina Orozco Flores en su tumba. |
| Mis tíos | Evelyn Rivera, Mynor del Valle, Jacqueline del Valle, Rufina Hernández, Julio Hernández, Ronald Hernández, por brindarme su apoyo, su cariño y sus consejos a lo largo de mi vida. |
| Mi asesor | Luis Mariano Álvarez Muralles, por sus consejos, y compartir sus conocimientos y experiencia a lo largo de mi formación profesional. |

AGRADECIMIENTOS A:

| | |
|---|--|
| Universidad de San Carlos de Guatemala | Por ser mi casa de estudios durante mi formación profesional. |
| Facultad de Ingeniería | Por formarme como profesional. |
| CII | Centro de Investigaciones de Ingeniería. Por su apoyo en la realización de mi diseño experimental y ser parte de mi formación profesional. |
| Mis amigos | Por sus consejos y su amistad. |
| Mis compañeros de trabajo | Por compartir sus conocimientos y ser un verdadero apoyo a lo largo de mi formación laboral. |

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES..... | V |
| LISTA DE SÍMBOLOS | IX |
| GLOSARIO | XI |
| RESUMEN..... | XV |
| OBJETIVOS..... | XVII |
| INTRODUCCIÓN | XIX |
| | |
| 1. MARCO TEÓRICO..... | 1 |
| 1.1. Antecedentes..... | 1 |
| 1.1.1. El ciclo hidrológico | 1 |
| 1.1.2. Agua subterránea | 2 |
| 1.1.3. Zonas de agua subterránea..... | 2 |
| 1.1.4. Fuentes del agua subterránea | 4 |
| 1.1.5. Factores condicionantes del agua subterránea | 5 |
| 1.1.6. Importancia del agua subterránea | 6 |
| 1.1.7. Sobreexplotación del agua subterránea | 8 |
| 1.1.8. Contaminación del agua subterránea | 10 |
| 1.1.9. Disminución del nivel freático como consecuencia de impermeabilización de calles y avenidas | 11 |
| 1.1.10. Escorrentía derivada de la impermeabilización de calles y avenidas, y sus consecuencias | 12 |
| 1.2. Clasificación y diseños de pavimentos | 13 |
| 1.2.1. Elementos estructurales que integran un pavimento | 14 |

| | | | |
|--------|----------|--|----|
| | 1.2.1.1. | Base | 14 |
| | 1.2.1.2. | Subbase | 14 |
| | 1.2.1.3. | Subrasante | 15 |
| 1.2.2. | | Tipos de pavimentos | 15 |
| | 1.2.2.1. | Pavimento flexible | 16 |
| | 1.2.2.2. | Pavimento rígido | 18 |
| 1.2.3. | | Métodos de diseño de pavimentos rígidos | 21 |
| | 1.2.3.1. | Método de diseño AASHTO | 21 |
| | 1.2.3.2. | Método de la Asociación del Cemento Portland (PCA)..... | 29 |
| | 1.2.3.3. | Método del catálogo español..... | 33 |
| 1.3. | | Concreto hidráulico permeable | 34 |
| | 1.3.1. | Materiales..... | 34 |
| | 1.3.1.1. | Cemento..... | 34 |
| | 1.3.1.2. | Agregado grueso..... | 35 |
| | 1.3.1.3. | Agregado fino | 36 |
| | 1.3.1.4. | Agua..... | 36 |
| | 1.3.1.5. | Aditivos..... | 37 |
| 1.3.2. | | Características físicas y propiedades mecánicas del concreto permeable..... | 38 |
| | 1.3.2.1. | Resistencia a compresión | 39 |
| | 1.3.2.2. | Resistencia a flexión | 40 |
| | 1.3.2.3. | Densidad del concreto..... | 41 |
| | 1.3.2.4. | Porosidad | 42 |
| | 1.3.2.5. | Durabilidad | 44 |
| 1.3.3. | | Usos del concreto permeable..... | 45 |
| 1.3.4. | | Polímeros para incrementar la resistencia al concreto permeable..... | 46 |
| | 1.3.4.1. | Polietileno de baja densidad..... | 47 |

| | | | |
|------|----------|---|----|
| | 1.3.4.2. | Polipropileno | 51 |
| | 1.3.4.3. | Caucho | 54 |
| 1.4. | | Pavimentos permeables | 57 |
| | 1.4.1. | Aplicaciones..... | 58 |
| | 1.4.2. | Ventajas..... | 59 |
| | 1.4.3. | Componentes | 60 |
| | 1.4.4. | Diseño de pavimento permeable | 60 |
| 1.5. | | Procedimiento constructivo del pavimento de concreto permeable..... | 61 |
| | 1.5.1. | Trabajos preliminares | 62 |
| | 1.5.2. | Terracerías | 64 |
| | 1.5.3. | Conformación de la base del pavimento..... | 64 |
| | 1.5.4. | Estructura del pavimento | 66 |
| | 1.5.5. | Carpeta con concreto permeable..... | 68 |
| | 1.5.6. | Colocación y construcción del concreto permeable..... | 69 |
| | 1.5.6.1. | Equipo y herramienta..... | 70 |
| | 1.5.6.2. | Preparación y disposición de la capa subrasante | 70 |
| | 1.5.6.3. | Mezclado | 71 |
| | 1.5.6.4. | Transporte | 72 |
| | 1.5.6.5. | Colocación..... | 73 |
| | 1.5.6.6. | Cimbras y equipo de enrasado..... | 74 |
| | 1.5.6.7. | Compactación..... | 76 |
| | 1.5.6.8. | Juntas de construcción y acabados..... | 78 |
| | 1.5.6.9. | Curado..... | 81 |
| | 1.5.7. | Reparación de pavimentos de concreto permeable..... | 84 |
| | 1.5.8. | Mantenimiento | 85 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 1.5.9. | Supervisión y pruebas de control de calidad | 86 |
| 2. | MARCO PRÁCTICO | 89 |
| 2.1. | Materiales utilizados..... | 89 |
| 2.1.1. | Cemento..... | 89 |
| 2.1.2. | Agregado grueso..... | 89 |
| 2.1.3. | Agregado fino..... | 92 |
| 2.1.4. | Adiciones de tiras plásticas | 95 |
| 2.1.4.1. | Polietileno de baja densidad:..... | 96 |
| 2.1.4.2. | Polipropileno..... | 97 |
| 2.2. | Diseño de mezcla..... | 97 |
| 2.3. | Ensayos de laboratorio..... | 102 |
| 2.3.1. | Ensayo de peso unitario y porcentaje de vacíos ... | 102 |
| 2.3.2. | Ensayo a compresión..... | 103 |
| 2.3.3. | Ensayo a flexión | 104 |
| 2.3.4. | Ensayo a tracción indirecta | 106 |
| 2.3.5. | Ensayo de permeabilidad..... | 107 |
| 3. | RESULTADOS..... | 111 |
| 4. | DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 119 |
| | CONCLUSIONES..... | 123 |
| | RECOMENDACIONES | 125 |
| | BIBLIOGRAFÍA..... | 127 |
| | APÉNDICES..... | 129 |
| | ANEXOS..... | 139 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|---|----|
| 1. | Ciclo hidrológico | 2 |
| 2. | Clasificación del agua subterránea | 3 |
| 3. | Estructura de un pavimento flexible | 16 |
| 4. | Estructura de pavimento rígido | 19 |
| 5. | Determinación del módulo de ruptura según norma ASTM C78 .. | 27 |
| 6. | Esfuerzo de compresión vs contenido de aire..... | 39 |
| 7. | Esfuerzo de flexión vs. contenido de aire..... | 41 |
| 8. | Filtración de agua vs. contenido de aire..... | 43 |
| 9. | Estructura de un pavimento permeable..... | 61 |
| 10. | Movimiento de tierras..... | 62 |
| 11. | Base y subbase del pavimento permeable..... | 66 |
| 12. | Colocación de pavimento permeable | 67 |
| 13. | Colocación de concreto permeable..... | 69 |
| 14. | Enrasado del concreto permeable mediante el uso de una enrasadora vibratoria de marco con sección tipo A | 76 |
| 15. | Compactación del concreto permeable por medio de un rodillo de acero | 77 |
| 16. | Realización de una junta constructiva en el concreto permeable..... | 79 |
| 17. | Ejemplo de juntas constructivas en un pavimento de concreto permeable | 80 |
| 18. | Curado de concreto permeable por medio de polietileno | 83 |
| 19. | Curva granulométrica del agregado grueso | 90 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 20. | Ensayo de peso unitario al agregado grueso según norma ASTM C-29 | 91 |
| 21. | Ensayo de granulometría al agregado grueso según norma ASTM C-136 | 91 |
| 22. | Ensayo de peso específico y % de absorción del agregado grueso según norma ASTM C-127 | 92 |
| 23. | Curva granulométrica del agregado fino | 93 |
| 24. | Ensayo de porcentaje que pasa el tamiz núm. 200, del agregado fino según norma ASTM C-117..... | 94 |
| 25. | Ensayo de granulometría al agregado fino según norma ASTM C-136 | 94 |
| 26. | Ensayo de peso específico y % de absorción al agregado fino según norma ASTM C-128 | 95 |
| 27. | Tiras de polietileno de baja densidad con dimensiones de 4 mm x 20 mm..... | 96 |
| 28. | Tiras de polipropileno con dimensiones de 4 mm x 20 mm | 97 |
| 29. | Resistencia a compresión con respecto a la edad para el concreto sin adición de tiras | 116 |
| 30. | Resistencia a compresión con respecto a la edad para el concreto con adición de tiras de polietileno de baja densidad..... | 116 |
| 31. | Resistencia a compresión con respecto a la edad para el concreto con adición de tiras de polipropileno..... | 117 |
| 32. | Comparación de resultados obtenidos del ensayo a compresión, de las diferentes mezclas de concreto permeable..... | 117 |

TABLAS

| | | |
|-------|---|-----|
| I. | Agua dulce de la hidrósfera..... | 8 |
| II. | Rangos recomendables de proporciones de materiales en el concreto permeable..... | 38 |
| III. | Rangos típicos de las características físicas y propiedades mecánicas del concreto permeable..... | 44 |
| IV. | Relaciones de las propiedades mecánicas con respecto a la resistencia a compresión..... | 45 |
| V. | Propiedades del polietileno de baja densidad | 48 |
| VI. | Propiedades del polipropileno | 52 |
| VII. | Resultados de los ensayos de caracterización del agregado grueso, según norma ASTM-C33..... | 90 |
| VIII. | Resultados de los ensayos de caracterización del agregado fino según norma ASTM-C33..... | 93 |
| IX. | Cálculo de volumen de concreto, para la fabricación de elementos a ensayar | 100 |
| X. | Cálculo de materiales para la elaboración de la mezcla de concreto permeable sin adición de tiras..... | 101 |
| XI. | Cálculo de materiales para la elaboración de la mezcla de concreto permeable con adición de tiras de polietileno de baja densidad y de polipropileno con dimensiones de 20 mm x 4 mm, al 0,10%..... | 101 |
| XII. | Resultados obtenidos del ensayo a compresión de las diferentes mezclas de concreto permeable | 111 |
| XIII. | Resultados obtenidos del ensayo a tracción indirecta, de las diferentes mezclas de concreto permeable..... | 112 |
| XIV. | Resultados obtenidos del ensayo a flexión | 112 |
| XV. | Resultados obtenidos del ensayo de peso unitario y porcentaje de vacíos | 113 |

| | | |
|--------|--|-----|
| XVI. | Resultados obtenidos del ensayo de permeabilidad..... | 113 |
| XVII. | Resumen de resultados, de las mezclas de concreto permeable, sin y con adiciones de tiras de polietileno y polipropileno | 113 |
| XVIII. | Determinación de la resistencia a flexión y a tensión a partir de la relación con la resistencia a compresión | 114 |
| XIX. | Comparación de valores teóricos y experimentales de la resistencia a flexión | 114 |
| XX. | Comparación de valores teóricos y experimentales de la resistencia a tensión | 115 |
| XXI. | Comparación de valores teóricos y experimentales del peso unitario | 115 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|-----------------------|---------------------------------------|
| h | Altura |
| A | Área |
| P | Carga |
| cm | Centímetro |
| cm³ | Centímetro cúbico |
| Cd | Coeficiente de drenaje |
| J | Coeficiente de transferencia de carga |
| Ø | Diámetro |
| H | Espesor de la losa |
| FC | Factor de carril |
| FCA | Factor de crecimiento anual |
| FS | Factor de sentido |
| GPa | Gigapascales |
| g | Gramos |
| °C | Grados Celsius |
| kg | Kilogramo |
| lb | Libra |
| psi | Libras sobre pulgada cuadrada |
| L | Litro |
| Mpa | Megapascales |
| m | Metro |
| m² | Metro cuadrado |
| m³ | Metro cúbico |

| | |
|------------------------------|--|
| mm | Milímetro |
| mm/h | Milímetro por hora |
| E | Módulo de elasticidad del concreto |
| Kd | Módulo de reacción de diseño del suelo |
| MR | Módulo de ruptura |
| ΔP | Pérdida de serviciabilidad |
| Pd | Periodo de diseño |
| P.U. | Peso unitario |
| π | Pi |
| PEBD | Polietileno de baja densidad |
| PP | Polipropileno |
| % | Porcentaje |
| w/c | Relación agua / cemento |
| σ | Resistencia a compresión |
| Rd | Resistencia a flexión |
| f'c | Resistencia a la compresión del concreto |
| fy | Resistencia a la tracción del acero |
| T | Resistencia a la tracción indirecta |
| s | Segundo |
| Pi | Serviciabilidad inicial |
| Pf | Serviciabilidad final |
| Td | Tránsito de diseño |
| TPDA | Tránsito promedio diario anual |
| IMDp | Vehículos pesados por día |

GLOSARIO

| | |
|--------------------------|--|
| AASHTO | <i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i> (Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes). |
| ACI 522 R-10 | Especificaciones para concreto permeable. |
| Aditivo | Producto incorporado en el momento del amasado del concreto en una cantidad no mayor del 5% en masa, con el objetivo de modificar las propiedades de la mezcla en estado fresco y/o endurecido |
| Agua subterránea | Agua que se encuentra dentro de la litosfera, se considera está relativamente libre de contaminación. |
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedad Americana para Ensayos y Materiales). |
| Ciclo hidrológico | Movimiento general del agua, ascendente por evaporación y descendente primero por las precipitaciones y después en forma de escorrentía superficial y subterránea. |
| CII | Centro de Investigaciones de Ingeniería |

| | |
|------------------------------|---|
| Concreto permeable | Concreto fabricado de cemento, agregado grueso, agua, aditivos y poco o ningún agregado fino, lo cual permite el paso de agua a través de este. |
| Escorrentía | Agua de lluvia que circula libremente sobre la superficie de un terreno. |
| Explanada | Superficie de la coronación del relleno sobre la que se apoya directamente el firme |
| Impermeabilidad | Característica que tienen las superficies de rechazar el agua sin dejarse atravesar por esta. |
| Infiltración | Paso del agua de la superficie hacia el interior del suelo. |
| Módulo de elasticidad | Relación entre la fatiga unitaria y la correspondiente deformación unitaria en un material sometido a un esfuerzo que está por debajo del límite de elasticidad del material. |
| Módulo de ruptura | También denominado resistencia a flexión, es una medida de la resistencia a la tracción del concreto. |
| Nivel Freático | Nivel donde la presión hidrostática del agua subterránea, es igual a la presión atmosférica. |

| | |
|----------------------|---|
| Pavimento | Conjunto de capas de material seleccionado que reciben en forma directa las cargas del tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada, proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe funcionar eficientemente. |
| PCA | <i>Portland Cement Association</i> (Asociación de Cemento Portland) |
| Permeabilidad | Es la capacidad que tiene un material de permitirle a un flujo que lo atraviese sin alterar su estructura interna. |
| Plástico | Son aquellos materiales que, compuestos por resinas, proteínas y otras sustancias, son fáciles de moldear y pueden modificar su forma de manera permanente a partir de una cierta compresión y temperatura. |
| Polietileno | Polímero termoplástico conformado por unidades repetitivas de etileno. |
| Polímero | Macromoléculas compuestas por una o varias unidades químicas (monómeros) que se repiten a lo largo de toda una cadena. |
| Polipropileno | Polímero termoplástico, parcialmente cristalino, que se obtiene de la polimerización del propileno (o propeno). |

Tráfico liviano

TPDA de 10 a 500 y donde transitan vehículos con un peso bruto menores de 3,5 toneladas.

TPDA

Tránsito promedio diario anual

RESUMEN

La construcción de carreteras, con pavimentos rígidos o flexibles, representa un problema ambiental, ya que se han impermeabilizado las superficies, y las fuentes de agua subterránea, se están escaseando. Una propuesta para mitigar este problema, es la implementación de pavimentos de concreto permeable. En este trabajo de investigación se tuvo como objetivo realizar un diseño de mezcla de concreto permeable con adición de tiras de polietileno de baja densidad y de polipropileno, para la implementación en pavimentos rígidos de tráfico liviano.

Se estudió el comportamiento del concreto permeable, al utilizar como aditivos, el polietileno de baja densidad y el polipropileno. Para ello, primeramente se realizó un diseño de mezcla de concreto permeable, basado en parámetros establecidos por el ACI 522 R-10. Seguidamente, se realizaron dos diseños de mezclas adicionales, en uno se empleó tiras de polietileno de baja densidad y en otro tiras de polipropileno, con dimensiones de 4 mm x 20 mm al 0,10 % del total de la mezcla.

Para evaluar el diseño de mezcla de concreto permeable adecuado, para ser utilizado en pavimentos de tráfico liviano, las mezclas fueron sometidas a los ensayos de compresión, flexión, tracción indirecta y permeabilidad, según normas ASTM, en el Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Basado en los resultados de los ensayos de laboratorio, y tomando en cuenta que la resistencia a flexión, es el parámetro más importante para el diseño de pavimentos, se determinó que la mezcla de concreto permeable con

adición de tiras de polietileno de baja densidad, con dimensiones de 4 mm x 20 mm, al 0,10 % del total de la mezcla, fue el que mejor se adapta para ser utilizado en pavimentos de tráfico liviano. Ya que se obtiene un incremento del 26 % de la resistencia a flexión, con respecto al concreto permeable sin adición de tiras.

OBJETIVOS

General

Realizar un diseño de mezcla de concreto permeable con adición de tiras de polietileno de baja densidad y de polipropileno, para la implementación en pavimentos rígidos de tráfico liviano.

Específicos

1. Realizar e interpretar ensayos de laboratorios para evaluar el comportamiento de las tiras de plástico en concretos permeables.
2. Determinar el porcentaje permisible, de la adición de tiras plásticas, en la mezcla de concreto permeable, que permita cumplir con la tasa de infiltración mínima, estipulado en el ACI 522 R-10.
3. Determinar la relación del porcentaje de vacíos y la permeabilidad del concreto permeable.
4. Obtener el diseño de mezcla de concreto permeable adecuado, para ser utilizado en pavimentos de tráfico liviano.

INTRODUCCIÓN

El agua de lluvia sumada a la impermeabilización de las superficies provoca dos fenómenos asociados: un incremento de caudal que deberá evacuarse por un sistema de alcantarillado existente y una disminución importante del agua que alimenta a los mantos freáticos. Una de las propuestas para contrarrestar esta problemática es la de implementar pavimento rígido utilizando concreto permeable (si las condiciones del suelo y el comportamiento del tráfico lo permiten).

La principal característica del concreto permeable es permitir la infiltración del agua a través de su superficie, para su posterior evacuación. Entre las aplicaciones del concreto permeable se puede mencionar: en pavimentación de estacionamientos, carreteras, cunetas de carreteras, muros de contención, patios, canchas deportivas, entre otros. Debido a que el concreto permeable tiene ausencia parcial o total de finos, la resistencia a la flexión y compresión tiende a ser inferior a la de un concreto convencional. Basándose en diferentes investigaciones que se han desarrollado en varios países, se ha comprobado que la adición de tiras de plástico (polietileno de baja densidad y polipropileno) de diversas dimensiones y en diferentes porcentajes respecto al peso de la mezcla; aumentan la resistencia al concreto permeable, principalmente a la flexión.

En la actualidad se cuenta con millones de metros cuadrados de pavimentos permeables, aplicados en países como Francia, España, Japón y Alemania. Por lo tanto, este trabajo de investigación pretender ser una

propuesta para que se implemente este sistema constructivo en Guatemala, proponiendo una alternativa ambientalmente viable.

El presente trabajo de graduación consistió en estudiar el comportamiento del concreto permeable, al utilizar como aditivos, dos diferentes tipos de polímeros, y determinar cuál presenta los mejores resultados, en cuanto resistencia y permeabilidad se refiere. Con la finalidad de obtener el diseño de mezcla adecuado, para ser utilizado en pavimentos de tráfico liviano.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

1.1.1. El ciclo hidrológico

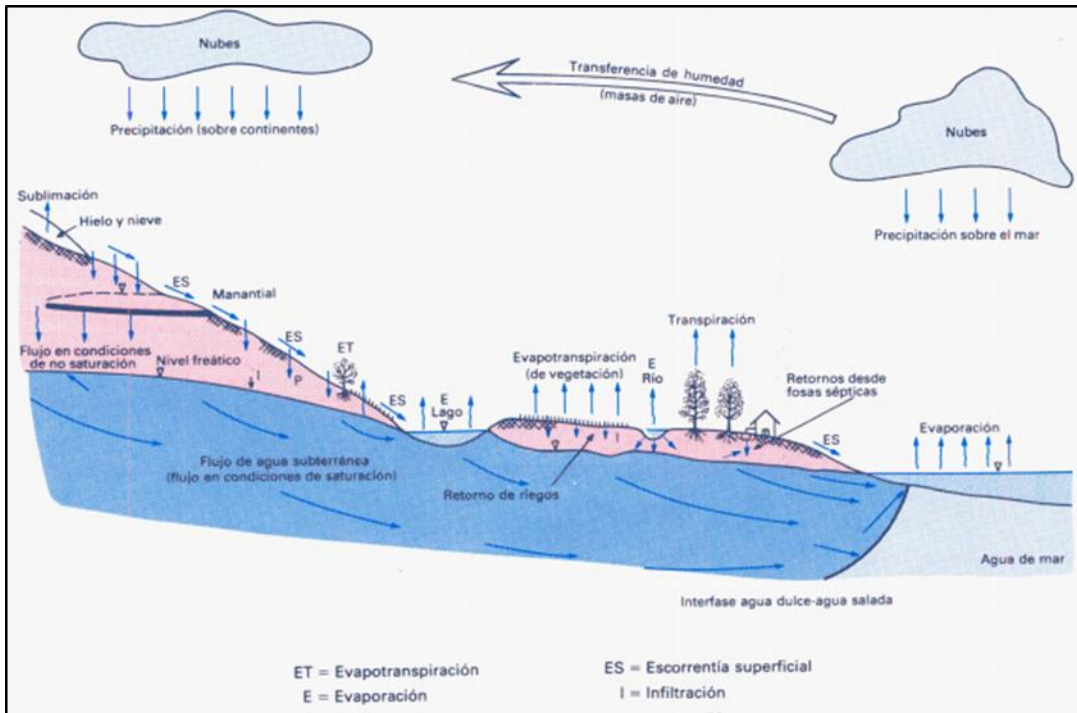
Se denomina ciclo hidrológico al movimiento general del agua: ascendente por evaporación y descendente primero por las precipitaciones y después en forma de escorrentía superficial y subterránea.

El agua que se encuentra sobre la superficie terrestre o muy cerca de esta se evapora bajo el efecto de la radiación solar y el viento. El vapor de agua, que así se forma, se eleva y se transporta por la atmósfera en forma de nubes hasta que se condensa y cae hacia la tierra en forma de precipitación.

Durante su trayecto hacia la superficie de la tierra, el agua precipitada puede volver a evaporarse o ser interceptada por las plantas o las construcciones, luego fluye por la superficie hasta las corrientes o se infiltra.

Del agua infiltrada, una parte es absorbida por las plantas y posteriormente es transpirada, casi en su totalidad, hacia la atmósfera y otra parte fluye bajo la superficie de la tierra hacia las corrientes, el mar u otros cuerpos de agua o bien hacia zonas profundas del suelo para ser almacenada como agua subterránea y después aflorar en manantiales, ríos o el mar donde nuevamente se evapora, constituyéndose en un ciclo.

Figura 1. **Ciclo hidrológico**



Fuente: GONZÁLEZ NAVARRO, Álvaro. *Las aguas subterráneas en España*. p. 32.

1.1.2. **Agua subterránea**

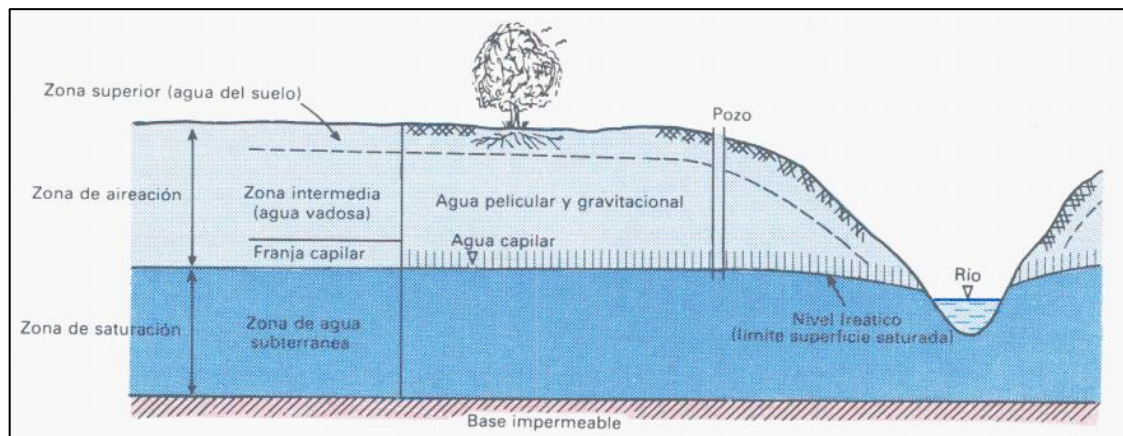
Dentro del ciclo hidrológico, un porcentaje de la precipitación forma parte de la circulación subterránea la cual consiste en el agua que se encuentra dentro de la litósfera. Se considera que el agua subterránea está relativamente libre de contaminación.

1.1.3. **Zonas de agua subterránea**

El agua subterránea se puede clasificar fácilmente separando dos regiones por una división irregular llamada nivel freático como se puede ver en

la figura 2. Esta división es la superficie donde la presión hidrostática es igual a la presión atmosférica. Por encima del nivel freático se encuentra la zona vadosa, también conocida como zona de aireación o no saturada donde los poros del suelo pueden contener aire o agua. En la zona debajo del nivel freático, los poros del suelo están llenos de agua por lo que esta zona también se conoce como zona de saturación o zona freática.

Figura 2. **Clasificación del agua subterránea**



Fuente: GONZÁLEZ NAVARRO, Álvaro. *Las aguas subterráneas en España*. p. 29.

En la zona vadosa la humedad se reparte en tres regiones:

- **Región húmeda del suelo:** donde las raíces de las plantas penetran; está comprendida entre cero y diez metros de profundidad a partir de la superficie.
- **Franja capilar:** región que está por encima del nivel freático donde la tensión capilar provoca el ascenso del agua. Su espesor varía desde

unos centímetros hasta algunos metros, dependiendo del tamaño de los poros del suelo.

- Región intermedia: donde los niveles de humedad permanecen constantes. Esta región se presenta si el nivel freático es profundo.

En la zona de saturación se encuentra el agua subterránea propiamente dicha. Dentro de esta zona, también conocida como manto freático, todos los espacios porosos están llenos de agua. La parte inferior de esta zona saturada está compuesta por una capa impermeable la cual impide que el agua siga descendiendo.

1.1.4. Fuentes del agua subterránea

La mayor parte del agua subterránea proviene de la precipitación, pero también puede provenir de fuentes subterráneas. Entre estas fuentes se puede mencionar el agua presente en la roca durante su formación.

Asimismo, pero en menores cantidades, existe agua que se forma químicamente dentro del subsuelo, por lo tanto, nunca ha estado a la intemperie hasta que es traída a la superficie por rocas intrusivas, a esto se le denomina agua juvenil, también se le conoce como agua innata o agua fósil. Tanto el agua de formación como el agua juvenil con frecuencia contienen minerales indeseables.

El agua pluvial llega a formar parte del agua subterránea por infiltración y percolación de corrientes y lagos. La infiltración es el movimiento del agua a través de la superficie del suelo hacia el interior de la tierra, diferente de la percolación que es el movimiento del agua a través del suelo. La percolación directa es el proceso más efectivo en la recarga del agua subterránea donde los

suelos son permeables o donde el nivel freático está cerca de la superficie del terreno.

En sitios donde la precipitación anual es baja y el nivel freático está a varios metros de la superficie, se puede esperar poca o ninguna recarga. En estas áreas, la infiltración del agua de los ríos a través de suelos permeables es posiblemente la mayor fuente de recarga.

El movimiento de agua en la zona de aeración se da una vez que el agua está en contacto con el suelo; luego el agua desciende a través de los espacios grandes, mientras que los más pequeños toman agua por capilaridad. A medida que estos poros capilares se llenan de agua, la tasa de infiltración disminuye.

En suelos homogéneos, la infiltración disminuye gradualmente hasta que la zona de aeración es saturada; pero en la mayoría de los casos, el suelo es estratificado y las capas inferiores son menos permeables que las capas superficiales, dando como resultado una tasa de infiltración igual a la tasa de percolación del estrato menos permeable.

1.1.5. Factores condicionantes del agua subterránea

Existen varios factores que influyen en la infiltración del agua: condición de la superficie del suelo y su cubierta vegetal, propiedades del suelo como porosidad, permeabilidad y contenido de humedad presente en el suelo.

- Precipitación: es importante considerar la precipitación, si se toma en cuenta que la mayor fuente del agua subterránea. Existen dos aspectos importantes en la precipitación: cantidad y duración.

- Forma del terreno: el relieve da lugar a la formación de las cuencas hidrográficas, formando así la ruta que seguirá el agua en la superficie.
- Geología: la velocidad de movimiento depende de la estructura y composición geológica de las formaciones para que el agua pueda transitar por el subsuelo. Las propiedades más importantes son la porosidad y la permeabilidad.
- Vegetación: es un factor que influye en la infiltración y, por lo tanto, contribuye a la recarga del agua subterránea. Las raíces de las plantas y los animales en el suelo lo vuelven más poroso, volviéndolo más susceptible a la infiltración.

1.1.6. Importancia del agua subterránea

A nivel global, el agua subterránea representa unas veinte veces más que el total de las aguas superficiales de todos los continentes e islas, de ahí la importancia de esta agua como reserva y como recurso de agua dulce. Además, tiene un importante papel en la naturaleza. El efecto de la gran reserva de agua respecto al flujo anual es esencial para mantener el caudal de base de muchos ríos y la humedad del suelo en las riberas y áreas bajas.

El agua subterránea es de esencial importancia para nuestra civilización porque supone la mayor reserva de agua potable en las regiones habitadas por los seres humanos. Puede aparecer en la superficie en forma de manantiales o puede ser extraída mediante pozos. En tiempos de sequía puede servir para mantener el flujo de agua superficial, pero incluso cuando no hay escasez es preferible utilizar agua subterránea porque no tiende a estar contaminada por residuos o microorganismos.

Considerando la hidrósfera entera, o toda el agua de la tierra, solo alrededor de las seis décimas partes del uno por ciento aparece bajo tierra; no obstante, este pequeño porcentaje, almacenado en la roca y los sedimentos situados debajo de la superficie terrestre, constituye una enorme cantidad. Cuando se excluyen los océanos y se consideran solo las fuentes de agua dulce, se pone más de manifiesto la importancia de las aguas subterráneas.

En la tabla I se muestra la distribución de agua dulce calculada para la hidrósfera. Por supuesto, el mayor volumen aparece en forma de hielo glaciar. El segundo en la clasificación es el agua subterránea que constituye más del 14 % del total. Sin embargo, cuando se excluye el hielo y se considera solo el agua líquida, más del 94 % de toda el agua dulce es agua subterránea. No cabe duda de que el agua subterránea representa el mayor depósito de agua dulce que resulta fácilmente asequible a los seres humanos. Su valor en términos de economía y de bienestar humano es incalculable.

Desde un punto de vista geológico, el agua subterránea es importante como agente erosivo. La acción disolvente del agua subterránea va minando lentamente las rocas solubles como la caliza, permitiendo la formación de depresiones superficiales denominadas dolinas, así como la creación de cavernas subterráneas. El agua subterránea es también un compensador del flujo de escorrentía. Gran parte del agua que fluye en los ríos no procede directamente de la lluvia y de la fusión de la nieve. Más bien, un gran porcentaje de la precipitación se infiltra y luego se desplaza lentamente bajo tierra hasta las corrientes encauzadas. El agua subterránea es, pues, una forma de almacenamiento que mantiene las corrientes fluviales durante los períodos de ausencia de precipitaciones.

La información de la tabla I refuerza este dato. La tasa de intercambio del agua subterránea es de 280 años. Esta cifra representa el tiempo necesario para sustituir el agua ahora almacenada bajo tierra. Por el contrario, la tasa de intercambio para los ríos es tan solo ligeramente superior a 11 días: si se cortara el suministro de agua subterránea a un río y no lloviera, se secaría en tan solo 11 días. Por tanto, el agua que fluye en un río durante un período seco constituye lluvia que cayó en algún momento anterior y se almacenó bajo tierra.

Tabla I. **Agua dulce de la hidrósfera**

| Partes de la hidrósfera | Volumen de agua dulce (km ³) | Porción de volumen total de agua dulce (%) | Tasa de intercambio del agua |
|-------------------------------|--|--|------------------------------|
| Casquetes polares y glaciares | 24 000 000 | 84,945 | 8000 años |
| Aguas subterráneas | 4 000 000 | 14,158 | 280 años |
| Lagos y embalse | 155 000 | 0,549 | 7 años |
| Humedad del suelo | 83 000 | 0,294 | 1 año |
| Vapor de agua en la atmosfera | 14 000 | 0,049 | 9,9 días |
| Agua de los ríos | 1 200 | 0,004 | 11,3 días |
| Total | 28 253 200 | 100,000 | |

Fuente: *Agua dulce de la hidrosfera*.

http://www.rutageologica.cl/index.php?option=com_content&view=article&id=380&Itemid=755&showall=1. Consulta: 22 de abril de 2015.

1.1.7. **Sobreexplotación del agua subterránea**

La sobreexplotación de un acuífero se puede definir como la extracción de agua del mismo en una cantidad superior a la correspondiente a su alimentación, todo ello referido a un periodo de tiempo suficientemente largo como para diferenciar las consecuencias similares que tendrían periodos igualmente secos. En consecuencia, el efecto más inmediato de la

sobreexplotación sería el descenso continuado de los niveles piezométricos, que se acompaña normalmente del agotamiento de las urgencias.

Algunas de las consecuencias negativas de la sobreexplotación se exponen a continuación.

- Consecuencias directas: descenso de los niveles piezométricos que, como se ha dicho en la definición, sería el aspecto primordial caracterizador de la sobreexplotación; compactación inducida del terreno, con la consiguiente pérdida de capacidad de almacenamiento, especialmente visible en los acuíferos detríticos ligados a materiales recientes y en los acuíferos confinados; compartimentación de acuíferos; aumento de los costes de explotación como consecuencia del aumento de la altura de elevación; deterioro de la calidad del agua; abandono de pozos; modificaciones inducidas en los regímenes de los ríos relacionados con los acuíferos sobreexplotados; afección o secado de zonas húmedas; problemas legales por afección a los derechos de terceras personas.
- Consecuencias indirectas: problemas en las redes de evacuación de aguas residuales de ciudades afectadas por la subsidencia ligada a la sobreexplotación; rotura de canalizaciones, conducciones y vías de comunicación en dichas áreas; salinización de suelos; avance de la desertización; inducción de hundimientos y colapsos en áreas kársticas y detríticas; modificaciones en la vegetación; variaciones en la distribución de la línea de costas en áreas litorales; cambio en las propiedades físicas del acuífero, inducidos por la intrusión marina en acuíferos kársticos costeros.

1.1.8. Contaminación del agua subterránea

El agua subterránea tiende a ser dulce y potable, pues la circulación subterránea tiende a depurar el agua de partículas y microorganismos contaminantes. Sin embargo, en ocasiones estos llegan al acuífero por la actividad humana, como la construcción de fosas sépticas o la agricultura. Por otro lado, la contaminación puede deberse a factores naturales, si los acuíferos son demasiado ricos en sales disueltas o por la erosión natural de ciertas formaciones rocosas.

La contaminación del agua subterránea puede permanecer por largos períodos de tiempo. Esto se debe a la baja tasa de renovación y largo tiempo de residencia, ya que al agua subterránea no se le puede aplicar fácilmente procesos artificiales de depuración como los que se pueden aplicar a los depósitos superficiales, por su difícil acceso. En caso de zonas locales de contaminación se pueden realizar remediación de acuíferos mediante la técnica de bombeo y tratamiento que consiste en: extraer agua del acuífero, tratarla químicamente e inyectarla de vuelta al acuífero.

Entre las causas antropogénicas (originadas por los seres humanos), debidas a la contaminación, están la infiltración de nitratos y otros abonos químicos muy solubles usados en la agricultura. Estos suelen ser una causa grave de contaminación de los suministros en llanuras de elevada productividad agrícola y densa población. Otras fuentes de contaminantes son las descargas de fábricas, los productos agrícolas y los químicos utilizados por las personas en sus hogares y patios. Los contaminantes también pueden provenir de tanques de almacenamiento de agua, pozos sépticos, lugares con desperdicios peligrosos y vertederos. Actualmente, los contaminantes del agua subterránea

que más preocupan son los compuestos orgánicos industriales como disolventes, pesticidas, pinturas, barnices o los combustibles como la gasolina.

En cuanto a los abonos químicos minerales, los nitratos son los que generan mayor preocupación. Estos se originan de diferentes fuentes: la aplicación de fertilizantes, los pozos sépticos que no están funcionando bien, las lagunas de retención de desperdicios sólidos no impermeabilizadas por debajo y la infiltración de aguas residuales o tratadas. El envenenamiento con nitrato es peligroso en los niños. En altos niveles pueden limitar la capacidad de la sangre para transportar oxígeno, causando asfixia en bebés. En el tubo digestivo el nitrato se reduce produciendo nitritos que son cancerígenos.

1.1.9. Disminución del nivel freático como consecuencia de impermeabilización de calles y avenidas

El crecimiento de ciudades es uno de los procesos que altera las condiciones naturales de una cuenca, modificando su ciclo hidrológico, impermeabilizando y compactando el suelo, cambiando los recorridos naturales de drenaje y aumentando la contaminación del agua. La población en las ciudades ha aumentado, volviendo evidente los problemas originados por la alteración del medio ambiente y su hidrología. En las ciudades, las aguas pluviales se han transformado en un problema, provocando daños por inundaciones.

Al observar una cuenca urbanizada se prevé que en ellas escurrirá un mayor volumen de agua, disminuyendo la infiltración y la humedad en el suelo, aumentando de esta manera los caudales máximos, transportando así mayor cantidad de contaminantes.

Uno de los aspectos importantes es el incremento de la magnitud del caudal provocada por la precipitación y su frecuencia. Por un lado, esto se debe a que el nuevo uso del suelo aumenta la cantidad de áreas impermeables, incrementando la proporción que escurre de las aguas de lluvia. Por otro lado, la nueva infraestructura de la urbanización modifica el recorrido de la escorrentía conduciéndola a concentrarse aumentando su velocidad.

Toda esta impermeabilización urbana provoca que las aguas pluviales sean evacuadas a medios receptores, como ríos o lagos, lo que disminuye la infiltración en áreas que antes eran puntos de recarga del agua subterránea. La disminución en infiltración se refleja en disminución del nivel freático, siendo un problema dado a que el agua subterránea es una fuente importante de suministro de agua para la población.

1.1.10. Escorrentía derivada de la impermeabilización de calles y avenidas, y sus consecuencias

La urbanización en las cuencas ha provocado que el uso del suelo cambie de uno natural por uno urbano, modificando así la impermeabilización creando un aumento de la escorrentía superficial, especialmente cuando se presentan grandes precipitaciones. El incremento de la impermeabilidad reduce el tiempo de concentración de la escorrentía, aumentando el volumen de descarga inmediatamente después de comenzar la precipitación en una cuenca.

Para solucionar el problema de las altas escorrentías, se evacua las aguas pluviales por medio de desagües, pero eso solo traslada el problema, generando caudales cada vez mayores y contribuyendo a un mayor impacto de las aguas pluviales urbanas sobre los medios receptores. En los casos en que las áreas urbanas crecen hacia sectores que ya cuentan con un sistema de

drenaje, estos van quedando obsoletos o son incapaces de operar con los mayores caudales que generan las nuevas zonas impermeabilizadas. Entonces, a medida que las ciudades crecen, la contaminación de las aguas pluviales y aguas negras incrementan y dado que generalmente su tratamiento es insuficiente o inexistente, se generan impactos negativos en el ambiente.

Es importante mencionar que el aumento de escorrentía provoca la elevación de erosión y transporte de sedimentos, lo que significa incremento de sólidos en inundaciones. El problema es que ahora, el agua pluvial no solo acarrea contaminantes obtenidos en la atmósfera sino que al escurrir arrastra basura y erosiona los suelos. Las actividades de la ciudad agregan otros contaminantes como residuos de los medios de transporte (aceites, combustibles, entre otros) y aumentan la concentración de otros.

1.2. Clasificación y diseños de pavimentos

Se llama pavimento al conjunto de capas de material seleccionado que reciben en forma directa las cargas del tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada, proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe funcionar eficientemente. Las condiciones necesarias para un adecuado funcionamiento son las siguientes: anchura, trazo horizontal y vertical, resistencia adecuada a las cargas para evitar las fallas y los agrietamientos, además de una adherencia adecuada entre el vehículo y el pavimento aun en condiciones húmedas. Deberá presentar una resistencia adecuada a los esfuerzos destructivos del tránsito, de la intemperie y del agua. Debe tener una adecuada visibilidad y contar con un paisaje agradable para no provocar fatigas.

1.2.1. Elementos estructurales que integran un pavimento

Los elementos que integran un pavimento son: base, subbase y subrasante.

1.2.1.1. Base

La base es la capa situada debajo de la carpeta (pavimento flexible). Su función es eminentemente ser resistente, absorbiendo la mayor parte de los esfuerzos verticales y su rigidez o su resistencia a la deformación bajo las sollicitaciones repetidas del tránsito suele corresponder a la intensidad del tránsito pesado. Así, para tránsito medio y ligero se emplean las tradicionales bases granulares, pero para tránsito pesado se emplean ya materiales granulares tratados con un cementante.

1.2.1.2. Subbase

En los pavimentos flexibles, la subbase es la capa situada debajo de la base y sobre la capa subrasante, debe ser un elemento que brinde un apoyo uniforme y permanente al pavimento.

Cuando se trate de un pavimento rígido, esta capa se ubica inmediatamente abajo de las losas de hormigón, y puede ser no necesaria cuando la capa subrasante es de elevada capacidad de soporte.

Su función es proporcionar a la base un cimiento uniforme y constituir una adecuada plataforma de trabajo para su colocación y compactación. Debe ser un elemento permeable para que cumpla también una acción drenante, para lo

cual es imprescindible que los materiales usados carezcan de finos y en todo caso suele ser una capa de transición necesaria.

Esta capa no debe ser sujeta al fenómeno de bombeo y que sirva como plataforma de trabajo y superficie de rodamiento para las máquinas pavimentadoras. En los casos que el tránsito es ligero, principalmente en vehículos pesados, puede prescindirse de esta capa y apoyar las losas directamente sobre la capa subrasante.

Se emplean normalmente subbases granulares constituidas por materiales cribados o de trituración parcial, suelos estabilizados con cemento, entre otros.

1.2.1.3. Subrasante

Esta capa debe ser capaz de resistir los esfuerzos que le son transmitidos por el pavimento. Interviene en el diseño del espesor de las capas del pavimento e influye en el comportamiento del pavimento. Proporciona en nivel necesario para la subrasante y protege al pavimento conservando su integridad en todo momento, aún en condiciones severas de humedad, proporcionando condiciones de apoyo uniformes y permanentes.

Con respecto a los materiales que constituyen la capa subrasante, necesariamente deben utilizarse suelos compactables y obtener por lo menos el 95 % de su grado de compactación.

1.2.2. Tipos de pavimentos

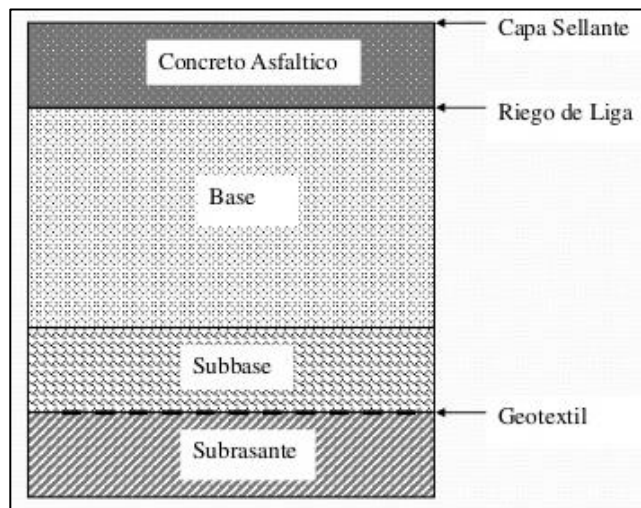
Los tipos de pavimento son flexible y rígido.

1.2.2.1. Pavimento flexible

Una carpeta constituida por una mezcla asfáltica proporciona la superficie de rodamiento que soporta directamente las solicitaciones del tránsito y aporta las características funcionales. Estructuralmente, la carpeta absorbe los esfuerzos horizontales y parte de los verticales, ya que las cargas de los vehículos se distribuyen hacia las capas inferiores por medio de las características de fricción y cohesión de las partículas de los materiales y la carpeta asfáltica se pliega a pequeñas deformaciones de las capas inferiores sin que su estructura se rompa.

Las capas que forman un pavimento flexible son carpeta asfáltica, base y subbase, las cuales se construyen sobre la capa subrasante.

Figura 3. Estructura de un pavimento flexible



Fuente: SAUCEDO, Vidal Artemio. *Concreto hidráulico permeable, una alternativa para la recarga de los mantos acuíferos del valle de México*. p. 16.

- Ventajas
 - Su construcción inicial resulta más económica
 - Tiene un periodo de vida de entre 10 y 15 años

- Desventajas
 - Para cumplir con su vida útil requiere de un mantenimiento constante.
 - Las cargas pesadas producen roderas y dislocamientos en el asfalto y son un peligro potencial para los usuarios. Esto constituye un serio problema en intersecciones, casetas de cobro de peaje, donde el tráfico está constantemente frenando y arrancando.
 - Las roderas llenas de agua de lluvia en estas zonas pueden causar deslizamientos, pérdida de control del vehículo y, por lo tanto, dar lugar a accidentes y a lesiones personales.
 - Las roderas, dislocamientos, agrietamientos por temperatura, agrietamientos tipo piel de cocodrilo (fatiga) y el intemperismo, implican un tratamiento frecuente a base de selladores de grietas y de recubrimientos superficiales.
 - Las distancias de frenado para superficies de hormigón son mucho mayores que para las superficies de asfalto sobre todo cuando el asfalto está húmedo y con huellas.

- Una vez que se han formado huellas en un pavimento de asfalto, la experiencia ha demostrado que la colocación de una sobrecarpeta de asfalto sobre ese pavimento no evitará que se vuelva a presentar.
- Las huellas reaparecen ante la incapacidad de lograr una compactación adecuada en las huellas que dejan las ruedas y/o ante la imposibilidad del asfalto de resistir las presiones actuales de los neumáticos y los volúmenes de tráfico de la actualidad.

1.2.2.2. Pavimento rígido

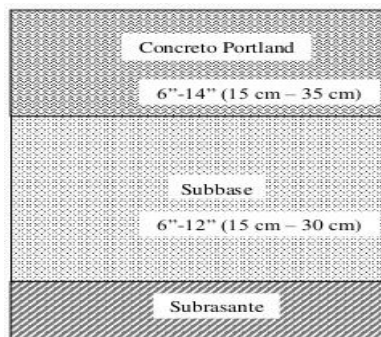
La superficie de rodamiento de un pavimento rígido es proporcionada por losas de hormigón hidráulico las cuales distribuyen las cargas de los vehículos hacia las capas inferiores por medio de toda la superficie de la losa y de las adyacentes que trabajan en conjunto con la que recibe directamente las cargas. Por su rigidez, distribuyen las cargas verticales sobre un área grande y con presiones muy reducidas. Salvo en bordes de losa y juntas sin pasajuntas, las deflexiones o deformaciones elásticas son casi inapreciables.

Este tipo de pavimento no puede plegarse a las deformaciones de las capas inferiores sin que se presente la falla estructural. Este punto de vista es el que influye en los sistemas de cálculos de pavimentos rígidos, sistemas que combinan el espesor y la resistencia de hormigón de las losas para una carga y suelos dados.

Aunque en teoría las losas de hormigón hidráulico pueden colocarse en forma directa sobre la subrasante, es necesario construir una capa de subbase para evitar que los finos sean bombeados hacia la superficie de rodamiento al

pasar los vehículos lo cual puede provocar fallas de esquina o de orilla en la losa. La sección transversal de un pavimento rígido está constituida por la losa de hormigón hidráulico y la subbase que se construye sobre la capa subrasante.

Figura 4. **Estructura de pavimento rígido**



Fuente: SAUCEDO, Vidal Artemio. *Concreto hidráulico permeable, una alternativa para la recarga de los mantos acuíferos del valle de México*. p. 17.

- **Ventajas**
 - El hormigón refleja la luz lo que aumenta la visibilidad y puede disminuir los costos de iluminación en las calles hasta un 30 % en cantidad de luminarias y consumo de energía.
 - El hormigón no se ahueca nunca, por lo tanto, no hay acumulación de agua y, por ende, tampoco se produce hidroplaneo.
 - Es fácil darles rugosidad a los pavimentos de hormigón durante su construcción para generar una superficie que provea de mayor adherencia.

- La rigidez del hormigón favorece que la superficie de rodado mantenga la planeidad.
- La lisura es el factor más importante para los usuarios. Actualmente, los pavimentos de hormigón se pueden construir más suaves que los de asfalto.
- A diferencia del asfalto, el hormigón puede soportar cargas de tráfico pesadas sin que se produzca ahuellamiento, deformaciones o lavado de áridos.
- La superficie dura del hormigón, hace más fácil el rodado de los neumáticos. Estudios han demostrado que aumenta la eficiencia de combustible de los vehículos.
- El hormigón se endurece a medida que pasa el tiempo. Después del primer mes, el hormigón continúa lentamente ganando 40 % de resistencia durante su vida.
- El hormigón tiene una vida promedio de 30 años.
- Los pavimentos de hormigón frecuentemente sobrepasan la vida de diseño y las cargas de tráfico.
- Los pavimentos de hormigón se pueden diseñar para que duren desde 10 hasta 50 años, dependiendo de las necesidades.
- Las técnicas de restauración de pavimentos pueden extender su vida hasta tres veces la de diseño.

- Los pavimentos de hormigón tienen un mayor valor a largo plazo debido a su mayor expectativa de vida con los mínimos requerimientos de mantención.
- La durabilidad del hormigón disminuye la necesidad de reparación y mantenciones anuales, en comparación con pavimentos asfálticos.
- Los pavimentos de hormigón se pueden construir y dar al tránsito en tiempos reducidos, incluso de hasta 12 horas.
- Desventajas
 - Tiene un costo inicial mucho más elevado que el pavimento flexible.
 - Se deben tener cuidado en el diseño

1.2.3. Métodos de diseño de pavimentos rígidos

A continuación, se presentan los métodos de diseño de pavimentos rígidos.

1.2.3.1. Método de diseño AASHTO

Es uno de los métodos más utilizados a nivel internacional para el diseño de pavimentos de concreto hidráulico.

El procedimiento de diseño normal es suponer un espesor de pavimento e iniciar a realizar tanteos; con el espesor supuesto calcular los ejes equivalentes y posteriormente evaluar todos los factores adicionales de diseño, si se cumple el equilibrio en la ecuación el espesor supuesto es el resultado del problema, en caso de no haber equilibrio en la ecuación, se deberá recalculer tomando como base el valor anterior. La convergencia del método es muy rápida.

- Modelo matemático

La ecuación general a la que llegó AASHTO para el diseño de pavimentos rígidos, es la siguiente.

$$T_d = \left[\frac{H + 2,54}{2,588} \right]^{7,35} * 10^\alpha * \beta^{(4,22 - 0,32 * P_f)} \quad [Ec. 1]$$

$$\alpha = \frac{\log\left(\frac{\Delta P}{3}\right)}{\left[1 + \left(\frac{18,078}{H + 2,54}\right)\right]^{8,45}} \quad [Ec. 2]$$

$$\beta = \left(\frac{Rd * Cd}{15,185 * J} \right) * \left[\frac{H^{0,75} - 2,278}{H^{0,75} - 46,79 * \left(\frac{Kd}{E}\right)^{0,25}} \right] \quad [Ec. 3]$$

Donde:

- Td: tránsito de diseño (ejes equivalentes de 8,2 Ton)
- H: espesor de la losa en cm
- Rd: resistencia a flexión en kg/cm²
- Cd: coeficiente de drenaje
- J: coeficiente de transferencia de carga

- Kd: módulo de reacción de diseño en kg/cm^3
 - E: módulo de elasticidad del concreto en kg/cm^2
 - ΔP : pérdida de serviciabilidad: $P_i - P_f$
 - P_i : índice de serviciabilidad inicial.
 - P_f : índice de serviciabilidad final
- Variables de diseño de pavimentos rígidos
 - Espesor (H)

El espesor del pavimento de concreto es la variable que se pretende determinar al realizar un diseño, el resultado del espesor se ve afectado por todas las demás variables que intervienen en los cálculos. Es importante especificar lo que se diseña ya que a partir de espesores regulares una pequeña variación en el espesor puede significar una variación importante en la vida útil.

- Serviciabilidad (P)

El procedimiento de diseño AASHTO predice el porcentaje de pérdida de serviciabilidad (ΔP) para varios niveles de tráfico y cargas de ejes. Entre mayor sea el ΔP , mayor será la capacidad de carga del pavimento antes de fallar.

La serviciabilidad se define como la habilidad del pavimento de servir al tipo de tráfico (autos y camiones) que circulan en la vía; se mide en una escala del 0 al 5 donde 0 (cero) significa una calificación para pavimento intransitable y 5 (cinco) para un pavimento excelente.

La serviciabilidad es una medida subjetiva de la calificación del pavimento, sin embargo, la tendencia es poder definirla con parámetros medibles: índice de

perfil, índice de rugosidad internacional, coeficiente de fricción, distancias de frenado, visibilidad, entre otros.

- Serviciabilidad inicial (Pi): es la condición que tiene un pavimento inmediatamente después de su construcción. Los valores recomendados por AASHTO para este parámetro son:
 - Para pavimento de concreto = 4,5
 - Para pavimento de asfalto = 4,2
- Serviciabilidad final (Pf): la serviciabilidad final tiene que ver con la calificación que se espera tenga el pavimento al final de su vida útil. Los valores recomendados de serviciabilidad final Pt son:
 - Para autopistas 2,5
 - Para carreteras 2,0
 - Para zonas industriales 1,8
 - Pavimentos urbanos principales 1,8
 - Pavimentos urbanos secundarios 1,5
- Tránsito de diseño (Td)

El tránsito de diseño es una de las variables más significativas del diseño de pavimentos y, sin embargo, es una de las que más incertidumbre presenta al momento de estimarse. Es importante hacer notar que se debe contar con la información más precisa posible del tráfico para el diseño ya que de no ser así se pueden tener diseños inseguros o con un grado importante de sobrediseño.

La metodología AASHTO considera la vida útil de un pavimento relacionada con el número de repeticiones de carga que podrá soportar el pavimento antes de llegar a las condiciones de servicio final predeterminadas para el camino. El método AASHTO utiliza en su formulación el número de repeticiones esperadas de carga de ejes equivalentes, es decir, que antes de entrar a las fórmulas de diseño, se deben transformar los ejes de pesos normales de los vehículos que circularán por el camino; en ejes sencillos equivalentes de 18 kips (8,2 Ton) también conocidos como ESAL's.

En el cálculo de esta variable intervienen varios factores: el factor de crecimiento del tráfico (depende de la tasa de crecimiento y de los años de vida útil), factor de sentido (1 o 2), factor de carril (0,5 a 1,0) y, finalmente el factor de equivalencia del tráfico (depende del espesor del pavimento, de la carga del eje, del tipo de eje y de la serviciabilidad final).

- Transferencia de cargas

La transferencia de carga es la capacidad que tiene una losa del pavimento; de transmitir fuerzas cortantes con sus losas adyacentes con el objeto de minimizar las deformaciones y los esfuerzos en la estructura del pavimento, mientras mejor sea la transferencia de cargas mejor será el comportamiento de las losas del pavimento.

La efectividad de la transferencia de carga entre losas adyacentes depende de varios factores:

- Cantidad de tráfico
- Utilización de pasajuntas
- Soporte lateral de las losas

La utilización de pasajuntas es la manera más conveniente de lograr la efectividad en la transferencia de cargas.

- Pasajuntas: barra de acero redondo liso $f_y = 4\ 200\ \text{kg/cm}^2$ la cual no se debe de adherir al concreto permitiendo el libre movimiento de losas longitudinalmente, pero si debe transferir verticalmente parte de la carga aplicada en una losa a la adyacente. Se colocan perfectamente alineadas a la mitad del espesor de la losa. El diámetro, longitud y separación de las pasajuntas está en función del espesor de las losas principalmente. Es importante considerar su empleo ya que de no hacerlo puede presentarse el efecto de bombeo que se visualiza como un desnivel o escalonamiento entre las losas y una deformación en la base que se traduce en agrietamiento en las esquinas de las losas principalmente.
 - Propiedades del concreto

Son dos las propiedades del concreto que influyen en el diseño de un pavimento de concreto y en su comportamiento a lo largo de su vida útil:

- Resistencia a la tensión por flexión ($S'c$) o módulo de ruptura (MR)
 - Módulo de elasticidad del concreto (E_c)
- Módulo de ruptura (MR): debido a que los pavimentos de concreto trabajan principalmente a flexión es recomendable que su especificación de resistencia sea acorde con ello; por eso el diseño considera la resistencia del concreto trabajando a flexión, que se le conoce como

resistencia a la flexión por tensión ($S'c$) o módulo de ruptura (MR) normalmente especificada a los 28 días.

Figura 5. **Determinación del módulo de ruptura según norma ASTM C78**



Fuente: Cemex Concretos. *Pavimentos de concretos Cemex*. p. 49.

El módulo de ruptura se mide mediante ensayos de vigas de concreto aplicándoles cargas en los tercios de su claro de apoyo. Esta prueba está normalizada por la ASTM C78.

- Módulo de elasticidad: el módulo de elasticidad del concreto está íntimamente relacionado con su módulo de ruptura y se determina mediante la norma ASTM C469. Existen varios criterios con los que se puede estimar el módulo de elasticidad a partir del módulo de ruptura. Los dos más utilizados son:

$$E_c = 6\,750 * MR \quad [\text{Ec. 1}]$$

$$E_c = 26\,454 * MR^{0.77} \quad [\text{Ec. 2}]$$

Donde:

- Ec: módulo de elasticidad (psi)
- MR: módulo de ruptura o resistencia a flexión (psi)

- Requisitos para la clase y resistencia del concreto: según lo estipulado en 503 (f) de las especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes de la Dirección General de Caminos, el concreto de cemento hidráulico para pavimentos debe ser como mínimo clase 24,5 (3 500) con una resistencia a compresión AASHTO T 22 (ASTM C 39), promedio mínimo de 24,5 Mpa (3 500 psi) y una resistencia a la flexión AASHTO T 97 (ASTM C 78), promedio mínimo de 3,8 Mpa (550 psi), determinadas sobre especímenes preparados según AASHTO T 126 (ASTM C 192) y T 23 (ASTM C 31), ensayados a los 28 días.
 - Resistencia de la subrasante

La resistencia de la subrasante es considerada dentro del método por medio del módulo de reacción del suelo K_d , que se puede obtener directamente mediante la prueba de placa.

El módulo de reacción del suelo de la prueba de placa corresponde a la capacidad portante que tiene el terreno natural (terreno natural y terraplén, si lo hay, y se puede incrementar al tomar la contribución de la subbase) donde se soportará el cuerpo del pavimento.

Con base en un gran número de muestras y estudios se han podido desarrollar algunos valores estimados del módulo de reacción del suelo en función a diferentes propiedades y correlaciones con el SUCS y VRS.

- Drenaje

En cualquier tipo de pavimento, el drenaje es un factor determinante en el comportamiento de la estructura del pavimento a lo largo de su vida útil y, por lo tanto, lo es también en su diseño. Es muy importante evitar que exista presencia de agua en la estructura de soporte, dado que en caso de presentarse esta situación afectará en gran medida la respuesta estructural del pavimento. Los valores recomendados para el coeficiente de drenaje (Cd) deberán estar entre 1,0 y 1,10.

- Confiabilidad

La confiabilidad está definida como la probabilidad de que un pavimento desarrolle su función durante su vida útil en condiciones adecuadas para su operación. Los valores de confiabilidad pueden ser entre 0,50 y 1,00.

1.2.3.2. Método de la Asociación del Cemento Portland (PCA)

El método considera dos criterios de diseño:

- **Fatiga:** el análisis por fatiga (para controlar el agrietamiento por fatiga) influye principalmente en el diseño de pavimentos de tráfico ligero (calles residenciales y caminos secundarios independientemente de si las juntas

tienen o no pasajuntas) y pavimentos con tráfico mediano con pasajuntas.

- Erosión: el análisis por erosión (el responsable de controlar la erosión del terreno de soporte, bombeo y diferencia de elevación de las juntas) influye principalmente en el diseño de pavimentos con tráfico mediano a pesado con transferencia de carga por segregación de agregados (sin pasajuntas) y pavimentos de tráfico pesado con pasajuntas.

Los factores de diseño de este método son los siguientes:

- Resistencia a la flexión del concreto

La consideración de la resistencia a la flexión del concreto es aplicable en el procedimiento de diseño para el criterio de fatiga que controla el agrietamiento del pavimento bajo la repetición de cargas. La resistencia a la flexión del concreto es determinada por la prueba del Módulo de Ruptura, norma ASTM C 78.

- Terreno de apoyo o base

El terreno de apoyo está definido en términos del módulo de reacción de la subrasante de Westergaard (k). Los valores de k son expresados como libras por pulgada cuadrada por pulgada (psi / in) o más comúnmente, por libras por pulgada cúbica (pci).

- Período de diseño

El período de diseño seleccionado afecta el espesor de diseño ya que determina por cuántos años y, por ende, cuántos camiones deberá servir el pavimento.

- Número de repeticiones esperadas para cada eje

Toda la información referente al tráfico termina siendo empleada para conocer el número de repeticiones esperadas durante todo el período de diseño de cada tipo de eje. Para poder conocer estos valores se tendrán que conocer varios factores referentes al tránsito: el tránsito promedio diario anual (TPDA), el porcentaje que representa cada tipo de eje en el TPDA, el factor de crecimiento del tráfico, el factor de sentido, el factor de carril y el período de diseño. Se calcula con la siguiente fórmula:

$$Re = TPDA * \%Te * Fs * Fc * Pd * FCA * 365 \quad [Ec. 3]$$

Donde:

- TPDA: tránsito promedio diario anual. Es importante que se especifique la composición de este tráfico, es decir que se detalle el tráfico por tipo de vehículo. El método de diseño de la PCA recomienda que se considere únicamente el tráfico pesado, es decir que se desprece todo el tráfico ligero como automóviles y pick-ups de 4 llantas.
- FCA: factor de crecimiento anual. Es el factor que sirve para determinar el crecimiento del tráfico para un periodo conocido de años. Para conocer el factor de crecimiento anual se requiere

únicamente del periodo de diseño en años y de la tasa de crecimiento anual.

- FS: factor de sentido. Este factor se emplea para diferenciar las vialidades de un sentido de las de doble sentido, de manera que para vialidades en doble sentido se utiliza un factor de sentido de 0.5 y para vialidades en un solo sentido un factor de 1.0.
 - FC: factor de carril. El factor de carril determina el porcentaje de vehículos que circulan por el carril de la derecha, que es el carril con más tráfico.
 - % Te: % del TPDA para cada tipo de eje.
 - Pd: período de diseño
 - 365: días de un año.
- Factor de seguridad de carga

Una vez que se conoce la distribución de carga por eje, es decir, ya que se conoce cuántas repeticiones se tendrán para cada tipo y peso de eje, se utiliza el factor de seguridad de carga para multiplicarse por las cargas por eje. Los factores de seguridad de carga pueden tomar valores entre 1,0 y 1,3 dependiendo de volúmenes de tráfico pesado.

Una ventaja que se debe reconocer en el método de PCA es que toma el tráfico real que estima circulará sobre el pavimento, sin convertirlo en ejes sencillos equivalentes.

1.2.3.3. Método del catálogo español

Varios países europeos han desarrollado catálogos de estructuras de pavimentos, en los que en lugar de variar de forma continua los espesores en función del tránsito de diseño, se dividen en una serie de intervalos, a cada uno de los cuales se asigna un espesor fijo de cada una de las capas que componen el pavimento, con independencia del valor del tránsito dentro de dicho intervalo.

El catálogo español es con base en tablas para diseño; la versión vigente está en la Instrucción 6.1 y 2-IC Secciones de firme (2003), aprobada en Boletín Oficial del Estado, número 297 de 12 diciembre de 2003, referencia B0E-A-2003-22787.

Considera que el agua es desalojada rápidamente de la estructura de pavimentos por lo que no considera el aspecto climático.

Solo considera el tráfico pesado, descarta el daño que pueden hacer los vehículos ligeros. IMDp similar al TDPA sin los ligeros.

- Carril de proyecto: aquel que tenga la carga vehicular mayor.
- Metodología: se obtiene el IMDp (vehículos pesados por día); categorías de tránsito pesado; base de explanada (subyacente, terraplén): en función del CBR; explanada (subrasante) con Ev2; se obtiene la opción 1: sección de firme con T y E; se analizan varias opciones y se elige la más económica.

1.3. Concreto hidráulico permeable

El concreto permeable es fabricado de cemento, agregado grueso, agua, aditivos y poco o ningún agregado fino, lo cual permite el paso de agua a través de este. Es decir, los vacíos creados en el concreto por la falta de agregado fino permiten que el agua pase a través de este y al mismo tiempo este concreto funciona como filtro al retener los contaminantes sólidos, dando lugar a que estos puedan ser recolectados fácilmente durante su limpieza y mantenimiento.

Cuando se usa concreto permeable, el agua de lluvia se filtra al suelo, recargando el nivel freático en lugar de fluir en forma de escorrentía superficial.

Es importante señalar que al remover el concreto permeable que se previene parte de los contaminantes sólidos entren a los colectores de agua de lluvia. Sin embargo, el concreto permeable tiene los siguientes inconvenientes: requieren mayor mantenimiento que los pavimentos regulares o concretos y los agregados que están entre las juntas pueden ser propensos a irse con el agua.

1.3.1. Materiales

A continuación, se describen los materiales que se utilizan en el concreto.

1.3.1.1. Cemento

El cemento es un aglomerante hidráulico, es decir, que reacciona y fragua en presencia de agua. Al ser mezclado con piedrín, arena y agua, crea una mezcla denominada concreto. En términos generales, el cemento es un polvo muy fino que puede ser grisáceo o blanco. Desde el punto de vista químico, se trata de una mezcla de silicatos y aluminatos de calcio obtenidos a través del

cocido de calcáreo, arcilla y arena. El material obtenido molido muy finamente, una vez que se mezcla con agua se hidrata y se solidifica progresivamente.

Según el reporte ACI 522R-10, el cemento que se debe utilizar para la mezcla del concreto permeable es el cemento Pórtland que cumpla con las especificaciones de la norma ASTM C 150, C 595 o C 1157. La cantidad de material cementante que se le agregue al concreto permeable afectará directamente la resistencia a compresión y el contenido de vacíos. Si no se le agrega el suficiente cemento, puede afectar la cohesión de la pasta con el agregado y reduciría la resistencia a compresión. Así mismo, si se le agrega demasiado cemento, este puede llenar los vacíos disminuyendo así la porosidad. La cantidad de material cementante óptimo dependerá del tamaño y granulometría del agregado.

1.3.1.2. Agregado grueso

Está formado fundamentalmente por gravas, gravas trituradas, piedra triturada, escoria de hornos de explosión, concreto de cemento hidráulico triturado o una combinación de lo anterior y se considera como el material retenido a partir del tamiz núm. 4.

Para la elaboración del concreto permeable, la graduación de los agregados debe ser entre 3/4" y 3/8". Estos agregados no deben tener forma alargada (aplanada) y se prefiere que sean livianos. Deben estar libres de cualquier recubrimiento: polvo, arcilla u otro elemento absorbente, que pueda afectar la cohesión entre pasta-agregado y/o la hidratación del cemento. El agregado debe cumplir con las especificaciones de las normas ASTM C 448 y C 33 / C 33M.

1.3.1.3. Agregado fino

El agregado fino para un concreto se determina como el material que pasa por el tamiz núm. 4 hasta el tamiz núm.100 y se clasifica en arena natural, de canto rodado o de río, manufacturada o combinación de ambas. Deberá estar graduado dentro de los límites que se establecen en la norma ASTM C 33.

La forma y textura del agregado grueso también influye en el agregado fino. Las partículas alargadas, aplanadas o de formas cúbicas y textura rugosa requieren una mayor cantidad de arena, agua y pasta en una mezcla, debido a la fricción que generan entre estas es mayor en comparación con los agregados de canto rodado y de textura lisa. El uso del agregado fino en el concreto incrementa su resistencia a compresión, manejabilidad y densidad; sin embargo, la adición de este puede afectar el espacio entre los poros influyendo en el flujo del agua a través del concreto por lo que su uso debe ser limitado.

1.3.1.4. Agua

El agua en el concreto es el elemento que hidrata las partículas de cemento y hace que se vuelvan adhesivas. Así mismo, influye en la trabajabilidad del concreto. El agua suele representar entre el 10 al 25 % del volumen del concreto; además, se debe calificar su calidad, ya que existen sustancias que pueden resultar perjudiciales para el concreto. El agua que se utiliza para cualquier mezcla de concreto debe ser preferiblemente potable, limpia y libre de cantidades perjudiciales de aceite, ácidos, azúcar, sales como cloruros o sulfatos, metales, material orgánico y otras sustancias que puedan ser dañinas.

Para un diseño de mezcla de concreto permeable, el efecto que tiene una alta relación w/c es que debido a la fluidez del concreto que se produce, tiende a llenar los poros provocando que el contenido de vacíos disminuya. Por otro lado, una baja relación w/c provoca que las partículas de cemento no se adhiera al agregado, lo que incide en problemas para su funcionamiento. Según diversos ensayos en este concreto realizados por el Comité ACI 522, se ha demostrado que una relación w/c óptima está en el rango de 0,26 a 0,45, dando una apropiada cohesión entre partículas y fluidez estable.

1.3.1.5. Aditivos

Los aditivos son productos capaces de disolverse en agua, que se agregan al concreto durante su mezclado en porcentajes no mayores del 5 % de la masa de cemento, con el propósito de producir una mejora en el comportamiento del concreto en su estado fresco y/o en condiciones de trabajo.

Los aditivos son productos capaces de disolverse en agua, que se agregan al concreto durante su mezclado en porcentajes no mayores del 5 % de la masa de cemento, con el propósito de producir una mejora en el comportamiento del concreto en su estado fresco y/o en condiciones de trabajo.

Según las observaciones de los ensayos realizados en el área de aditivos en el concreto permeable por el Comité ACI 522, se han utilizado aditivos retardantes los cuales deben cumplir las normas ASTM C 494. Estos son útiles especialmente cuando se trabaja en climas cálidos. Los aditivos retardantes pueden mejorar la manejabilidad y otras características del comportamiento del concreto durante su colocación.

Tabla II. **Rangos recomendables de proporciones de materiales en el concreto permeable**

| Rangos típicos* de proporciones de materiales en el concreto permeable** | |
|---|---|
| Materiales cementantes | 270 - 415 kg/m ³ (450 - 700 lb/yd ³) |
| Agregados | 1 190 – 1 480 kg/m ³ (2 000 – 2 500 lb/yd ³) |
| Relación agua / cemento (w/c) | 0,27 - 0,30:1*** |
| Relación agregado/cemento | 4 – 4,5:1*** |
| Relación agregado fino/cemento | 0 - 1:1**** |
| <p>* Estas proporciones son solo para información.</p> <p>** Aditivos químicos, particularmente retardantes y estabilizadores de hidratación, son usados comúnmente. El uso de materiales cementantes suplementarios, como ceniza y escoria, también son comunes.</p> <p>*** Se han utilizado rangos mayores, pero ha resultado en reducción de resistencia y durabilidad.</p> <p>**** La adición de agregado fino disminuirá el contenido de vacíos e incrementará la resistencia.</p> | |

Fuente: Comité ACI 522. *Reporte de concreto permeable ACI 522R-10*. p. 46.

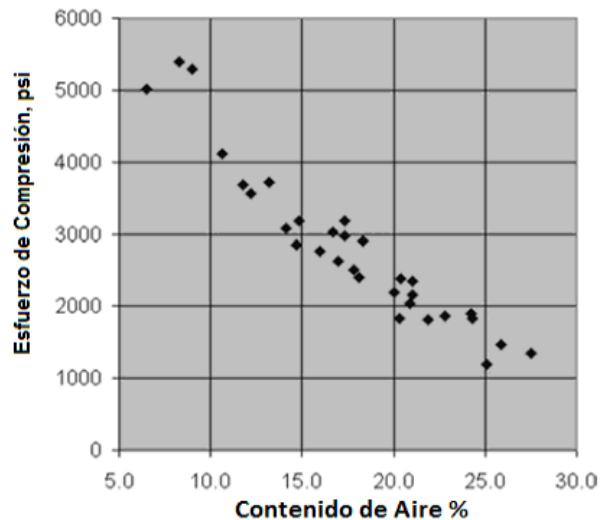
1.3.2. Características físicas y propiedades mecánicas del concreto permeable

Las propiedades del concreto permeable dependen de su porosidad (contenido de aire) de la cual depende el contenido de cemento, relación agua/cemento (w/c), nivel de compactación y calidad de los agregados. Su contenido influirá en el desarrollo de su resistencia e infiltración: las propiedades más importantes de este concreto.

1.3.2.1. Resistencia a compresión

La resistencia a compresión varía entre los 2,8 mega Pascales hasta 28 mega Pascales. La resistencia a compresión del concreto permeable se ve afectado por el diseño de mezcla y el esfuerzo de compactación. En otras palabras, sus propiedades físicas y mecánicas están en función de la calidad de los materiales, la proporción en que se usen y el esfuerzo de compactación que se utilice en la colocación del concreto. Un factor que incide considerablemente en la resistencia a compresión es el contenido de aire y está inversamente relacionado con su resistencia. El Comité ACI 522 ha realizado diferentes ensayos a cilindros para verificar la baja en la resistencia del concreto debido a su contenido de aire (ver figura 6).

Figura 6. **Esfuerzo de compresión vs contenido de aire**



Fuente: RODAS RALDA, Natalia Ixchel. *Desarrollo y uso de bloques de concreto permeable en senderos ecológicos*. p. 9.

También, se ha comprobado que un incremento en el tamaño del agregado grueso reduce la resistencia de compresión del concreto, así como el incremento del módulo de finura en los agregados.

Aunque la relación agua/cemento (w/c) es importante en la resistencia a compresión del concreto convencional, los efectos en el concreto permeable no son los mismos. Al utilizar una relación alta (w/c), el concreto es más fluido, llenando los vacíos; al utilizar una relación baja (w/c), la adherencia entre agregados puede verse perjudicada, por lo cual es importante encontrar una cantidad óptima de agua para cada diseño de mezcla.

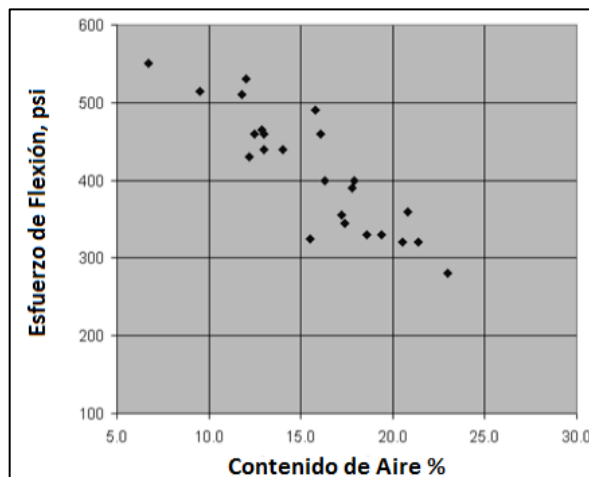
De igual manera, es importante la cantidad de material cementante en la mezcla del concreto permeable, debido a que mucha pasta puede obstruir los poros. La dosificación óptima de cemento puede variar por el tipo de agregado y según su uso, es decir, la resistencia a compresión y permeabilidad que se desea obtener.

1.3.2.2. Resistencia a flexión

La resistencia a flexión en el concreto permeable varía entre 1 y 3,8 mega Pascales. Diversas instituciones han estado involucradas con la investigación y desarrollo del concreto permeable, entre las cuales se puede mencionar el Comité ACI 522, Instituto Mexicano del Concreto y el Centro de Investigaciones de Ingeniería. Según sus experiencias con la fabricación del concreto permeable, estas instituciones han observado que para obtener una buena resistencia a flexión se deben utilizar agregados gruesos entre 1/4 y 3/8 de pulgada y un contenido de vacíos de aproximadamente 25 %. El Comité ACI 522 encontró que el contenido de aire tiene una influencia importante en el

esfuerzo de flexión, disminuyéndolo mientras el contenido del aire aumenta tal como se muestra en la figura 7.

Figura 7. **Esfuerzo de flexión vs. contenido de aire**



Fuente: RODAS RALDA, Natalia Ixchel. *Desarrollo y uso de bloques de concreto permeable en senderos ecológicos*. p. 10.

Según los ensayos realizados por este comité, si se agrega una pequeña cantidad de agregado fino (5 % aproximadamente), se incrementa la resistencia a la flexión del concreto.

1.3.2.3. **Densidad del concreto**

La densidad del concreto permeable es aproximadamente el 70 % del concreto convencional, esto significa que su densidad varía entre 1 680 hasta 1 920 kilogramos por metro cúbico (105–120 libras por pie cúbico). La densidad del concreto permeable fresco puede ser determinado por el método ASTM C 1688 y está relacionado con el contenido de vacíos que se da a la mezcla. El contenido de vacíos depende de varios factores: tamaño del agregado,

contenido de cemento, relación agua cemento (w/c) y esfuerzo de compactación.

El esfuerzo de compactación puede hacer que la densidad del concreto permeable varíe considerablemente, provocando variación en la resistencia compresión. Se debe tener cuidado con la graduación del agregado que se utilice ya que al tener mucha variación entre las partículas gruesas y finas, estas últimas pueden rellenar el vacío dejado por las más gruesas, reduciendo la porosidad y, por lo tanto, también la permeabilidad.

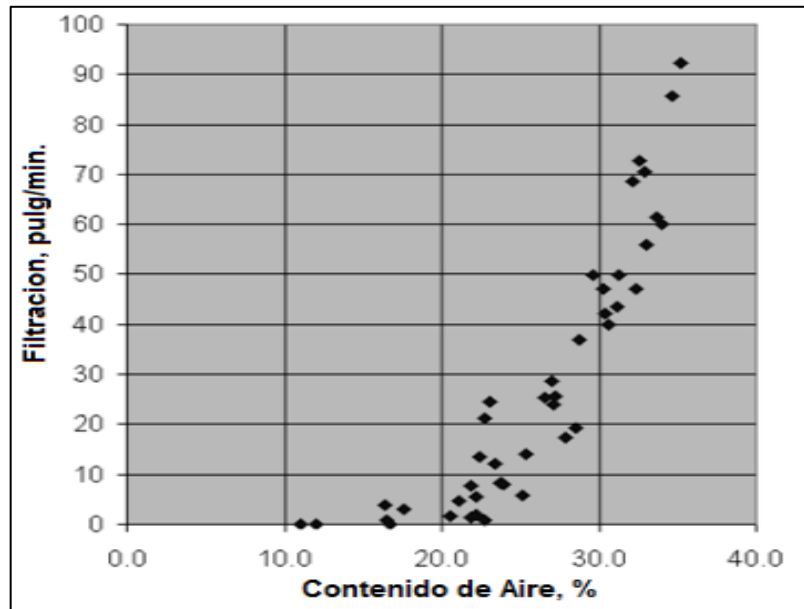
1.3.2.4. Porosidad

Una propiedad que tiene gran influencia en el concreto permeable es el tamaño de los poros. Para generar poros grandes, se debe usar agregados con mayor graduación. Esto es recomendable debido a que se evita que los poros se obstruyan.

La porosidad y el tamaño de los poros están relacionados con la capacidad para filtrar el agua, lo cual es uno de los principales propósitos de este concreto. Se ha demostrado mediante ensayos que se requiere una porosidad de por lo menos 15 % para lograr una tasa de infiltración significativa. Para una porosidad de 20-25 % se ha reportado un coeficiente de permeabilidad aproximado de 0,01 metros por segundo.

El Comité ACI 522, mediante ensayos a cilindros, ha demostrado que mientras el concreto tenga mayor contenido de aire, su filtración de agua será mayor (ver figura 8).

Figura 8. Filtración de agua vs. contenido de aire



Fuente: RODAS RALDA, Natalia Ixchel. *Desarrollo y uso de bloques de concreto permeable en senderos ecológicos*. p. 12.

Como se puede observar en la figura 8, la tasa de infiltración se incrementa mientras lo hace el contenido de aire en el concreto. El problema se encuentra cuando al aumentar el contenido de aire, la resistencia a compresión tiende a disminuir, por lo que al realizar un diseño de mezcla se debe encontrar un balance entre una tasa de infiltración que permita evitar el estancamiento y al mismo tiempo obtener una resistencia aceptable.

Una característica especial del concreto permeable, es que a pesar de sus poros de tamaños considerables, es altamente eficaz de la absorción acústica.

Es decir, puede ser usado para reducir el sonido generado por la interacción llanta-pavimento en carreteras. El concreto permeable logra este

efecto al alterar la generación de ruido minimizando el bombeo del aire entre el neumático y la carpeta de rodadura, los poros absorben el sonido mediante la fricción interna entre las moléculas de aire y la superficie del poro.

1.3.2.5. Durabilidad

La durabilidad del concreto se refiere al tiempo de vida que tiene bajo ciertas condiciones ambientales. Se ha probado que con el mantenimiento adecuado, el concreto permeable puede tener un tiempo de vida de 20 a 30 años, pero esto puede variar por diferentes factores. Entre los agentes que podrían afectar de manera negativa a la durabilidad del concreto están la exposición a temperaturas extremas y a químicos como sulfatos y ácidos.

Por otro lado, su base debe ser de material que no sea fácilmente removido por el agua, por ejemplo, grava, lo que crea un incremento en su durabilidad al hacer que la estructura sea menos susceptible a daños ocasionados por la infiltración de agua como es el caso del pavimento convencional.

Tabla III. **Rangos típicos de las características físicas y propiedades mecánicas del concreto permeable**

| | |
|---------------------------|--------------------------------------|
| % de vacíos | 15 a 35 % |
| Índice de infiltración | 192 a 1724 pulg/h (0,14 a 1,22 cm/s) |
| Tamaño de poros | 0,08" a 0,32" (2 a 8 mm) |
| Coefficiente de absorción | 0,1 a 1 |
| Resistencia a compresión | 2,8 a 28 Mpa |
| Resistencia a la flexión | 1 a 3,8 Mpa |

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Relaciones de las propiedades mecánicas con respecto a la resistencia a compresión**

| | |
|---|--|
| Resistencia a flexión* | MR = $2,3 f'c^{(2/3)}$ (pulg-lb) |
| | MR = $0,083 f'c^{(2/3)}$ (SI) |
| Resistencia a tensión** | T = 0,65 * MR |
| Módulo de elasticidad** | E= $3\ 900 f'c^{(1/2)}$ (Mpa) |
| | E= $12\ 500 f'c^{(1/5)}$ (kg/cm ²) |
| * ACI 522 R-10. | |
| ** Estudio de flexo tracción para el concreto permeable. Instituto tecnológico de Costa Rica, escuela de ingeniería en construcción. p. 19. | |

Fuente: elaboración propia.

1.3.3. Usos del concreto permeable

El concreto permeable se utiliza sin refuerzo, debido a que su porosidad deja propenso al acero a la oxidación por agentes externos. Se debe tener una limpieza periódica de este material para prevenir el atascamiento. Es de mencionar que en Guatemala aún no se ha comercializado el concreto permeable debido a que varias empresas que venden concreto aún están investigando los materiales que debe contener y los controles de calidad adecuados ya que varían con los métodos utilizados para el concreto convencional. Como ejemplos, se enlistan las aplicaciones que se la ha dado en países que ya utilizan este concreto.

- Áreas de estacionamiento: se ha utilizado el concreto permeable para áreas de estacionamiento de vehículos livianos con resultados favorables.
- Carreteras: el pavimento permeable se puede usar tanto para el área de tráfico vehicular como el peatonal. Como en cualquier pavimento de

concreto, la preparación de la base es importante, así como su colocación, ya que la compactación no debe ser excesiva para no obstruir los vacíos.

- Cunetas de carreteras: el concreto permeable se ha utilizado para recolectar y redirigir agua pluvial a tanques para su recolección.
- Muros de contención: los muros donde se requiere concreto ligero.
- Patios, canchas deportivas: en Europa se ha utilizado el concreto permeable para construcción de canchas deportivas para que permita al agua infiltrarse en el suelo y luego ser drenadas.
- Pisos para invernaderos: se utiliza el concreto permeable en invernaderos debido a que tiene aislamiento térmico y evita el estancamiento de agua lo que eliminan el crecimiento de hierbas indeseables.

1.3.4. Polímeros para incrementar la resistencia al concreto permeable

Debido a que el concreto poroso tiene ausencia de finos, la resistencia a la flexión y compresión tienden a ser menores que las de un concreto convencional; por lo tanto, se utilizan aditivos para poder compensar esta deficiencia, que por lo general son polímeros, los cuales poseen buena resistencia a tensión. Se han realizado investigaciones comprobando experimentalmente, que la adición de polímeros en el concreto en proporciones específicas mejoran las características del concreto.

Para poder respaldar lo mencionado anteriormente se citarán resultados de investigaciones realizadas con la adición de diversos polímeros al concreto convencional y/o permeable.

1.3.4.1. Polietileno de baja densidad

El polietileno de baja densidad es un polímero de la familia de los polímeros olefínicos. Es un polímero termoplástico conformado por unidades repetitivas de etileno. Se designa como LDPE (por sus siglas en inglés, *low density polyethylene*) o PEBD, polietileno de baja densidad.

El polietileno es el termoplástico más usado actualmente en el mundo, se trata de un material de bajo costo, que puede moldearse a casi cualquier forma, extruirse para hacer fibras o soplarse para formar películas delgadas.

- Características:
 - Buena resistencia térmica y química. Puede soportar temperaturas de 80 °C de forma continua y 95 °C durante un corto período de tiempo.
 - Buena resistencia al impacto.
 - Es de color lechoso, puede llegar a ser transparente dependiendo de su espesor.
 - Muy buena procesabilidad, es decir, se puede procesar por los métodos de conformado, empleados para los termoplásticos: inyección y extrusión.
 - Es más flexible que el polietileno de alta densidad.
 - Presenta dificultades para imprimir, pintar o pegar sobre este.
 - Densidad en el entorno de 0,910 - 0,940 g/cm³.

El mayor uso del polietileno de baja densidad es en el sector del envase y empaque: bolsas, botellas compresibles para pulverizar fármacos, envase industrial, laminaciones, película para forro, película encogible y estirable, aislante para cables y conductores, tubería conduit, película para invernadero, tubería de riego y sistemas de irrigación.

Tabla V. **Propiedades del polietileno de baja densidad**

| Propiedades eléctricas | |
|---|-----------------------|
| Constante dieléctrica a 1MHz | 2,2-2,35 |
| Factor de disipación a 1MHz | $1-10 \times 10^{-4}$ |
| Resistencia dieléctrica (KV mm ⁻¹) | 27 |
| Resistencia superficial (ohm/sq) | 1013 |
| Resistencia de volumen (ohm cm) | $10^{15}-10^{18}$ |
| Propiedades físicas | |
| Absorción de agua en 24h (%) | < 0,015 |
| Densidad (g/cm ³) | 0,915-0,935 |
| Índice refractivo | 1,51 |
| Resistencia a la radiación | Aceptable |
| Resistencia al ultra-violeta | Mala |
| Coefficiente de expansión lineal (K ⁻¹) | $1,7 \times 10^{-4}$ |
| Grado de cristalinidad (%) | 40-50 |
| Punto de fusión (°C) | 105 a 115 |
| Propiedades mecánicas | |
| Módulo elástico E (N/mm ²) | 200 |
| Coefficiente de fricción | - |
| Módulo de tracción (GPa) | 0,1-0,3 |

Continuación de la tabla V.

| | |
|---|-----------------|
| Relación de Poisson | - |
| Resistencia a tracción (MPa) | 5 - 25 |
| Esfuerzo de rotura (N/mm ²) | 8 -10 |
| Elongación a ruptura (%) | 20 |
| Propiedades térmicas | |
| Calor específico (J K ⁻¹ Kg ⁻¹) | 1900-2300 |
| Coeficiente de expansión (x 10 ⁶ K ⁻¹) | 100-200 |
| Conductividad térmica a 23 °C (W/mK) | 0,33 |
| Temperatura máxima de utilización (°C) | 50-90 |
| Temperatura de reblandecimiento (°C) | 110 |
| Temperatura de cristalización (°C) | 105-110 |
| Temperatura mínima de utilización (°C) | -60 |
| Resistencia química | |
| Ácidos-concentrados | Buena-Aceptable |
| Ácidos-diluidos | Buena |
| Alcalís | Buena |
| Alcoholes | Buena |
| Cetonas | Buena-Aceptable |
| Grasas y aceites | Buena-Aceptable |
| Halógenos | Aceptable-Buena |
| Hidro-carbonios halógenos | Aceptable-Buena |
| Hidrocarburos aromáticos | Aceptable-Buena |

Fuente: *Propiedades del polietileno de baja densidad.*

<http://www.eis.uva.es/~macromol/curso07-08/pe/polietileno%20de%20baja%20densidad.htm>.

Consulta: 22 de abril de 2016.

En la investigación colombiana realizada en el 2002 por los ingenieros Fredy Reyes y Andrés Torres y Grupo CECATA, publicada en la revista ingeniería de construcción volumen 17 núm. 2, titulada Efecto de las fibras plásticas en la flexión de estructuras de pavimentos drenantes, se dieron a

conocer los resultados de la experimentación de la adición de fibras de polietileno de baja densidad, utilizando bolsas plásticas recicladas, en un concreto permeable con resistencia a compresión de 242 kg/cm^2 a los 28 días.

Al adicionar tiras de polietileno con dimensiones de 4 mm x 20 mm al 0,10 % de la mezcla total de concreto, se logró incrementar la resistencia a flexión en un 38 % con respecto a la mezcla sin adición de tiras plásticas, obteniendo de esta manera el porcentaje óptimo para incrementar la resistencia a flexión al concreto permeable.

En cuanto a la adición del porcentaje óptimo se produce una disminución en promedio de un 3,40 % de la resistencia a la compresión simple, con respecto a mezcla de concreto permeable sin adición de tiras, la cual prácticamente se mantiene constante durante los primeros 28 días.

En cuanto a la adición del porcentaje óptimo se produce un incremento en promedio de un 1,00 % de la resistencia a tracción directa, obtenida en la mezcla con adición de 0,00% la cual prácticamente se mantiene constante durante los primeros 28 días.

En cuanto a la adición del porcentaje óptimo se produce un incremento promedio del 13,70 % del módulo de elasticidad, obtenida en la mezcla con adición 0,00 % la cual prácticamente se mantiene constante durante los primeros 28 días.

Al comparar la resistencia a flexión del concreto permeable con adición de tiras plásticas al porcentaje óptimo, con respecto a la del concreto convencional, se logró apreciar una variación de tan solo un 15 %. Por lo que cabe destacar que es lo suficientemente aceptable.

1.3.4.2. Polipropileno

El polipropileno (PP) es el polímero termoplástico, parcialmente cristalino, que se obtiene de la polimerización del propileno (o propeno). Pertenece al grupo de las poli olefinas y es utilizado en una amplia variedad de aplicaciones que incluyen empaques para alimentos, tejidos, equipo de laboratorio, componentes automotrices y películas transparentes. Tiene gran resistencia contra diversos solventes químicos, así como contra álcalis y ácidos.

- Ventajas
 - Ligero
 - Alta resistencia a la tensión y a la compresión
 - Excelentes propiedades dieléctricas
 - Resistencia a la mayoría de los ácidos y álcalis
 - Bajo coeficiente de absorción de humedad

- Aplicaciones

A partir de los procesos industriales se pueden preparar un sinnúmero de productos de polipropileno diferentes cuyas propiedades varían según la longitud de las cadenas del polímero (peso molecular), de su polidispersidad, de los comonómeros eventualmente incorporados, entre otros. Estas características básicas definen las propiedades mecánicas del material y sus aplicaciones finales. Literalmente se habla de diferentes tipos o grados de polipropileno. Por todo esto, la gran diversidad de productos originados con esta poli olefina le permite tener aplicaciones tan variadas como:

- Autopartes
- Baldes, recipientes, botellas
- Muebles
- Juguetes
- Películas para envases de alimentos
- Fibras y filamentos
- Bolsas y bolsones
- Fondo de alfombras
- Pañales, toallas higiénicas, ropa

Tabla VI. **Propiedades del polipropileno**

| Propiedades eléctricas | |
|--|------------------------------------|
| Constante dieléctrica @1MHz | 2,2-2,6 |
| Factor de disipación a 1 MHz | 0,0003 - 0,0005 |
| Resistencia dieléctrica (kV mm ⁻¹) | 30-40 |
| Resistividad superficial (Ohm/sq) | 1013 |
| Resistividad de volumen a ^C (Ohm/cm) | 10 ¹⁶ -10 ¹⁸ |
| Propiedades físicas | |
| Absorción de agua - equilibrio (%) | 0,03 |
| Densidad (g/cm ⁻³) | 0,9 |
| Índice refractivo | 1,49 |
| Índice de oxígeno límite (%) | 18 |
| Inflamabilidad | Combustible |
| Resistencia a los ultra-violetas | Aceptable |
| Punto de fusión (°C) | 160 |
| Propiedades mecánicas | |
| Alargamiento a la rotura (%) | 150-300. para bopp >50 |
| Coeficiente de fricción | 0,1-0,3 |
| Dureza - rockwell | R80-100 |
| Módulo de tracción (GPa) | 0,9-1,5. para bopp 2,2-4,2 |
| Resist. a la abrasión ASTM D1044 | 13-16 |
| Resistencia a la tracción (MPa) | 25-40. para bopp 130-300 |
| Resistencia al impacto Izod (J m ⁻¹) | 20-100 |

Continuación de la tabla VI.

| Propiedades térmicas | |
|---|-------------|
| Calor específico (J K ⁻¹ kg ⁻¹) | 1700 - 1900 |
| Coefficiente de expansión térmica (x10 ⁻⁶ K ⁻¹) | 100-180 |
| Conductividad térmica a 23C (W m ⁻¹ K ⁻¹) | 0,1-0,22 |
| Temperatura máxima de utilización (°C) | 90-120 |
| Temperatura mínima de utilización (°C) | -10 a -60 |
| Temp. de deflexión en caliente – 0,45MPa (°C) | 100-105 |
| Temp. de deflexión en caliente 1,8MPa (°C) | 60-65 |
| Resistencia química | |
| Ácidos - concentrados | Buena |
| Ácidos - diluidos | Buena |
| Álcalis | Buena |
| Alcoholes | Buena |
| Cetonas | Buena |
| Grasas y aceites | Aceptable |
| Halógenos | Mala |
| Hidrocarburos aromáticos | Aceptable |

Fuente: elaboración propia.

En la investigación mexicana, publicada en *la Revista Académica de Ingeniería* de la Universidad Autónoma de Yucatán México, Vol. 17, Núm. 3, septiembre-diciembre 2013 pp. 204-214, Moreno, E.I., Varela Rivera, J., Solís Carcaño, R., Sánchez Pech, O. titulada *Efectos de las fibras poliméricas en la permeabilidad y características mecánicas del concreto con agregado calizo de alta absorción*, se realizaron especímenes de prueba con dos relaciones agua/cemento, de 0,80 y 0,62, reforzados con fibras de polipropileno (900 g por m³) y sin refuerzo. Se analizó la influencia de las fibras en las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido: en el primer caso se estudiaron el revenimiento, el contenido de aire y el peso volumétrico; en el segundo caso, la

resistencia a tensión, compresión, flexión y cortante, así como la permeabilidad al aire. Los resultados de las pruebas son los siguientes:

Con la dosificación utilizada de fibras de polipropileno (900 g), las propiedades del concreto fresco no sufrieron considerables cambios que afectaran la resistencia o la fluidez del concreto.

La resistencia a compresión del concreto y el esfuerzo cortante no sufrieron cambios considerables por la presencia de las fibras, por lo que se puede considerar despreciable su aportación a estas propiedades.

La resistencia a tensión y a flexión del concreto se incrementó significativamente con el uso de las fibras, se observa que la mejoría fue mayor en el concreto de baja resistencia.

La permeabilidad disminuyó ampliamente sobre todo en el concreto de baja resistencia. Por lo que las fibras de polipropileno sí podrían tener un uso con fines de protección, principalmente cuando los agresores entran al concreto a través de los poros capilares.

1.3.4.3. Caucho

El caucho es un polímero elástico que surge como una emulsión lechosa (conocida como látex) en la savia de varias plantas, pero que también puede ser producido sintéticamente. La principal fuente comercial de látex son las euforbiáceas, del género *Hevea*, como *Hevea brasiliensis*.

Por su flexibilidad, se utiliza frecuentemente para fabricar mangueras, neumáticos y rodillos para una amplia variedad de máquinas desde los rodillos

para escurrir la ropa hasta los instalados en las rotativas e imprentas. Por su elasticidad se usa en varios tipos de amortiguadores y mecanismos de las carcasas de máquinas para reducir las vibraciones. Al ser relativamente impermeable a los gases se emplea para fabricar mangueras de aire, globos y colchones. Su resistencia al agua y a la mayoría de los productos químicos líquidos se aprovecha para fabricar ropa impermeable, trajes de buceo, tubos para química y medicina, revestimientos de tanques de almacenamiento, máquinas procesadoras y vagones aljibes para trenes. Por su resistencia a la electricidad, el caucho blando se utiliza en materiales aislantes, guantes protectores, zapatos y mantas, y el caucho duro se usa para las carcasas de teléfonos, piezas de aparatos de radio, medidores y otros instrumentos eléctricos. El coeficiente de rozamiento del caucho, alto en superficies secas y bajo en superficies húmedas, se aprovecha para correas de transmisión y cojinetes lubricados con agua en bombas para pozos profundos.

Actualmente, se fabrican miles de artículos de caucho para usos muy diferentes. El caucho es ampliamente utilizado en la fabricación de neumáticos, llantas, artículos impermeables y aislantes, por sus excelentes propiedades de elasticidad y resistencia ante los ácidos y las sustancias alcalinas. Es repelente al agua, aislante de la temperatura y de la electricidad. Se disuelve con facilidad ante petrolatos, bencenos y algunos hidrocarburos.

En la investigación de Venezuela, publicada en la *Revista de la Facultad de Ingeniería* de la Universidad Central de Venezuela, Vol. 23 N° 1, pp-67-75, en el año 2008, C. Albano, N. Camacho, M. Hernández, A. J. Bravo, H. Guevara, titulada *Estudio de concreto elaborado con caucho de reciclado de diferentes tamaños de partículas*. Se analizó la influencia de la adición de la raspadura de las bandas de rodamiento de los neumáticos a los compuestos de concreto a través de ensayos destructivos y no destructivos.

Los estudios sobre resistencia a la compresión y a la tracción realizados a los compuestos a la composición de 5 % en peso, así como con diferentes tamaños de partícula de caucho reciclado (grueso \geq 1,19 mm, fino $<$ 1,19 mm, al azar) a la edad de 28 días, indican que la adición de caucho de tamaños de partícula denominados fino y grueso disminuye estas propiedades mecánicas. En cambio, para el compuesto con 5 % en peso de caucho de tamaño al azar, los valores de estas propiedades mecánicas no presentan variaciones significativas al compararlos con el concreto tradicional. Los resultados de los ensayos de laboratorio fueron los siguientes:

El descenso en los valores de las propiedades de resistencia a la compresión y resistencia a la tracción de los compuestos con caucho de tamaño fino y grueso, se debe a la porosidad que se origina en las muestras. Por otra parte, el comportamiento del compuesto de concreto con 5 % en peso de caucho de tamaño al azar muestra en todas las propiedades analizadas, valores similares a los del concreto tradicional. Esto se debe a que las partículas pequeñas se colocan en los huecos dejados por las partículas grandes de caucho, disminuyendo de esta forma la porosidad.

En resumen, se puede inferir que es factible, de acuerdo a la data analizada, utilizar 5 % en peso de caucho de tamaño aleatorio (al azar) ya que no deteriora las características del concreto; además, lo vuelve más liviano y al mismo tiempo ayuda a disminuir los efectos negativos que generan los desechos de caucho en el medio ambiente.

1.4. Pavimentos permeables

- Historia

“El concreto permeable tuvo sus inicios en Europa. En el siglo XIX, el concreto permeable fue utilizado en una variedad de usos: paredes con carga hidráulica, paneles prefabricados, y pavimentación. En el Reino Unido en 1852, se construyeron dos casas usando solo grava en el concreto. La eficacia económica parece haber sido la primera razón para su uso más temprano debido a la cantidad limitada de cemento que se empleó.

No sería hasta 1923 en que el concreto permeable se vuelve a usar como material de construcción viable. Esta vez fue limitado a la construcción de hogares en regiones como Escocia, Liverpool, Londres y Manchester. Debido a su bajo costo, el uso del concreto permeable en Europa aumentó constantemente, especialmente en los tiempos de la Segunda Guerra Mundial. El uso del concreto permeable continuó ganando renombre y su uso se extendió a Venezuela, África del oeste, Australia, Rusia y el medio este de EUA.

Puesto que los Estados Unidos no sufrió el mismo tipo de escasez de materiales como en Europa después de la Segunda Guerra Mundial, el concreto permeable no tuvo una presencia significativa en los Estados Unidos hasta los años 70, cuando su uso comenzó no como sustituto más barato del concreto convencional, más bien por sus características de permeabilidad. El problema encontrado en los Estados Unidos era el de excesivo impermeabilizado de las nuevas áreas construidas. Como siguió creciendo la urbanización, la cantidad del área impermeable aumentó. Esto tuvo un impacto negativo en el ambiente, causando la degradación en la calidad del agua. El concreto permeable comenzó a usarse en los estados de la Florida, Utah y New México pero se ha

extendido rápidamente a través de los Estados Unidos a estados como California, Illinois, Oklahoma y Wisconsin.

Aunque tuvo principios modestos, el uso del concreto permeable como sustituto del concreto convencional ha crecido hasta volverse una herramienta de funcionamiento múltiple en la industria de la construcción.

Práctico para muchos usos, el concreto permeable en pavimentos es limitado por su baja durabilidad bajo tránsito pesado; esta carencia de la resistencia restringe el uso del concreto permeable a funciones específicas. El concreto permeable limita su uso en áreas sujetas al tráfico de bajos volúmenes y cargas. Aunque se ha utilizado como paredes de carga hidráulica en casas junto a cortes, se recomienda utilizarlo en estacionamientos, invernaderos, calzadas, banquetas, calles residenciales, canchas de tenis y andadores de piscinas.”¹

1.4.1. Aplicaciones

Cuando se habla de pavimentar en la actualidad, lo primero que se piensa es en concreto asfáltico o concreto hidráulico; pero este trabajo de graduación plantea que los pavimentos permeables son una opción en superficies específicas: estacionamientos, calles de tráfico ligero, banquetas, áreas peatonales; lo que hace del pavimento tradicional, en estas áreas, un factor antiecológica.

- Estacionamientos: ofrece importantes ventajas frente a los pavimentos tradicionales gracias a su permeabilidad; elimina cualquier tipo de encharcamiento en las vías evitando de este modo las salpicaduras al

¹ GHAFORI, Nader. Pavimentos permeables. p. 45.

transitar los vehículos, el acuaplaneo que se puede producir por la acumulación de agua, posibles resbalones. Además, gracias a las amplias zonas de estacionamiento de algunas instalaciones (centros comerciales, áreas de servicio, entre otros.) se puede recuperar el agua de lluvia para su posterior uso en riegos de zonas verdes, entre otros.

- Bloques: utilizando bloques de concreto permeable como rejillas en las calles se conseguirá que toda el agua que termina acumulándose junto a los costados de las aceras sea automáticamente filtrada al sistema de alcantarillado que evita los charcos que se forman normalmente en estas zonas; trabajando de manera similar a los sistemas actuales de sumideros de hierro fundido permitiendo la filtración al 100 %.
- Ciclovías y áreas verdes: se pueden realizar ciclovías, andadores forestales, ante las autoridades se les reconoce como área verde, consiguiendo una superficie muy agradable tanto para los peatones como para las bicicletas ofreciendo un magnífico tanto de color como de textura acabado sin olvidar su permeabilidad y que funciona como pavimento antiderrapante.

1.4.2. Ventajas

Superficies de rodadura antiderrapantes; bajo costo de instalación comparado con un sistema con drenaje pluvial; incremento del área vendible de los fraccionamientos debido a que ya no se requiere de lagunas de retención y las plantas de tratamiento de aguas son menores; reduce la necesidad de incrementar la capacidad de drenaje pluvial; tiene una vida promedio de 20 a 30 años, según su correcta fabricación; recarga los mantos acuíferos directamente, filtra los agentes que pueden contaminar las aguas subterráneas y dañar

ecosistemas; percola el agua en vez de crear espejos de agua en la superficie de rodamiento con lo que mejora la visibilidad y reduce el hidroplaneo; reduce el ruido del tráfico; reduce el efecto invernadero ya que no conserva tanto calor como el concreto asfáltico o hidráulico tradicional; al reducir la impermeabilización del terreno disminuye la frecuencia anual de caudales por lo que las inundaciones son menos probables.

1.4.3. Componentes

Los pavimentos permeables están básicamente compuestos por cemento, agua, agregados y aditivos, complementados por la estructura propia del pavimento, capas de mejoramiento con materiales inertes, pozos de absorción en su caso o elementos de resguardo de aguas pluviales como cisternas, elementos de contención laterales como guarniciones y por la propia carpeta de concreto permeable que servirá de superficie de rodadura.

1.4.4. Diseño de pavimento permeable

En la determinación del espesor de un pavimento permeable se deben elaborar dos análisis distintos: uno para el aspecto estructural y otro para las características hidráulicas.

Para el diseño estructural de pavimentos de concreto permeable se utilizan los métodos empleados en pavimentos rígidos tradicionales. Los más usados son los métodos AASHTO, PCA y el catalogo español.

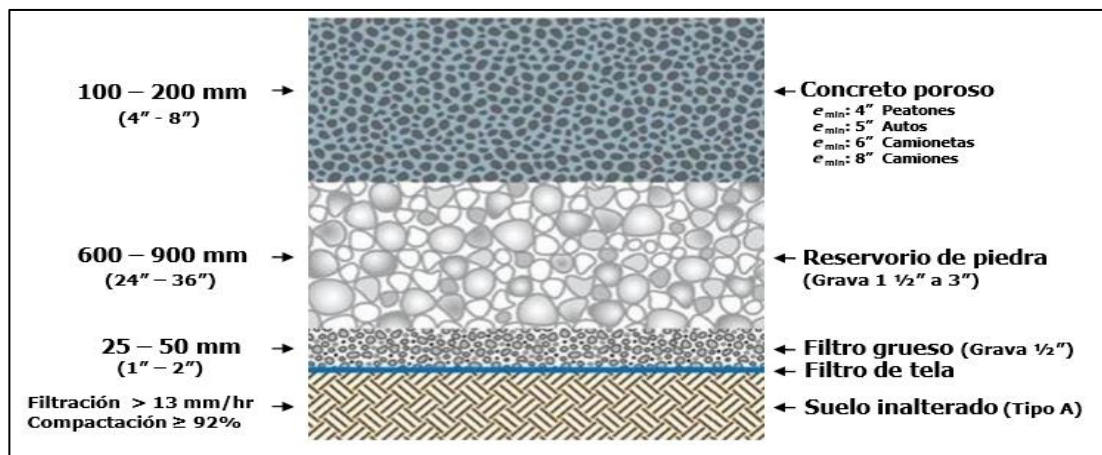
Los criterios del espesor y de la estructura del pavimento que resultan se deben entonces analizar para la capacidad y la permeabilidad del terreno. En muchos casos, los vacíos del pavimento se pueden utilizar como depósito de

almacenaje para las aguas de lluvia; así que el espesor de los dos análisis, el estructural o del almacenaje de agua, será el que rija.

El rango práctico de los espesores de diseño para el concreto permeable es a partir de 5 a 10 pulgadas (12,50 a 25,00 centímetros) para pavimentos.

La estructura porosa de una mezcla de concreto permeable permite no solo la transmisión vertical del agua, sino que también permite el flujo horizontal. Esta capacidad única debe ser considerada en establecer los perfiles de drenaje.

Figura 9. **Estructura de un pavimento permeable**



Fuente: AIRE, Carlos. *Concreto poroso como alternativa sustentable*. p. 34.

1.5. Procedimiento constructivo del pavimento de concreto permeable

El suelo natural encontrado en cualquier proyecto deberá muestrearse y someterse a pruebas de permeabilidad y capacidad de carga.

1.5.1. Trabajos preliminares

Se ubica y se traza el área donde se aplicará el nuevo pavimento de concreto permeable. En los casos donde haya que demoler algún pavimento existente, se debe retirar la estructura anterior también, o sea la base que normalmente se compone de grava cementada, asfalto y tepetate compactado.

Se deberá marcar los niveles de piso terminado hasta donde debe quedar el pavimento de concreto permeable terminado.

Figura 10. **Movimiento de tierras**



Fuente: SAUCEDO VIDAL, Artemio. *Concreto hidráulico permeable, una alternativa para la recarga de los mantos acuíferos del Valle de México*. p. 127.

Una vez terminado el trazo y las demoliciones, se procede a excavar el terreno hasta la profundidad deseada. Una vez definido el espesor del pavimento de concreto permeable y el de la base que se usará, se puede determinar a qué profundidad hay que excavar el terreno. Lo ideal es que la excavación se haga hasta encontrar el terreno natural, en ese punto se aplica

una vibrocompactación con el objeto de estabilizarlo y nivelarlo, no dejando áreas flojas que pudieran deformarse durante el proceso de construcción.

Una nivelación adecuada debe dejar pendientes aceptables hacia los pozos o canales de absorción. Terminado esto se debe compactar el terreno por medios mecánicos.

También se deberán delimitar las áreas de instalación del pavimento de concreto permeable con algún tipo de cimbra, esto se debe hacer cuando hay que dejar fronteras o juntas con algún otro pavimento existente o juntas frías para la propia colocación del concreto.

En algunos casos no hay que excavar sino construir guarniciones para contener la base y el pavimento de concreto permeable, estas piezas se podrán hacer también con concreto hidráulico común.

Los pozos de absorción permiten la acumulación del agua de lluvia la cual a través de estos podrá ser encausada al subsuelo gracias a la presión hidrostática del agua. Para determinar el número de pozos se deberá conocer la permeabilidad del terreno y la cantidad de agua que pueda llegar a este desde otros lados. Un pozo de absorción capaz de drenar un área de 40 m², que puede variar desde 1,00 x 1,00 x 1,00 metro, hasta de 0,60 x 0,60 x 0,60 metros. Mientras más profundo es un pozo de absorción, seguramente más rápido se infiltrará el agua al subsuelo. En algunas ocasiones es recomendable usar canales para conducir el agua hacia los pozos.

1.5.2. Terracerías

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

Dependiendo del tipo de suelo, la subrasante debería compactarse entre 90 – 95 % de la densidad determinada por AASHTO T-9951 o AASHTO T-18052. Antes de la colocación del pavimento, la subrasante o subbase debería ser compactada de acuerdo a las especificaciones y a las condiciones de humedad.

1.5.3. Conformación de la base del pavimento

La base es la estructura que mantiene al pavimento permeable sobre el terreno. Las capas quedan establecidas de acuerdo al uso de cada pavimento, en calles, estacionamientos grandes, obras de mucho tráfico, será necesario aplicar una base y una sub base de agregados de 1 ½” hasta 3”, en casos de obras de poca carga solo será necesario una capa de base de ¾”.

Esta base, por no contar con un material como la arena que lo haga homogéneo, descompone las cargas que se le aplican al pavimento en todas direcciones en forma heterogénea, favoreciendo que la carga transmitida al terreno sea mínima ya que la reparte por todos lados.

La subbase se hace con agregados pétreos en diámetros mayores, de 1 ½” hasta 3” y 4” que se instalan directamente sobre el terreno compactado.

Por lo anteriormente descrito, es muy difícil que un pavimento hidráulico permeable se deforme por efecto de las cargas, como las que transmiten autos y camiones. Se debe compactar y nivelar muy bien por medios mecánicos.

Los materiales deben encontrarse libres de contaminación, es decir, que no perjudique a la uniformidad de los agregados que conforman la base y subbase. El espesor máximo de capas será de 20,32 cm (8 in), y será compactado con un equipo vibratorio a una densidad mínima del 92 % de la densidad seca máxima según lo establecido. La subrasante estará en el rango de condiciones óptimas de humedad.

Otros materiales importantes son el geotextil y la geomalla, estos materiales se usan para contener de una manera mucho más eficaz los terrenos que presentan poca sustentación como las arcillas expansivas. Los geo textiles son telas que tienen una gran resistencia a la flexión y que permiten contener los materiales en su sitio ayudando en gran manera a su estabilidad.

Se aplican directamente sobre el terreno compactado mecánicamente; sobre esta se aplica la subbase que servirá también para fijarla en su sitio. Es de notarse la gran resistencia a la tensión que estas telas aportan, lo que mejora enormemente la estabilidad de los suelos o bases.

Figura 11. **Base y subbase del pavimento permeable**



Fuente: SAUCEDO VIDAL, Artemio. *Concreto hidráulico permeable, una alternativa para la recarga de los mantos acuíferos del Valle de México*. p. 132.

1.5.4. Estructura del pavimento

Las propiedades del concreto permeable requieren especial cuidado en el mezclado y la transportación. Para producir una mezcla de consistencia adecuada, las proporciones deben ser correctamente ajustadas para la humedad de los agregados.

El uso de un aditivo reductor de agua ayudará en las operaciones de colocación provocando que el fraguado inicial de mezcla sea más tardío cuando se manejen grandes tiempos en la colocación. Durante la transportación, el producto se mezclará a una baja velocidad. La descarga de la mezcla deberá completarse una hora después de que se haya agregado el agua a la mezcla, a menos que se utilice un estabilizador de hidratación, lo que puede aumentar el tiempo de colocación. Un ambiente con alta temperatura provocará un efecto directo en el fraguado inicial por lo que se deberá tener cierto cuidado. De acuerdo con experiencia, se dice que este tipo de concreto no se recomienda para bombeo.

Los procedimientos de colocación adecuados son muy importantes porque conducen a un buen desempeño del pavimento permeable. También es necesario que se cuente con el personal calificado para llevar a cabo este procedimiento.

La descarga del material deberá ser lo más rápido posible y continúa. Si llega a ser interrumpido, la mezcla permanecerá en el canalón, la cual tendrá que removerse y ser depositada en el piso.

Figura 12. **Colocación de pavimento permeable**



Fuente: SAUCEDO VIDAL, Artemio. *Concreto hidráulico permeable, una alternativa para la recarga de los mantos acuíferos del Valle de México.* p. 136.

El uso de equipo mecánico de esparcimiento mejorará la producción y reducirá la contaminación de los materiales de la subrasante. Si este equipo no está disponible, la distribución será manual. La siguiente operación es la nivelación y compactación del material.

La utilización de una frecuencia alta en el vibrado del concreto, empleando el equipo mecánico de colocación, puede causar en la mezcla una densificación y con ello eliminar la estructura permeable si continúa el vibrado.

La vibración puede causar a la pasta cementante una fluidez tal, que llene la parte baja de la estructura permeable del concreto dejando en la superficie los agregados. Esto reducirá la resistencia del concreto en la superficie y debilitará la permeabilidad en la porción baja del pavimento.

Después de la colocación mecánica, no se requieren operaciones de acabado adicional. El concreto se depositará cerca de su posición final, de tal forma que el concreto fresco se incorpore a la masa de concreto colocado previamente.

1.5.5. Carpeta con concreto permeable

El concreto hidráulico permeable será puesto de acuerdo a los requerimientos de la estructura. Automáticamente después del enrasamiento y de la compactación, no se permitirá otro acabado.

Las cimbras pueden ser de madera o acero y tendrán la profundidad del pavimento. Deberán ser lo suficientemente resistentes y estables para soportar equipo mecánico sin tener alguna deformación, desarrollando las operaciones de compactación y esparcimiento.

Las juntas transversales de contracción serán instaladas en intervalos de 6,10 m se instalarán a una profundidad de 6,35 mm del espesor del pavimento. Las juntas longitudinales serán colocadas en el punto medio del ancho del carril. Estas juntas pueden colocarse con concreto plástico o con una cortadora.

Si se utiliza una cortadora, el procedimiento es rápido ya que el pavimento endurece lo suficiente para prevenir los desvíos. Normalmente se hacen las juntas después del curado.

Las juntas transversales de construcción solo pueden ser instaladas, siempre que se haya terminado el tramo de construcción, de otra manera el concreto nunca empezará a endurecer. Las juntas de aislamiento se usarán solo cuando haya algún bloque o losa u otras estructuras contiguas.

1.5.6. Colocación y construcción del concreto permeable

La construcción del concreto permeable debe realizarse de acuerdo con los planos y especificaciones del proyecto para proveer un pavimento que satisfaga las necesidades de los usuarios y/o los reglamentos locales. La construcción inicia con una cuidadosa planeación, donde se debe determinar la secuencia del desarrollo del proyecto, fechas de entrega de superficies pavimentadas, equipo óptimo para el tamaño del proyecto, pruebas y supervisión.

Figura 13. **Colocación de concreto permeable**



Fuente: LÓPEZ PALACIOS, Emiliano. *Control de calidad y colocación de concretos permeables*. p. 51.

Los pavimentos permeables se construyen siguiendo un procedimiento diferente al de los pisos tradicionales ya que se construyen con bases de agregados pétreos los cuales deberán estar confinados; estas bases deberán estar libres de materiales finos como la arena, ya que estos serían disueltos y arrastrados por el agua dando lugar, después de cierto tiempo, a la formación de baches.

Al término de la construcción de la base, se coloca el pavimento permeable, cuyo espesor final varía de acuerdo al proyecto. Cabe aclarar que hay lugares en los cuales es posible colocar los pavimentos permeables directamente sobre el terreno natural, es decir, sin necesidad de la construcción de bases, tal es el caso de los terrenos rocosos y los cercanos al mar.

1.5.6.1. Equipo y herramienta

El equipo a utilizar dependerá del tamaño, volúmenes de la obra, disponibilidad de recursos en el lugar, etapa de construcción y características específicas del proyecto.

1.5.6.2. Preparación y disposición de la capa subrasante

Para iniciar la construcción de la capa subrasante deberá muestrearse el suelo encontrado en el lugar del proyecto, someterse a pruebas de permeabilidad y capacidad de carga. Si existe un porcentaje predominante de arena es posible que las condiciones de graduación no favorezcan a la permeabilidad.

La uniformidad y apoyo de la subrasante son criterios claves para la colocación del concreto permeable, además, de tomar en cuenta el diseño hidrológico y estructural.

La compactación de la subrasante dependerá del tipo de suelo, esta deberá compactarse entre el 90 % y 95 % de la densidad determinada por la norma AASHTO T 180, en caso de aumentar la densidad de la subrasante disminuirá su permeabilidad.

Debido a que es de vital importancia la capa subrasante, es esencial tener una buena preparación al nivel correcto para la construcción de un pavimento de calidad. Es recomendable que los primeros 150 mm de la parte superior de subrasante estén compuestos de material granular con abundante contenido de grava y una cantidad moderada de finos, menos del 10 %.

La subrasante no debe encontrarse irregular, lodosa, saturada o congelada al iniciar su colocación. Antes de la colocación del concreto permeable, la subrasante debe ser humedecida. Al proporcionar una subrasante con una alta humedad dará como resultado una reducción en la resistencia del pavimento y puede conducir a una falla prematura del pavimento.

1.5.6.3. Mezclado

Debido a las características especiales del concreto permeable, se requiere un control de calidad estricto al momento de dosificar la mezcla. Particularmente el contenido de agua del concreto permeable está limitado a un pequeño rango para proporcionar la fuerza y permeabilidad adecuada, además de evitar la desintegración de los constituyentes de la mezcla y la pérdida de la

estructura porosa. El grado de humedad en el agregado debe ser supervisado cuidadosamente, debido a que el agua es absorbida por el agregado y un exceso de humedad suministrado al agregado puede ser perjudicial.

Las pruebas de peso de unidad son recomendables para verificar las proporciones correctas de la mezcla. Los pesos de unidad deben variar entre 1 600 y 2 000 kg/cm³.

La proporción del agregado y del cemento se establecen experimentando con los materiales disponibles en el sitio de trabajo, pues las variaciones en características de materiales limitarán la utilidad de los diseños preceptivos de la mezcla.

1.5.6.4. Transporte

Debido a que el concreto permeable tiene un bajo contenido de agua, se requiere de un cuidado especial durante su transportación. Las mezclas de concreto permeable tienden a unirse fuertemente a las aspas por lo que es necesario que estas se limpien adecuadamente y se inspeccionen; por otro lado, la mezcla debe ser descargada completamente una hora después de que se haya agregado el agua a la mezcla. El uso de aditivos reductores de agua podrían extender el tiempo de colocación hasta una hora y media o más, provocando que el fraguado inicial de la mezcla sea más tardío cuando se manejen grandes tiempos en la colocación. Es de tomarse en cuenta las altas temperaturas ambientales y las condiciones de viento ya que afectarán la transportación y colocación de la mezcla.

1.5.6.5. Colocación

Existe una gran variedad de técnicas que pueden ser utilizadas para la construcción y colocación de pavimentos de concreto permeable, al igual que en el concreto convencional, la técnica de construcción depende principalmente del lugar donde será instalado el concreto poroso y los requerimientos específicos del proyecto. Es importante mencionar que las mezclas de concreto permeable no pueden ser bombeadas, por lo que es importante realizar una buena planeación para el acceso en el sitio de trabajo. Antes de la colocación, es necesario revisar la preparación de la subrasante y la forma; no deben existir irregularidades, desalineaciones o surcos, en caso de existir deben ser corregidos.

Una disposición bien planificada del proyecto puede facilitar las operaciones de construcción, permitir el uso eficiente de equipo de colocación y proporcionar acceso para los camiones de entrega del concreto. Es recomendable tener un plano que muestre la localización de todas las juntas y la secuencia de colocación antes de empezar la construcción; además, establecer la localización de objetos fijos teniendo en mente el patrón de juntas y los métodos de construcción.

La colocación del concreto permeable debe ser completada tan rápidamente como sea posible. El tiempo en que se permita que el material fresco esté expuesto a los elementos, es un tiempo en el que se está perdiendo el agua necesaria para el curado. El secado de la pasta de cemento puede llevar a una falla por desmoronamiento en los bordes de la superficie del pavimento. Las operaciones y equipos a utilizar deben estar planeados, diseñados y seleccionados teniendo en cuenta la colocación rápida y curado inmediato del pavimento.

Previo a la colocación de la mezcla, es recomendable revisar tanto la subrasante como la nivelación que se encuentren colocadas e instaladas de manera correcta. Durante el proceso de descarga se debe realizar una inspección visual de la mezcla, para asegurar una relación agua-cemento óptima, la cual debe tener un aspecto metálico-brillante; en caso de que el material presente grumos, la mezcla será rechazada. La operación de descarga debe ser continua, además de depositar tan cerca de su nivel final como sea práctico. Esto comúnmente se logra por la descarga directa de la canaleta del camión mezclador directamente en la subrasante.

Durante la colocación del concreto, al contener zonas dentro del proyecto donde no puedan alcanzarse con los mezcladores, es recomendable la utilización de bandas transportadoras, debido a que el revenimiento de las mezclas de concreto es cero, por lo que el bombeo no se recomienda. Al ser depositado en su sitio el concreto permeable, su acomodo se realiza por medio de rastrillos o herramientas similares.

Para una correcta colocación, se debe tener precaución y supervisión en las siguientes actividades:

- Arrastrar o palear el concreto fresco a su posición final
- El llenado de los huecos en el concreto
- La contaminación del concreto permeable con material dañino
- Caminar sobre el concreto permeable fresco

1.5.6.6. Cimbras y equipo de enrasado

Las cimbras utilizadas en la construcción del concreto permeable pueden ser de madera, plástico, acero, o mixtas cumpliendo como requisito el mismo

espesor del pavimento, deben ser suficientemente fuertes y estables para soportar el equipo mecánico. Para construcciones en las que el tiempo es determinante y el número de usos de una misma cimbra es considerable, es recomendable optar por un sistema de cimbra industrializado fabricado con materiales como aluminio, fibra de vidrio, entre otros materiales; aunque el costo inicial de adquisición sea mayor que el de la cimbra de madera.

La cimbra debe ser fuerte y rígida para garantizar el soporte adecuado del elemento que se construye y satisfaga las tolerancias dimensionales permitidas para soportar el equipo de rodillo y enrasadores usados; se deben utilizar suficientes estacas para resistir el movimiento lateral.

Por otra parte, la cimbra debe ser lo suficientemente hermética para evitar escurrimientos durante el proceso de vibrado y fraguado del concreto, así como la subrasante por debajo de la cimbra para compactarse de acuerdo con las recomendaciones del diseñador y nivelarlas correctamente. A su vez, la cimbra debe ser fácilmente desmontable para no dañar el acabado especificado del concreto y permitir su reutilización el mayor número de veces posible.

El método de enrasado a utilizar varía dependiendo del tamaño colocado. Para trabajos pequeños, como caminos particulares o aéreas estrechas, es aceptable el uso de reglas rectas manuales o bailarinas. Si se trata de trabajos más grandes, es recomendable el uso de una enrasadora vibratoria de marco con sección tipo A. Es de vital importancia enrasar el concreto lo más rápido posible, por lo que el trabajo manual no es recomendable si el tamaño de la obra es muy grande debido a la insuficiencia de velocidad en el trabajo.

Figura 14. **Enrasado del concreto permeable mediante el uso de una enrasadora vibratoria de marco con sección tipo A**



Fuente: LÓPEZ PALACIOS, Emiliano. *Control de calidad y colocación de concretos permeables*. p. 62.

1.5.6.7. Compactación

El tiempo y cantidad de compactación en el funcionamiento del concreto permeable tiene efectos verdaderamente considerables. Un alto grado de compactación ofrecerá una resistencia mayor en el concreto, esto debido a la densificación del concreto y la eliminación de espacios vacíos internos de la mezcla, sin embargo estos espacios vacíos son necesarios para obtener la permeabilidad y permitir la filtración del agua. Una alta compactación traerá como resultado una baja considerable en la permeabilidad del concreto y por consiguiente una falla en el sistema del concreto permeable.

Figura 15. **Compactación del concreto permeable por medio de un rodillo de acero**



Fuente: LÓPEZ PALACIOS, Emiliano. *Control de calidad y colocación de concretos permeables*. p. 63.

El procedimiento de compactación debe durar entre 15 y 20 minutos después de la vibración de impactos debido a la estructura de la mezcla, esto genera una evaporación rápida del agua que produce el inicio del fraguado. Si el concreto ha fraguado, el rodillo no compactará al nivel deseado, además, de causar agrietamiento superficial en el cementante e incrementar la posibilidad de aparición de futuras fallas. Una vez terminada la compactación del concreto no es recomendable pulir la superficie, pues se obstruirán los poros de la superficie disminuyendo la permeabilidad. En caso de existir algún defecto en el trabajo realizado, debe corregirse en forma manual.

1.5.6.8. Juntas de construcción y acabados

Las juntas de construcción se forman generalmente por circunstancias imprevistas o por necesidad del procedimiento constructivo; las primeras surgen cuando el elemento estructural no se cuela de manera monolítica y las segundas cuando el mismo proceso no permite colocar los elementos de manera monolítica.

Las juntas de construcción se forman cuando se coloca concreto fresco, sin endurecer, sobre concreto ya endurecido sin la posibilidad de integrarlos por medio de vibración; se deben tomar las medidas adecuadas para obtener la adherencia deseada. Esto se logra mediante la preparación de la superficie del concreto endurecido para recibir al nuevo concreto; se deben retirar los materiales sueltos, mal adheridos, lechada o mortero superficial, con el objeto de tener una superficie rugosa y sana.

La ubicación de estas juntas debe planearse antes de la colocación y hay que apegarse a estas ubicaciones tanto como sea posible. Siempre se debe procurar que estén apropiadamente localizadas, limpias y bien adheridas. Como gran desventaja de las juntas es que se tienen filtraciones y se degradan con el clima por lo cual se recomienda evitarlas tanto como sea posible.

Las juntas constructivas en el concreto permeable deben ser colocadas como una prevención al agrietamiento; difieren a las convencionales, debido a que el pavimento poroso tiene menos de un tercio de la retracción de un concreto convencional. Las juntas se deben colocar en un intervalo de 6 m; sin embargo, pueden colocarse como máximo hasta 13,5 m, deben de tener una profundidad de $\frac{1}{3}$ a $\frac{1}{4}$ del espesor del pavimento, por lo que en este caso los

equipos convencionales no son aplicables obligando a utilizar un rodillo especial con una hoja filosa.

Figura 16. **Realización de una junta constructiva en el concreto permeable**



Fuente: LÓPEZ PALACIOS, Emiliano. *Control de calidad y colocación de concretos permeables*. p. 64.

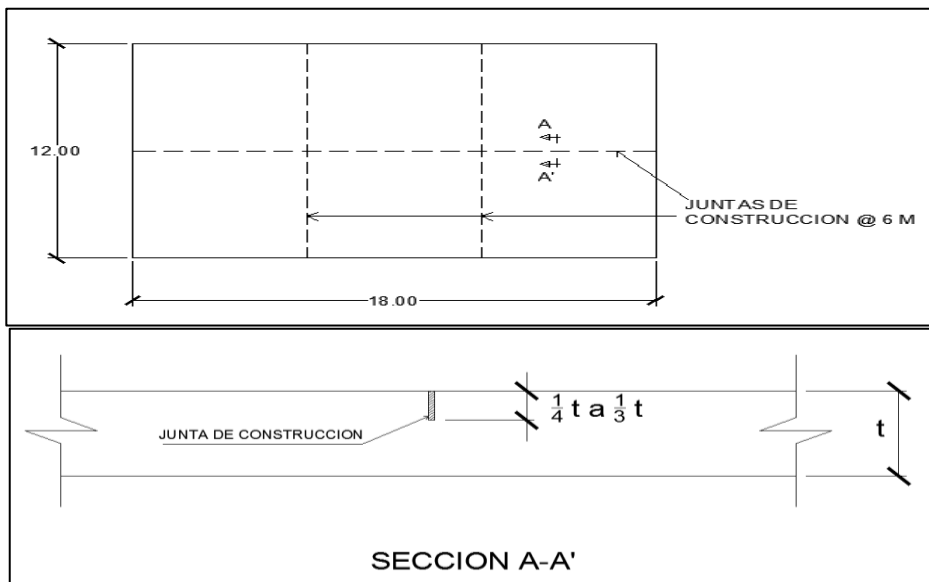
Las juntas longitudinales se colocan en el punto medio del ancho del carril, en caso de exceder los 4,50 m; estas juntas pueden ser construidas cuando el concreto se encuentra en estado fresco con las herramientas adecuadas o con una sierra cortadora, después de que el concreto se haya endurecido, aunque al realizar el trabajo en estado fresco con las herramientas adecuadas produce un mejor resultado.

Las juntas transversales de construcción solo pueden ser instaladas, siempre y cuando se haya terminado el tramo de construcción, de otra manera el concreto será afectado y nunca empezará a endurecer. Para garantizar el vínculo de los agregados con la construcción de las juntas, se debe tener un

adecuado agente de adherencia para colocar el concreto fresco al ya existente, el cual será cepillado o esparcido al límite de la superficie del pavimento existente. La experiencia muestra que las juntas longitudinales son más susceptibles a deteriorarse. Una compactación adicional en esta zona es necesaria para evitar la aparición de estas fallas.

Típicamente, los pavimentos de concreto permeable no tienen el mismo acabado que los pavimentos de concreto convencional. Normalmente las operaciones de sellado y pulido no se realizan, pues tienden a sellar la superficie porosa, dejando inválida la principal función del concreto permeable. Para la mayoría de los concretos permeables instalados, el último paso de su construcción es la compactación que dejan como ventaja una superficie con mayor rugosidad que ayudan a mejorar la tracción.

Figura 17. **Ejemplo de juntas constructivas en un pavimento de concreto permeable**



Fuente: elaboración propia.

1.5.6.9. Curado

El objetivo del curado de facilitar el desarrollo de la hidratación del cemento así como el de reducir los efectos nocivos de las contracciones producidas por las condiciones ambientales: temperatura, viento y humedad las cuales promueve fisuramientos aleatorios.

Durante este proceso es de vital importancia controlar las temperaturas en las mezclas y la de tomar medidas que contrarresten los efectos del viento excesivo y humedad del aire; existe un sinnúmero de métodos para curar los pavimentos recién colocados: el método húmedo que consiste en esparcir o rociar agua, arpilleras húmedas o arena húmeda; y el método de membrana que, a diferencia del método húmedo, se aplican compuestos para el curado como polietileno saturado.

Sin importar cuál sea el tipo que se utilice, el primer requisito para llevar a cabo el curado es que se aplique con oportunidad. Siempre se busca que se pueda iniciar en las etapas más tempranas posibles de la colocación del concreto, y toda vez que no se dañe la superficie y deberán apearse a los lineamientos de calidad contenidos en las normas ASTM y AASHTO vigentes, además, de cumplir con los siguientes requisitos:

- Poder aplicarse inmediatamente después del allanado y terminado del concreto aún en presencia de agua superficial.
- Tener un color blanco que refleje en alto porcentaje la luz solar.
- Presentar una viscosidad alta y secado al tacto en un lapso no mayor a 30 minutos.

La estructura y rugosidad de la superficie del concreto permeable hace que haya una mayor exposición de la superficie de cemento a la evaporación; por eso el procedimiento de curado es uno de los elementos fundamentales para obtener un pavimento con las condiciones deseadas. El agua es necesaria para las reacciones químicas del cemento y esto es fundamental para el concreto permeable obteniendo un curado más rápido. Sin embargo, es común aplicar retardadores de agua antes de la compactación con el fin de minimizar cualquier posibilidad de pérdida de agua en la superficie.

Debido al nulo sangrado del concreto permeable, tiene una alta propensión a la fisuración por retracción plástica. De hecho, el curado del pavimento de concreto permeable inicia antes de la colocación del concreto pues la capa subrasante debe ser humedecida para prevenir la absorción de agua de la mezcla. Después de la colocación, el método recomendable de curado es el de cubrir las losas recién instaladas con plástico durante los próximos 7 días para mezclas de concreto simple y 10 días para mezclas de concreto que incorporan materiales cementantes suplementarios.

El señalamiento en el piso debe pintarse hasta después de que haya terminado el periodo de curado. No debe permitirse el tránsito sobre el pavimento durante su curado. El constructor deberá tomar las precauciones necesarias para evitar daño en el pavimento como consecuencia o abuso de las operaciones de construcción, además, prohibir la remoción de material curado y evitar toda forma de tránsito sobre el pavimento de concreto permeable. Adicionalmente, el contratista no debe permitir el almacenamiento de materiales de construcción sobre la superficie del pavimento ya que estos materiales pueden obstruir los poros o dañar de alguna otra manera los pavimentos permeables.

Figura 18. **Curado de concreto permeable por medio de polietileno**



Fuente: LÓPEZ PALACIOS, Emiliano. *Control de calidad y colocación de concretos permeables*. p. 68.

Aunque los requerimientos de curado para la colocación de concreto en climas extremadamente cálidos o fríos son los mismos que para temperaturas normales, las técnicas utilizadas para lograr los curados se vuelven más complejas. Las técnicas de curado y protección para ambos tipos de climas extremos se deben planear con mucha anticipación.

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

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

evaporación a la superficie del concreto después del proceso de enrasado para retardar la pérdida de humedad en una superficie. Después de la compactación y antes de la colocación de polietileno, la superficie puede ser rociada por medio de vapor o con un retardador de evaporación cuando la superficie parezca estar perdiendo su apariencia brillante.

1.5.7. Reparación de pavimentos de concreto permeable

Durante la etapa de construcción o puesta en servicio del pavimento de concreto permeable pueden ocurrir ciertas fallas estructurales, principalmente por un mal proceso constructivo o por la necesidad de alguna instalación de servicio, por lo cual es necesario reparar estas fallas para dar un buen servicio a los usuarios.

Las reparaciones menores consisten en resanar las áreas dañadas ya se con una mezcla epóxica con agregados, o con un concreto permeable de las mismas proporciones de la mezcla utilizada, dependiendo del tamaño de las reparaciones. Para no tener una variación de color con respecto a la del pavimento se pueden utilizar pinturas acrílicas en el área del resane con un éxito variable.

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

1.5.8. Mantenimiento

La mayoría de los concretos permeables funcionan con un mantenimiento mínimo. Este mantenimiento principalmente consiste en tomar medidas de prevención para evitar el taponamiento de los poros, haciendo necesario preparar el sitio antes de la construcción y diseñar de una manera adecuada el drenaje circundante para impedir el flujo de materiales en superficies de pavimento. Sólidos, rocas, hojas caídas de árboles y otras partículas finas que se pueden infiltrar en los poros del concreto dificultan el flujo del agua a través del concreto, ocasionando una disminución en la utilidad del pavimento permeable. Materiales como arenas y sólidos finos no deben encontrarse en contacto alguno con el concreto ni siquiera temporalmente.

Los métodos de mantenimiento comúnmente más aceptados para la limpieza del concreto permeable son el lavado a presión y el uso de una aspiradora. El lavado a presión empuja con fuerza los contaminantes a través de la superficie del pavimento. Este sistema es efectivo, pero debe tenerse suma precaución de no usar demasiada presión ya que esto dañará la porosidad del concreto permeable. Debe lavarse a presión una sección pequeña de pavimento usando varias presiones de agua para determinar la presión apropiada para el pavimento dado. El uso de una aspiradora potente remueve los contaminantes, extrayéndolos de los huecos del pavimento. El sistema más efectivo, sin embargo, es el de combinar las dos técnicas: aspirar y después el lavado a presión. Valores experimentales muestran que en algunos casos la pérdida de permeabilidad que se puede producir en el primer año es recuperable en un 50 % y que manteniendo la frecuencia anual, las pérdidas del segundo año se pueden recuperar en un 70 %.

En relación a la periodicidad con que debe realizarse la limpieza, es recomendable hacerlo una vez al año y después del periodo de lluvias para encontrar un ablandamiento máximo de la suciedad y así alcanzar los mejores resultados con el menor esfuerzo.

1.5.9. Supervisión y pruebas de control de calidad

El concepto de supervisión como se utiliza en el campo de la construcción de concreto, incluye no solo observaciones y mediciones de campo sino también pruebas de laboratorio con obtención y análisis de resultado.

Al igual que en cualquier material de ingeniería, es importante verificar la calidad de un pavimento de concreto permeable, es por esto que se realizan pruebas de la condición de la subrasante para asegurar el grado de compactación en valor de soporte y la permeabilidad adecuada. Por otra parte, las pruebas de la mezcla deben ser realizadas con el objeto de asegurar la calidad tanto en estado fresco como en estado endurecido; la verificación de todos estos parámetros se lleva a cabo por medio de pruebas de la ASTM y AASHTO las cuales son aplicables a la construcción de concreto permeable.

Para verificar las condiciones de preparación de la subrasante, se debe supervisar la compactación, la humedad apropiada, las formaletas deben estar alineadas, limpias y que posean el desencofrante. La determinación de la permeabilidad de la subrasante y el análisis del suelo son particularmente en el diseño y construcción del proyecto. Por lo general, para determinar la permeabilidad se debe tomar una muestra ya compactada.

Para la preparación de la mezcla de concreto permeable debe basarse en las especificaciones del proyecto, es decir las proporciones de la mezcla.

Generalmente requieren contenidos mínimos de cementantes, volúmenes de agregado y granulometría, aditivos y agua. Asimismo, deben realizarse ensayos de campo como medición del peso volumétrico de acuerdo a las normas ASTM C172 y C29. La aceptación debe ser sobre un valor de ± 80 kg/m³ del peso volumétrico de diseño.

Por último, el criterio de aceptación que debe realizar la supervisión es la de realizar pruebas de laboratorio al pavimento terminado. Se deben obtener tres muestras de núcleo del pavimento de acuerdo a la norma ASTM C 42 y determinar la aceptación para el espesor, el contenido de huecos, el peso volumétrico, la resistencia a compresión y a flexión. Una supervisión visual que muestre una estructura de poros completamente cerrada o severamente restringida podrá indicar que el pavimento no funcione apropiadamente, entonces, estas secciones que se hayan demostrado que son impermeables deben ser removidas y reemplazadas.

En ningún momento la aceptación debe basarse en la resistencia a compresión del concreto permeable. Debido a que la supervisión debe evaluar objetivamente los resultados de los ensayos de laboratorio indicados anteriormente y determinar la aceptación del pavimento.

2. MARCO PRÁCTICO

2.1. Materiales utilizados

A continuación, se describen los materiales utilizados para la elaboración de las diferentes mezclas de concreto permeable, los cuales cumplen con las especificaciones descritas en el reporte del ACI 522 R-10.

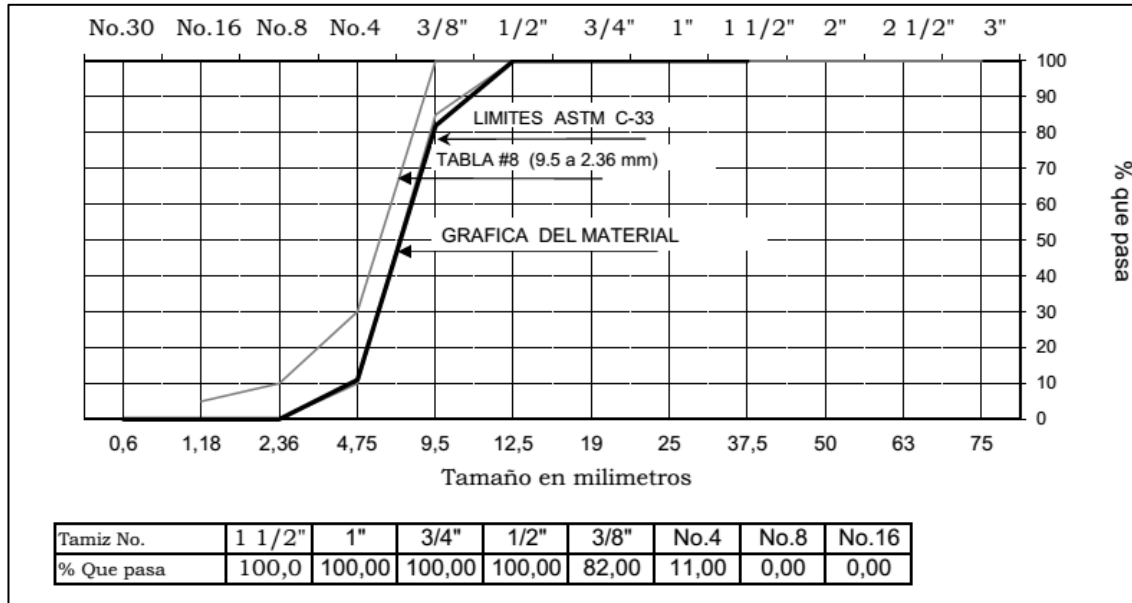
2.1.1. Cemento

Se utilizó cemento portland con una resistencia de 4 000 psi a los 28 días de curado, el cual cumple con las normas ASTM C 1157 y COGUANOR NGO 41001.

2.1.2. Agregado grueso

Se utilizó agregado grueso que proviene de la Cantera Finca San Miguel, ubicada en km 45 carretera al Atlántico, Sanarate, El Progreso. El agregado grueso posee un tamaño máximo nominal de 3/8"; se le realizaron los respectivos ensayos según la norma ASTM-C33 y se verificó que las características físicas se encuentran dentro de los parámetros indicados en dicha norma. El ensayo de granulometría determinó que el material se encuentra dentro de los límites establecidos, excepto para el tamiz de 3/8", con un 3 % superior a lo indicado en la norma (ver figura 21). Por otro lado, se calculó que el 0,20 % de la muestra total, pasa el tamiz Núm. 200, por lo que es menor que el máximo permisible que es de 1 %.

Figura 19. **Curva granulométrica del agregado grueso**



Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Resultados de los ensayos de caracterización del agregado grueso, según norma ASTM-C33**

| Característica física | Resultado |
|---|-----------|
| Peso espeífico | 2,73 |
| Peso unitario compactado (kg/m ³) | 1 530,00 |
| Peso unitario suelto (kg/m ³) | 1 470,00 |
| Porcentaje de absorción | 2,30 |
| Pasa tamiz # 200 (%) | 0,20 |
| Porcentaje de vacíos (%) | 44,00 |
| Módulo de finura | 6,07 |

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Ensayo de peso unitario al agregado grueso según norma ASTM C-29**



Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Ensayo de granulometría al agregado grueso según norma ASTM C-136**



Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Ensayo de peso específico y % de absorción del agregado grueso según norma ASTM C-127**

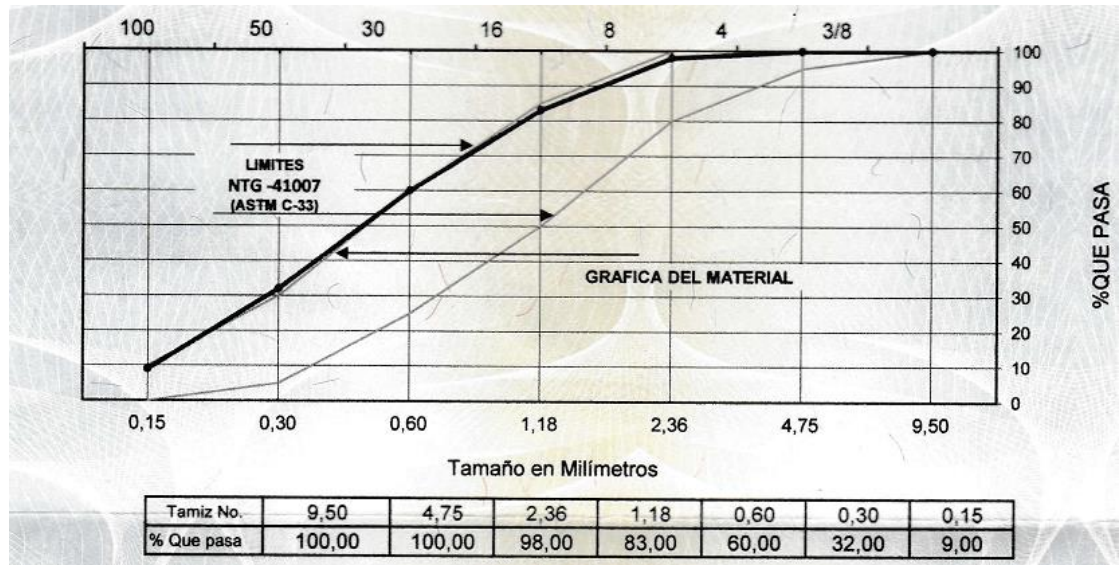


Fuente: elaboración propia.

2.1.3. **Agregado fino**

Se utilizó para la mezcla de concreto permeable, arena de río, que proviene del Arenal Villa Lobos ubicado en Villa Nueva. Se realizaron los respectivos ensayos según la norma ASTM-C33; se verificó que las características físicas se encuentran dentro de los parámetros indicados en dicha norma. El análisis de granulometría determinó que el material se encuentra dentro de los límites establecidos, excepto para el tamiz num. 50 con un 2 % superior a lo indicado en la norma, (ver figura 25). Por otro lado, se obtuvo un módulo de finura de 2,41, el cual se encuentra dentro del rango de 2,3 a 3,1. Por último, se calculó que el 4,20 % de la muestra total pasa el tamiz Núm. 200 el cual es menor que el máximo permitido que es de 5 %.

Figura 23. Curva granulométrica del agregado fino



Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. Resultados de los ensayos de caracterización del agregado fino según norma ASTM-C33

| Característica física | Resultado |
|---|-----------|
| Peso específico | 2,41 |
| Peso unitario compactado (kg/m ³) | 1 190,00 |
| Peso unitario suelto (kg/m ³) | 1 120,00 |
| Porcentaje de vacíos (%) | 51,00 |
| Porcentaje de absorción | 1,80 |
| Contenido de materia orgánica | 2 |
| Pasa tamiz # 200 (%) | 4,20 |
| Retenido tamiz 6,35 (%) | 0,00 |
| Módulo de finura | 2,18 |

Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Ensayo de porcentaje que pasa el tamiz núm. 200, del agregado fino según norma ASTM C-117**



Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Ensayo de granulometría al agregado fino según norma ASTM C-136**



Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Ensayo de peso específico y % de absorción al agregado fino según norma ASTM C-128**



Fuente: elaboración propia.

2.1.4. Adiciones de tiras plásticas

Debido a que el concreto permeable tiene ausencia de finos, la resistencia a la flexión y compresión tienden a ser menores que las de un concreto convencional, por lo tanto, se busca un material que pueda compensar esta desventaja.

Según en diferentes investigaciones que se han desarrollado en varios países se ha comprobado que la adición de tiras de plástico de diversas dimensiones y en diferentes porcentajes respecto al peso de la mezcla aumentan la resistencia al concreto permeable, principalmente a la flexión.

En esta investigación se desea estudiar el comportamiento del concreto permeable al utilizar como aditivos dos diferentes tipos de polímeros y determinar cuál presenta los mejores resultados en cuanto resistencia y permeabilidad se refiere. Con la finalidad de obtener el diseño de mezcla adecuado para ser utilizado en pavimentos de tráfico liviano.

2.1.4.1. Polietileno de baja densidad:

Según en la investigación colombiana realizada en el año 2002, por los ingenieros Fredy Reyes y Andrés Torres y Grupo CECATA, publicada en la *Revista Ingeniería de Construcción* Volumen 17, núm.2, titulada *Efecto de las fibras plásticas en la flexión de estructuras de pavimentos drenantes*, se utilizará como referencia los resultados obtenidos donde el diseño óptimo de concreto permeable se consiguió al adicionarle tiras de polietileno de baja densidad con dimensiones de 4 mm x 20 mm, al 0,10 % de la mezcla total de concreto.

Para esta investigación, se utilizaron bolsas plásticas de polietileno de baja densidad, y se cortaron en tiras con dimensiones de 4 mm x 20 mm.

Figura 27. **Tiras de polietileno de baja densidad con dimensiones de 4 mm x 20 mm**



Fuente: elaboración propia.

2.1.4.2. Polipropileno

Para esta investigación, se utilizaron costales reciclados de polipropileno, y se cortaron en tiras con dimensiones de 4 mm x 20 mm.

Figura 28. **Tiras de polipropileno con dimensiones de 4 mm x 20 mm**



Fuente: elaboración propia.

2.2. Diseño de mezcla

El diseño de mezcla fue basado en parámetros establecidos por el reporte ACI 522R-10 que está fundamentado en pruebas que este comité ha realizado para determinar el funcionamiento óptimo de este tipo de concreto.

Para el diseño de mezcla de concreto permeable, se tomó como referencia la investigación colombiana realizada en el año 2002, por los ingenieros Fredy Reyes y Andrés Torres y Grupo CECATA, publicada en la *Revista Ingeniería de Construcción*, volumen 17 núm. 2, titulada *Efecto de las*

fibras plásticas en la flexión de estructuras de pavimentos drenantes. En dicha investigación el diseño de mezcla de concreto permeable fue el siguiente:

1:0,55:2,81:0,35

Se obtuvieron los siguientes resultados: de los ensayos de laboratorio realizados al concreto permeable a los 28 días de edad, la resistencia a compresión fue de 242 kg/cm², la resistencia a flexión fue de 34,50 kg/cm² y la resistencia a tracción indirecta fue de 25,50 kg/cm².

Con la finalidad de verificar que los materiales que se utilizarán en esta investigación, específicamente los agregados, se adapten a dicho diseño de mezcla, se realizó una muestra representativa de una baldosa con dimensiones de 15 cm x 15 cm x 7 cm de altura.

De dicha muestra, se logró apreciar que la mezcla fue poco trabajable, por lo que se utilizó una relación de agua cemento de 0,39. Por otro lado, con respecto a la permeabilidad, se apreció que difícilmente drena el agua, por lo tanto, con la finalidad de obtener un diseño totalmente permeable, se modificó la relación agregado fino y cemento, la cual fue de 0,46.

Se obtiene el siguiente diseño de mezcla que se utilizó en esta investigación.

1:0,46:2,81:0,39

Con el diseño de mezcla propuesto se pretende obtener resultados similares a la referencia indicada.

Posteriormente, se realizaron dos diseños de mezclas adicionales utilizando como aditivos dos diferentes tipos de polímeros: polietileno de baja densidad y polipropileno. Para ello, se emplearon tiras con dimensiones de 4 mm x 20 mm, al 0,1 % del total de la mezcla.

- Dosificación:

La densidad del concreto permeable varía entre 1 680 hasta 1 920 kilogramos por metro cúbico (105–120 libras por pie cúbico). Para el diseño de mezcla, de esta investigación, se decidió utilizar el promedio de estos dos valores. Por lo tanto, se planteó un peso específico del concreto permeable de 1 800 kilogramos por metro cúbico para lo que la cantidad de material a utilizar por cada mezcla se calculó de la siguiente manera:

$$1:0,46:2,81:0,39$$

$$\frac{1\ 800}{1 + 0,46 + 2,81 + 0,39} = \frac{1\ 800}{4,66} = 386,27$$

- Cemento: $1 \times 386,27 = 386,27 \text{ kg/m}^3$
- Agregado fino: $0,46 \times 386,27 = 177,68 \text{ Kg/m}^3$
- Agregado grueso: $2,81 \times 386,27 = 1085,41 \text{ Kg/m}^3$
- Agua: $0,39 \times 386,27 = 150,64 \text{ Kg/m}^3$

Tomando en cuenta los ensayos a realizar, para el estudio del comportamiento de las tiras plásticas en el diseño de concreto permeable propuesto, se realizó la siguiente cuantificación de materiales.

Tabla IX. **Cálculo de volumen de concreto, para la fabricación de elementos a ensayar**

| Nombre del ensayo | Elementos a ensayar | Cantidad de concreto a utilizar | Observaciones |
|--|---|---------------------------------|--|
| Peso unitario y % de vacíos (ASTM C-1688) | | 0,0070 m ³ | Se requiere una tara con un volumen de 7 L |
| Resistencia a compresión (ASTM C-39) | 9 cilindros con diámetro de Ø = 6" y altura de h= 12" | 0,0504 m ³ | Se ensayarán 3 cilindros por edad (3, 7 y 28 días) |
| Resistencia a flexión (ASTM C-78) | 2 vigas con dimensiones de 6"x6"x21" | 0,0248 m ³ | Se ensayarán 2 vigas a los 28 días de curado, |
| Resistencia a tensión indirecta (ASTM C-496) | 2 cilindros con diámetro de Ø = 6" y altura de h= 12" | 0,0112 m ³ | Se ensayarán 2 cilindros a los 28 días de curado, |
| Permeabilidad (ASTM C-1701) | 1 baldosa con dimensiones de 0,30x0,60x0,07 m | 0,0126 m ³ | |
| Volumen total | | 0,1060 m ³ | |

Fuente: elaboración propia.

- Volumen total: 0,1060 m³
- Factor por desperdicio: 1,15
- Volumen calculado: 0,1060 x 1,15 = 0,1219 m³

Tabla X. **Cálculo de materiales para la elaboración de la mezcla de concreto permeable sin adición de tiras**

| Materiales | PARA 1 m ³ | PARA 0,1219 m ³ |
|-----------------|-----------------------|----------------------------|
| Cemento | 386,27 Kg | 47,09 Kg |
| Arena | 177,68 Kg | 21,66 Kg |
| Piedrín de 3/8" | 1085,41 Kg | 132,31 Kg |
| Agua | 150,64 Kg | 18,36 Kg |
| Total | 1 800,00 Kg | 219,64 Kg |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Cálculo de materiales para la elaboración de la mezcla de concreto permeable con adición de tiras de polietileno de baja densidad y de polipropileno con dimensiones de 20 mm x 4 mm, al 0,10%**

| Materiales | PARA 1 m ³ | PARA 0,1219 m ³ |
|----------------------------|-----------------------|----------------------------|
| Cemento | 386,27 Kg | 47,09 Kg |
| Arena | 177,68 Kg | 21,66 Kg |
| Piedrín de 3/8" | 1 085,41 Kg | 132,31 Kg |
| Agua | 150,64 Kg | 18,36 Kg |
| Tiras Plásticas (0,10%) | 1,80 Kg | 0,22 Kg |
| Total | 1 801,80 Kg | 219,64 Kg |

Fuente: elaboración propia.

2.3. Ensayos de laboratorio

Para conocer que el diseño de mezcla propuesto es apto para ser utilizado en pavimentos de tráfico liviano, el concreto permeable debe cumplir los requisitos mínimos de diseño para pavimentos, en cuanto resistencia y permeabilidad se refiere. Por lo tanto, se realizaron los siguientes ensayos de laboratorio según las Normas ASTM.

2.3.1. Ensayo de peso unitario y porcentaje de vacíos

Para determinar el peso unitario del concreto permeable, se debe realizar según lo estipulado en la norma ASTM C 1688 (método de prueba estándar para determinar la densidad y el contenido de vacío del concreto permeable recién mezclado).

Este ensayo difiere con el establecido en la norma ASTM C 138 (método de prueba estándar para determinar la densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de aire (gravimétrico) del concreto) en que en lugar de utilizar la varilla con punta redondeada, se utiliza el martillo de proctor estándar (5 libras) y a diferencia del ensayo convencional que se hace en tres capas con 25 golpes en cada una, en este ensayo se añade el concreto en dos capas de igual grosor y se golpea con el martillo 20 veces por capa. El peso unitario se obtiene dividiendo el peso neto del concreto (el peso del cilindro lleno de concreto menos la masa de la tara) con el volumen del cilindro.

$$P.U. = \frac{PB - Ptara}{Vol} \quad [Ec. 4]$$

Donde:

- P.U.: peso unitario
- PB: peso del cilindro lleno de concreto
- Ptara: peso de la tara
- Vol: volumen

Mediante este ensayo se puede obtener el porcentaje de vacíos en el concreto mediante la fórmula:

$$P.V. = \frac{T - D}{T} \times 100 \quad [\text{Ec. 5}]$$

Donde

- P.V.: porcentaje de vacíos
- T: densidad teórica del concreto
- D: densidad real del concreto

2.3.2. Ensayo a compresión

Para determinar la resistencia a compresión del concreto permeable, se realizaron los ensayos a compresión según la norma ASTM C-39 a probetas con dimensiones de 6" de diámetro y 12" de altura las cuales se elaboraron y se sometieron a curado según la norma ASTM C-192.

Para cada diseño de mezcla se ensayaron a compresión 3 probetas por edad, a los 3, 7 y 28 días.

- Procedimiento de la prueba de compresión:
 - Identificar el cilindro o espécimen.
 - Realizar dos mediciones del diámetro del cilindro, con aproximación de 0,25 mm (0,01 pulg) más cercano, medidos en ángulos rectos uno del otro a la altura media del espécimen.
 - Medir la longitud del espécimen, en tres posiciones espaciadas regularmente alrededor de la circunferencia, con aproximación de 1 mm (0,05 pulg) más cercano.
 - Determinar el área de la sección transversal en milímetros cuadrados (pulgadas cuadradas).
 - Someter a carga axial el cilindro en la máquina para el ensayo a compresión, a velocidad controlada.
 - Anotar el resultado de la carga máxima soportada.
 - Identificar y anotar el tipo de falla.
 - Calcular la resistencia a la compresión del espécimen dividiendo la carga máxima soportada por el espécimen durante el ensayo por el promedio del área de la sección transversal determinado expresar el resultado a los 0,1 MPa (10 lb/pulg²) más cercanos.

2.3.3. Ensayo a flexión

La determinación de la resistencia a flexión del concreto permeable es un factor predominante en el diseño de pavimentos. Para ello se realizaron dos vigas para cada diseño de mezcla con dimensiones de 6 pulgadas de alto por 6 pulgadas de ancho y 21 pulgadas de largo, según la norma ASTM C-192; se ensayaron a los 28 días de edad según la norma ASTM C-78.

- Procedimiento
 - Identificar el espécimen o viga.
 - Tomar la medida de la longitud de la separación entre apoyos en milímetros (o pulgadas).
 - Someter la viga a flexión, en la máquina de ensayo.
 - Anotar la carga máxima en newtons (o libras-fuerza).
 - Tomar tres medidas del ancho y espesor. Aproximar al más cercano 1 mm (0,05 pulg).
 - Determinar el módulo de ruptura a partir de los datos calculados.

- Si la fractura se inicia en la superficie de tensión dentro del tercio medio de la luz o longitud de separación entre apoyos, calcular el módulo de ruptura como sigue:

$$R = PL/bd^2 \quad [\text{Ec. 6}]$$

Donde:

- R: módulo de ruptura, MPa o psi.
- P: carga máxima aplicada indicada por la máquina de ensayo, N o lbf.
- L: longitud de la separación de apoyos, mm o pulg.
- b: ancho promedio del espécimen, en la fractura, mm o pulg.
- d: espesor promedio del espécimen, en la fractura, mm o pulg.

- Si la fractura ocurre en la sección de tensión fuera del tercio medio de la luz o longitud de separación entre apoyos por no más de 5 % de la luz, calcular el módulo de ruptura como sigue:

$$R = 3 Pa / bd^2 \quad [\text{Ec. 7}]$$

Donde:

- a: distancia promedio entre la línea de fractura y el soporte más cercano medido en la superficie de tensión de la viga, mm (o pulg).
- Si la fractura ocurre en la sección de tensión fuera del tercio medio de la luz o longitud de separación entre apoyos por más de 5 % de la misma, descartar los resultados del ensayo.

2.3.4. Ensayo a tracción indirecta

La resistencia a tracción indirecta se obtuvo al ensayar cilindros con dimensiones de 6 pulgadas de diámetro y 12 pulgadas de altura, según la norma ASTM C-496. Para lo cual se elaboraron 2 cilindros por cada diseño de mezcla y se ensayaron a los 28 días de edad.

- Procedimiento
 - Identificar el cilindro o espécimen.
 - Realizar dos mediciones del diámetro del cilindro con aproximación de 0,25 mm (0,01 pulg) más cercano medidos en ángulos rectos uno del otro a la altura media del espécimen.

- Medir la longitud del espécimen en tres posiciones espaciadas regularmente alrededor de la circunferencia con aproximación de 1 mm (0,05 pulg) más cercano.
- Posicionar el cilindro en la máquina para la realización del ensayo, aplicar una fuerza de compresión diametral a lo largo de la longitud del espécimen cilíndrico de concreto a una velocidad controlada, hasta que ocurra la falla.
- Anotar el resultado de la carga máxima soportada.
- Identificar y anotar el tipo de falla.
- Calcular la resistencia a tracción indirecta del espécimen como sigue:

$$T=2P/\pi ld \quad [\text{Ec. 8}]$$

Donde:

- T: resistencia a la tracción indirecta, MPa (psi)
 - P: máxima carga aplicada por la máquina de ensayo, N (lbf)
 - l: longitud, mm (pulg.), y
 - d: diámetro, mm (pulg.)
- Aproximar el resultado a los 0,05 Mpa (5 psi) más cercanos.

2.3.5. Ensayo de permeabilidad

La permeabilidad se determinó mediante el método descrito en la norma ASTM C 1701. Se fabricaron baldosas de 30 x 60 x 7,5 centímetros para cada diseño de mezcla para calcular la tasa de infiltración.

Se utilizó un anillo con diámetro de 12 pulgadas y altura de dos pulgadas, 18 kilogramos de agua (debido a que 3,6 kilogramos se infiltraron en menos de 30 segundos) por cada baldosa.

- Procedimiento
 - Identificar la baldosa de concreto permeable que se utilizara para el ensayo.
 - Instalar el anillo de infiltración, en la superficie superior de la baldosa de concreto permeable, utilizando un sellador. Dicho anillo debe poseer un diámetro de 300 ± 10 mm ($12,0 \pm 0,5$ pulg) con una altura mínima de 50 mm (2,0 pulg).
 - En el interior del anillo de infiltración, marcar o grabar dos líneas a una distancia de 10 y 15 mm (0,40 y 0,60 pulg) desde el fondo del anillo.
 - Medir y registrar el diámetro interior del anillo con una aproximación de 1 mm (0,05 pulg).
 - Pre humedecer: verter el agua en el anillo a una velocidad suficiente para mantener el nivel entre las dos líneas marcadas. Utilizar un total de $3,60 \pm 0,05$ kg ($8,0 \pm 0,1$ lb) de agua. Comenzar a cronometrar tan pronto como el agua impacte en la superficie de concreto permeable. Terminar de cronometrar cuando no exista agua en la superficie permeable. Registrar la cantidad de tiempo transcurrido con una aproximación de 0,1 s.

- El ensayo debe comenzar dentro de 2 minutos después de completar la prehumectación. Si el tiempo transcurrido en la etapa de prehumectación es menor de 30 s, entonces utilizar un total de $18,00 \pm 0,05$ kg ($40,00 \pm 0,1$ lb) de agua. Si el tiempo transcurrido en la etapa de pre-

humectación es mayor o igual a 30 s, entonces utilizar un total de $3,60 \pm 0,05$ kg ($8,0 \pm 0,1$ lb) de agua. Registrar el peso del agua con una aproximación de 10 g (0,02 lb). Verter el agua adentro del anillo a una velocidad suficiente para mantener el nivel entre las dos líneas marcadas y hasta que la cantidad medida de agua haya sido utilizada. Comenzar a cronometrar tan pronto como el agua impacte en la superficie de concreto permeable. Terminar de cronometrar cuando no exista agua en la superficie permeable. Registrar la duración del ensayo (t) con una aproximación de 0,1 s.

- Si un ensayo se repite en la misma ubicación, el ensayo que se está repitiendo no necesita una pre-humectación si se realiza entre los 5 min después de completar el primer ensayo. Si se conduce más de un ensayo en una misma ubicación en un solo día, la tasa de infiltración en esa ubicación en ese día debe ser calculada como el promedio de los dos ensayos. No repetir este ensayo en más de dos ocasiones en la misma ubicación en un solo día.
- Calcular la tasa de infiltración (I) utilizando unidades consistentes como se describe a continuación:

$$I = \frac{KM}{(D^2 x t)} \quad [\text{Ec. 9}]$$

Donde:

- I: tasa de infiltración, mm/h (pulg/h)
- M: masa de infiltración de agua, kg (lb)
- D: diámetro interior del anillo de infiltración, mm (pulg)

- t: tiempo requerido para que una cantidad medida de agua se infiltre en el concreto, (s)
- K: 4 583 666 000 en el sistema internacional o 126 870 en el sistema pulgada-libra.

El factor K tiene unidades de $(\text{mm}^3 \times \text{s}) / (\text{kg} / \text{h})$ [$(\text{pulg}^3 \times \text{s}) / (\text{lb} \times \text{h})$] y se necesitan convertir los datos (W, D, y t) a la tasa de infiltración I en mm/h (pulg/h).

3. RESULTADOS

Tabla XII. Resultados obtenidos del ensayo a compresión de las diferentes mezclas de concreto permeable

| Concreto permeable | Edad de ruptura | Identificación de cilindro | Resistencia a compresión en lb/plg ² | Promedio (lb/plg ²) | % resistencia con respecto a la de 28 días |
|---|-----------------|----------------------------|---|---------------------------------|--|
| TIPO 1 (Concreto sin adición de tiras plásticas) | 3 días | P1-1,1 | 1 350 | 1 263 | 47,25 % |
| | | P1-1,2 | 1 180 | | |
| | | P1-1,3 | 1 260 | | |
| | 7 días | P1-2,1 | 1 970 | 2 063 | 77,18 % |
| | | P1-2,2 | 2 350 | | |
| | | P1-2,3 | 1 870 | | |
| | 28 días | P1-3,1 | 2 550 | 2 673 | 100,00 % |
| | | P1-3,2 | 2 730 | | |
| | | P1-3,3 | 2 740 | | |
| TIPO 2 (Concreto con adición de tiras de polietileno) | 3 días | P2-1,1 | 1 150 | 1 113 | 45,93 % |
| | | P2-1,2 | 910 | | |
| | | P2-1,3 | 1 280 | | |
| | 7 días | P2-2,1 | 1 670 | 1 717 | 70,86 % |
| | | P2-2,2 | 1 840 | | |
| | | P2-2,3 | 1 640 | | |
| | 28 días | P2-3,1 | 2 420 | 2 423 | 100,00 % |
| | | P2-3,2 | 2 310 | | |
| | | P2-3,3 | 2 540 | | |
| TIPO 3 (Concreto con adición de tiras de polipropileno) | 3 días | P3-1,1 | 2 000 | 1 945 | 65,27 % |
| | | P3-1,2 | 1 890 | | |
| | 7 días | P3-2,1 | 2 380 | 2 270 | 76,17 % |
| | | P3-2,3 | 2 160 | | |
| | 28 días | P3-3,1 | 2 930 | 2 980 | 100,00 % |
| | | P3-3,2 | 3 030 | | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. Resultados obtenidos del ensayo a tracción indirecta, de las diferentes mezclas de concreto permeable

| Concreto permeable | Edad de ruptura | Identificación de cilindro | Resistencia a tracción indirecta(psi) | Promedio (psi) |
|--------------------|-----------------|----------------------------|---------------------------------------|----------------|
| Tipo 1 | 28 días | P1-1.1 | 215 | 225 |
| | | P1-1.2 | 235 | |
| Tipo 2 | 28 días | P2-1.1 | 255 | 235 |
| | | P2-1.2 | 215 | |
| Tipo 3 | 28 días | P3-1.1 | 385 | 400 |
| | | P3-1.2 | 415 | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. Resultados obtenidos del ensayo a flexión

| Concreto permeable | Edad de ruptura | Identificación de viga | Módulo de ruptura (psi) | Promedio (psi) |
|--------------------|-----------------|------------------------|-------------------------|----------------|
| Tipo 1 | 28 días | P1-v.1 | 370 | 395 |
| | | P1-v.2 | 420 | |
| Tipo 2 | 28 días | P2-v.1 | 485 | 500 |
| | | P2-v.2 | 510 | |
| Tipo 3 | 28 días | P3-v.1 | 430 | 440 |
| | | P3-v.2 | 450 | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. Resultados obtenidos del ensayo de peso unitario y porcentaje de vacíos

| Concreto permeable | Peso unitario (kg/m ³) | % de vacíos |
|--------------------|------------------------------------|-------------|
| Tipo 1 | 1 640 | 8,81 % |
| Tipo 2 | 1 670 | 7,14 % |
| Tipo 3 | 1 710 | 5,08 % |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. Resultados obtenidos del ensayo de permeabilidad

| Concreto permeable | Tipo 1 | Tipo 2 | Tipo 3 |
|------------------------------|--------|--------|--------|
| Tasa de infiltración (plg/h) | 796,60 | 603,90 | 549,38 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. Resumen de resultados, de las mezclas de concreto permeable, sin y con adiciones de tiras de polietileno y polipropileno

| Concreto permeable | Tipo 1 | Tipo 2 | Tipo 3 |
|--|---------|----------------------|------------------------|
| Aditivo | Ninguno | Tiras de polietileno | Tiras de polipropileno |
| Resistencia a compresión (psi) | 2 673 | 2 423 | 2 980 |
| Resistencia a tracción indirecta (psi) | 225 | 235 | 400 |
| Resistencia a flexión (psi) | 395 | 500 | 440 |
| Módulo de elasticidad (ksi) | 2 666 | 3 375 | 2 970 |
| Peso unitario (kg/m ³) | 1 640 | 1 670 | 1 710 |
| % De vacíos | 8,81% | 7,14% | 5,08% |
| Tasa de infiltración (plg/h) | 796,60 | 603,90 | 549,38 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. Determinación de la resistencia a flexión y a tensión a partir de la relación con la resistencia a compresión

| Concreto permeable | Tipo 1 | Tipo 2 | Tipo 3 |
|---|----------|----------------------|------------------------|
| Aditivo | Ninguno | Tiras de polietileno | Tiras de polipropileno |
| Resistencia a compresión (psi) | 2 673,00 | 2 423,00 | 2 980,00 |
| Resistencia a flexión = $2.3 f'c^{(2/3)}$ (psi) | 442,99 | 414,92 | 476,29 |
| Resistencia a tensión = $0.65 * m_r$ (psi) | 287,94 | 269,70 | 309,59 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. Comparación de valores teóricos y experimentales de la resistencia a flexión

| Concreto permeable | Tipo 1 | Tipo 2 | Tipo 3 |
|--|---------|----------------------|------------------------|
| Aditivo | Ninguno | Tiras de polietileno | Tiras de polipropileno |
| Resistencia a flexión valor experimental (psi) | 395,00 | 500,00 | 440,00 |
| Resistencia a flexión valor teórico (psi) | 442,99 | 414,92 | 476,29 |
| % de variación con respecto al teórico | 10,83% | 20,51% | 7,62% |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. Comparación de valores teóricos y experimentales de la resistencia a tensión

| Concreto permeable | Tipo 1 | Tipo 2 | Tipo 3 |
|--|---------|----------------------|------------------------|
| Aditivo | Ninguno | Tiras de polietileno | Tiras de polipropileno |
| Resistencia a tensión valor experimental | 225,00 | 235,00 | 400,00 |
| Resistencia a tensión valor teórico | 287,94 | 269,70 | 309,59 |
| % de variación con respecto al teórico | 21,86 % | 12,87 % | 29,20 % |

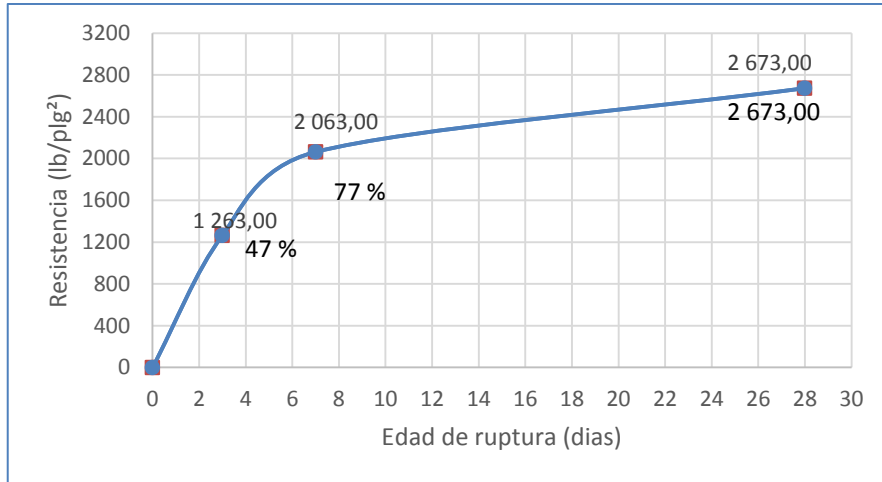
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. Comparación de valores teóricos y experimentales del peso unitario

| Concreto permeable | Tipo 1 | Tipo 2 | Tipo 3 |
|--|----------|----------------------|------------------------|
| Aditivo | Ninguno | Tiras de polietileno | Tiras de polipropileno |
| Peso unitario (kg/m ³) | 1 640,00 | 1 670,00 | 1 710,00 |
| Peso unitario del concreto convencional (kg/m ³) | 2 400,00 | 2 400,00 | 2 400,00 |
| % del peso unitario del concreto permeable con respecto al concreto convencional | 68,33 % | 69,58 % | 71,25 % |

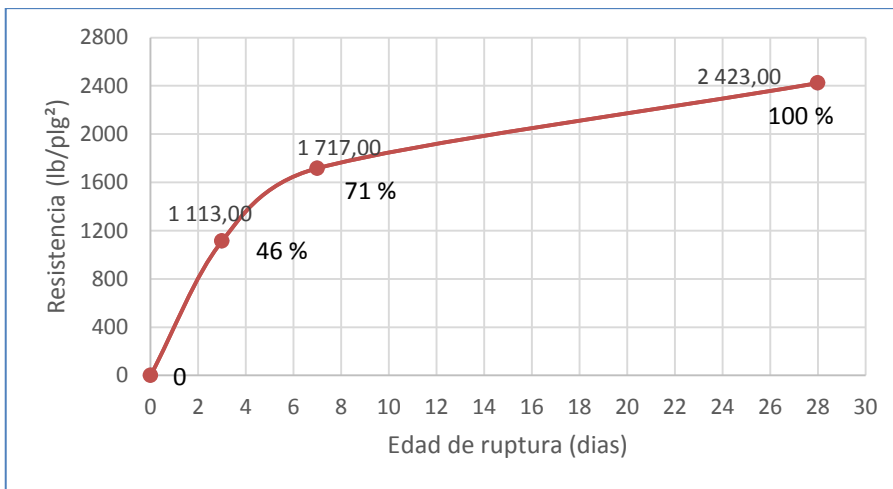
Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Resistencia a compresión con respecto a la edad para el concreto sin adición de tiras**



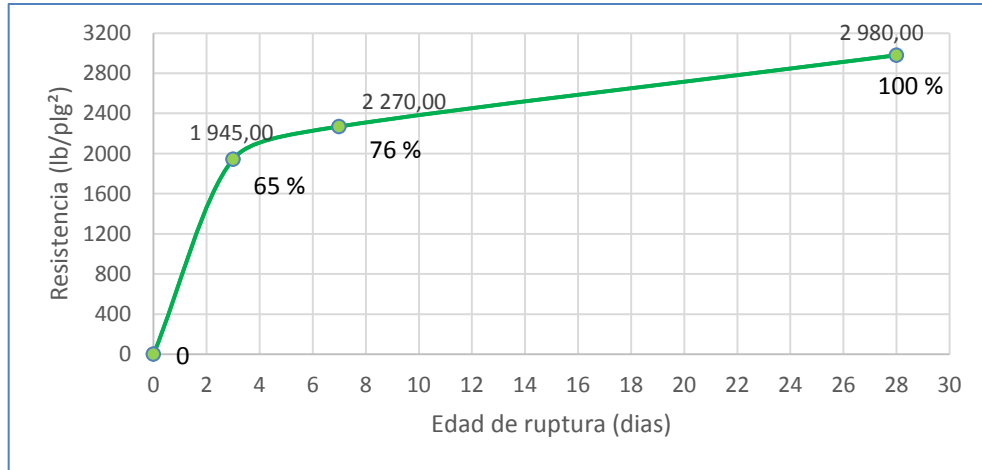
Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Resistencia a compresión con respecto a la edad para el concreto con adición de tiras de polietileno de baja densidad**



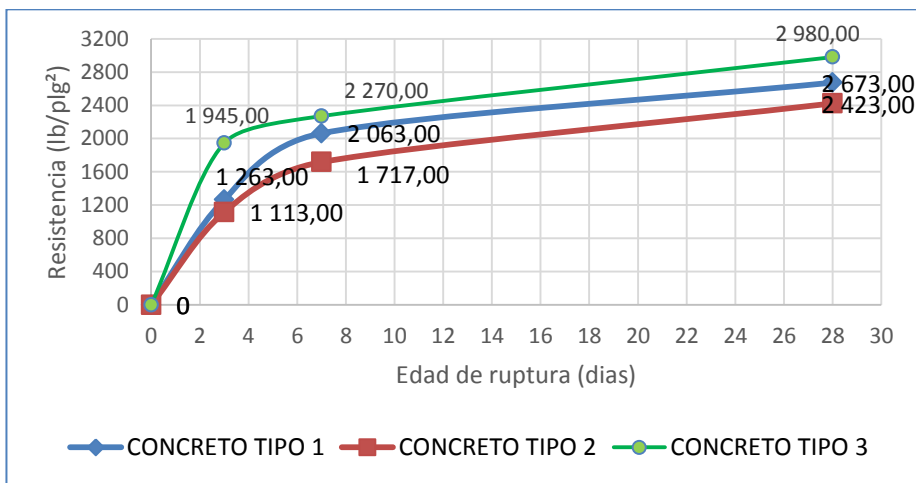
Fuente: elaboración propia.

Figura 31. Resistencia a compresión con respecto a la edad para el concreto con adición de tiras de polipropileno



Fuente: elaboración propia.

Figura 32. Comparación de resultados obtenidos del ensayo a compresión, de las diferentes mezclas de concreto permeable



Fuente: elaboración propia.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El presente informe a nivel de trabajo de graduación consistió en estudiar el comportamiento del concreto permeable, al utilizar como aditivos, dos diferentes tipos de polímeros, y determinar cuál presenta los mejores resultados, en cuanto resistencia y permeabilidad se refiere. Con la finalidad de obtener el diseño de mezcla adecuado, para ser utilizado en pavimentos de liviano.

Para realizar el estudio, primero se procedió con el diseño de una mezcla de concreto permeable, basado en los parámetros establecidos por el ACI 522-R10, y tomando como referencia investigaciones relacionadas al tema.

Seguidamente se realizaron 3 baldosas de muestra, con dimensiones de 15 cm x 15 cm x 7 cm de altura, variando la relación de agua / cemento y la cantidad de agregado fino, en donde se verificó la trabajabilidad y la permeabilidad del concreto. A partir de ello se obtuvo el diseño de mezcla, que se utilizó en esta investigación. La proporción de agregado fino / cemento fue de 0,46, la de agregado grueso / cemento fue de 2,81, la relación agua / cemento fue de 0,39 y se estableció un peso específico de 1 800 kilogramos por metro cúbico.

Posteriormente, se realizaron dos diseños de mezclas adicionales, utilizando como aditivos dos diferentes tipos de polímeros, polietileno de baja densidad y polipropileno. Para ello, se emplearon tiras con dimensiones de 4 mm x 20 mm, al 0,1 % del total de la mezcla.

Con la finalidad de analizar el comportamiento del concreto permeable, al utilizar los dos tipos de aditivos, se determinaron las características físico-mecánicas de las tres mezclas de concreto. Por lo tanto, se efectuaron los siguientes ensayos de laboratorio, en el Centro de Investigaciones de Ingeniería, según normas ASTM: peso unitario y porcentaje de vacíos, resistencia a compresión, resistencia a flexión, resistencia a tensión indirecta, y permeabilidad.

Los resultados obtenidos, del ensayo de resistencia a compresión, según norma ASTM C-39, se encuentran en la tabla XII y en las figuras 31 a la 34. Para llevar el control de la resistencia a compresión del concreto, durante el tiempo de curado, se llevaron a cabo los ensayos a los 3, 7 y 28 días, después de la fecha de fraguado.

Para la determinación de la resistencia a tracción indirecta, según la norma ASTM C-496, para cada mezcla de concreto, se ensayaron a los 28 días, dos cilindros con dimensiones de 6" de diámetro y 12" de altura. Los resultados se encuentran en la tabla XIII.

Así mismo, para la obtención del módulo de ruptura, se ensayaron dos vigas a flexión, según la norma ASTM C-78. Los resultados se logran apreciar en la tabla XIV.

Del ensayo de permeabilidad, basándose en las especificaciones de la norma ASTM C-1701, se logró determinar el índice de infiltración para cada tipo de mezcla de concreto permeable, los resultados se localizan en la tabla XV. Por otro lado, los resultados del ensayo de peso específico y porcentaje de vacíos, que se encuentran en la tabla XVI, demuestran que el porcentaje de vacíos es directamente proporcional a la permeabilidad del concreto.

En la Tabla XVII, se presenta el resumen de los resultados de los diferentes diseños de mezclas de concreto permeable. La mezcla de concreto permeable tipo 1 (sin adición de tiras plásticas), presentó los siguientes resultados: la resistencia a compresión a los 28 días, fue de 2 673 lb/plg², la resistencia a tracción indirecta, a los 28 días fue de 225 lb/plg², la resistencia a flexión a los 28 días, fue de 395 lb/plg², el módulo de elasticidad fue de 2 666 ksi, y la tasa de infiltración fue de 796,60 pulg/hora, que es superior a la tasa de infiltración mínima (285 pulg/hora).

Por otro lado, se determinaron teóricamente los valores de resistencia a flexión y a tensión, relacionando la resistencia a compresión, para cada mezcla de concreto. Así mismo, se compararon los resultados experimentales con respecto a los teóricos, dichos resultados se encuentran en las tablas XVIII a la XX.

Como punto de referencia se comparó el peso unitario de cada una de las mezclas de concreto permeable, con respecto al peso unitario del concreto convencional, el cual se encuentra en la tabla XXI.

Los resultados de los ensayos de laboratorio, de la mezcla de concreto permeable tipo 2 (con adición de tiras de polietileno de baja densidad, con dimensiones de 4 mm x 20 mm), determinan que con respecto a la mezcla de concreto permeable tipo 1, la resistencia a compresión se disminuyó en un 9 %, (2 423 lb/plg²), la resistencia a tracción indirecta se incrementó en un 5 % (235 lb/plg²), la resistencia a flexión se incrementó en un 26 % (500 lb/plg²), el módulo de elasticidad fue de 3 375 ksi, y la tasa de infiltración se disminuyó en un 24 % (603,90), sin embargo, es superior a la tasa de infiltración mínima (285 pulg/hora).

La mezcla de concreto permeable tipo 3 (con tiras de polipropileno, con dimensiones de 4 mm x 20 mm), presentó los siguientes resultados, con respecto al concreto permeable sin adición de tiras: la resistencia a compresión se incrementó en un 12 %, (2 980 lb/plg²), la resistencia a tracción indirecta se incrementó en un 79 % (400 lb/plg²), la resistencia a flexión se incrementó en un 11 % (440 lb/plg²), el módulo de elasticidad fue de 2 970 ksi, y la tasa de infiltración se disminuyó en un 31 % (549,38 pulg/hora), sin embargo, es superior a la tasa de infiltración mínima (285 pulg/hora).

De lo indicado anteriormente, se concluye que el diseño de mezcla de concreto permeable tipo 3, presento los mejores resultados de las tres mezclas, en cuanto a resistencia a compresión (2 980 lb/plg²), y resistencia a tracción (400 lb/plg²). Por otro lado, la mezcla de concreto permeable tipo 2, presentó los mejores resultados de las tres mezclas, en cuanto a resistencia a flexión (500 lb/plg²) y módulo de elasticidad (3 375 ksi).

Los resultados, indican que la adición de tiras plásticas, disminuye el porcentaje de vacíos y por lo tanto la permeabilidad. Sin embargo, las tres mezclas poseen una tasa de infiltración superior a la mínima (285 pulg/hora).

En la figura 32, se logra apreciar que la mezcla de concreto permeable tipo 3, fue el que mejores resultados proporciona a temprana edad, en cuanto a resistencia a compresión, en donde se obtiene una resistencia del 65,04 %, a los 3 días de curado, con respecto a la resistencia a los 28 días.

CONCLUSIONES

1. La adición de tiras de polietileno de baja densidad con dimensiones de 4 mm x 20 mm, al 0,10 % del total de la mezcla, modificó las características al concreto permeable, de la siguiente manera: la resistencia a compresión se disminuyó en un 9 % (2 423 lb/plg²), la resistencia a tracción indirecta se incrementó en un 5 % (235 lb/plg²), la resistencia a flexión se incrementó en un 26 % (500 lb/plg²) y la tasa de infiltración se disminuyó en un 24 % (603,90 pulg/hora).
2. El concreto permeable con adición de tiras de polipropileno, con dimensiones de 4 mm x 20 mm, al 0,10 % de la mezcla total, con respecto al concreto permeable sin adición de tiras, presentó los siguientes resultados: la resistencia a compresión se incrementó en un 12 %, (2 980 lb/plg²), la resistencia a tracción indirecta se incrementó en un 79 % (400 lb/plg²), la resistencia a flexión se incrementó en un 11 % (440 lb/plg²), y la tasa de infiltración se disminuyó en un 31 % (549,38 pulg/hora).
3. Los valores obtenidos en este trabajo de graduación son coherentes a lo que se indica en la teoría. Para todas las mezclas de concreto permeable la resistencia a compresión se encuentra dentro del rango de 2,8 a 28 Mpa (406,28 a 4062,8 psi), la resistencia a flexión es superior a 1 MPa (145,1 psi), el índice de infiltración es superior a 192 pulg/h. Con respecto a los valores de resistencia a flexión, obtenidos a partir de la resistencia a compresión, se concluye que la mezcla de concreto permeable con adición de tiras de polipropileno se acerca más a los

valores indicados a la teoría con un porcentaje de variación de 7,62 % con respecto al valor teórico. Así mismo, se obtuvo la resistencia a tensión a partir de la resistencia a compresión, y la mezcla de concreto permeable con adición de tiras de polietileno de baja densidad, fue la que posee menor porcentaje de variación con respecto a lo indicado a la teoría.

4. Se determinó que la adición de tiras plásticas con dimensiones de 4 mm x 20 mm al 0,10 % del total de la mezcla, se encuentra dentro del rango permisible, para obtener una tasa de infiltración superior a la mínima (285 pulg/hora), según lo estipulado en el ACI 522 R-10.
5. El porcentaje de vacíos es directamente proporcional a la permeabilidad del concreto permeable. Para el diseño de mezcla sin adición de tiras plásticas, se determinó que el porcentaje de vacíos fue de 8,81 % y una tasa de infiltración de 796,60 pulg/hora, para la mezcla con adición de tiras de polietileno de baja densidad, se obtuvo un porcentaje de vacíos de 7,14 % y un índice de permeabilidad de 603,90 pulg/hora, y por último para la mezcla con adición de tiras de polipropileno, se determinó un porcentaje de vacíos de 5,08 % y una tasa de permeabilidad de 549,38 pulg/hora.
6. Según lo estipulado en las especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes de la Dirección General de Caminos, para el diseño de pavimentos rígidos en Guatemala, con respecto al concreto, la resistencia mínima a la compresión debe ser de 3500 psi y la resistencia a la flexión de 550 psi. Por lo tanto, ninguno de los diseños realizados en este trabajo de graduación, cumple con estas características.

RECOMENDACIONES

1. Se le puede incrementar la resistencia a compresión y a flexión al concreto permeable si se considera en el diseño de mezcla un porcentaje mínimo de agregado fino sin que este afecte la permeabilidad del concreto. Tomando en cuenta que la cantidad de agregado fino que se considere es directamente proporcional a la resistencia, sin embargo, es inversamente proporcional a la permeabilidad del concreto.
2. En la elaboración de la mezcla de concreto permeable la compactación es un factor importante a considerar ya que a mayor compactación se incrementa la resistencia al concreto, pero afecta disminuyendo el porcentaje de vacíos, por lo tanto, su permeabilidad.
3. En el diseño de mezcla de concreto permeable la relación de agua/cemento debe ser inferior a 0,40 para obtener un concreto trabajable y que la pasta de cemento no perjudique la permeabilidad.
4. Debido a que en el diseño concreto permeable la relación de agua/cemento que se debe considerar debe ser mínima, se recomienda utilizar aditivos para mejorar la trabajabilidad del concreto (retardantes de agua) sin que afecte la relación agua / cemento.
5. Para continuar con la investigación realizada en este trabajo de graduación se recomienda utilizar un cemento estructural con una resistencia de 5800 psi a los 28 días de edad. Seguidamente, experimentar si de esta manera se logra cumplir con las especificaciones

generales para construcción de carreteras y puentes de la Dirección General de Caminos, con respecto a la resistencia del concreto.

6. Promover la investigación al estudiar el comportamiento de otros polímeros o aditivos que incrementen la resistencia al concreto sin que afecte considerablemente la permeabilidad, y de esta manera obtener el diseño óptimo.
7. Para la obtención de la materia prima de tiras plásticas se recomienda abocarse a empresas que reciclan plásticos.

BIBLIOGRAFÍA

1. ACI. Boletín Informativo núm. 183. [En línea] <http://acicdmexicoscs.org.mx/attachments/File/Boletin183_Interiores_ok.pdf>[Consulta: 30 de agosto de 2013].
2. BARRIOS BOLAÑOS, Walter Raúl. *Guía teórica y práctica del curso de pavimentos y mantenimientos de carreteras*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2007. 171 p.
3. CEMEX CONCRETOS. *Pavimentos de concreto Cemex*. México: Amarillo AM, 2010. 139 p.
4. Centro de Aguas Urbanas Depto. de Ingeniería Hidráulica y Ambiental Pontificia Universidad Católica de Chile. Con bajo impacto hidrológico ambiental: *Uso de pavimentos permeables*. Revista BIT, noviembre 2013. [En línea] <http://www.centroaguasurbanas.cl/documentos/Uso_de_Pavimentos_Permeables_Revista_BIT.pdf>[Consulta: 30 de agosto de 2013].
5. Depto. de Ingeniería y Gestión de la Construcción, PUC. *Pavimentos porosos de hormigón: Una opción para mitigar los efectos de las aguas lluvias*. revista BIT, noviembre 2012. [En línea]<<http://www.centroaguasurbanas.cl/documentos/Pavimentos>

_Porosos_de_Hormigon_Revista_BIT.pdf.> [Consulta: 30 de agosto de 2013].

6. FLORES PRIETO, Juan Roberto. *Caracterización del concreto permeable usando el módulo de ruptura y el porcentaje de desgaste*. Trabajo de maestría en infraestructura en la rama de las vías terrestres. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2010. 76 p.
7. LÓPEZ PALACIOS, Emiliano. *Control de calidad y colocación de concretos permeables*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2010. 94 p.
8. REYES., Fredy; TORRES, Andrés; Grupo CECATA. *Efecto de las fibras plásticas en la flexión de estructuras de pavimentos drenantes*. Revista de Ingeniería de Construcción. Volumen 17 núm. 2. Año 2002. [En línea]<<http://www.ricuc.cl/index.php/ric/article/download/248/47>>.[Consulta: 27 de agosto de 2013].
9. RODAS RALDA, Natalia Ixchel. *Desarrollo y uso de bloques de concreto permeable en senderos ecológicos*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2012. 117 p.
10. VIDAL, Artemio Saucedo. *Concreto hidráulico permeable, una alternativa para la recarga de los mantos acuíferos del valle de México*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2010. 148 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Muestra de cálculo

- Resistencia a compresión

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad [\text{Ec. 10}]$$

Donde:

- σ : resistencia a compresión en Kg/cm² (lb/pulg²)
- P: carga a compresión en Kg (lb)
- A: área en cm² (pulg²)

Ejemplo: para el cilindro P1-3.1, que se ensayó a compresión a los 28 días, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Carga: 71 000 lbs (32 205,39 kg)
- Diámetro promedio: 15,11 cm (5,95 plg)
- Factor de conversión de kg/cm² a lb/plg²: 14,225

$$\sigma: \frac{32\,205,39\text{ kg}}{\pi/4 (15,11\text{ cm})^2} : 179,72 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * 14,225: 2556\text{ lb/plg}^2 \cong 2560\text{ lb/plg}^2$$

Resistencia a tracción indirecta

$$T = \frac{2P}{\pi h \phi} \quad [\text{Ec. 11}]$$

Donde:

- T: resistencia a tracción indirecta (kg/cm²)
- P: carga en Kg
- h: altura en cm
- Ø: diámetro en cm

Ejemplo: Para el cilindro P1-1.1, que se ensayó a tracción indirecta a los 28 días, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Carga: 24 000 lbs (10 866,33 kg)
- Altura promedio: 30,44 cm
- Diámetro promedio: 15,21 cm
- Factor de conversión de kg/cm² a lb/plg²: 14,225

$$T = \frac{2 * 10\,866,33 \text{ kg}}{\pi * 30,44 \text{ cm} * 15,21 \text{ cm}} = 14,94 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * 14,225 = 212,52 \text{ lb/plg}^2$$

$$\cong 215 \text{ lb/plg}^2$$

- Peso unitario y porcentaje de vacíos

$$P.U. = \frac{P_{tara+mat} - P_{tara}}{V_{tara}} \quad [\text{Ec. 12}]$$

$$\% \text{ DE VACIOS} = \frac{P.U._{Teorico} - P.U._{real}}{P.U._{Teorico}} * 100 \quad [\text{Ec. 13}]$$

Ejemplo: para la mezcla de concreto permeable tipo 1, se obtuvieron los siguientes resultados:

- $P.U_{Teorico}$: 1800 kg/m³
- $P_{tara+mat}$: 14,16 kg
- P_{tara} : 2,67 kg
- V_{tara} : 0,007 m³ (7 L)

$$P.U. = \frac{14,16 - 2,67}{0,007} = 1\,641,43 \frac{kg}{m^3} \cong 1\,640 \frac{kg}{m^3}$$

$$\% DE VACIOS = \frac{1\,800 - 1\,641,43}{1\,800} * 100 = 8,81 \%$$

- Resistencia a flexión

$$MR = \frac{PL}{ah^2} \quad [Ec. 14]$$

Donde:

- MR= módulo de Ruptura en kg/cm²
- P= carga en kg
- L= distancia de luz entre apoyos en cm
- a= ancho en cm
- h= altura en cm

Ejemplo: para la viga de concreto P1-V.1 que se ensayó a flexión a 28 días, se obtuvieron los siguientes resultados:

- P: 4 500 lbs (2 041,19 kg)
- L: 45,72 cm
- $a_{promedio}$: 15,43 cm
- $h_{promedio}$: 15,23 cm
- Factor de conversión de kg/cm^2 a lb/plg^2 : 14,225

$$MR = \frac{2\,041,19 * 45,72}{15,43 * 15,23^2} = 26,07 \frac{kg}{cm^2} * 14,225 = 370,85 lb/plg^2 \cong 370 lb/plg^2$$

- Módulo de elasticidad

$$Ec = 6750 * MR \quad [Ec. 15]$$

Donde:

- E_c = módulo de elasticidad (psi)
- MR = módulo de ruptura (psi)

Ejemplo: para la mezcla de concreto permeable tipo 1, se obtuvieron los siguientes resultados, del ensayo de resistencia a flexión:

MR : 395 psi

$$Ec = 6\,750 * 395 = 2\,671\,334 \text{ psi} = 2\,666 \text{ ksi}$$

- Permeabilidad

$$I = \frac{KM}{D^2 * t} \quad [Ec. 16]$$

Donde:

- I: tasa de infiltración, mm/h (pulg/h)
- M: masa de infiltración de agua, kg (lb)
- D : diámetro interior del anillo de infiltración, mm (pulg)
- T: tiempo requerido para que una cantidad medida de agua se infiltre en el concreto (s)
- K: 4 583 666 000 en sistema internacional o 126 870 en sistema pulgada-libra.
- Ejemplo: para la mezcla de concreto permeable tipo 1, se obtuvieron los siguientes resultados del ensayo de permeabilidad:
- Masa de infiltración de agua : 18 kg (18 L)
- D: 217 mm
- t: 86,595 s

$$I = \frac{4\,583\,666\,000 * 18\text{kg}}{217^2 * 86,595} = 20\,233,74 \frac{\text{mm}}{\text{h}} \div 25,4 \text{ mm/pulg} = 796,60 \text{ pulg/hora}$$

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Elaboración de mezclas de concreto permeable**



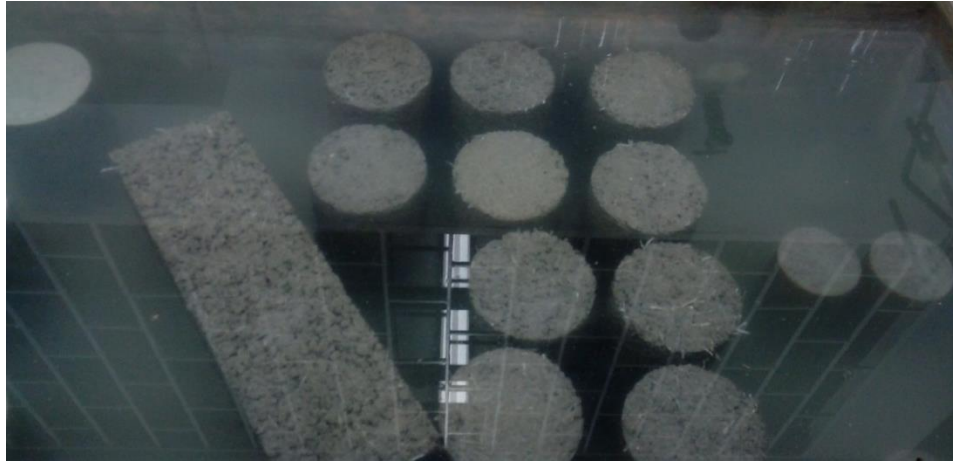
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Elaboración de las muestras de concreto permeable, para ser ensayadas en el laboratorio**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Curado de las muestras de concreto permeable**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Cilindros de concreto permeable, para ser ensayados a compresión**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Viga de concreto permeable, para ser ensayada a flexión**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Determinación del peso de cilindro de concreto permeable tipo 3, antes de ser ensayado a compresión**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. Ensayo de resistencia a compresión, según Norma ASTM C-39 al cilindro de concreto permeable tipo 3, a los 28 días de curado



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. Ensayo de resistencia a flexión, según norma ASTM C-78, a la viga de concreto permeable tipo 3, a los 28 días de curado



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Ensayo de resistencia a tracción indirecta al cilindro de concreto permeable tipo 1, a los 28 días de curado**



Fuente: elaboración propia.

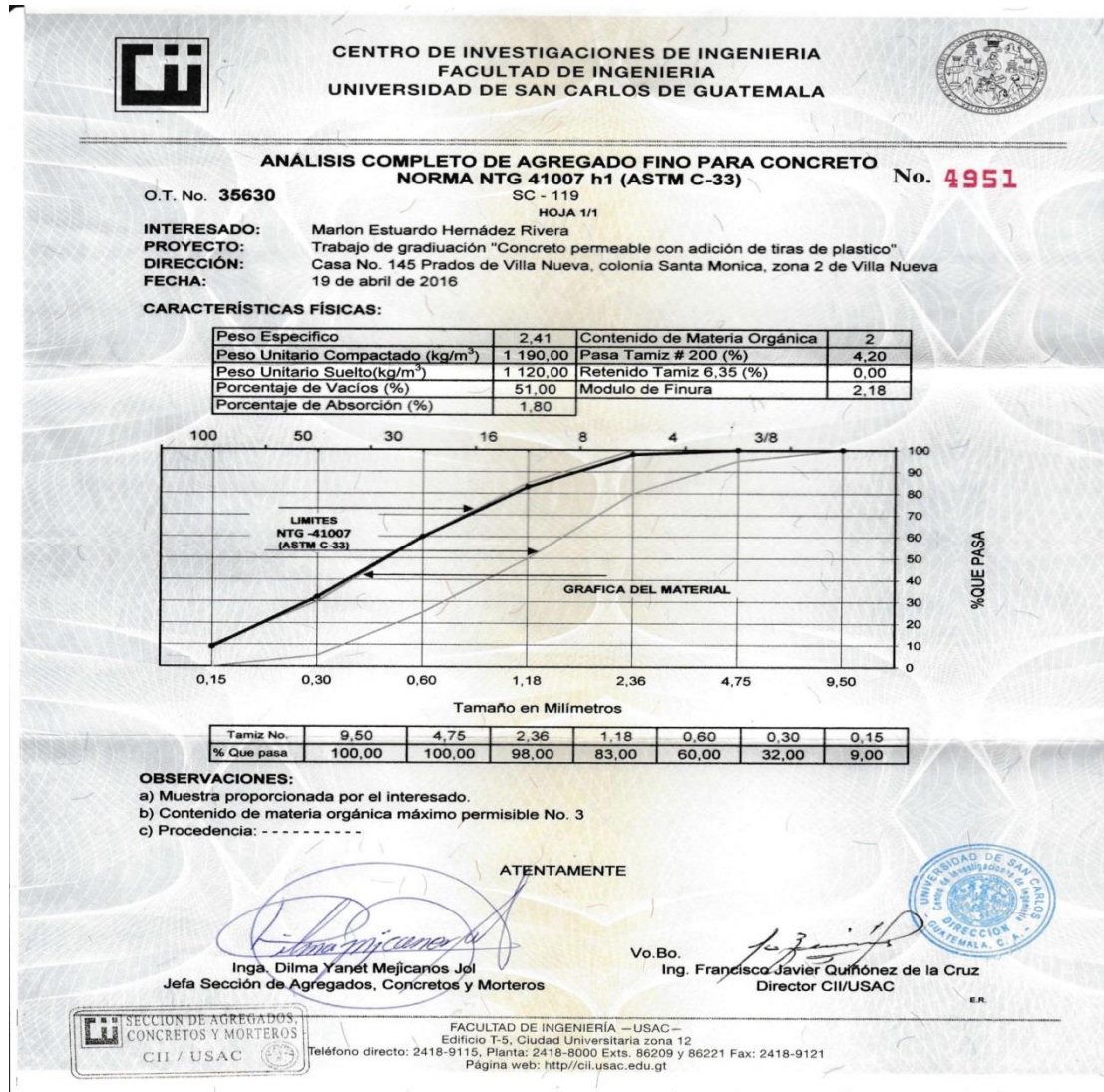
Apéndice 11. **Ensayo de permeabilidad, según norma ASTM C-1701, a la muestra de concreto permeable tipo 1**



Fuente: elaboración propia.


ANEXOS

Anexo 1. Resultados de los ensayos al agregado fino




Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Anexo 2. Resultados de los ensayos al agregado grueso



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



ANÁLISIS COMPLETO DE AGREGADO GRUESO PARA CONCRETO
NORMA NTG 41007 h1 (ASTM C-33)

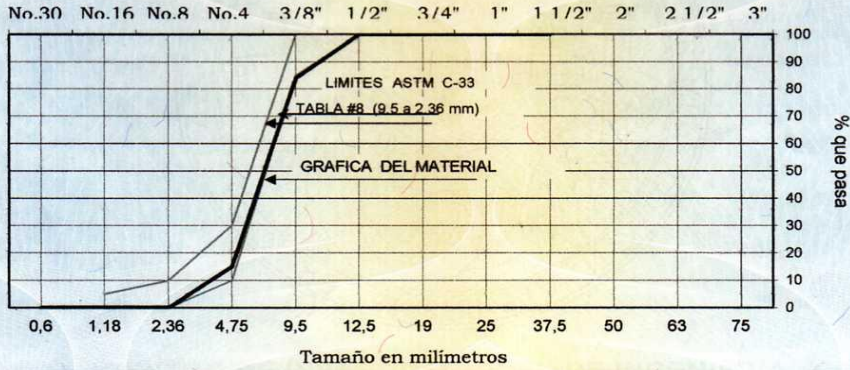
O.T. No. 35629
INFORME No. S.C. - 215
HOJA 1/1

INTERESADO: Marlon Estuardo Hernández Rivera Carné 2010 20420
PROYECTO: Trabajo de graduación "Concreto permeable con adición de tiras de plástico".
DIRECCIÓN: Casa No. 145 Prados de Villa Nueva, Colonia Santa Monica, Z. 2, Villa Nueva.
FECHA: 15 de junio de 2016

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS:

| | | | |
|--|----------|--------------------------------------|-------|
| Densidad Relativa (sss) | 2,73 | Pasa Tamiz # 200 (%) | 0,20 |
| Densidad (sss) (kg/m ³) | 2 720,00 | Porcentaje de Vacíos, Compactado (%) | 44,00 |
| Masa Unitaria, Compactada (kg/m ³) | 1 530,00 | Porcentaje de Vacíos, Suelto (%) | 46,00 |
| Masa Unitaria, Suelta (kg/m ³) | 1 470,00 | Modulo de Finura | 6,01 |
| Porcentaje de Absorción (%) | 2,30 | Retenido Tamiz 6,35 (%) | 51,70 |

No. 08063




| Tamiz No. | 1 1/2" | 1" | 3/4" | 1/2" | 3/8" | No.4 | No.8 | No.16 |
|------------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|------|-------|
| % Que pasa | 100,0 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 84,00 | 15,00 | 0,00 | 0,00 |

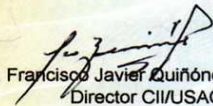
OBSERVACIONES:

- Muestra proporcionada por el interesado.
- Tamiz # 200, procedimiento A, lavado con agua corriente.


ATENTAMENTE,



Ing. Digna Yanet Mejicanos Jol
Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros

Vo.Bo. 


Ing. Francisco Javier Quiñón de la Cruz
Director CII/USAC




FACULTAD DE INGENIERÍA –USAC–
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Anexo 3. Resultados de los ensayos a compresión del concreto tipo 1



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



INFORME DE ENSAYO A COMPRESIÓN PARA CILINDROS DE CONCRETO
NORMA NTG - 41017 h1 (ASTM C-39) **No. 08436**
INFORME SACM - 506
HOJA 1/1

O.T. No. 35627

INTERESADO: Marlon Estuardo Hernández Rivera.

PROYECTO: Trabajo de graduación "Concreto permeable con adición de tiras de plástico y su aplicación en pavimentos rígidos de tráfico liviano".

DIRECCIÓN: Casa No. 145 Prados de Villa Nueva, Colonia Santa Mónica, Zona 2 de Villa Nueva.

FECHA: 10 de noviembre de 2016

| No. CILINDRO OBRA | No. CILINDRO LABORATORIO | FECHA DE ELABORACIÓN | FECHA DE RUPTURA | EDAD en días | CILINDRO REPRESENTATIVO DE LA FUNDICIÓN | PESO en kg | DIÁMETRO en cm | ALTURA en cm | CARGA en libras | RESISTENCIA Mpa | RESISTENCIA lb/pig ² | TIPO DE FRACTURA |
|-------------------|--------------------------|----------------------|------------------|--------------|---|------------|----------------|--------------|-----------------|-----------------|---------------------------------|------------------|
| P1-1.1 | 48-06 | 20/06/2016 | 23/06/2016 | 3 | Concreto permeable tipo 1 | 10,190 | 15,085 | 30,460 | 37 500 | 9,30 | 1 350 | E |
| P1-1.2 | 49-06 | 20/06/2016 | 23/06/2016 | 3 | Concreto permeable tipo 1 | 10,150 | 15,090 | 30,513 | 32 500 | 8,10 | 1 180 | B |
| P1-1.3 | 50-06 | 20/06/2016 | 23/06/2016 | 3 | Concreto permeable tipo 1 | 10,290 | 15,175 | 30,530 | 35 500 | 8,70 | 1 260 | B |
| P1-2.1 | 51-06 | 20/06/2016 | 27/06/2016 | 7 | Concreto permeable tipo 1 | 9,960 | 15,210 | 30,310 | 55 500 | 13,60 | 1 970 | B |
| P1-2.2 | 52-06 | 20/06/2016 | 27/06/2016 | 7 | Concreto permeable tipo 1 | 10,100 | 15,115 | 30,253 | 65 500 | 16,20 | 2 350 | B |
| P1-2.3 | 53-06 | 20/06/2016 | 27/06/2016 | 7 | Concreto permeable tipo 1 | 9,930 | 15,100 | 30,330 | 52 000 | 12,90 | 1 870 | B |
| P1-3.1 | 106-07 | 20/06/2016 | 18/07/2016 | 28 | Concreto permeable tipo 1 | 10,340 | 15,105 | 30,550 | 71 000 | 17,60 | 2 550 | B |
| P1-3.2 | 107-07 | 20/06/2016 | 18/07/2016 | 28 | Concreto permeable tipo 1 | 10,350 | 15,090 | 30,483 | 75 500 | 18,80 | 2 730 | D |
| P1-3.3 | 108-07 | 20/06/2016 | 18/07/2016 | 28 | Concreto permeable tipo 1 | 10,220 | 15,075 | 30,467 | 76 000 | 18,90 | 2 740 | B |

OBSERVACIONES :

a) Diseño de mezcla bajo condiciones de laboratorio.

b) Muestras ensayadas en maquina de compresión RIEHLE Testing Machine División con capacidad de 300,000 lbs.

c) Dial utilizado para lectura de cargas: 300,000 lbs.

d) Cilindros cabeceados según norma ASTM C-1231.


e) Asentamiento de mezcla: 0,00 cm.

f) Peso unitario: 1640,0,0 Kg/m³ (ASTM C-1688).


g) Contenido de vacio: 8,81 % (ASTM C-1688).

h) Proporción utilizada: 1 : 0,46 : 2,81 : 0,39.


BOSQUEJO DE TIPOS DE FRACTURA




A. CONO




B. COMO Y CLIVAJE



C. COMO Y RUPTURA




D. CORTE

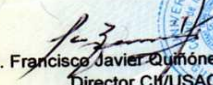


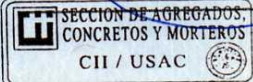
E. COLUMNAR

El presente informe representa únicamente las muestras identificadas en el mismo.
Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.

ATENAMENTE,


Inga. Dilma Yanez Mejicanos Jol
Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros

Vo.Bo. 
Ing. Francisco Javier Quiñones de la Cruz
Director CII/USAC



FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: http://cii.usac.edu.gt

CV

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Anexo 4. Resultados de los ensayos a flexión del concreto tipo 1



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**INFORME DE ENSAYO A FLEXIÓN DE VIGAS DE CONCRETO
NORMA NTG 41017 h2 (ASTM C-78)
INFORME SACM - 507
HOJA 1/1**

No. 08437

O.T. No. 35627

INTERESADO: Marlon Estuardo Hernández Rivera.

PROYECTO: Trabajo de graduación "Concreto permeable con adición de tiras de plástico y su aplicación en pavimentos rígidos de tráfico liviano".

DIRECCIÓN: Casa No. 145 Prados de Villa Nueva, Colonia Santa Mónica, Zona 2 de Villa Nueva.

FECHA: 10 de noviembre de 2016

RESULTADOS:

| MUESTRA | FECHA DE COLOCACIÓN | FECHA DE RUPTURA | EDAD (días) | ANCHO (mm) | ALTO (mm) | LARGO (mm) | LUZ ENTRE APOYOS (mm) | CARGA RUPTURA (N) | ESFUERZO A FLEXIÓN (Mpa) | ESFUERZO A FLEXIÓN (PSI) |
|---------|---------------------|------------------|-------------|------------|-----------|------------|-----------------------|-------------------|--------------------------|--------------------------|
| P1-V.1 | 20/06/2016 | 18/07/2016 | 28 | 154,33 | 152,33 | 536,00 | 457,20 | 20 017 | 2,55 | 370,00 |
| P1-V.2 | 20/06/2016 | 18/07/2016 | 28 | 152,33 | 151,67 | 536,67 | 457,20 | 22 241 | 2,90 | 420,00 |

OBSERVACIONES:

- a) Muestra elaborada y moldeada en laboratorio.
- b) La falla ocurrió en la superficie de tensión dentro del tercio medio de la luz entre apoyos de la viga .

El presente informe representa únicamente las muestras identificadas en el mismo.
Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.

ATENTAMENTE,



Inga. Dilma Yanez Mejicanos Jol
Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros

Vo.Bo. 

Ing. Francisco Javier Guzmán de la Cruz
Director CII/USAC



SECCION DE AGREGADOS,
CONCRETOS Y MORTEROS
CII / USAC

FACULTAD DE INGENIERÍA –USAC–
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

cv.


Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Anexo 5. Resultados de los ensayos de permeabilidad del concreto tipo 1


| | | |
|---|--|---|
|  | CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA |  |
| INFORME DE ENSAYO DE PERMEABILIDAD EN CONCRETO NORMA NTG 41017 h 34 (ASTM C-1701) | | No. 08438 |
| O.T. No.35627 | INFORME SACM - 508 HOJA 1/1 | |
| INTERESADO: | Marlon Estuardo Hernández Rivera. | |
| PROYECTO: | Trabajo de graduación "Concreto permeable con adición de tiras de plástico y su aplicación en pavimentos rígidos de tráfico liviano". | |
| DIRECCIÓN: | Casa No. 145 Prados de Villa Nueva, Colonia Santa Mónica, Zona 2 de Villa Nueva. | |
| FECHA: | 10 de noviembre de 2016 | |
| RESULTADOS: | | |
| | TASA DE INFILTRACIÓN (pulgadas/hora) | |
| CONCRETO PERMEABLE TIPO 1 | 796,60 | |
| OBSERVACIONES: | | |
| a) Mezclas realizadas bajo condiciones de laboratorio. b) Ensayos realizados en laboratorio. | | |
| El presente informe representa únicamente las muestras identificadas en el mismo. Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización. | | |
| ATENTAMENTE, | | |
|  | Vo.Bo.  |  |
| Inga Dilma Yanet Mejicanos Jol Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros | Francisco Javier Quiñonez de la Cruz Director CII/USAC | cv. |
|  | FACULTAD DE INGENIERÍA –USAC– Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12 Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121 Página web: http://cii.usac.edu.gt | |

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Anexo 6. Resultados de los ensayos a compresión del concreto tipo 2



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



INFORME DE ENSAYO A COMPRESIÓN PARA CILINDROS DE CONCRETO No. **08441**
NORMA NTG - 41017 h1 (ASTM C-39)
INFORME SACM - 511
HOJA 1/1

O.T. No. 35626






INTERESADO: Marlon Estuardo Hernández Rivera.
PROYECTO: Trabajo de graduación "Concreto permeable con adición de tiras de plástico y su aplicación en pavimentos rígidos de tráfico liviano".
DIRECCIÓN: Casa No. 145 Prados de Villa Nueva, Colonia Santa Mónica, Zona 2 de Villa Nueva.
FECHA: 11 de noviembre de 2016

| No. CILINDRO OBRA | No. CILINDRO LABORATORIO | FECHA DE ELABORACIÓN | FECHA DE RUPTURA | EDAD en días | CILINDRO REPRESENTATIVO DE LA FUNDICIÓN | PESO en kg | DIÁMETRO en cm | ALTURA en cm | CARGA en libras | RESISTENCIA Mpa | RESISTENCIA lb/pg ² | TIPO DE FRACTURA |
|-------------------|--------------------------|----------------------|------------------|--------------|---|------------|----------------|--------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|------------------|
| P2-1.1 | 44-11 | 18/07/2016 | 21/07/2016 | 3 | Concreto permeable tipo 2 | 10,080 | 15,185 | 30,437 | 32 000 | 7,90 | 1 150 | B |
| P2-1.2 | 45-11 | 18/07/2016 | 21/07/2016 | 3 | Concreto permeable tipo 2 | 10,490 | 15,230 | 30,630 | 26 000 | 6,30 | 910 | B |
| P2-1.3 | 46-11 | 18/07/2016 | 21/07/2016 | 3 | Concreto permeable tipo 2 | 10,300 | 15,230 | 30,447 | 36 000 | 8,80 | 1 280 | B |
| P2-2.1 | 47-11 | 18/07/2016 | 25/07/2016 | 7 | Concreto permeable tipo 2 | 10,110 | 15,225 | 30,437 | 47 000 | 11,50 | 1 670 | B |
| P2-2.2 | 48-11 | 18/07/2016 | 25/07/2016 | 7 | Concreto permeable tipo 2 | 9,950 | 15,200 | 30,490 | 52 000 | 12,70 | 1 840 | B |
| P2-2.3 | 49-11 | 18/07/2016 | 25/07/2016 | 7 | Concreto permeable tipo 2 | 10,250 | 15,205 | 30,580 | 46 000 | 11,30 | 1 640 | B |
| P2-3.1 | 50-11 | 18/07/2016 | 16/08/2016 | 29 | Concreto permeable tipo 2 | 9,900 | 15,190 | 30,573 | 68 000 | 16,70 | 2 420 | B |
| P2-3.2 | 51-11 | 18/07/2016 | 16/08/2016 | 29 | Concreto permeable tipo 2 | 10,260 | 15,105 | 30,470 | 64 000 | 15,90 | 2 310 | B |
| P2-3.3 | 52-11 | 18/07/2016 | 16/08/2016 | 29 | Concreto permeable tipo 2 | 10,150 | 15,140 | 30,413 | 71 000 | 17,50 | 2 540 | D |

OBSERVACIONES :


- Diseño de mezcla bajo condiciones de laboratorio.
- Muestras ensayadas en maquina de compresión RIEHLE Testing Machine División con capacidad de 300,000 lbs.
- Dial utilizado para lectura de cargas: 300,000 lbs.
- Cilindros cabeceados según norma ASTM C-1231.
- Asentamiento de mezcla: 0,00 cm.
- Peso unitario: 1670,00 Kg/m³ (ASTM C-1688).
- Contenido de vacio: 7,14 % (ASTM C-1688).
- Proporción utilizada: 1 : 0,46 : 2,81 : 0,39.
- Se utilizó 0,10 % de fibra de polipropileno


BOSQUEJO DE TIPOS DE FRACTURA








El presente informe representa únicamente las muestras identificadas en el mismo.
Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.


ATENTAMENTE,


 Inga Dylma Yanet Mejicanos Jol
 Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros

Vo.Bo.

 Ing. Francisco Javier Quijón de la Cruz
 Director CII/USAC



FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—
 Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
 Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
 Página web: http://cii.usac.edu.gt



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Anexo 7. Resultados de los ensayos a flexión del concreto tipo 2



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



INFORME DE ENSAYO A FLEXIÓN DE VIGAS DE CONCRETO
NORMA NTG 41017 h2 (ASTM C-78)
INFORME SACM - 512
HOJA 1/1

No. 08442

O.T. No. 35626

INTERESADO: Marlon Estuardo Hernández Rivera.

PROYECTO: Trabajo de graduación "Concreto permeable con adición de tiras de plástico y su aplicación en pavimentos rígidos de tráfico liviano".

DIRECCIÓN: Casa No. 145 Prados de Villa Nueva, Colonia Santa Mónica, Zona 2 de Villa Nueva.

FECHA: 11 de noviembre de 2016

RESULTADOS:

| MUESTRA | FECHA DE COLOCACIÓN | FECHA DE RUPTURA | EDAD (días) | ANCHO (mm) | ALTO (mm) | LARGO (mm) | LUZ ENTRE APOYOS (mm) | CARGA RUPTURA (N) | ESFUERZO A FLEXIÓN (Mpa) | ESFUERZO A FLEXIÓN (PSI) |
|---------|---------------------|------------------|-------------|------------|-----------|------------|-----------------------|-------------------|--------------------------|--------------------------|
| P2-V.1 | 18/07/2016 | 16/08/2016 | 29 | 152,17 | 152,07 | 537,00 | 457,20 | 25 800 | 3,35 | 485,00 |
| P2-V.2 | 18/07/2016 | 16/08/2016 | 29 | 152,03 | 151,97 | 535,00 | 457,20 | 26 689 | 3,50 | 510,00 |

OBSERVACIONES:

- a) Muestra elaborada y moldeada en laboratorio.
- b) La falla ocurrió en la superficie de tensión dentro del tercio medio de la luz entre apoyos de la viga .
- c) Se utilizo 0,10 % de fibra de polipropileno.

El presente informe representa únicamente las muestras identificadas en el mismo.
Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.

ATENTAMENTE,



Inga Dilma Yanet Mejicanos Jol
Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros

Vo.Bo. 

Ing. Francisco Javier Quirónez de la Cruz
Director CII/USAC



SECCION DE AGREGADOS,
CONCRETOS Y MORTEROS
CII / USAC

FACULTAD DE INGENIERÍA –USAC–
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>


UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DIRECCIÓN GENERAL DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS
C.V.

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Anexo 8. Resultados de los ensayos de permeabilidad del concreto tipo 2



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**INFORME DE ENSAYO DE PERMEABILIDAD EN CONCRETO
NORMA NTG 41017 h 34 (ASTM C-1701)**

No. 08443

O.T. No.35626

INFORME SACM - 513
HOJA 1/1

INTERESADO: Marlon Estuardo Hernández Rivera.

PROYECTO: Trabajo de graduación "Concreto permeable con adición de tiras de plástico y su aplicación en pavimentos rígidos de tráfico liviano".

DIRECCIÓN: Casa No. 145 Prados de Villa Nueva, Colonia Santa Mónica, Zona 2 de Villa Nueva.

FECHA: 11 de noviembre de 2016

RESULTADOS:

| TASA DE INFILTRACIÓN (pulgadas/hora) | |
|--------------------------------------|--------|
| CONCRETO PERMEABLE TIPO 2 | 603,90 |

OBSERVACIONES:

- a) Mezclas realizadas bajo condiciones de laboratorio.
- b) Ensayos realizados en laboratorio.
- c) Se utilizo 0,10 % de fibra de polipropileno.

El presente informe representa únicamente las muestras identificadas en el mismo.
Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.

ATENTAMENTE,



Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros

Vo.Bo. 
Ing. Francisco Javier Quiñón de la Cruz
Director CII/USAC



SECCION DE AGREGADOS,
CONCRETOS Y MORTEROS
CII / USAC

FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.