ALCALDÍA MAYOR DE SANTA FE DE BOGOTÁ D.C.

INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO

CALLE 22 No. 6-27 PISO 9 Bogotá D.C.



ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA EROSIÓN DE MATERIALES EMPLEADOS COMO BASES EN PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO CONTRATO 089 DE 2009

## UNIVERSIDAD DE LOS ANDES



## **INFORME FINAL**

BOGOTÁ, D.C. DICIEMBRE DE 2010

### Tabla de Contenidos

1. Introducción 1	Ĺ
2. Justificación	;
3. Alcance	5
4. Antecedentes	6
5.Objetivos	
5.1. Objetivo general	9
5.2. Objetivos específicos	)
6. Descripción del Estado del Arte en el Tema	2
6.1. Revisión Bibliográfica del Fenómeno de Bombeo1	2
6.1.1. Proceso de Deterioro por Erosión en Bases de Pavimentos de Concreto Hidráulico 1	2
6.1.2. Materiales empleados en bases de pavimentos rígidos	14
6.1.3. Descripción de los mecanismos de erosión de capas de subbase por efectos del agu	ıa:
fenómeno de bombeo	16
6.1.4. Metodologías para identificar daños causados por erosión de la base en paviment	os
rígidos2	6
6.2. Revisión Bibliográfica de los Diseños Experimentales para Medir la Susceptibilidad a la Erosio	ón
de Materiales Empleados como Bases en Pavimentos de Concreto Hidráulico	37
7. Desarrollo de la Consultoría	3
7.1. Etapa 1: Diseño del Experimento y Cronograma de Trabajo 48	3
7.1.1. Aproximación Teórica de la Hidráulica de Bombeo en Bases de Pavimentos Rígidos	49
7.1.2. Funcionamiento de los Pavimentos en Concreto en Estado Seco 5	0
7.1.3. Cálculo Analítico del Flujo de Agua bajo una Losa de Pavimento	5
7.1.4. Diseño del Experimento de Erodabilidad utilizando Mesa Vibratoria	ł
7.1.5. Ensayo de Erosión bajo Chorro de Agua a Presión	
7.1.6. Cronograma de Trabajo77	,
7.2. Etapa 2: Consecución de Materiales	)
7.3. Etapa 3: Caracterización de Materiales	5
7.3.1. Actividades de Caracterización de Materiales	3
7.3.2. Tablas Resumen de Resultados: Ensayos de Caracterización	95
7.4. Etapa 4: Elaboración de los Diseños y Evaluación de los Módulos 100	)
7.4.1. Metodología empleada 102	
7.4.2. Diseño de Mezclas Granular-Cemento (GEC_B_ Granulometría Gr2) 10	)3

7.4.3. Diseño de Mezclas de Material Granular estabilizado con Emulsion Astaltica y Cemento				
(GEE_A_GranulometríaGr1) 112				
7.4.4. Diseño de Mezclas Asfálticas (MD 20_Granulometrías 1 y 2) 118				
7.4.5. Tablas resumen de resultados: elaboración de los diseños y evaluación de los módulos121				
7.5. Etapas 5 y 6: Determinación de las Pérdidas por Erosión mediante el Ensayo de Mesa Vibratoria y				
Flujo de Agua a Velocidad Controlada y Análisis de Datos y Determinación de los Valores				
Representativos de Pérdida por Erosión para Cada tipo de Material127				
7.5.1. Metodología General 127				
7.5.2. Elaboración de los Especímenes de Ensayo de cada Material 128				
7.5.3. Montaje del Ensayo de Erosión mediante Chorro a Presión de Agua 131				
7.5.4. Montaje del ensayo de erosión mediante mesa vibratoria				
7.5.5. Ejecución del Ensayo de Erosión mediante Chorro a Presión de Agua138				
7.5.6. Ejecución del Ensayo de Erosión mediante Mesa Vibratoria				
7.5.7. Resultados y Análisis de Resultados de los Ensayos de Erosión de Chorro a Presión de				
145				
Agua				
7.5.8. Resultados y Análisis de Resultados de los Ensayos de Erosión en Mesa Vibratoria				
7.5.8. Resultados y Análisis de Resultados de los Ensayos de Erosión en Mesa Vibratoria				
<ul> <li>7.5.8. Resultados y Análisis de Resultados de los Ensayos de Erosión en Mesa Vibratoria</li> <li></li></ul>				
Agua       143         7.5.8. Resultados y Análisis de Resultados de los Ensayos de Erosión en Mesa Vibratoria				
Agua       143         7.5.8. Resultados y Análisis de Resultados de los Ensayos de Erosión en Mesa Vibratoria       149         7.5.9. Tablas Resumen de Resultados: resultados de los ensayos de erosión       181         7.6. Etapa 7: Correlación de los Resultados de Pérdida por Erosión con las Variables de Potencial de				
Agua       143         7.5.8. Resultados y Análisis de Resultados de los Ensayos de Erosión en Mesa Vibratoria       149         7.5.9. Tablas Resumen de Resultados: resultados de los ensayos de erosión       181         7.6. Etapa 7: Correlación de los Resultados de Pérdida por Erosión con las Variables de Potencial de Erosión y Consumo por Erosión				
Agua       143         7.5.8. Resultados y Análisis de Resultados de los Ensayos de Erosión en Mesa Vibratoria       149         7.5.9. Tablas Resumen de Resultados: resultados de los ensayos de erosión       181         7.6. Etapa 7: Correlación de los Resultados de Pérdida por Erosión con las Variables de Potencial de Erosión y Consumo por Erosión       185         7.7. Etapa 8: Generación del Documento Técnico Final y Ejecución de una Capacitación       181				
Agua       143         7.5.8. Resultados y Análisis de Resultados de los Ensayos de Erosión en Mesa Vibratoria       149         7.5.9. Tablas Resumen de Resultados: resultados de los ensayos de erosión       181         7.6. Etapa 7: Correlación de los Resultados de Pérdida por Erosión con las Variables de Potencial de Erosión y Consumo por Erosión       185         7.7. Etapa 8: Generación del Documento Técnico Final y Ejecución de una Capacitación Técnica.       207				
Agua       143         7.5.8. Resultados y Análisis de Resultados de los Ensayos de Erosión en Mesa Vibratoria       149         7.5.9. Tablas Resumen de Resultados: resultados de los ensayos de erosión       181         7.6. Etapa 7: Correlación de los Resultados de Pérdida por Erosión con las Variables de Potencial de Erosión y Consumo por Erosión				
Agua       143         7.5.8. Resultados y Análisis de Resultados de los Ensayos de Erosión en Mesa Vibratoria       149         7.5.9. Tablas Resumen de Resultados: resultados de los ensayos de erosión       181         7.6. Etapa 7: Correlación de los Resultados de Pérdida por Erosión con las Variables de Potencial de Erosión y Consumo por Erosión.       185         7.7. Etapa 8: Generación del Documento Técnico Final y Ejecución de una Capacitación Técnica.       207         8. Conclusiones       209         9. Recomendaciones       216				
Agua       143         7.5.8. Resultados y Análisis de Resultados de los Ensayos de Erosión en Mesa Vibratoria       149         7.5.9. Tablas Resumen de Resultados: resultados de los ensayos de erosión       181         7.6. Etapa 7: Correlación de los Resultados de Pérdida por Erosión con las Variables de Potencial de Erosión y Consumo por Erosión.       185         7.7. Etapa 8: Generación del Documento Técnico Final y Ejecución de una Capacitación Técnica.       207         8. Conclusiones       209         9. Recomendaciones       216         Bibliografía       218				





### ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA EROSIÓN DE MATERIALES EMPLEADOS COMO BASES EN PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO

INFORME FINAL

Diciembre 07 de 2010

#### 1. Introducción

Este documento corresponde al informe final del proyecto "Estudio de la Resistencia a la Erosión de Materiales Empleados como Bases en Pavimentos de Concreto Hidráulico", realizado por medio del contrato 089 de 2009 entre el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) y la Universidad de Los Andes. El documento contiene un reporte de las actividades realizadas durante los seis meses de trabajo establecidos en el contrato. El plan de trabajo empleado para la ejecución del proyecto estuvo compuesto por las siguientes etapas: 1) diseño del experimento y cronograma de trabajo, 2) consecución de materiales, 3) caracterización de los materiales, 4) elaboración de los diseños y evaluación de los módulos de las mezclas establecidas en los términos de referencia, 5) determinación de las pérdidas por erosión, mediante la ejecución del ensayo en mesa vibratoria y bajo flujo de agua a velocidad controlada, 6) análisis de los datos y determinación de los valores representativos de pérdida por erosión para cada tipo de material, 7) correlación de los resultados de pérdida por erosión con las variables de potencial de erosión y consumo por erosión para los materiales evaluados con base en las metodologías desarrolladas por las asociaciones AASHTO y PCA y 8) generación del documento final y ejecución de una capacitación técnica. Debido a su pertinencia para la ejecución de este proyecto, como una actividad adicional se realizó una revisión bibliográfica detallada sobre el tema de erosión de bases en pavimentos de concreto hidráulico durante la etapa inicial del proyecto.

El capítulo principal de este documento correspondiente al desarrollo de la consultoría presenta la consolidación de las actividades realizadas durante las ocho etapas, y se encuentra dividido en seis secciones. Las primeras cinco secciones presentan los resultados obtenidos





durante las cinco primeras etapas del proyecto descritas con anterioridad, la sección seis incluye las etapas cinco y seis del proyecto, las cuales constituyen el objeto principal de este contrato y finalmente, la séptima sección contempla las actividades de las etapas siete y ocho definidas en los términos de referencia.

La última parte del documento contiene las conclusiones generales y las recomendaciones generadas a partir del análisis realizado sobre los resultados de los ensayos de determinación de pérdidas por erosión y su correlación con los valores de las metodologías AASHTO y PCA para cada uno de los materiales evaluados.





#### 2. Justificación

Un pavimento se define como una estructura multicapa diseñada para resistir solicitaciones de tipo mecánico y ambiental, cuyo objetivo es proveer niveles de serviciabilidad aceptables a lo largo de su vida útil. Los dos tipos de pavimento tradicionales son los pavimentos flexibles o de concreto asfáltico y los rígidos o de concreto hidráulico La diferencia principal entre estos pavimentos radica en el tipo de materiales empleados para su construcción y en su comportamiento mecánico en términos de distribución de esfuerzos y deformaciones. Los pavimentos flexibles presentan mayores deformaciones puntuales y los esfuerzos son transmitidos verticalmente de arriba hacia abajo de la estructura. Los mecanismos de daño asociados con este tipo de pavimento son generados por los fenómenos de fatiga y ahuellamiento. Por otro lado, en los pavimentos rígidos, la mayor parte de los esfuerzos generados por las cargas del tráfico y el clima son asumidos por las losas de concreto. Esta condición reduce significativamente las deflexiones que llegan a la capa de base. A diferencia de los pavimentos flexibles, no se espera que la capa de base cumpla una función estructural relevante dentro del desempeño del pavimento, sino que provea un soporte continuo, homogéneo y duradero a las losas de concreto. Los principales procesos de deterioro asociados con estas estructuras incluyen el agrietamiento por fatiga de las losas de concreto, el alabeo de las losas por cambios térmicos, el desplazamiento relativo de las losas, el desprendimiento de material en las juntas de las losas de concreto y la pérdida de material o bombeo de las capas de soporte. Este último intensifica o acelera de manera importante el desarrollo de los demás procesos, motivo por el cual es fundamental encontrar alternativas para prevenirlo, controlarlo y mitigarlo. El fenómeno de erosión por bombeo se encuentra asociado con los esfuerzos de cortante que son inducidos por el movimiento de agua que se desplaza horizontalmente a altas velocidades en la interfase entre las losas de concreto y la parte superior de la capa de base ante el paso repetido de las cargas de tráfico.

El proceso de bombeo en pavimentos rígidos depende de varios factores, tales como la presencia de agua, la calidad del drenaje de la estructura, las deflexiones en las juntas y en las





esquinas de la losa, los métodos de transmisión de carga entre losas, las propiedades estructurales de los materiales empleados en el pavimento y las características de susceptibilidad a la erodabilidad propias del material empleado en la capa de base. La determinación de este último factor es particularmente importante ya que estos valores pueden ser empleados eficientemente en una etapa preliminar de selección de materiales como parte de las metodologías de diseño de pavimentos de concreto hidráulico.

Las Especificaciones Técnicas Generales de Materiales y Construcción para Proyectos de Infraestructura Vial y de Espacio Público en Bogotá D.C. IDU – ET – 2005, son una normativa que contiene una descripción de las características técnicas y ensayos realizados sobre los materiales empleados para la construcción de obras civiles. Sin embargo, este documento no contiene ninguna metodología específica para evaluar la susceptibilidad a la erosión de los materiales empleados como bases en pavimentos de concreto hidráulico. Considerando la importancia del fenómeno de erosión de las capas de base en el comportamiento estructural de los pavimentos rígidos, es fundamental contar con información que permita realizar una selección pertinente de los materiales de soporte para las losas del pavimento.





#### 3. Alcance

El alcance de este proyecto incluye el diseño de los materiales establecidos en los términos de referencia, la ejecución de los ensayos de caracterización básica solicitados para cada tipo de material, el diseño e implementación de los montajes experimentales para evaluar la susceptibilidad innata de los materiales a desarrollar procesos de erosión, la ejecución de dichos ensayos sobre los materiales y el diseño de una metodología de análisis que permita evaluar la pertinencia del uso de estos materiales como bases de soporte de pavimentos de concreto.





#### 4. Antecedentes

Una de las primeras experiencias con pavimentos rígidos en el mundo data de Escocia en los años de 1865 y 1866. Durante los primeros tres años de uso de este tipo de estructura no se observó ningún tipo de deterioro; sin embargo, al cabo de diez años se realizó una inspección que demostró que el daño en la superficie del pavimento era tan severo que la vía había perdido casi en su totalidad su serviciabilidad. Esto sugirió que los pavimentos de concreto tendían a volverse frágiles con la edad y que sólo eran convenientes para tráfico liviano. Esta experiencia frenó el desarrollo de metodologías de diseño y el desarrollo general de la tecnología de pavimentos de concreto hidráulico en Inglaterra y Europa. Más adelante, en 1913 en el Segundo Congreso Nacional de Caminos en Londres se presentaron evidencias exitosas del empleo de este tipo de estructura en diversos proyectos en Estados Unidos. En 1914 se realizó la Conferencia Nacional de Construcción de Caminos en Concreto en Chicago y para este momento ya se habían desarrollado las primeras reglamentaciones para su diseño y construcción. Con la llegada de las guerras mundiales, se aceleró el desarrollo de normativas para el diseño y construcción de pavimentos en concreto, lo cual popularizó su uso a través del mundo.

Los pavimentos rígidos se caracterizan por presentar bajas deformaciones subsuperficiales, por reducir la distancia de frenado de los vehículos, por ser reciclables y por presentar largos periodos de servicio sin necesidad de realizar intervenciones o reparaciones importantes. Los mecanismos básicos de falla y las manifestaciones de daño de estas estructuras se encuentran relacionados con las características de la carga así como con las magnitudes y cambios típicos en la temperatura y en la humedad de la zona del proyecto. La estructura de los pavimentos rígidos se encuentra compuesta por la capa superficial o losa de concreto hidráulico y las capas de soporte que incluyen la base, la subbase (la cual es opcional) y la subrasante. El comportamiento mecánico de las losas depende de las propiedades y geometría de cada capa, de la existencia e instalación de refuerzo al interior de la losa, de la configuración de las juntas y del uso de dispositivos de transferencia de carga entre las losas.





Las capas de base y subbase de los pavimentos rígidos juegan un papel fundamental en el desempeño mecánico de la estructura. Una buena selección de los materiales que se emplearán para estas capas es crucial para proveer a las losas de concreto un soporte continuo y homogéneo mediante el control del desgaste o pérdida de dicho soporte por la acción del agua como parte del desarrollo de fenómenos de erosión por bombeo.

Existen diferentes entidades a nivel internacional que promueven la investigación, el diseño y el uso de los pavimentos rígidos. Dentro de estas entidades se encuentran la American Concrete Pavement Association (ACPA), la Portland Cement Association (PCA), La Asociación Mundial de la Carretera (PIARC), la Federal Higway Administration (FHWA), la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), entre otros. En relación con el tema de erosión de las capas de base de los pavimentos rígidos, cada una de estas entidades ha realizado diferentes aproximaciones para controlar este fenómeno. Algunas de ellas incluyen el cumplimiento de especificaciones muy exigentes para los materiales de base (ACPA, ICPA), el uso limitado de materiales estabilizados para estas capas (ACPA), el control del número permitido de repeticiones de diferentes niveles de carga que limitan el fenómeno de erosión mediante el control de los niveles de deformaciones verticales en las esquinas de las losas (PCA) y la reducción de la resistencia del módulo de reacción o soporte subrasante-subbase por la pérdida potencial de contacto entre las losas y la capa base (AASHTO). Algunas de estas entidades también han desarrollado una clasificación de la susceptibilidad de diferentes materiales de base mediante la definición de factores de erosión (AASHTO, PCA, y PIARC). A manera de ejemplo, la Tabla 4.1 presenta el sistema de clasificación desarrollado por la PIARC, el cual otorga a los materiales estudiados un valor que varía entre A y E, siendo A un material extremadamente resistente a la erosión y E un material muy erodable.





TIPO DE MATERIAL	CLASE	Factor de Erosión
Concreto Pobre (8% de cemento) Concreto bituminoso (6% de asfalto)	A (Extremadamente resistente)	0.5 - 1.5
Material granular tratado con cemento (5%) Material granular tratado con bitumen (4%)	B (Muy resistente)	1.5 – 2.5
Material granular tratado con cemento (3.5%) Material granular tratado con bitumen (3%)	C (Resistente)	2.5 - 3.5
Material granular tratado con el 2.5% de cemento in – situ	D (Erosionable)	3.5 - 4.5
Materiales granulares no tratados	E (Muy erosionable)	4.5 - 5.5

Tabla 4.1. Clasificación PIARC de los materiales en función de los factores de Erosi	ión
--	-----

El Instituto de Desarrollo Urbano, por su parte, establece en sus Especificaciones Técnicas de Materiales y de Construcción IDU – ET - 2005 las características técnicas de los materiales empleados como bases en pavimentos rígidos y los clasifica en términos del tráfico esperado para la vía. Sin embargo estas especificaciones carecen de una variable que permita clasificar a los materiales en función de la susceptibilidad de éstos a la erosión.

En la sección 7.1 de este informe se presenta una descripción detallada del mecanismo de deterioro por bombeo y de los principales estudios y montajes experimentales que se han desarrollado para comprender y controlar este fenómeno. Esta información puede ser considerada también como parte de los antecedentes de este proyecto.





#### 5. Objetivos

#### 5.1. Objetivo general

El objetivo de este proyecto consiste en diseñar métodos experimentales para evaluar y determinar las pérdidas por erosión de diferentes materiales que pueden ser empleados como base en los pavimentos rígidos.

Una vez caracterizada la pérdida por erosión que presenta cada material, el objetivo es plantear recomendaciones de utilización de dichos materiales como bases para pavimentos de concreto hidráulico.

El objetivo de este informe es reportar las actividades realizadas durante los seis meses de trabajo del contrato 089 de 2009, de acuerdo con la programación y el cronograma especificado en dicho contrato.

#### 5.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos de este informe incluyen:

- Describir el fenómeno de erosión en bases de pavimentos de concreto hidráulico.
- Describir los trabajos que se han realizado para la caracterización experimental de este fenómeno.
- Reportar las actividades de adquisición de los materiales empleados en el proyecto.
- Reportar los resultados de la caracterización experimental básica de los materiales empleados como base en pavimentos de concreto hidráulico definidos en los términos de referencia: 1) base granular sin estabilizar (BG\_A), 2) material granular estabilizado con cemento (GEC\_B), 3) material granular estabilizado con cemento y emulsión asfáltica (GEEA\_A) y 4) mezcla asfáltica (MD 20).
- Describir los diseños experimentales utilizados para la caracterización de la susceptibilidad a la erosión de los diferentes materiales de base considerados en este proyecto. Los diseños





experimentales incluyen la descripción de los componentes del sistema, la descripción del funcionamiento del sistema acoplado, las características de operabilidad del equipo y las mediciones y valores que resultan del ensayo.

- Describir los procedimientos empleados para realizar los diseños de los materiales estabilizados: 1) material granular estabilizado con cemento (GEC\_B), 2) material granular estabilizado con cemento y emulsión asfáltica (GEEA\_A) y 3) mezcla asfáltica (MD 20).
- Presentar los resultados de los ensayos ejecutados para realizar los diseños de las mezclas de los materiales estabilizados: 1) material granular estabilizado con cemento (GEC\_B), 2) material granular estabilizado con cemento y emulsión asfáltica (GEEA\_A) y 3) mezcla asfáltica (MD 20).
- Presentar los resultados finales de los diseños de las mezclas de: 1) material granular estabilizado con cemento (GEC\_B), 2) material granular estabilizado con cemento y emulsión asfáltica (GEEA\_A) y 3) mezcla asfáltica (MD 20).
- Presentar los resultados de los ensayos realizados para la determinación de los módulos de los materiales estabilizados: 1) material granular estabilizado con cemento (GEC\_B), 2) material granular estabilizado con cemento y emulsión asfáltica (GEEA\_A) y 3) mezcla asfáltica (MD 20).
- Presentar los resultados del ensayo de ley de fatiga que se realizó sobre las mezclas asfálticas (MD 20).
- Describir el procedimiento utilizado para la ejecución de los ensayos de erosión de los materiales que se podrían emplear como bases de pavimentos de concreto hidráulico: 1) base granular sin estabilizar (BG\_A), 2) material granular estabilizado con cemento (GEC\_B), 3) material granular estabilizado con cemento y emulsión asfáltica (GEEA\_A) y 4) mezcla asfáltica (MD 20). Como parte de este contrato se diseñaron y ejecutaron dos tipos diferentes de ensayos de erodabilidad. El primer ensayo permite determinar la susceptibilidad cualitativa a la erosión de un material mediante la aplicación de un chorro de agua a presión. El segundo ensayo consiste la determinación de pérdida de material mediante el montaje de mesa vibratoria.





- Reportar los resultados de los ensayos realizados sobre cada uno de los materiales mediante el ensayo de chorro de agua a presión.
- Reportar los resultados de los ensayos realizados sobre los materiales de base estabilizados mediante el ensayo de mesa vibratoria.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos de los ensayos realizados.
- Concluir sobre los valores típicos de susceptibilidad a la erosión de cada uno de los materiales considerados en este contrato.
- Encontrar los valores de los factores de erosión empleados por las metodologías AASHTO y PCA para realizar una comparación preliminar con los resultados obtenidos experimentalmente.
- Presentar un registro fotográfico de todas las actividades realizadas.





#### 6. Descripción del Estado del Arte en el Tema

A continuación se presenta un resumen de la información adquirida a partir de una completa revisión bibliográfica realizada sobre el tema de erosión en materiales empleados como base en pavimentos de concreto hidráulico. La primera sección describe físicamente el fenómeno de bombeo y los mecanismos de erosión por efectos de agua, también presenta una revisión de los materiales empleados como bases en pavimentos rígidos. La segunda sección presenta los diferentes ensayos disponibles que han sido desarrollados para evaluar el fenómeno de erosión.

#### 6.1. Revisión Bibliográfica del Fenómeno de Bombeo

#### 6.1.1. Proceso de Deterioro por Erosión en Bases de Pavimentos de Concreto Hidráulico

Las capas de base empleadas en los pavimentos rígidos cumplen diversas funciones, las cuales son necesarias para garantizar la durabilidad y el buen desempeño estructural este tipo de estructuras. Algunas de estas funciones incluyen (Huang 1998; Jung et al. 2009):

- proveer una base estable y homogénea para las placas de concreto hidráulico,
- aumentar la rigidez o resistencia general de la estructura,
- proveer buenas condiciones de drenaje de la estructura,
- permitir una transición vertical gradual entre los módulos de las diferentes capas (i.e., desde las placas de concreto hasta la capa de subrasante), y
- prevenir el deterioro por erosión de la base que soporta las placas.

Es importante mencionar que no todas las funciones listadas anteriormente se deben cumplir de forma simultánea en un pavimento rígido. De hecho, el tipo de material seleccionado para la capa de base, las características del pavimento (sin reforzar, continuamente reforzado, etc.) y las condiciones ambientales y de carga a las que será sometido el pavimento, son los factores que





permiten identificar cuáles de estas funciones son prioritarias en cada tipo proyecto en particular. Sin embargo, de las cinco funciones listadas existen dos—fuertemente relacionadas entre sí que son deseables en todo proyecto de infraestructura vial que involucre pavimentos rígidos. Estas dos funciones son la de proveer un soporte continuo y homogéneo para las placas de concreto hidráulico y la de evitar la erosión y desgaste de dicho soporte por la acción del agua o de otros agentes adversos.

Si el material seleccionado para conformar la capa de base cumple con las condiciones de resistencia mecánica requeridas en un proyecto particular, pero es fácilmente erodable ante la presencia de agua, la base de soporte perderá su condición homogénea. La falta de homogeneidad en la capa de soporte promoverá la iniciación y propagación de procesos de agrietamiento y fractura durante la etapa temprana de la vida de la estructura. Estos procesos producirán una pérdida acelerada de las características de funcionalidad y serviciabilidad del pavimento, los cuales a su vez generarán sobrecostos asociados con el funcionamiento general de la red de infraestructura debido a la necesidad de ejecutar obras de rehabilitación no programadas.

En este sentido, es interesante mencionar que si bien las losas de concreto pueden trabajar apropiadamente en combinación con bases de variada resistencia estructural, la pérdida de la homogeneidad de su capa de soporte es una condición que debe ser estrictamente controlada con el fin de garantizar un desempeño satisfactorio de la estructura. Por lo tanto, la caracterización de la susceptibilidad a la erosión de los materiales empleados en estas capas es una prioridad para garantizar estructuras eficientes, económicas y duraderas.

El objetivo de este proyecto (contrato IDU-Uniandes 089 de 2009) consistió, justamente, en determinar la susceptibilidad a la erosión de diversos materiales que son, o pueden ser, empleados como parte de las capas de bases de este tipo de pavimentos en la ciudad de Bogotá.

A continuación se describe la importancia de la selección de los materiales de base de pavimentos de concreto hidráulico así como las características del mecanismo de erosión, cuya caracterización constituye el objeto de estudio en este proyecto.





#### 6.1.2. Materiales empleados en bases de pavimentos rígidos

Como se mencionó previamente, la selección de los materiales para emplear en bases de pavimentos rígidos requiere considerar el rol que esta capa cumple en cuanto a la preservación de la resistencia estructural y la durabilidad del pavimento. El papel de los materiales de base en la durabilidad general de la estructura es tan importante que la mayoría de metodologías de diseño de pavimentos rígidos—incluidas las recientes metodologías mecanicistas—incluyen la erodabilidad de las bases de soporte como un parámetro de control dentro de los procesos de selección de materiales o, en algunos casos, directamente dentro del proceso de diseño de la estructura (e.g., método de diseño de la Portland Cement Association, PCA).

La práctica de la ingeniería de pavimentos rígidos de las últimas décadas ha incluido diversas tendencias en la selección y en el empleo de los materiales utilizados en las capas de base de este tipo de estructuras. Muchos de los pavimentos de concreto hidráulico construidos durante la primera mitad del siglo XX en el mundo no incluían capas de base; es decir, las placas de concreto eran directamente apoyadas sobre la subrasante. Este fue el caso de Estados Unidos, en donde la mayoría de pavimentos rígidos construidos antes de 1940 no incluyeron capas de base de ningún tipo. Con el aumento del volumen de camiones durante la Segunda Guerra Mundial, muchos de estos pavimentos presentaron un deterioro acelerado causado principalmente por pérdidas de material de subrasante mediante procesos de erosión y bombeo. Esta condición motivó la inclusión de una capa intermedia cuyo objetivo era separar las placas de concreto del material de subrasante. El material seleccionado para esas capas de base consistió en material granular sin cementar. Desde entonces, éste ha sido el material de mayor empleo en la conformación de capas de base en pavimentos rígidos.

Sin embargo, rápidamente se observó que, aunque en menor escala, el material granular sin tratar también era susceptible a sufrir pérdidas por erosión. La erodabilidad de estas capas de base era particularmente preocupante en proyectos relacionados con altos volúmenes de cargas de tráfico y con condiciones adversas de drenabilidad. Con base en estas experiencias, las capas de material granular fueron reemplazadas por dos nuevos materiales: 1) capas impermeables





conformadas por material granular estabilizado con cemento, o 2) capas de material granular sin tratar pero con una granulometría abierta que permitiera la conformación de bases drenantes. Aunque el empleo de las bases granulares drenantes ha demostrado ser eficiente en controlar los daños por erosión, las altas exigencias relacionadas con las especificaciones del material y con los controles de calidad en obra han limitado significativamente su empleo. Por el contrario, el uso de materiales granulares estabilizados con cemento, o en su defecto capas de base de concreto pobre, se ha establecido como la práctica más común en las últimas dos décadas en la construcción de pavimentos rígidos sometidos a condiciones importantes de carga.

Sorpresivamente, algunas de las bases conformadas por materiales granulares estabilizados con cemento demostraron ser demasiado rígidas para garantizar un comportamiento estructural adecuado—en particular en pavimentos continuamente reforzados en donde se evidenció que el empleo de este material generaba distorsiones en los patrones de falla de la estructura—al tiempo que otros demostraron tener bajas condiciones de durabilidad ante el ataque del agua. Aunque esta situación no desmotivó el uso de capas estabilizadas con cemento hidráulico, si promovió el estudio detallado del efecto de la rigidez y de durabilidad de las capas estabilizadas en el desempeño global de los pavimentos. Al mismo tiempo, nuevos materiales granulares estabilizados con otros materiales, particularmente con productos asfálticos, se empezaron a emplear con gran frecuencia en este tipo de estructuras.

El empleo de bases estabilizadas con productos asfálticos no se considera un reemplazo de las bases tradicionales, ya que en la mayoría de oportunidades este material se incluye como parte de una capa *adicional* que separa las losas de concreto hidráulico de las capas de materiales estabilizados con cemento. En otras palabras, estas bases han sido incluidas como capas de "transición" o como capas de "interfase" entre las dos capas mencionadas. Las principales funciones de esta capa de transición son: 1) proteger la capa de material granular estabilizado con cemento del ataque del agua, y 2) permitir una disminución gradual entre la alta rigidez de las losas de concreto y la baja resistencia estructural del material de subrasante. Esta última condición es importante porque cambios abruptos en la rigidez de las capas de un pavimento rígido pueden generar concentraciones de esfuerzos en los bordes y esquinas de las placas, lo cual puede propiciar el agrietamiento temprano de las losas de concreto. Adicionalmente, en el





caso de pavimentos de concreto continuamente reforzados, la capa asfáltica de interfase permite reducir la fuerzas de resistencia por fricción entre las placas de concreto y las capas de material granular estabilizado con cemento, lo cual a su vez promueve un patrón de agrietamiento uniforme en estas estructuras (Jung et al. 2009).

En la actualidad, el empleo de materiales granulares sometidos a algún tipo de proceso de estabilización constituye la práctica común en el diseño y construcción de pavimentos rígidos sometidos a altas exigencias de cargas. El uso de materiales granulares sin tratar, por el contrario, es una práctica que ha sido limitada a pavimentos sometidos a bajas o medianas exigencias de tráfico.

# 6.1.3.Descripción de los mecanismos de erosión de capas de subbase por efectos del agua: fenómeno de bombeo

El problema general de la erosión de materiales de bases tiene su origen en los esfuerzos cortantes inducidos por el movimiento de agua a altas velocidades en la interfase entre las placas de concreto y la parte superior de la capa de base (Sánchez-López 1988). En este sentido, es importante resaltar que un requisito indispensable para el desarrollo de daño por erosión es la existencia de agua líquida en la zona de interfase.

Los esfuerzos de cortante que se desarrollan en la interfase entre las dos capas son generados por el movimiento relativo de las placas ante el paso vehicular en la superficie y por las presiones inducidas por el agua líquida que se encuentra presente en la zona. Por lo tanto, la magnitud de estos esfuerzos depende de la deflexión relativa que se genera entre el centro y las juntas transversales de la placa, así como de la velocidad de movimiento del agua, dos índices que se encuentran fuertemente correlacionados. De acuerdo con mediciones experimentales reportadas en la literatura (Van Wijk 1985) los esfuerzos cortantes producidos por el paso del agua en la zona de interfase pueden variar en un rango entre 20 y 80 Pa. La deflexión relativa de la placa de concreto ante el paso vehicular depende de las características propias de la estructura del pavimento; en particular, de la capacidad de transferencia de carga entre sus juntas y de la magnitud de la carga. Juntas de pavimentos rígidos con bajos niveles de transferencia de carga





permiten mayores desplazamientos del borde la placa, los cuales afectan directamente la magnitud de los esfuerzos de corte que se desarrollan en la zona de interfase.

Los esfuerzos de cortante promueven el desprendimiento de material fino de las capas de base (y en casos extremos incluso de la parte inferior de las losas de concreto), los cuales son arrastrados por el agua a través de la interfase y expulsados o *bombeados* en forma de *micro-chorros* fuera del pavimento cuando la placa recupera su posición original después del paso de la carga vehicular. Eventualmente, la pérdida de material fino por *bombeo* genera zonas de pérdida significativa de material (i.e., cuencas de erosión), particularmente cerca de los bordes y esquinas de las placas. El efecto inmediato de este proceso es la disminución de la calidad del soporte de las losas de concreto hidráulico. La Figura 6.1. ilustra el proceso de bombeo. En el caso de pavimentos rígidos con bases conformadas por material granular sin cementar, el paso vehicular genera esfuerzos de cortante entre las diferentes partículas de agregado, tal como se ilustra en la Figura 6.2. Valores asociados con la presión de poros, la velocidad y la dirección de movimiento del agua generados por el paso vehicular durante procesos de bombeo pueden ser encontrados en Hansen et al. (1991).

Es importante mencionar que si bien el mecanismo de erosión más común consiste en el desprendimiento de partículas finas de las capas de bases, existe evidencia experimental (en campo y en laboratorio) que sugiere que existen dos fuentes adicionales de generación de esfuerzos cortantes en la zona de interfase, las cuales contribuyen sustancialmente a la pérdida de material fino y a la pérdida acelerada de la resistencia estructural del pavimento por bombeo: 1) los esfuerzos de fricción generados entre la base de las losas de concreto y el material de base , y 2) el efecto de las deflexiones inducidas en las placas de concreto por efecto de expansión térmica. En este sentido, Hansen et al. (1991) han reportado que, en algunas configuraciones especiales de pavimentos, estas fuentes alternativas de generación de esfuerzos cortantes pueden contribuir a la abrasión de las capas de base en una proporción igual, o incluso superior, a la generada por el paso del agua.







1. Condición inicial



2. Acercamiento vehículo, deflexión inicial



3. Deflexión placa, formación de esfuerzos cortantes e intrusión de agua en la interfase



4. Deflexión placa, formación de esfuerzos cortantes e intrusión de agua en la interfase



5. Expulsión de agua con partículas finas a través de micro-chorros



6. Pérdida de soporte de la capa de base por erosión del material

Figura 6.1. Proceso de bombeo en pavimentos rígidos con capas de base de alta susceptibilidad a la erosión.







**Figura 6.2.** Proceso de erosión en pavimentos rígidos con capas de base conformadas por material granular sin cementar. Modificado a partir de Jung et al.(2009).

El origen, la magnitud y la importancia de las diferentes fases de los mecanismos de deterioro ilustrados en la Figura 6.1 se pueden explicar con base en un análisis teórico de los procesos hidráulicos que se desarrollan durante cada etapa. En este sentido, diferentes estudios han permitido determinar que el flujo del agua bajo las losas de concreto rígido (Figura 6.1), tiene un comportamiento fundamentalmente diferente en función de la profundidad de la cavidad que existe por debajo de las losas (Tabla 6.1) (Ray et al. 1985). Así mismo, estos estudios han permitido investigar la contribución y el rol que tienen las cargas por eje y la velocidad de los vehículos en la generación de este fenómeno. En las siguientes secciones se describen estos aspectos en detalle. Las ecuaciones presentadas en estas secciones resultan de las derivaciones contenidas en la sección 6.3 de este informe.

#### • Influencia de la profundidad de la cavidad en la erosión (etapas de evolución del daño):

La Tabla 6.1 clasifica las características de la evolución del daño por erosión mediante la identificación de tres etapas principales: 1) bombeo latente, 2) periodo de aceleración de daño y 3) periodo de aparición de degradaciones.





Etapa	Profundidad de la cavidad (mm)	Velocidad de expulsión del agua (m/s)	Estado de la interface losa-base	Características del pavimento
1	< 0.5 base muy poco erosionada	Baja << 4 m/s	Etapa inicial, pequeñas cavidades debidas principalmente a gradiente térmicos negativos	Bombeo latente
2	0.5 a 1 mm	Flujo transitorio >>4 a 8 m/s etapa crítica de expulsión	Pequeñas cavidades en los puntos débiles susceptibles de agrandarse debido a las altas velocidades de expulsión del agua	Período de aceleración
3	> 1 mm base muy erosionada	< 6 m/s	Posibilidad de estabilización de la profundidad de la cavidad pero aceleración de la fatiga y rotura de la losa	Período de aparición de degradaciones

#### Tabla 6.1. Comportamiento del flujo de agua bajo las losas de concreto

#### Etapa 1: Etapa inicial de bombeo latente

Este caso se presenta cuando existen pequeñas cavidades creadas principalmente por gradientes térmicos negativos. En estas circunstancias el agua se comporta como un fluido viscoso y el cálculo de la velocidad del agua se puede realizar utilizando las teorías de la hidrodinámica y de la vibración de losas:

$$V_m = \frac{P h_{max}^2}{2 \,\mu \, L \, I^2} \tag{6.1}$$

en donde *P* es la carga del vehículo, *L* es largo de la cavidad, *h* es la profundidad de la cavidad, *I* es el ancho de la cavidad y  $\mu$  es la viscosidad dinámica. Según esta expresión, la velocidad de expulsión del agua es proporcional al cuadrado de la profundidad de la cavidad





 $(h^2)$  e inversamente proporcional al largo de la cavidad y al cuadrado de su ancho. Las velocidades calculadas con base en esta expresión varían entre 0 y 3 m/s (Figura 6.3, parte A). Estas velocidades no tienen una fuerza suficiente para erosionar una capa de pavimento en concreto pobre o en gravas-cemento. Sin embargo, estas velocidades sí tienen la suficiente fuerza para transportar finos hasta de 3 mm de diámetro cuya cementación se ha perdido. También pueden lavar los finos de los materiales no tratados.



Figura 6.3. Velocidad de expulsión del agua en función de la profundidad de la cavidad.

#### Etapa 2: Caso intermedio: profundidad de la cavidad entre 0.5 y 1 mm

En este caso el flujo de agua es transitorio, lo cual dificulta los cálculos analíticos. Por esta razón, en este etapa es mejor recurrir a medidas directas de la presión de agua (Phu 1979). Las velocidades de expulsión de agua en esta etapa pueden superar a las de los casos anteriores (Figura 6.3, parte B). Debido a las altas velocidades generadas en esta etapa, se puede concluir que constituye la etapa crítica de erosión de la base del pavimento.





#### Etapa 3: profundidad de la cavidad superior a 1 mm

Este caso se puede presentar cuando la erosión ya ha comenzado o en casos en los que existan gradientes térmicos negativos verdaderamente excepcionales. Para cavidades superiores a 1 mm el régimen de flujo del agua se modifica profundamente debido a que el número de Reynolds corresponde al de un flujo laminar. Bajo estas condiciones, la presión del agua que aparece bajo el eje de un vehículo es función del cuadrado de la velocidad de deflexión, la cual a su vez depende casi exclusivamente del peso del vehículo. Las ecuaciones (6.2) y (6.3) permiten calcular la velocidad de expulsión de agua en la salida de la cavidad. Con base en estas ecuaciones se puede determinar que la velocidad de expulsión del agua para cavidades de 1 mm está comprendida entre 4 y 8 m/s; esta velocidad disminuye rápidamente con el aumento de la profundidad de la cavidad (Figura 6.3, parte C). Si el agua solamente es expulsada por la junta transversal, la velocidad se puede calcular mediante:

$$V_m = \frac{LV_z}{2(h_{max} - Z_{max})}$$
(6.2)

en donde:  $h_{max}$  es la profundidad de la cavidad, L es el largo de la cavidad, I es el ancho de la cavidad,  $V_z$  es la velocidad de deflexión (m/s), y  $Z_{max}$  es la deflexión en el extremo de la losa ante el paso de los vehículos.

Si el agua es expulsada por la junta transversal y la junta longitudinal de la berma, esta ecuación se transforma en:

$$Vm = \frac{L I Vz}{2\left(\frac{L}{Z} + 1\right) \left(h \max - Z \max\right)}$$
(6.3)





Es importante mencionar que estas ecuaciones solamente son válidas para valores de  $(h_{\text{max}}-Z_{\text{max}})>0.5$ mm, ya que bajo estas condiciones se presenta flujo laminar. Cuando  $(h_{\text{max}}-Z_{\text{max}})$  se aproxima a 0.5 mm (que corresponde aproximadamente a una cavidad del orden de 1mm), la velocidad de expulsión de agua es máxima (8 m/s).

Las relaciones observadas en las tres etapas que describen la evolución del fenómeno de bombeo muestran que la extensión longitudinal de la cavidad produce un aumento en la longitud del voladizo que forma el pavimento. Esto a su vez hace que las deflexiones relativas aumenten y que se prolongue el efecto de la erosión. En el largo plazo, el aumento de los esfuerzos en la losa alcanza una magnitud tal que se produce su rotura por fatiga.

#### • Influencia de la carga por eje en el desarrollo de la erosión

La Figura 6.3 también permite observar la influencia del peso de los vehículos en la velocidad de expulsión de agua. La información presentada en esta figura permite concluir que este efecto es notable, ya que un aumento en la carga real en un eje simple de 10 a 13 toneladas produce un incremento en la velocidad máxima de expulsión del agua de 5.5 a 8 m/s. Este aumento será más crítico en la medida en que la velocidad del agua para la cual se inicia el proceso de erosión esté comprendida entre estos valores.

#### • Influencia de la velocidad de los vehículos en el desarrollo de erosión

La velocidad de los vehículos tiene una influencia importante ya que combina dos efectos diferentes. En primer lugar la deflexión dinámica es inferior a la deflexión estática. En segundo lugar una velocidad de los vehículos baja hace que la velocidad del flujo del agua disminuya. Estos dos efectos combinados hacen que la velocidad de los vehículos para la cual se produce la mayor erosión sea de alrededor de 30 Km/h. En la Figura 6.4 se observa el efecto de la velocidad de los vehículos.







Figura 6.4. Efecto de la velocidad de los vehículos en la generación de erosión.

En cuanto a la agresividad del fenómeno de erosión, es importante mencionar que su extensión y magnitud están determinadas por tres aspectos principales: 1) la cantidad de agua líquida disponible para quedar atrapada en la zona de interfase (i.e., de las condiciones de drenabilidad de la estructura), 2) las susceptibilidad a la erosión de los materiales empleados en la capa de base, y 3) las características de los espectros de carga a los que es sometido el pavimento. En este sentido, la mejor práctica para controlar el fenómeno de erosión consiste en: seleccionar materiales resistentes a la acción dañina del agua, diseñar y construir obras complementarias que garanticen un drenaje eficiente y controlar el nivel de las deflexiones individuales de las placas en cercanías de las juntas.

En general, la velocidad a la que se extienden los procesos de fractura en las placas de concreto cuando existe pérdida de material en su base de soporte es muy alta y esta velocidad tiende a aumentar rápidamente en el tiempo. Esto es debido, en parte, a que la existencia de nuevas grietas o fisuras en la placa de concreto se convierten en nuevas rutas de acceso de agua y en nuevas zonas de alta susceptibilidad a la erosión. La Figura 6.5





muestra el avance del proceso de agrietamiento de las placas de concreto de un pavimento rígido con problemas de erosión en un periodo de 1 mes. Esta figura demuestra claramente la agresividad característica de este fenómeno. De hecho, estudios de campo realizados en California (USA) a finales de la década de los 70's demostraron que el agrietamiento de las placas de concreto por efectos de erosión de la capa de base puede aparecer en los pavimentos en tiempos muy cortos—incluso inferiores a 3 meses— después de que los pavimentos han sido puestos en servicio (Neal et al. 1977).

En términos económicos, la erosión en proyectos de pavimentos de concreto hidráulico está asociada con altos sobrecostos debido a que las labores de reparación o rehabilitación requieren la reconstrucción de la zona afectada, así como el diseño e implementación de obras paralelas destinadas a controlar las condiciones de drenabilidad del pavimento (Faisca et al. 2009). Un estudio detallado de los modelos económicos asociados con programas de rehabilitación de pavimentos rígidos afectados por erosión y bombeo puede ser encontrado en Van Wijk (1985).



Figura 6.5. Avance del daño por erosión en la vía interestatal US 75 (Sherman District, Texas). Tomada de Jung et al. (2009).





# 6.1.4. Metodologías para identificar daños causados por erosión de la base en pavimentos rígidos

La técnica más común para identificar fenómenos de erosión de bases empleadas en pavimentos de concreto hidráulico consiste en la inspección visual. En general, la existencia de patrones de fractura de las placas de concreto en zonas aledañas a las juntas y, particularmente, en las zonas cercanas a las esquinas, son evidencia de la ausencia de un soporte homogéneo de la capa de base. Adicionalmente, si los daños observados a nivel superficial se detectan en un periodo temprano de la vida útil del pavimento (e.g., entre medio año y 5 años desde el momento en que fue puesto en servicio), la causa más probable es la erosión del material de la base por efectos de bombeo. La figura 6.6 muestra algunas fotografías de la troncal de Transmilenio de la Autopista Norte en Bogotá, tomadas en los años 2001 y 2002-menos de año después de su apertura para el paso vehicular. En estas fotografías se evidencian patrones de agrietamiento cercanos a las juntas de las placas. Debido a que estos daños se reportaron en la etapa inicial de la vida útil del pavimento, es altamente improbable que la causa del agrietamiento observado sea derivada de procesos de fatiga en las losas de concreto hidráulico de alta resistencia. Por el contrario, la evidencia de drenajes inadecuados y la posterior verificación de la alta susceptibilidad a la erosión del material empleado en la base (i.e., un mortero de resistencia media denominado relleno fluido), constataron que los daños observados fueron causados prioritariamente por fenómenos de bombeo.







**Figura 6.6.** Identificación visual de daños por erosión de la capa de base en las placas de concreto en la Autopista Norte en Bogotá (en algunos casos el daño resulta de la combinación con otros fenómenos de deterioro; autoría del grupo de investigación, 2001).





El daño superficial causado por problemas de erosión de los materiales de base, como los mostrados en la Figura 6.6., son evidencia de un estado avanzado de la pérdida de material en la capa de soporte de las losas de concreto. Sin embargo, la identificación de las etapas iniciales de los procesos de erosión en estas capas requiere otro tipo de técnicas. Las técnicas más efectivas para este propósito incluyen: 1) la toma de núcleos de pavimento en campo, los cuales deben alcanzar profundidades superiores a las del espesor de las placas de concreto, 2) el uso de un georadar con el fin de identificar zonas con gran acumulación de vacíos y zonas erosionadas con presencia de agua, y 3) el uso de otras técnicas de identificación indirecta de problemas de erosión, tal como las mediciones de deflexiones en la estructura (mediante el Falling Weight Deflectometer, FWD).

La toma de núcleos en campo es una técnica eficaz para determinar con certeza la existencia de problemas de erosión en pavimentos rígidos y para cuantificar el nivel o gravedad de este fenómeno. Su gran desventaja es que es una técnica destructiva y, por lo tanto, el número de muestras es limitado. En otras palabras, esta técnica es un medio eficaz para caracterizar el bombeo en lugares específicos, pero no permite extrapolar esta información a las zonas adyacentes del lugar donde se realizó el muestreo.

Con respecto al georadar; el principio básico de este método es enviar ondas eléctricas desde la superficie y, con base en las características de las ondas reflejadas capturadas por el sensor, obtener información sobre las estructuras de pavimento. Este procedimiento se puede emplear para identificar de forma no-destructiva los espesores de las capas que conforman un pavimento o, en este caso, para identificar zonas con alta presencia de vacíos y de alta acumulación de agua. Estas zonas se identifican con base en procedimientos de retro-cálculo que permiten obtener información sobre las constantes dieléctricas de los materiales presentes en el pavimento. La experiencia ha demostrado que valores de constantes dieléctricas cercanas o superiores a 9 están asociadas con zonas de alta erosión o de alta concentración de humedad (Jung et al. 2009).

El Falling Weight Deflectometer (FWD), por su parte, es una técnica no-destructiva altamente utilizada para caracterizar la composición estructural de un pavimento. Sin embargo, esta técnica también se puede emplear para medir la efectividad de la transferencia de carga entre





placas de concreto hidráulico en pavimentos rígidos (LTE de sus siglas en inglés por Load Transfer Effectiveness), así como los espesores efectivos de las capas de pavimentos. Estos dos indicadores han demostrado tener una fuerte correlación con zonas en la estructura de gran deterioro y alto potencial de erosión. Esto se debe a que las juntas caracterizadas por tener bajos valores de transferencia de cargas están a menudo asociadas con juntas en donde los materiales de base y/o subbase están erosionados. Así mismo, zonas con bajos valores de espesores efectivos están relacionados con zonas de baja resistencia estructural, las cuales, si se encuentran ubicadas cerca de las zonas de juntas que tienen bajos niveles de LTE, pueden ser fácilmente clasificadas como regiones que presentan altos índices de erosión.

El Texas Transportation Institute (TTI, Texas A&M University) ha realizado durante los últimos 3 años un estudio completo de caracterización del desempeño de diferentes materiales de bases de pavimento rígidos construidos en el estado de Texas (Jung et al., 2009). Además de las inspecciones visuales, los investigadores han empleado las técnicas alternativas mencionadas con anterioridad. La Figura 6.7 muestra núcleos obtenidos en campo en dos condados diferentes de Texas, así como algunas muestras tomadas por la Universidad de Los Andes en la troncal de la Autopista Norte del sistema Transmilenio en Bogotá. En todos los casos, los núcleos corresponden a vías de arteriales de alta prioridad construidas con pavimentos rígidos de diferentes configuraciones, las cuales estaban caracterizadas por presentar daños relacionados con fenómenos de erosión de las capas de base o subbase.







**Figura 6.7.** Núcleos de pavimentos rígidos en vías con reportes de daños por erosión en : a) Autopista Norte (Bogotá), y b) el estado de Texas (tomado de Jung et al. (2009))

Por su parte, la Figura 6.8 muestra imágenes obtenidas del georadar (Jung et al. 2009). En esta imagen las zonas oscuras corresponden a zonas de alta concentración de vacíos y las zonas naranjas o amarillas corresponden a zonas con alta concentración de humedad y con alto potencial de erodabilidad.







**Figura 6.8.** Imagen obtenida mediante el georadar del corte vertical de una sección de pavimento rígido de bajo desempeño y con evidencia de daños por erosión. Tomado de Jung et al. (2009)

Finalmente, la Figura 6.9 muestra los resultados de deflexión y de espesor efectivos obtenidos de mediciones de FWD realizadas en una sección de la autopista interestatal US81/287 en el estado de Texas. Los resultados mostrados en la figura muestran una fuerte relación entre altos valores de deflexión y los bajos valores de espesores efectivos, lo cual es un indicativo de la existencia potencial de erosión en la capa de soporte de las losas de concreto.



**Figura 6.9.** Espesor efectivo, *he*, (i.e., effective thickness) y deflexiones para una sección erosionada en la vía interestatal US 81/287 en Texas. Tomado de Jung et al. (2009)





En la literatura también se encuentran otros modelos en los que se han empleado medidas del estado superficial del pavimento para establecer el nivel de bombeo en los pavimentos. Por ejemplo, Byrum (2006) empleó datos de perfiles superficiales adquiridos de forma no-destructiva como parte del proyecto Long Term Pavement Performance (LTPP)—patrocinado por la Federal Highway Administration (FHWA)—para desarrollar un índice de bombeo en pavimentos con pasadores. Este índice es función del perfil del pavimento, el cual puede ser fácilmente obtenido mediante métodos no destructivos. Este índice, también fue empleado por el autor para encontrar una relación empírica entre la cantidad de movimiento o deflexión relativa de las juntas y la cantidad estimada de pérdida de material por efectos de bombeo.

Una experiencia interesante—que involucra metodologías diferentes a las mencionadas con anterioridad—consiste en el trabajo realizado en la Ciudad de Bogotá por la Universidad de los Andes cuyo objetivo era comprender y caracterizar los daños de bombeo reportados en la troncal de la Autopista Norte del sistema de transporte masivo Transmilenio. En dicho estudio, la Universidad realizó mediciones de presión y deflexión dinámica en secciones del pavimento que habían sido claramente afectados por erosión. Esta medición se realizó en 2005 en la Autopista Norte, aproximadamente a 150 m de la Estación de Transmilenio Toberín. Las mediciones se realizaron en la interfase entre la losa concreto y la capa de base, conformada por un *relleno fluido*.

El ensayo consistió en la medición del aumento de la presión de agua y la deflexión dinámica producidas por el paso de los ejes de los vehículos articulados del sistema Transmilenio sobre las losas de concreto, que suprayacen una capa de material de base denominado relleno fluido. Esta medición se realizó en condición de tráfico alto y en condición de total saturación de la losa en estudio.

El sitio seleccionado para la instrumentación fue una losa de concreto ubicada sobre el carril exclusivo de buses del Transmilenio en sentido Norte-Sur. Esta losa se encontraba ubicada frente a la rampa de acceso del puente peatonal de la Estación Toberín. Se escogió dicha losa porque su junta transversal presentaba de manera visible el fenómeno de bombeo.





Para la realización de la medición se tomó la decisión de instrumentar la zona con los siguientes equipos:

- 2 sensores de presión de agua marca Drock con un rango de 0 a 5 bares.
- 2 LVDTs marca Omega con u rango de + 1 cm.
- Tarjeta de Adquisición de datos marca Iotech de 4 canales.
- 2 amplificadores con una ganancia de 1 10 para los sensores de presión de agua.
- Camión dotado con un tanque de agua.
- 2 mangueras.

Los detalles geométricos de la instrumentación realizada se presentan en la Figura 6.10. De igual manera, los detalles de la instrumentación en la losa se presentan en las Figuras 6.11 y 6.12.



Figura 6.10. Instrumentación de la losa






Figura 6.11. Sensores de presión e inyección de agua



Figura 6.12. LVDTs





La irrigación del agua requirió la perforación de dos orificios cuya profundidad fue del mismo espesor de la losa de concreto y con un diámetro de media pulgada. En la figura 6.10 se presenta la ubicación de los sensores de presión y los orificios a través de los cuales se inyectó el agua. Ambos se encontraban centrados en la losa de concreto en el sentido transversal, mientras que los deformímetros se ubicaron a 5 cm de las juntas transversal y longitudinal. El agua fue inyectada a través de mangueras desde el camión ubicado en el carril mixto. Este camión contaba con un tanque de agua, en el cual el nivel de agua se estableció a una altura de 193 cm de la losa. La irrigación de agua fue continua durante un total de 3 días, tiempo en el cual se realizaron las mediciones. De igual manera se requirió la perforación de agua. El camión fue dotado con un sistema de adquisición de datos, en el cual se registró la presión de agua y la deflexión de las dos losas en tiempo real.

Las Figuras 6.13 y 6.14 ilustran ejemplos de los resultados típicos obtenidos mediante esta metodología de experimentación en campo. En la figura 6.13 se observa la evolución de la deflexión dinámica medida durante el paso de un bus Transmilenio. En esta figura se observan tres picos de deflexión correspondientes al paso de los tres ejes de los buses articulados. En la figura 6.14 se observa la evolución de la presión del agua en la cavidad presente entre la losa y la base del pavimento.



Figura 6.13. Deflexión dinámica medida durante el paso de un bus articulado (deflexión en mm vs. tiempo)







Figura 6.14. Presión de agua medida durante el paso de un bus articulado (presión en kg/cm<sup>2</sup> vs. tiempo)

Teniendo en cuenta los resultados de campo se pudo concluir que la presión del agua es mayor en la medida en que la deflexión dinámica es mayor. Igualmente, como se mencionó con anterioridad, la bibliografía reporta que entre mayor es la presión de agua, mayor es la velocidad de expulsión de la misma. Para el cálculo exacto de la velocidad del flujo del agua bajo las losas de concreto hidráulico es necesario tener en cuenta en primer lugar la deflexión dinámica que ocurre en las losas y, posteriormente, la hidráulica del flujo del agua a lo largo de la cavidad existente entre la capa de base y las losas de concreto.

La importancia de la metodología presentada con anterioridad es que si bien no tiene como objetivo la identificación de zonas de bombeo, sí permite la caracterización del fenómeno y la obtención de parámetros que pueden ser empleados en diversos modelos analíticos.

Finalmente, es importante mencionar que la metodología más apropiada para realizar una caracterización completa de problemas de erosión en bases de pavimentos rígidos consiste en una combinación acertada de varios de los métodos descritos con anterioridad.





# 6.2. Revisión Bibliográfica de los Diseños Experimentales para Medir la Susceptibilidad a la Erosión de Materiales Empleados como Bases en Pavimentos de Concreto Hidráulico

Como se ha demostrado en las secciones anteriores, el fenómeno de bombeo es un problema complejo debido al gran número de variables involucradas. Por esta razón, el procedimiento generalmente utilizado para el análisis cualitativo del fenómeno de bombeo es el de comparar el comportamiento de pavimentos ya construidos y, con base en ellos, extrapolar y obtener conclusiones sobre el comportamiento de pavimentos nuevos construidos en forma similar. Mediante este procedimiento se han desarrollado ábacos y fórmulas empíricas que permiten evaluar la evolución del desnivel que presentan las losas en las juntas transversales de un pavimento rígido.

Si bien este procedimiento empírico permite obtener conclusiones sobre pavimentos comparables a aquellos sobre los cuales se ha establecido el modelo, éste presenta limitantes importantes en los casos en los cuales el procedimiento constructivo o los materiales son diferentes. En estos casos es preferible utilizar análisis más refinados que permitan tener en cuenta la influencia de las diferentes variables que intervienen en el fenómeno de bombeo y en el comportamiento real del material utilizado como base del pavimento rígido. Esta situación es la que ha motivado desde la década de 1960 a diseñar e implementar ensayos experimentales de diversa índole. Los ensayos experimentales reportados en la literatura tienen 2 objetivos primordiales: 1) simular el proceso de bombeo observado en campo para obtener valores sobre las variables involucradas en el proceso (i.e., velocidades de movimiento del agua en la interfase entre las losas y la base, presiones de agua, etc.), y 2) cuantificar la susceptibilidad al deterioro de diferentes materiales empleados en bases de pavimentos rígidos. Es importante mencionar que algunos de estos montajes experimentales han permitido la obtención de datos que se pueden emplear como variables de entrada en modelos analíticos que describen e problema del bombeo desde el punto de vista hidráulico. El uso y/o desarrollo de estos modelos es muy importante ya





que permite explorar e identificar la importancia relativa que tienen las diferentes variables involucradas en el fenómeno de bombeo.

Con base en los objetivos planteados para el presente proyecto de consultoría, esta sección del informe está dedicada exclusivamente a describir las experiencias de diseños experimentales destinados a caracterizar la susceptibilidad a la erosión por agua de los materiales empleados en bases de soporte de pavimentos rígidos. Una investigación de la literatura disponible sobre este tema permite obtener tres conclusiones principales:

- 1. no existen una gran variedad de artículos internacionales en revistas indexadas, informes o reportes de investigación sobre este tema,
- 2. no existen ensayos estandarizados (e.g., normas AASHTo, ASTM, etc.) para cuantificar la erodabilidad por efectos del agua de materiales empleados en bases de pavimentos de concreto. La única excepción que se encontró en la literatura corresponde al ensayo de abrasión mediante cepillado—descrito posteriormente en esta sección—del cual existen normas AASTHO. Los demás ensayos reportados en la literatura corresponden a esfuerzos individuales realizados por diversos centros de investigación.
- 3. la bibliografía internacional recolectada demuestra que este tema fue de gran relevancia durante las décadas de 1970 y 1980. Sin embargo, después de este periodo no se encuentran estudios internacionales publicados sobre la materia sino hasta el año 2009, en donde se destaca un estudio sobre este tema financiado por el Departamento de Transporte de Texas (Texas Departament of Transportation o TexasDOT) y la Federal Highway Administration (FHWA) y ejecutado por el Texas Transportation Institute (TTI) de la Universidad de Texas A&M. La existencia de estudios recientes sobre la caracterización, control y modelación de la erodabilidad de capas de soporte de pavimentos rígidos es un testimonio de que éste es un tema que sigue siendo relevante para controlar el desempeño y la durabilidad de pavimentos de concreto. Más aun, la existencia de estos estudios es una muestra de que los organismos estatales que tienen a su cargo la administración de las redes viales requieren con urgencia mecanismos experimentales confiables y eficientes que les permitan caracterizar la durabilidad de estos materiales. En el ámbito internacional, particularmente en Estados





Unidos, la caracterización de estos materiales es particularmente importante debido a las mínimas especificaciones de susceptibilidad a la erosión establecidas en las nuevas metodologías de diseño de pavimentos (e.g., AASHTO 2002, también conocido como MEPDG de sus siglas en inglés Mechanical-Empirical Pavement Design Guide).

A continuación se describen los principales diseños experimentales que se han desarrollado para cuantificar la susceptibilidad a la erosión de materiales empleados en bases en pavimentos rígidos.

## • Máquina de ensayo con cepillo (Phu 1979)

Este ensayo fue diseñado por investigadores franceses para caracterizar la erodabilidad de diversos tipos de materiales. El principio básico del ensayo es provocar la pérdida de material de un especimen mediante la aplicación de un cepillo en la superficie en movimientos lineales (Figura 6.15) o rotacionales (Figura 6.16). En el caso del ensayo caracterizado por movimientos lineales, el valor de la masa aplicada en la parte superior del cepillo es variable, la longitud total del movimiento es de 70 mm y la velocidad de aplicación es de 36 movimientos por minuto. En el caso del ensavo caracterizado por movimientos rotacionales, la masa aplicada al espécimen es de 1 kg, el diámetro del cepillo es de 100 mm y la velocidad de aplicación de la carga es de 840 rpm. La pérdida de masa de los especímenes es empleada en ambos ensayos para calcular el índice de erosión (IE) del material. El IE está definido como la razón entre la masa perdida por el especimen y la masa perdida por un material de referencia. El material de referencia es un material granular estabilizado con 3.5% de cemento hidráulico y el valor de pérdida de masa de este material es de 26 g/min. Por lo tanto, valores de IE cercanos a 1 están asociados con materiales que tienen una susceptibilidad a la erosión similar a la del material de referencia. Entre menor es el valor de IE, mejor es la resistencia del material a la erosión. El mayor inconveniente de este ensayo son los largos tiempos de ejecución, los cuales pueden alcanzar valores de hasta 6 semanas para una caracterización en especímenes sometidos a acondicionamientos ambientales





previos (e.g., ciclos en condición seca y húmeda). De los ensayos experimentales consultados, éste es el único que se encuentra estandarizado mediante normas internacionales (AASHTO T135-76 vigente desde 1970).







Adaptado de Phu (1979)



**Figura 6.16.** Ilustración de la máquina de ensayo con cepillo. Figura adaptada de Phu (1979).





# • Máquina rotacional de cortante (adaptación de Van Wijk 1985)

Como parte de una tesis doctoral realizada en la Universidad de Purdue (USA), Van Wijk (1985) estudió el problema de erosión en bases de pavimentos rígidos y diseñó dos montajes experimentales para su cuantificación. El principio básico de los dos montajes es que la erosión ocurre cuando el esfuerzo cortante inducido por el agua supera la resistencia a cortante del material de base. Este principio fue utilizado inicialmente durante las décadas de 1960 y 1970 para realizar ensayos experimentales similares. El primer montaje corresponde a una *máquina rotacional cortante* y está diseñado para medir la erodabilidad de materiales cementados. El principio básico de este experimento consiste en generar abrasión en el material mediante la inducción de esfuerzos cortantes producidos por el paso del agua alrededor del espécimen. Los primeros investigadores que trabajaron en diseñar un experimento con los mismos principios fueron Espey (1963) de la Universidad de Texas en Austin y posteriormente Akky (1974) de la Universidad de California en Davis. La Figura 6.17 muestra la adaptación de este aparato realizada por Van Wijk (1985).

# • Máquina de inyección de agua (adaptación de Van Wijk, 1985)

Este montaje corresponde al segundo diseño experimental propuesto por Van Wijk para medir la erodabilidad de materiales no cementados. Los primeros ensayos de inyección de agua a alta velocidad para medir la erodabilidad de materiales no cementados fueron usados a finales de la década de 1960 (Dash 1968; Bhasin 1969). El montaje propuesto por Van Wijk (1985) se puede observar en la Figura 6.18. El principio básico de este ensayo consiste en promover la abrasión de la parte superior de especímenes no cohesivos mediante la aplicación de un chorro de agua presurizada a un ángulo de 20°. La medición de la susceptibilidad a la erosión se deriva de la pérdida final de peso del espécimen.











**Figura 6.18.** Ilustración de la máquina de inyección de agua. Figura adaptada de Van Wijk (1985)





#### • Ensayo de desgaste por rodamiento (de Beer 1989)

Este montaje fue desarrollado en Sur África a finales de la década de 1990 con el fin de simular el desgastamiento producido en pavimentos rígidos por efectos de bombeo. El principio del ensayo consiste en someter la superficie de un espécimen al efecto de fricción generado por una membrana de neopeno sobre la que transita una rueda. El desgaste del material superficial (desprendimiento de los finos) se produce directamente por efectos de fricción entre las dos superficies. Para simular el lavado de los finos producidos de forma similar a la que ocurre durante el bombeo, la muestra es sumergida en agua. El resultado del ensayo consiste en un índice de erosión, el cual se define como el valor promedio de la cavidad generada por erosión después de 5,000 aplicaciones de carga. A diferencia de la mayoría de los métodos, en este ensayo la erosión se mide con base en la profundidad de la superficie afectada y no en función del peso del material desprendido durante del especimen.

La Figura 6.19 muestra un esquema del montaje experimental. Desafortunadamente, este ensayo posee algunas deficiencias en el sentido en que el mecanismo que produce el daño no es comparable al mecanismo real de daño que ocurre en la zona de interfase entre las losas de concreto y la capa de base.









## • Ensayo de erosión sobre mesa vibratoria (Phu 1979; Caicedo 2001)

Este ensayo fue desarrollado por Phu (1979) como parte de una tesis doctoral con el objetivo de determinar la susceptibilidad a la erosión de materiales cementados empleados en pavimentos rígidos. Para cumplir con este objetivo, Phu diseñó un experimento para simular adecuadamente los mecanismos que caracterizan los procesos de erosión en estos pavimentos. El montaje experimental consiste en producir vibraciones entre un cilindro del material a caracterizar y una superficie de concreto de alta resistencia, bajo la presencia de agua líquida.

Durante la vibración se presentan dos fases. En la primera fase el cilindro se aleja de la base de concreto formando una cavidad entre los dos materiales, al tiempo que una lámina de agua penetra en esta cavidad. En una segunda fase, el cilindro se acerca a la base de concreto y el agua fluye a alta velocidad entre los dos materiales, de forma similar a lo que ocurre en la interfase entre las placas de concreto y la capa de base en campo. Esta acción del agua en la interfase promueve la pérdida del material por erosión. Para las mismas condiciones geométricas y una misma frecuencia de vibración, es de esperar que exista mayor pérdida de finos en materiales altamente erodables, mientras que la pérdida en peso del espécimen es menor cuando el material ensayado es resistente a la erosión. Aunque uno de los principales inconvenientes reportados en los años 70's y 80's con respecto a este ensayo fue la dificultad de su montaje, las condiciones tecnológicas actuales (calidad de los instrumentos y de los sistemas de toma y adquisición de datos, entre otros) permiten realizar este tipo de montajes sin mayores complicaciones. De hecho, Caicedo (2001) utilizó exitosamente un montaje similar para evaluar la susceptibilidad a la erosión de diferentes tipos de materiales granulares estabilizados que podían ser empleados en capas de base de pavimento rígidos. La Figura 6.20 presenta una ilustración general de este montaje experimental.





Un aspecto muy importante de este ensayo es que mediante el control de la aceleración y de la frecuencia de vibración tanto de la base de concreto como de la muestra sometida al ensayo, es posible variar el espesor de la cavidad y la velocidad de expulsión del agua. En otras palabras, este ensayo—a diferencia de la mayoría de los ensayos descritos con anterioridad—permite controlar las variables de entrada para simular, por ejemplo, diferentes condiciones de carga a las cuales puede ser sometida la estructura.



Figura 6.20. Ensayo de erosión con mesa vibratoria. Modificado a partir de Phu (1979)

# • Ensayo triaxial para la cuantificación de la erodabilidad (Jung et al. 2009)

Este montaje constituye el método experimental más reciente reportado en la literatura. El ensayo consiste en someter especimenes cilíndricos conformados por concreto hidráulico de





alta resistencia y por el material de ensayo (los cuales forman una interfase diagonal entre los dos materiales, Figura 6.21) a un ensayo triaxial cíclico. Durante el ensayo, diferentes niveles de esfuerzo desviador (i.e., diferencia entre el esfuerzo principal mayor y el menor, o  $\sigma_1$ - $\sigma_3$ ) son aplicados al espécimen de tal forma que se generan diferentes niveles de esfuerzo cortante en la interfase entre los dos materiales. La Figura 6.22 resume la condición de esfuerzos a los que es sometido el material de ensayo. Los resultados de este experimento permiten determinar tres parámetros diferentes: 1) la resistencia crítica a cortante del material en la interfase con base en la ejecución de un ensayo estático, 2) los coeficientes de fricción correspondientes a los valores críticos de esfuerzos cortantes, y 3) la velocidad de pérdida de material en función de los diferentes niveles de esfuerzo cortante. La mayor dificultad de este ensayo es que el proceso de erosión simulado no considera el rol de los mecanismos hidráulicos, los cuales cumplen un papel fundamental en el desarrollo de la pérdida de material por bombeo en pavimentos rígidos. Es decir, el ensayo permite obtener los valores de pérdida de material que son generados exclusivamente por las condiciones de fricción entre las placas de concreto y los materiales de base.



**Figura 6.21.** Especímen para el ensayo de erosión en aparato triaxial. Modificado a partir de Jung et al. (2009).







Figura 6.22. Condición de esfuerzos aplicados al espécimen de ensayo. Modificado a partir de Jung et al. (2009).

El deterioro por erosión de las capas de base es considerado una de las causas de daño prematuro más comunes y agresivas en pavimentos rígidos. El esfuerzo por identificar, controlar y disminuir la susceptibilidad a la erosión de estos materiales ha promovido el diseño de experimentos y modelos analíticos desde la primera mitad del siglo XX. La existencia de proyectos recientes sobre el tema—financiados por importantes agencias gubernamentales de Estados Unidos—es una muestra clara de que este problema persiste en la actualidad. Por lo tanto, la ejecución de proyectos de investigación destinados a cuantificar la susceptibilidad a la erosión de materiales comúnmente empleados en capas de soporte de pavimentos rígidos, como el que se realizó mediante el contrato 089 de 2009 entre la Universidad de los Andes y el Instituto de Desarrollo Urbano IDU, es una actividad necesaria para garantizar la construcción de estructuras resistentes y durables.





#### 7. Desarrollo de la Consultoría

A continuación se presenta un completo reporte de las actividades realizadas en cada una de las etapas definidas en los términos de referencia para el proyecto *Estudio de la resistencia a la erosión de materiales empleados como bases en pavimentos de concreto hidráulico*, realizado por medio del Contrato 089 de 2009 entre la Universidad de los Andes y el IDU.

## 7.1. Etapa 1: Diseño del Experimento y Cronograma de Trabajo

La información presentada en las secciones 6.1 y 6.2 del presente documento fue cuidadosamente evaluada para realizar el diseño definitivo del montaje experimental empleado en este contrato. Observando las ventajas y desventajas de cada uno de los ensayos descritos en el numeral 6.2, y debido a la experiencia previa del grupo de trabajo en este tema, el método seleccionado para la medición de la erodabilidad de los materiales cementados es el ensayo con mesa vibratoria. El montaje experimental fue ligeramente modificado con respecto al empleado por el grupo de trabajo en el año 2001, con el fin de incluir nuevos sensores que permitieran obtener mediciones adicionales de las condiciones del ensayo. Para el caso de los materiales no cementados (i.e., base granular sin estabilizar), se utilizó un ensayo similar al de inyección de chorro de agua a alta velocidad.

La primera parte de esta sección presenta la teoría hidráulica que describe los mecanismos del proceso de bombeo, a partir de los cuales se pueden obtener las condiciones que se deben emplear en los ensayos de mesa vibratoria. A continuación se presentan las características de los dos diseños de erosión propuestos para este proyecto.

El propósito de esta parte de la investigación fué plantear un procedimiento experimental que permitiera evaluar la erodabilidad de un material de base de un pavimento rígido de la manera más ajustada a la realidad del funcionamiento del pavimento. Con el objeto de replicar en laboratorio el fenómeno de erosión que ocurre en el campo es necesario analizar el mecanismo que se produce en el pavimento cuando se desarrolla el fenómeno de bombeo.





## 7.1.1. Aproximación Teórica de la Hidráulica de Bombeo en Bases de Pavimentos Rígidos

Diferentes referencias bibliográficas conducen a afirmar que el fenómeno de bombeo se puede caracterizar de la manera siguiente:

$$B = B(P, V_e, E, n) = \int_p \left(1 - \frac{E}{E'}\right) V_e n P dt$$
(7.1)

En donde:

- B representa el bombeo
- P representa la carga por eje
- V<sub>e</sub> es la velocidad de expulsión del agua
- E representa la erodabilidad del material
- E' es la erodabilidad de un material de referencia considerada como satisfactoria
- *n* es el número diario de ejes que circulan por la vía
- *p* representa el dominio de integración, éste representa el tiempo durante el cual la interfase losas-base está funciona presencia de agua.

De acuerdo con esta ecuación las dos grandes incógnitas necesarias para evaluar la erosión de un material de base de un pavimento rígido son la velocidad de expulsión del agua,  $V_e$  y la erodabilidad del material, *E*. Por lo tanto, la evaluación del parámetro de erodabilidad debe tener en cuenta de una manera clara el efecto de la velocidad de expulsión del agua.

El primer objetivo para el diseño de un experimento de erosión consiste, por lo tanto, en la evaluación de la velocidad de expulsión de agua teniendo en cuenta las características del pavimento. En segundo lugar se planteó un experimento que replique las condiciones de campo; es decir, los mecanismos de deterioro, de la manera más fiel posible.





El cálculo teórico de la velocidad de expulsión de agua en un pavimento requiere la adopción de ciertas hipótesis tales como:

- Suponer que bajo cualquier condición de funcionamiento del pavimento puede aparecer una cavidad entre la base y las losas de concreto.
- Debido a consideraciones de simetría, la losa se considera como empotrada en una posición que corresponde al extremo de la cavidad.
- La superficie de la base se considera impermeable.
- El flujo creado por la expulsión del agua, producida por la deflexión de la losa debido al peso de la carga rodante, se considera un flujo plano.

Es importante resaltar que el modelo de cavidad bajo las losas también aplica para pavimentos que no hayan sufrido erosión. En efecto, en pavimentos nuevos la cavidad puede aparecer por el alabeo debido a gradientes de temperatura negativos, o por el fraguado diferencial del concreto (fraguado de arriba hacia abajo). El efecto del tamaño de la cavidad en las diferentes etapas de la erosión se encuentra explicado en detalle en la tabla 6.1 de la sección 6.1.3.

Antes de abordar el cálculo de la velocidad de expulsión del agua bajo una losa de pavimento rígido es necesario evaluar el comportamiento mecánico de un pavimento rígido sin presencia de agua. El cálculo de la deflexión dinámica bajo estas condiciones permitirá acoplar el comportamiento mecánico del pavimento con el flujo de agua bajo el mismo.

#### 7.1.2. Funcionamiento de los Pavimentos en Concreto en Estado Seco

Con el fin de calcular la velocidad del agua bajo una losa de concreto es importante evaluar en primer lugar la velocidad de deflexión de las losas que conforman el pavimento rígido. Para este propósito es necesario evaluar tanto la deflexión estática como la deflexión dinámica.





# Deflexión bajo una carga estática

Para realizar el cálculo de la deflexión, el tramo de la losa de concreto que se encuentra por encima de la cavidad se supone como empotrado (figura 7.1).



Figura 7.1. Modelo de losa en voladizo

Bajo estas condiciones la deflexión está dada por la ecuación utilizada corrientemente en la resistencia de materiales:

$$Z_{st} = \frac{PL^3}{3EI} \tag{7.2}$$

en donde,

*P* es la carga de la mitad del eje*E* es el módulo de Young de la losa*I* es el momento de inercia geométrico





## Deflexión dinámica

La ecuación de base para el estudio de la vibración de la losa puede escribirse de la forma siguiente (Figura 7.2.):



Figura 7.2. Ecuación de equilibrio de una losa en flexión

$$EI\frac{d^2z}{dx^2} = -M \tag{7.3}$$

en donde M es el momento flector en la losa a una distancia x.

Diferenciando dos veces la anterior ecuación se obtiene:

$$\frac{d}{dx}\left[EI\frac{d^2z}{dx^2}\right] = -\frac{dM}{dx} = Q$$
(7.4)

$$\frac{d^2}{dx^2} \left[ EI \frac{d^2 z}{dx^2} \right] = -\frac{dQ}{dx} = w$$
(7.5)

en donde Q es la fuerza cortante en x y w es en este caso el peso por metro lineal de la losa. La ecuación general de la vibración se puede obtener aplicando el principio de D'Alambert:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ EI \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \right] = -\frac{\rho A}{g} \frac{\partial^2 z}{\partial t^2}$$
(7.6)





En donde  $\rho$  representa el peso específico de la losa y *g* es la aceleración de la gravedad. Dado que *E* e *I* son constantes se puede escribir:

$$EI\frac{\partial^4 z}{\partial x^4} = -\frac{\rho A}{g}\frac{\partial^2 z}{\partial t^2}$$
(7.7)

Esta ecuación se puede escribir de la siguiente manera:

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + a^2 \frac{\partial^4 z}{\partial x^4} = 0 \text{ en donde } a^2 = \frac{EIg}{\rho A}$$
(7.8)

Cuando la losa vibra, la deflexión en cada punto varía de manera armónica en función del tiempo. Por lo tanto, la deflexión se puede describir mediante la siguiente ecuación:

$$z = X(C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t) \tag{7.9}$$

En donde *X* es una función de la distancia x y  $\omega$  es la frecuencia angular de vibración. Derivando la ecuación 2.12 de acuerdo con la ecuación 2.11 se obtiene:

$$\frac{\partial^4 X}{dx^4} = \frac{\omega^2}{a^2} X \tag{7.10}$$

La solución general para z es la siguiente:

$$z = (C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t)(A \sinh kx + B \cosh kx + C \sin kx + D \cos kx)$$
(7.11)

en donde:

 $k^4 = \omega^2/a^2$ 

*A*, *B*, *C*, *D* son constantes de integración que dependen de las condiciones de frontera de la losa.

 $C_1$ ,  $C_2$  son constantes de integración que dependen del modo de vibración.

En el caso de la cavidad que se presenta bajo la losa de concreto, las condiciones de frontera son las siguientes: losa empotrada en el extremo de la fisura y libre en el extremo de la junta. Por lo tanto, las condiciones de frontera se pueden expresar de la manera siguiente:

Para 
$$x=0$$
  $\frac{\partial X}{\partial x} = 0$  (7.12)





Para 
$$x=L$$
  $\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} = \frac{\partial^3 X}{\partial x^3} = 0$  (7.13)

Por lo tanto se obtiene:

$A(\cosh kL + \cos kL) + B(\sinh kL - \sin kL) = 0$	(7.14)

 $A(\sinh kL + \sin kL) + B(\cosh kL + \cos kL) = 0$ (7.15)

Finalmente se obtiene:

$$\cosh kL \cos kL = -1 \tag{7.16}$$

Existe un número infinito de kL que satisfacen la ecuación anterior, esto quiere decir que existe un número infinito de modos de vibración. Los primeros valores de kL son los siguientes:

$k_1L=1.875$	$k_1L=10.996$
$k_1L=4.694$	$k_1L=14.137$
$k_1L=7.855$	$k_1L=17.279$

La frecuencia y el período natural de vibración están dados por el primer modo de vibración, es decir kL=1.875; con lo cual se obtiene:

$$\omega = \frac{3.515}{L^2} \sqrt{\frac{EIg}{\rho A}}$$
(7.17)

$$\tau = \frac{2\pi L^2}{3.515} \sqrt{\frac{\rho A}{EIg}}$$
(7.18)

Las condiciones de frontera de la vibración imponen lo siguiente:

Para t=0

$$\frac{\partial z}{\partial t} = 0 \Longrightarrow C_1 = 0 \tag{7.19}$$

Para x=L y t=0

 $z = z_{st} \tag{7.20}$ 





Estas dos últimas ecuaciones permiten obtener la expresión de la deflexión dinámica *z* en el punto *x*:

$$z_{x} = 0.5 z_{st} \left[ \cosh 1.9 \frac{x}{L} - \cos 1.9 \frac{x}{L} - 0.7 \left( \sinh 1.9 \frac{x}{L} - \sin 1.9 \frac{x}{L} \right) \right] \cos \left( \frac{3.15}{L^{2}} \sqrt{\frac{EIg}{\rho A}} t \right)$$
(7.21)

La expresión general de la vibración para un punto dado en función del tiempo es la siguiente:

$$z_x = z_{st} \frac{x}{L} \cos\left(\frac{2\pi t}{\tau}\right) \tag{7.22}$$

Por lo tanto, la velocidad de deflexión del extremo de la losa durante la vibración es entonces:

$$V_z = z_{st} \left( -\frac{2\pi}{\tau} \right) \sin \left( \frac{2\pi t}{\tau} \right)$$
(7.23)

En consecuencia, la velocidad máxima es:

$$|V_z|_{\max} = \frac{2\pi z_{st}}{\tau}$$
 para  $t = \frac{\tau}{4}$  (7.24)

y la velocidad media en el extremo de la losa es:

$$V_{zmean} = \frac{4z_{st}}{\tau}$$
(7.25)

#### 7.1.3. Cálculo Analítico del Flujo de Agua bajo una Losa de Pavimento

El flujo del agua bajo un pavimento rígido se puede calcular analíticamente haciendo una similitud entre el fenómeno de bombeo y el flujo del agua entre dos placas planas que forman un ángulo agudo, véase la siguiente figura.







Figura 7.3. Flujo del agua entre dos placas en ángulo

En este modelo, P representa la carga aplicada en el extremo de cada placa. Cada placa tiene una rigidez representada por un resorte de constante k. L y l son, respectivamente, el largo de cada una de las placas.

Las hipótesis principales para el cálculo del flujo del agua son las siguientes:

- El desplazamiento de cada placa es pequeño y por lo tanto se puede escribir:  $P=K_{Z_{st}}$ , en donde  $Z_{st}$  es la deflexión estática de la placa que se comporta como un voladizo.
- El flujo del agua que aparece cuando las dos placas se cierran se considera como un flujo plano.
- Cada placa es impermeable.

Dependiendo del valor del ángulo de abertura de las placas,  $\alpha$ , se pueden presentar diferentes casos de regímenes de flujo del agua:

- Cuando  $\alpha$  es suficientemente pequeño el flujo del agua es del tipo viscoso (caso1).
- En el caso intermedio el flujo es transitorio (caso 2).
- Cuando α es suficientemente grande el flujo es del tipo ideal, es decir, carente de fricción (caso 3).





El primero y el último caso son accesibles analíticamente; el segundo solo es posible mediante técnicas numéricas o experimentales. Es importante mencionar que estos tres casos son los mismos referidos en la Tabla 6.1, en la cual se describen las tres etapas de flujo de agua bajo las losas en función de la magnitud de la profundidad de la cuenca erodada. En otras palabras, la magnitud de contexte en el modelo mecánico esquematizado en la figura 7.3 es proporcional a la magnitud de la profundidad de la cuenca de erosión. A continuación se describe el desarrollo analítico de las ecuaciones que describen cada uno de estos tres casos.

#### Solución del caso 1

Como se mencionó con anterioridad, este caso se presenta cuando existen pequeñas cavidades creadas principalmente por gradientes térmicos negativos. En estas circunstancias el agua se comporta como un fluido viscoso y el cálculo de la velocidad del agua puede realizarse utilizando las teorías de la hidrodinámica y de la vibración de losas.

La solución de este caso se puede obtener utilizando coordenadas polares. Tal como ya se anotó, cuando  $\alpha$  es pequeño el flujo que se produce como resultado del cerrado de las dos placas es un flujo viscoso. La función de corriente  $\Psi$  debe entonces satisfacer las siguientes condiciones:

$$\nabla^2 \psi = 0 \tag{7.26}$$
$$\nabla^4 \psi = 0$$

La forma geométrica del problema permite afirmar que la solución es de la forma:

$$\psi = \omega r^2 f(\theta) \tag{7.27}$$

En donde:

 $\omega$  es la velocidad angular de rotación de las placas.

 $f(\theta)$  es función independiente de *r*.





La expresión  $\nabla^2 \psi$  se puede escribir en coordenadas polares de la siguiente forma:

$$\nabla^2 \psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2}$$
(7.28)

$$\nabla^2 \psi = f'(\theta) + 4f(\theta) = 0 \tag{7.29}$$

Lo cual conduce a:

$$\nabla^4 \psi = 4f'' + f''' = 0 \tag{7.30}$$

De donde se obtiene la ecuación diferencial para  $f(\theta)$ 

$$4f'' + f''' = 0 \tag{7.31}$$

La solución general de una ecuación de este tipo es de la forma siguiente:

$$f(\theta) = C_1 \cos 2\theta + C_2 \sin 2\theta + C_3 \theta + C_4 \tag{7.32}$$

Las condiciones de frontera permiten determinar las constantes C1, C2, C3 y C4. En efecto se tiene:

$$V_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} = \omega r f'(\theta)$$
 para  $\theta = \pm \alpha$  (7.33)

$$V_{\theta} = -\frac{\partial \psi}{\partial r} = -2\omega r f(\theta) = \omega r \qquad \text{para} \qquad \theta = \alpha \qquad (7.34)$$

$$V_{\theta} = -\frac{\partial \psi}{\partial r} = -2\omega r f(\theta) = -\omega r \qquad \text{para} \qquad \theta = -\alpha \qquad (7.35)$$

De esta forma se obtiene:

$$f'(\alpha) = f'(-\alpha)$$
 y  $f(\alpha) = -f(-\alpha) = -\frac{1}{2}$  (7.36)

La expresión para  $f(\theta)$  es entonces:

$$f(\theta) = \frac{-\sin 2\theta}{2(\sin 2\alpha - 2\alpha \cos 2\alpha)} + \frac{\theta \cos 2\alpha}{\sin 2\alpha - 2\alpha \cos 2\alpha}$$
(7.37)

De donde:

$$f(\theta) = \frac{-\sin 2\theta + 2\theta \cos 2\alpha}{2(\sin 2\alpha - 2\alpha \cos 2\alpha)}$$
(7.38)





$$f'(\theta) = \frac{-\cos 2\theta + \cos 2\alpha}{\sin 2\alpha - 2\alpha \cos 2\alpha}$$
(7.39)

Lo cual permite calcular las componentes de la velocidad de expulsión del agua de la manera siguiente:

$$V_{r} = \omega r \frac{\cos 2\theta - \cos 2\alpha}{\sin 2\alpha - 2\alpha \cos 2\alpha}$$
(7.40)  
$$V_{\theta} = \omega r \frac{\sin 2\theta - 2\theta \cos 2\alpha}{\sin 2\alpha - 2\alpha \cos 2\alpha}$$
(7.41)

Cuando  $\theta$ =0 la velocidad  $V_{\theta}$ =0, lo cual muestra que en el plano medio de las dos placas el flujo en el sentido vertical es nulo. Esto equivale a decir que este plano medio es impermeable. Lo anterior muestra la validez de modelar el flujo del agua bajo las losas de un pavimento rígido utilizando el modelo de dos placas en ángulo. La siguiente figura (Figura 7.4) muestra esquemáticamente las líneas de corriente del agua expulsada durante el cerrado de las placas  $S_1$  y  $S_2$ .



Figura 7.4. Dirección del flujo del agua

#### Cálculo de la velocidad de rotación angular

Las ecuaciones simplificadas de Navier Stokes para un fluido viscoso se pueden escribir de la manera siguiente.

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \upsilon \left[ \frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_{\theta}}{\partial \theta} - \frac{V_r}{r^2} \right]$$
(7.42)





$$\frac{\partial p}{\partial \theta} = v \left[ \frac{\partial^2 V_{\theta}}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_{\theta}}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_{\theta}}{\partial r} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} - \frac{V_{\theta}^2}{r} \right]$$
(7.43)

Se puede suponer, además, que la presión únicamente depende de r, con lo cual se puede obtener la presión a partir de las expresiones de las velocidades  $V_r$  y  $V_{\theta}$ .

$$\frac{dp}{dr} = \frac{4\upsilon\omega\cos 2\alpha}{r(\sin 2\alpha - 2\alpha\cos 2\alpha)}$$
(7.44)

De donde:

$$p = \frac{4\upsilon\omega\cos 2\alpha}{\sin 2\alpha - 2\alpha\cos 2\alpha} Ln(r) + C$$
(7.45)

Suponiendo que p=0 en el extremo de la losa (r=L), se obtiene la expresión general para la presión:

$$p = \frac{4\upsilon\omega\cos 2\alpha}{\sin 2\alpha - 2\alpha\cos 2\alpha} Ln(\frac{r}{L})$$
(7.46)

Además, como  $\alpha$  es muy pequeño se puede escribir lo siguiente:

$$p = \frac{\upsilon \omega}{\alpha^3} Ln(\frac{r}{L}) \tag{7.47}$$

Para calcular la velocidad de rotación angular de la losa en presencia de agua se pueden adoptar las siguientes consideraciones, (Figura 7.5):  $h_{max}$ ,  $h ext{ y } H$  son la profundidad de la lámina de agua en el extremo de la losa para los tiempos t=0,  $t=t ext{ y } t=t_{final}$ , cuando la losa llega a su punto de equilibrio; además  $z ext{ y } z_{max}$  son los desplazamientos verticales del extremo de la losa para los tiempos  $t=t ext{ y } t=t_{final}$ .



Figura 7.5. Flujo del agua entre dos placas en ángulo





La fuerza F que es la resultante del peso del eje y de la reacción de la losa se puede escribir de la siguiente forma:

$$F = k(h - H) \tag{7.48}$$

La fuerza *F* también corresponde a la fuerza producida por la presión del agua actuando en toda la superficie de la parte en voladizo de la losa, es decir en la superficie de la placa  $S_1$ .

$$F = \int_{0}^{L} \frac{v\omega l}{\alpha^{3}} Ln\left(\frac{r}{L}\right) dr$$
(7.49)

Por lo tanto:

$$F = k(h - H) = -\frac{\upsilon\omega}{\alpha^3} Ll$$
(7.50)

La velocidad de rotación angular tiene como expresión:

$$\omega = -\frac{K(h-H)\alpha^3}{\upsilon L} \tag{7.51}$$

Como  $\alpha$  es muy pequeño la velocidad de rotación angular se reduce a:

$$\omega = -\frac{K(h-H)h^3}{\nu lL^4} \tag{7.52}$$

La velocidad de desplazamiento de la losa (deflexión) en presencia de agua se puede escribir de la siguiente manera:

$$V_z = \omega L = -\frac{K(h-H)h^3}{\nu lL^3}$$
(7.53)

Así mismo, la variación de las componentes de la velocidad del agua expulsada se pueden escribir de la siguiente forma.

$$V_r = \frac{K(h-H)h^3}{\upsilon lL^4} r \frac{\cos 2\theta - \cos 2\alpha}{\sin 2\alpha - 2\alpha \cos 2\alpha}$$
(7.54)

$$V_{\theta} = \frac{K(h-H)h^3}{\nu l L^4} r \frac{\sin 2\theta - 2\theta \cos 2\alpha}{\sin 2\alpha - 2\alpha \cos 2\alpha}$$
(7.55)





La relación entre la velocidad radial y la velocidad tangencial se puede establecer mediante:

$$\left|\frac{V_r}{V_{\theta}}\right| = \frac{\cos 2\theta - \cos 2\alpha}{\sin 2\alpha - 2\theta \cos 2\alpha}$$
(7.56)

Así, cuando  $\theta \neq \alpha$  se puede escribir:

$$\left|\frac{V_r}{V_{\theta}}\right| = \frac{1}{2\theta} \tag{7.57}$$

Lo anterior permite afirmar que cuando la relación entre la longitud de la cavidad y su profundidad es del orden de 1000. Por ejemplo, L=1m y h=1mm, la componente de  $V_r$  es 4500 veces superior que  $V_{\theta}$ ; con lo cual se puede concluir que la velocidad  $V_{\theta}$  se puede despreciar en comparación con  $V_r$ . Esta conclusión permite calcular la velocidad promedio de expulsión del agua considerando únicamente el flujo en el sentido longitudinal.

La velocidad promedio de expulsión de agua considerando que fluye en el volumen limitado por la placa *S*1 y el plano medio de las dos placas es el siguiente:

$$V_m(r) = -\frac{r}{2h}\frac{dh}{dt} = -\frac{rV_z}{2h}$$
(7.58)

Remplazando el valor de  $V_z$  en la expresión anterior se obtiene el valor de la velocidad media de expulsión de agua:

$$V_m(r) = \frac{K(h-H)h^2 r}{2\nu lL^3}$$
(7.59)

Según esta expresión, la velocidad de expulsión del agua es proporcional al cuadrado de la profundidad de la cavidad  $(h^2)$ . Las velocidades calculadas con base en esta expresión varían entre 0 y 3 m/s. Tal como se mencionó previamente en la sección 6.1.3, aunque estas velocidades no tienen una fuerza suficiente para erosionar una capa de pavimento en concreto pobre o en gravas- cemento, sí tienen la fuerza necesaria para transportar finos hasta de 3 mm de diámetro que han perdido sus propiedades de cementación, así como para lavar los finos de los materiales no tratados.





La presión del agua en un punto dado se puede determinar a partir de las expresiones anteriores mediante:

$$p(r) = \frac{\upsilon \omega}{\alpha^3} Ln(\frac{r}{L}) = \frac{\upsilon}{\alpha^3} \left[ \frac{K(h-H)}{\upsilon l L^4} \right] \ln\left(\frac{r}{L}\right)$$
(7.60)

Dado que  $\alpha = h/L$  se tiene:

$$p(r) = \frac{K(h-H)}{lL} \ln\left(\frac{r}{L}\right)$$
(7.61)

Se puede observar que p(r) tiende a infinito cuando r=0; es decir, éste es un punto singular de la presión.

La relación entre la velocidad de expulsión del agua y la presión se puede expresar de la siguiente forma:

$$V_m(r) = \frac{rh^2 p(r)}{2\nu L^2 Ln(L/r)}$$
(7.62)

La expresión anterior muestra que la velocidad del agua en un punto dado varía linealmente con la presión medida en el mismo punto.

#### Solución del caso 2 (flujo en estado intermedio)

Como se mencionó con anterioridad, en este caso el flujo de agua es transitorio y eso dificulta los cálculos analíticos. Por esta razón, Phu (1979) recomienda recurrir a medidas directas de presión de agua. Debido a las condiciones hidráulicas del sistema, las velocidades de expulsión de agua en esta etapa transitoria pueden superar a las de los casos anteriores. Estas altas velocidades permiten concluir que esta es la etapa crítica de erosión de la base del pavimento.

#### Solución del caso 3 (flujo laminar)

Como se mencionó en la sección 6.1.3, este caso representa un estado avanzado de erosión o, en su defecto, un estado de gradientes térmicos negativos muy altos. El régimen de flujo de agua en esta etapa corresponde al de un flujo laminar y, por lo tanto, la presión del agua que se





genera bajo el eje de un vehículo es función del cuadrado de la velocidad de deflexión. Esta velocidad de deflexión de la placa depende casi exclusivamente del peso del vehículo. Bajo condiciones laminares el cálculo de la velocidad de expulsión de agua en la salida de la cavidad es sencillo de realizar y corresponde a:

$$Vm = \frac{LVz}{2(hmax - Zmax)}$$
(7.63)

en donde,

 $h_{\rm max}$  es la profundidad de la cavidad

L es el largo de la cavidad

l es el ancho de la cavidad

 $V_z$  es la velocidad de deflexión (m/s)

Zmax es la deflexión en el extremo de la losa ante el paso de los vehículos

#### 7.1.4. Diseño del Experimento de Erodabilidad utilizando Mesa Vibratoria

Como se ha señalado en secciones anteriores, la principal causa para la aparición del fenómeno de bombeo es la erosión del material de base. Por esta razón era necesario simular en laboratorio el efecto del agua y de la repetición de las cargas en el material de base y determinar de esta manera el desgaste del mismo.

El ensayo de erodabilidad que mejor simula el comportamiento de una base de pavimento rígido es el ensayo en mesa vibratoria (Phu 1979). En efecto, en este ensayo (esquematizado en la figura 6.20) un cilindro del material a estudiar vibra sobre una superficie de concreto de alta resistencia. Como se mencionó en la sección 6.2, durante la vibración de la mesa que soporta el espécimen se presenta una primera fase en la cual el cilindro se aleja de la base de concreto y crea una cavidad entre los dos materiales al tiempo que una lámina de agua penetra en esta cavidad. En la segunda fase el cilindro se aproxima a la base de concreto y el agua fluye a alta velocidad produciendo erosión en caso de que el material sea susceptible.

Como se mencionó en la sección 6.2, este ensayo simula de manera muy cercana el problema de erosión de una base de pavimento rígido. Controlando la aceleración y la frecuencia





de vibración tanto de la base como de la muestra sometida al ensayo es posible variar el espesor de la cavidad y la velocidad de expulsión del agua.

## Desarrollo teórico

El flujo del agua en un ensayo en mesa vibratoria es similar al flujo que se presenta entre dos discos paralelos separados por una lámina de agua que se aproximan y separan cíclicamente (Figura 7.6). Las hipótesis para realizar el cálculo del flujo del agua son las siguientes:



Figura 7.6. Flujo de agua entre dos discos paralelos

- El disco inferior  $S_1$  representa la losa del pavimento la cual se desplaza con respecto al disco  $S_2$ .
- El disco S<sub>2</sub> representa la base del pavimento, éste permanece en su posición inicial.
- Los dos discos permanecen paralelos durante el desplazamiento.

Este modelo de dos discos paralelos funciona de manera esquemática de la manera siguiente: el peso P se aplica en el centro del disco S1, éste se desplaza hacia abajo expulsando el agua que se encuentra entre los dos discos. Es posible prever los siguientes casos, los cuales fueron descritos con anterioridad:

**Caso 1**: si  $h_{\text{max}}$  es suficientemente pequeño, el agua reacciona oponiéndose al movimiento del disco  $S_1$ . El flujo del agua es en este caso del tipo viscoso.





- **Caso 2**: si  $h_{\text{max}}$  se encuentra entre los dos valores precedentes el flujo del agua será un flujo transitorio cíclico.
- **Caso 3**: si  $h_{\text{max}}$  es suficientemente grande es posible despreciar la reacción del agua ante el movimiento del disco *S*1. En consecuencia el flujo del agua puede considerarse como un flujo perfecto.

La fuerza motriz F que provoca el desplazamiento hacia abajo del disco  $S_I$  se puede escribir de la siguiente forma:

$$F = m_s a_v \tag{7.64}$$

En donde:

 $m_{\rm s}$  es la masa de la muestra a ensayar

 $a_v$  es la aceleración vertical de la muestra

Cuando  $h_{\text{max}}$  es suficientemente pequeño, el flujo de agua es viscoso. Las ecuaciones de Navier – Stokes del movimiento del agua para este caso se pueden escribir en coordenadas cilíndricas. La simetría de revolución del sistema permite considerar el flujo del agua como un flujo radial, es decir que  $V_0=V_z=0$  y  $V_r=V(r,z)$ . En efecto las velocidades verticales son muy bajas comparadas con las velocidades radiales (a excepción del centro del disco). Por lo tanto las ecuaciones de Navier – Stokes se pueden escribir de la siguiente manera:

$$\frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \upsilon \left[ \frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_r}{r^2} \right]$$
(7.65)  
$$\frac{\partial r V_r}{\partial r} = 0$$
(7.66)

Esta ecuación se puede simplificar teniendo en cuenta que el espesor h es pequeño comparado con el radio r (salvo en las cercanías del centro), es posible entonces considerar que z es infinitamente pequeño comparado con r. Lo anterior implica que entre los términos al interior





del corchete de la ecuación 2.68 aquel que predomina comparado con los otros es  $\partial^2 V_r / \partial z^2$ . Igualmente el término  $V_r \partial V_r / \partial r$  predomina comparado con el término  $\partial V_r / \partial t$ . Por lo tanto la ecuación de Navier – Stokes se puede simplificar de la manera siguiente:

$$V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \upsilon \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2}$$
(7.67)

$$\frac{\partial r V_r}{\partial r} = 0 \tag{7.68}$$

La ecuación 7.68 implica:

$$V_r = \frac{C}{r} \tag{7.69}$$

En donde *C* es una constante que depende únicamente del tiempo. Remplazando el valor de  $V_r$  se obtiene:

$$\rho \frac{V_r^2}{r} + \upsilon \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} = \frac{\partial p}{\partial r}$$
(7.70)

Si se supone que la presión p es independiente de z, la ecuación 7.67 se puede considerar como una ecuación diferencial dependiente únicamente de z para un valor dado del radio r. Es así como la integración está dada por:

$$\frac{\upsilon}{2} \left(\frac{\partial V_r}{\partial r}\right)^2 = V_r \left(\frac{\partial p}{\partial r} - \frac{\rho V_r^2}{3r}\right) + C'$$
(7.71)

Lo cual permite encontrar la variación del desplazamiento del disco S1:

$$dz = \sqrt{\frac{p}{2}} \frac{dV_r}{\sqrt{\frac{V_r}{3r} \left(3r\frac{\partial p}{\partial r} - \rho V_r^2 + C'\right)}}$$
(7.72)

La solución analítica de la ecuación 7.72 solamente se puede encontrar a través de las siguientes simplificaciones: 1) el término dinámico se puede despreciar al ser comparado con el término potencial; esta aproximación se justifica en la medida en que el número de Reynolds es





inferior a la unidad, lo anterior corresponde a la solución del flujo viscoso entre dos placas planas infinitas; 2) se puede además utilizar la velocidad promedio de expulsión del agua para resolver el problema y 3) se puede suponer que la variación de la velocidad en sentido vertical es parabólica, es decir:

$$V = \frac{z(z-h)}{2\upsilon} \frac{dp}{dr}$$
(7.73)



Figura 7.7. Distribución parabólica de velocidades

La velocidad promedio de expulsión de agua está dada por:

$$V_m(r) = -\frac{h^2}{12\nu} \frac{dp}{dr}$$
(7.74)

Esta velocidad también se puede evaluar tomando un círculo de radio r. El volumen de agua expulsada por un desplazamiento dh durante un tiempo infinitamente pequeño dt es:

$$dv = \pi r^2 (-dh) \tag{7.75}$$

$$dv = qdt = V_m(r)2\pi rhdt \tag{7.76}$$

En donde q es el caudal de expulsión de agua en el tiempo t, por lo tanto:

$$V_m(r) = -\frac{r}{2h}\frac{dh}{dt}$$
(7.77)

De las ecuaciones 7.74 y 7.77:

$$\frac{dp}{dr} = \frac{6\nu r}{h^3} \frac{dh}{dt}$$
(7.78)

La expresión 7.77 muestra que la aproximación realizada más arriba deja de ser legítima cerca al centro.





Si se considera que en el borde del disco el agua se encuentra a la presión atmosférica, es decir p=0 para r=R se obtiene la expresión de la presión del agua a lo largo del disco:

$$p = \frac{3\nu(r^2 - R^2)}{h^3} \frac{dh}{dt}$$
(7.79)

La fuerza que actúa sobre la lámina del agua durante el proceso vibratorio corresponde a la masa de la muestra multiplicada por la aceleración de la misma:

$$F = m_s a_v \tag{7.80}$$

Esta fuerza corresponde a la integral de la presión en el área del disco:

$$F = \int_{0}^{R} 2\pi r p dr = \frac{6\pi v}{h^3} \frac{dh}{dt} \int_{0}^{R} r(r^2 - R^2) dr$$
(7.81)

$$F = m_s a_v = -\frac{3}{2} \frac{\pi v}{h^3} R^4 \frac{dh}{dt}$$
(7.82)

Por lo tanto la velocidad de desplazamiento del disco  $S_1$  está dada por:

$$V_{z} = \frac{dh}{dt} = \frac{2m_{s}a_{v}h^{2}}{3\pi vR^{2}}$$
(7.83)

Remplazando el valor de dh/dt en la expresión 7.77, se obtiene la velocidad promedio de expulsión del agua:

$$V_m(r) = -\frac{r}{2h}\frac{dh}{dt}$$
(7.84)

Por lo tanto

$$V_m(r) = \frac{m_s a_v h^2}{3\pi v} \frac{r}{R^4}$$
(7.85)

De la misma manera se puede obtener la presión del agua:

$$p = \frac{3\nu(r^2 - R^2)}{h^3} \frac{dh}{dt}$$
(7.86)

$$p = \frac{2m_s a_v (R^2 - r^2)}{\pi L^4}$$
(7.87)




## Ensayos previos utilizando el método de mesa vibratoria

Como se mencionó en la sección 6.2, ensayos previos a este proyecto se realizaron utilizando el método de mesa vibratoria. Estos ensayos se realizaron sobre relleno fluido empleando una frecuencia de vibración de 100 HZ, con un desplazamiento de 0.3 mm. En la Figura 7.8 se muestra el montaje del ensayo; en la Figura 7.9 se presenta la instrumentación para la medida de la aceleración de la muestra de relleno fluido.



Figura 7.8. Montaje del ensayo de erosión en mesa vibratoria









Figura 7.9. a) Señal sinusoidal b) Acelerómetro c) Toma de datos de aceleración en el ensayo de erodabilidad





Conociendo la aceleración de la base y de la muestra es posible calcular el desplazamiento de cada elemento y de esta forma el espesor de la cavidad que se genera entre la probeta y la base. El desplazamiento tanto de la muestra como de la base está dado por:

$$Z = \frac{a}{\left(2\pi f\right)^2} \tag{7.88}$$

En donde a es la aceleración de la muestra de la base y f es la frecuencia. La Figura 7.9 muestra la señal sinusoidal medida por el acelerómetro colocado en la parte superior de la probeta. Se puede observar que la muestra alcanza en promedio una aceleración de 5.9 g. Con base en estas medidas se obtiene un espesor de la cavidad de 0.15 mm.

La velocidad de expulsión de agua se puede calcular utilizando la teoría de discos paralelos. Esta velocidad está dada por:

$$V = \frac{Wa_m h^2}{2\pi\mu R^3} \tag{7.89}$$

En donde *W* es el peso de la muestra,  $a_m$  es la aceleración de la muestra, *h* es el espesor de la cavidad,  $\mu$  es la viscosidad dinámica del agua y *R* es el radio de la muestra. Con los valores de aceleración medidos se obtiene una velocidad del agua de 3.75 m/s.

### Procedimiento para el ensayo de erosión en mesa vibratoria

El ensayo de erosión en mesa vibratoria simula de la manera más aproximada el fenómeno de erosión y bombeo en las bases de pavimento rígido. Es importante notar además, que variando el nivel de aceleración es posible variar la velocidad de expulsión de agua.

El procedimiento para realizar el ensayo de erosión en mesa vibratoria es el siguiente:

### i. Preparación de muestras y curado

Las muestras deben ser compactadas al 97% de la densidad máxima prevista en los diseños de las mezclas, esto con el fin de realizar los ensayos sobre muestras representativas de las condiciones de compactación del campo. La compactación de las probetas se realiza





empleando el *compactador giratorio*. Las muestras de materiales estabilizados con cemento son sometidas a un período de curado en cuarto húmedo durante 28 días.

ii. Saturación de las muestras

Una vez curadas las muestras éstas son humedecidas mediante ascensión capilar durante las 24 horas previas al ensayo.

iii. Instalación de la muestra en el molde de ensayo

Previa a la instalación de las muestras en el molde de ensayo se adiciona agua en el mismo y se saturan los sensores de presión. Posteriormente a la saturación se adiciona el agua necesaria para completar 350 ml de agua en el molde y se procede a instalar la muestra.

*iv.* Aplicar el nivel de aceleración 1 (200.000 ciclos) correspondiente a la velocidad de expulsión V<sub>1</sub>.

La degradación de las muestras debido a la erosión aumenta a medida que la velocidad de expulsión del agua se incrementa. Por esta razón la medida de la erosión comienza con la menor velocidad y se incrementa progresivamente. Teniendo en cuenta las velocidades que se reportan en la bibliografía se proponen las siguientes velocidades de expulsión de agua: 3 m/s, 5 m/s y 7 m/s aproximadamente. La velocidad  $V_1$  es entonces 3 m/s aproximadamente (la manera de aplicar esta velocidad se explica más adelante).

v. Medir la erosión mediante el peso de material disgregado de la muestra.

Una vez terminados los primeros 200.000 ciclos de erosión se detiene el ensayo, se retira la muestra y se mide su masa y altura. Adicionalmente, se retira todo el material disgregado por erosión, se completan nuevamente los 350 ml de agua limpia y se continúa con el ensayo.

*vi.* Repetir los pasos 4 y 5 con velocidades de expulsión de agua V<sub>2</sub> y V<sub>3</sub>.
Se repite el procedimiento descrito empleando las otras dos velocidades.





La aplicación de las velocidades de expulsión del agua requeridas necesita un proceso previo de calibración, ya que las velocidades de expulsión de agua dependen de la masa y de la rigidez de la muestra tal como se explica a continuación:

En primer lugar se aplica una señal vibratoria sinusoidal al molde de ensayo. Esta señal está controlada por su amplitud y su frecuencia de vibración,  $Z_m$  y  $f_m$  respectivamente.

Durante el proceso vibratorio se mide la aceleración de la probeta y se calcula su desplazamiento  $Z_p$  mediante la ecuación 7.88.

La cavidad h que aparece entre el molde de ensayo y la probeta durante el proceso vibratorio es entonces:

$$h = Z_m - Z_p \tag{7.90}$$

La velocidad de expulsión de agua se puede calcular utilizando la teoría de discos paralelos (Phu 1979) descrita previamente, mediante la ecuación 7.89.

El proceso de calibración consiste entonces en aplicar diferentes amplitudes y frecuencias al molde de ensayo de tal forma que se obtenga la aceleración y el espesor de la cavidad requeridos para obtener la velocidad deseada.

El reporte de este ensayo incluye lo siguiente:

- La pérdida de material por erosión expresada en masa de cada muestra en función de la velocidad y del número de ciclos aplicados.
- Con base en esos resultados y utilizando parte de los desarrollos teóricos ya presentados se procede a realizar una evaluación de la susceptibilidad a la erosión de cada uno de los materiales y de la conveniencia de su empleo como material de base en pavimento rígidos.
- El registro fotográfico del estado final de la muestra después de realizar el ensayo de mesa vibratoria.





## 7.1.5. Ensayo de Erosión bajo Chorro de Agua a Presión

El ensayo de erosión en mesa vibratoria solo se puede realizar sobre muestras cementadas. Un ensayo complementario a esta metodología, que también se puede emplear para materiales no ligados, es el ensayo de erosión bajo chorro de agua. En este ensayo se aplica un chorro (jet) de agua a velocidad controlada sobre la muestra y se mide la pérdida de material, tal como se describió en la sección 6.2. Con el fin de comparar cualitativamente los resultados de este ensayo con el de mesa vibratoria se realizaron sobre la misma muestra (cara opuesta) y se aplicaron diferentes niveles de presión. La Figura 7.10 presenta un esquema simplificado del montaje.



Figura 7.10. Ensayo de erosión bajo chorro de agua.

El objetivo de este ensayo es determinar la velocidad crítica de expulsión del agua, la cual, debido a su energía, es capaz de comenzar la erosión del material. El proceso del ensayo consiste en abrir la válvula del agua manteniendo una presión constante en el recipiente. El ensayo busca entonces determinar la presión p para la cual aparece sobre la probeta una traza de erosión. Conociendo el valor de la presión p, y el caudal de salida del agua, se puede determinar la velocidad crítica de erosión.





El procedimiento del ensayo de erosión bajo chorro de agua de presión es el siguiente:

i. Preparación de muestras y curado

El ensayo se realiza sobre las mismas muestras sometidas al ensayo de erosión en mesa vibratoria.

# ii. Saturación de las muestras

La cara opuesta de la muestra a la cual se le va a realizar el ensayo de erosión en mesa vibratoria se somete a saturación capilar durante las 24 horas previas al ensayo.

iii. Instalación de la muestra en el molde de ensayo

Las muestras se colocan en una mesa giratoria cuya velocidad es de 4 revoluciones/minuto.

iv. Aplicación de agua sobre la superficie del espécimen a diferentes velocidades

Se aplica progresivamente agua a velocidad creciente aumentando la presión de inyección (5, 10, 15 y 20 bares). Se debe registrar la presión crítica para la cual el jet de agua comienza a dejar una traza sobre la muestra y con esta información se puede conocer la velocidad crítica de erosión.

El reporte de este ensayo incluye:

- La velocidad crítica de erosión para cada uno de los materiales.
- Los valores de velocidad crítica de erosión se compararán con las velocidades que puedan presentarse en un pavimento de concreto hidráulico ante el paso de vehículos pesados. Con base en los resultados, se evalúa la aplicabilidad del material como material de base.
- El registro fotográfico de las muestras al finalizar el ensayo.





# 7.1.6. Cronograma de Trabajo

Como producto de la primera etapa del proyecto, se elaboró un plan de trabajo y un cronograma detallado de actividades. La Tabla 7.1 corresponde al plan de actividades original, acordado por las partes para la ejecución del contrato (formulario TEC – 8 en el documento de la propuesta). Adicionalmente, la Tabla 7.2 muestra el cronograma detallado que fue empleado como guía según las actividades correspondientes a cada una de las etapas. No obstante, el plan de trabajo original fue modificado debido las siguientes dos razones: 1) el material granular estabilizado con cemento requería un periodo de curado durante el cual no se podía adelantar ninguna actividad y 2) para el montaje del ensayo de erodabilidad en mesa vibratoria se requerían unos sensores de presión cuyo proceso de importación y nacionalización fue retrasado por motivos externos al consultor.

N	Actividad	IVIESES Marra 2010 Abril 2010 Maya 2010 Junia 2010 Julia 2010 Arasta (							0.20	10								
1	Diseño del Experimento y cronograma de Trabajo											201				JUSI		
2	Consecución de materiales																	
3a	Caracterización de materiales																	
3b	Caracterización de materiales																	
4a	Elaboración de los diseños y evaluación de módulos (material granular y mezcla asfáltica)																	
4b	Elaboración de los diseños y evaluación de módulos (materiales estabilizados con cemento)																	
5	Determinación de las pérdidas por erosión, ensayo en mesa vibratoria y con flujo de agua a velocidad controlada (informe parcial)																	
6	Análisis de datos y determinación de los valores representativos de pérdida por erosión para cada tipo de material (informe parcial)																	
7	Correlación de los resultados de pérdida por erosión con las variables de potencial de erosión y consumo por erosión																	
8	Generación del documento técnico final y ejecución de una capacitación técnica																	
	INFORME FINAL																	

Tabla 7.1. Plan de trabajo original





Tabla 7.2. Cronograma detallado de actividades

	<b>Cronograma de Trabajo</b> Contrato 089 del 2009 Estudio de la resistencia a la erosión de materiales empleados como bases en pavimentos	de concreto hidráu	ılico
Número	Actividad	Inicio	Fin
0*	Revisión bibliográfica	1 de Marzo	7 de Abril
1	Diseño del Experimento y cronograma de Trabajo		
1a	Diseño de los experimentos de erosión	1 de Menne	7 de Merre
1b	Diseño y construcción del equipo de vibro-compactación	I de Marzo	/ de Mayo
1c	Calibración del equipo de vibro-compactación		
2			
2a	Material: Base Granular de Gravas de Carupa S.A.		
2b	Mateial: Base Granular de Patria S.A.	15 1 Marca	11. J. M.
2c	Asfalto	15 de Marzo	11 de Mayo
2d	Emulsión asfáltica		
2e	Cemento		
3	Caracterización de materiales		
3a	Caracterización de materiales granulares para bases no tratadas y bases	1 de Abril	20 de Mayo
3b	Caracterización de materiales granulares para mezcla asfáltica		
4	Elaboración de los diseños y evaluación de módulos		
4a	Material granular estabilizado con cemento	7 de Mario	21 de Octubr
4b	Material granular estabilizado con emulsión asfáltica y cemento	/ de Mayo	21 de Octubr
4c	Mezcla asfáltica		
5	Determinación de pérdidas por erosión		
5a	Ensayos en mesa vibratoria para materiales estabilizados	20 de Octubre	29 de Octubr
5b	Ensayo de chorros de agua a presión para todos los materiales		
6	Análisis de datos y determinación de los valores representativos de pérdida por erosión para cada tipo de material		
6a	Material Granular	2 1 Marianakan	7 1 Madamb
6b	Material granular estabilizado con cemento	3 de Noviembre	7 de Novienio
6c	Material granular estabilizado con cemento y emulsión asfáltica		
6d	Mezcla asfáltica		
7	Correlación de los resultados de pérdida por erosión con las variables de potencial de erosión y consumo por erosión de las metodologías AASHTO y PCA	9 de Noviembre	12 de Noviem
8	Generación del documento técnico final y ejecución de una capacitación técnica	1 de Agosto	12 de Noviem

#### Notas:

\* Esta actividad no estaba programada en el cronograma inicial pero se realizó por ser considerada fundamental para la buena ejecución del proyecto





### 7.2. Etapa 2: Consecución de Materiales

Tal como se definió en la propuesta técnica, se evaluaron cuatro tipos de materiales empleados como base en pavimentos de concreto hidráulico, los cuales se enumeran a continuación:

- 1. Base Granular BG\_A Granulometría Gr1
- 2. Material Granular estabilizado con Cemento GEC\_B Granulometría Gr2 (con tres niveles de resistencia diferentes)
- Material Granular estabilizado con Emulsión asfáltica y Cemento GEEA\_A Granulometría Gr1 (con tres niveles de resistencia diferentes)
- 4. Mezcla asfáltica en caliente tipo MD 20 (dos diseños con porcentajes de finos diferentes).

A partir de un análisis de las granulometrías definidas en las Especificaciones IDU ET (2005) para los diferentes materiales para base, se tomó la determinación de emplear dos fuentes de materiales granulares. La fuente del material granular empleado para los primeros tres tipos de base corresponde a la cantera *Gravas Carmen de Carupa S.A.* (http://gravasdecarupa.com/, Tel. 6685139 de la ciudad de Bogotá). El material granular empleado para la preparación de la mezcla asfáltica densa en caliente corresponde al comercializado por la empresa *Patria S.A.* (Tel. 6219151 de la ciudad de Bogotá). La selección de las fuentes de material se realizó con base en el Directorio de Proveedores activos a enero 30 de 2010 del IDU. En el anexo A.1 se presentan las cartas de aprobación de los proveedores Carmen de Carupa y Patria S.A.

La fuente del material de Carupa, se encuentra ubicada en el municipio de Carmen de Carupa a 15,5 Kms del municipio de Ubaté, al norte del departamento de Cundinamarca, tal como se puede ver en la Figura 7.11 obtenida por medio de Google Earth. Por otro lado, la fuente de extracción de agregados para mezcla asfáltica de Patria S.A. se encuentra ubicada en la planta Vista Hermosa en el municipio de Mosquera, Cundinamarca, tal como se aprecia en la Figura 7.12.







Figura 7.11. Ubicación de la fuente del material Carupa



Figura 7.12. Ubicación de la fuente del material Patria





De acuerdo con las especificaciones relacionadas con cada uno de los materiales, las Figuras 7.13 a 7.16 presentan las bandas de gradación correspondientes a cada uno de dichos materiales, así como la granulometría empleada para cada uno de estos materiales.

# 1. Base Granular BG\_A – Granulometría Gr1



Figura 7.13. Granulometría inicial y bandas de gradación del material BG\_A-Gr1





Tamaño d	el Tamiz	Porcentaje que pasa							
mm	U.S. Standard	Granulometría Propuesta	Rango Especificacione IDU						
50.0	2"	-	-						
37.5	1 1⁄2 "	100%	100%						
25.0	1"	85%	75% -		95%				
19.0	3/4 "	76%	50%	-	90%				
9.5	3/8 "	58%	45%	-	70%				
4.75	No. 4	40%	30%	-	50%				
2.0	No. 10	23%	15%	-	30%				
0.425	No. 40	13%	6.0%	-	20%				
0.075	No. 200	6%	2.0%	-	10%				

Tabla 7.3. Granulometría del material BG\_A- Gr1

2. Material Granular estabilizado con Cemento GEC\_B – Granulometría Gr2



Figura 7.14. Granulometría inicial y bandas de gradación del material GEC\_B-Gr2





Tamaño d	el Tamiz	Porcentaje que pasa							
mm	U.S. Standard	Granulometría Propuesta	Rango E	cificaciones U					
50.0	2"	-							
37.5	1 1⁄2 "	100%	100%						
25.0	1"	85%	70% -		100%				
19.0	3/4 "	75%	60%	-	90%				
9.5	3/8 "	60%	45%	-	75%				
4.75	No. 4	45%	30%	-	60%				
2.0	No. 10	35%	20%	-	50%				
0.425	No. 40	25%	10.0%	-	30%				
0.075	No. 200	9%	2.0%	-	15%				

 Tabla 7.4. Granulometría del material GEC\_B- Gr2

3. Material Granular estabilizado con Emulsión asfáltica y Cemento GEEA\_A - Gr1



Figura 7.15. Granulometría inicial y bandas de gradación del material GEEA\_A-Gr1





Tamaño (	del Tamiz	Porcentaje que pasa							
mm	U.S. Standard	Granulometría Propuesta	Rango E	cificaciones U					
37.5	1 1/2 "	100%		)%					
25.0	1"	85%	70% -		100%				
12.5	1/2"	66%	50%		80%				
9.5	3/8 "	58%	45%	-	75%				
4.75	No. 4	40%	30%	-	60%				
2.0	No. 10	23%	10%	-	27%				
0.425	No. 40	13%	5.0%	-	18%				
0.075	No. 200	6%	3.0%	-	15%				

Tabla 7.5. Granulometría del material GEEA\_A- Gr1

## 4. Mezcla asfáltica densa en caliente MD 20



Figura 7.16. Granulometría inicial y bandas de gradación del material MD 20





Tamaño	del Tamiz	Porcentaje que pasa									
mm	U.S. Standard	Granulometría Propuesta Diseño 1	Granulometría Propuesta Diseño 2	Rango E	cificaciones U						
37.5	1 ½ "	-			-						
25.0	1"	100%	100%	100%		)%					
19.0	3/4"	88%	88%	80%	-	95%					
12.5	1/2"	74%	74%	66%	-	82%					
9.5	3/8 "	67%	67%	59%	-	75%					
4.75	No. 4	53%	53%	45%	-	61%					
2.0	No. 10	38%	38%	30%	-	46%					
0.425	No. 40	20%	20%	14.0%	-	25%					
0.180	No. 80	12%	12%	8.0%	-	16%					
0.075	No. 200	7%	4%	4.0%	-	9%					

 Tabla 7.6. Granulometría del material MD 20

A continuación se presenta la comparación de las curvas granulométricas de las tres bases granulares:



Figura 7.17. Comparación de la curva granulométrica propuesta para las tres bases granulares





Como se puede ver en la Figura 7.17, la sección de la curva granulométrica que va desde el diámetro de 37.5 mm al de 9.5 mm fue seleccionada de modo que fuera muy parecida para los tres tipos de material, y para la base granular BG\_A y la base granular estabilizada con cemento y emulsión asfáltica se escogió prácticamente la misma granulometría. Esto se realizó con el objetivo de utilizar una misma fuente de material y para evitar repetir algunos ensayos de caracterización. Es por este motivo que para estos tres tipos de material se escogió la base granular que cumple las especificaciones BG\_A de *Gravas de Carupa S.A.*.

La emulsión asfáltica empleada en la base estabilizada tipo GEEA\_A – Gr1 fue adquirida a través de Incoasfaltos S.A. (tel: 8637888 de la ciudad de Chía). La emulsión era de rompimiento lento y modificado CRL-1h. El cemento asfáltico empleado en la base de mezcla asfáltica tipo MD 20 fue adquirida a través de SHELL-Colombia (tel: 6404000 de la ciudad de Bogotá). Las especificaciones del asfalto se encuentran en el anexo A.2 de este informe.

Una vez finalizada la consecución de materiales, el procedimiento experimental consistió de tres etapas principales. La primera de ellas es la caracterización de los materiales. La segunda etapa incluye el diseño de las mezclas de material granular estabilizado y la evaluación de los módulos de todos los materiales (etapas 3 y 4 del contrato). La tercera etapa consiste en determinar las pérdidas por erosión mediante los dos tipos de ensayo (etapas 5 y 6 del contrato).

#### 7.3. Etapa 3: Caracterización de Materiales

La primera sección de este capítulo describe los ensayos de caracterización ejecutados durante la tercera etapa del proyecto. La segunda sección presenta los resultados obtenidos a partir de los ensayos, así como la verificación del cumplimiento de las especificaciones IDU (2005).

El listado de los ensayos correspondientes a la etapa de caracterización básica de los materiales granulares de las dos fuentes descritas en la sección 7.2 (i.e., Carupa y Patria), se presenta en la Tabla 7.7:





Tabla 7.7. Listado de ensayos de caracterización para los diferentes materiales

CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES											
					MD	20					
ENSAYO	NORMA	BG_A - Gr1	GEC_B - Gr2	GEE_A - Gr1	Agregado Grueso	Agregado Fino					
Peso específico y absorción	INV E-223				√	√					
DUREZA					•	•					
Desgaste en la máquina de Los Ángeles (Gradación A)		~	~	~	~						
En seco, 500 revoluciones		$\checkmark$	$\checkmark$	√	√						
En seco, 100 revoluciones	INV E-218	✓	✓	✓	✓						
Después de 48 horas de inmersión, 500 revoluciones		✓	~	~	~						
Micro Deval	ASTM D-6928	✓	✓	✓	✓						
10% de finos	BS 812 PART 111	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	✓						
DURABILIDAD											
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de Mg.	INV E-220	✓	√	✓	✓	✓					
LIMPIEZA											
Límite Líquido	INV E-125	$\checkmark$	$\checkmark$	✓	✓	✓					
Índice de Plasticidad	INV E-126	✓	✓	✓	✓	✓					
Equivalente de Arena	INV E-133	√	✓	✓	✓	✓					
Valor de Azul de Metileno	EN-933-9	√	~	✓	✓	✓					
Terrones de arcilla y partículas deleznables	INV E – 211	$\checkmark$	$\checkmark$	✓							
GEOMETRÍA	-		-	-	-	-					
Granulometría	INV E-123	√	~	✓	✓						
Partículas Fracturadas Mecánicamente		√	$\checkmark$	$\checkmark$	✓						
1 cara	INVE-227	√	~	✓	✓						
2 caras		√	✓	~	√						
Índice de Aplanamiento	INV E-230	√			✓						
Índice de Alargamiento	INV E-230	√			√						
Angularidad del Agregado Fino	AASHTO T-304	$\checkmark$				$\checkmark$					
CONTENIDO DE ARENA NATURAL					-						
Proporción máxima de arena natural, en peso	-					$\checkmark$					
LLENANTE MINERAL DE APORTE					-						
Proporción de llenante mineral de aporte, % mínimo en peso del llenante mineral	AASHTO T-304					~					
CAPACIDAD DE SOPORTE											
CBR, % mínimo.	INV E-148	~	√	√							

De acuerdo con la Tabla 7.7 vale la pena reiterar que el material granular de Patria permite conocer la caracterización del material de mezcla asfáltica solamente, mientras que el material Carupa se empleó para caracterizar los materiales de: 1) base granular BG\_A. 2) material granular estabilizado con cemento GEC\_B y 3) material granular estabilizado con emulsión asfáltica y cemento GEEA\_A.





# 7.3.1. Actividades de caracterización de los materiales

A continuación se presenta una descripción de las actividades desarrolladas en el laboratorio para la ejecución de los ensayos de caracterización. Lo anterior va acompañado por un registro fotográfico de los materiales empleados y los equipos utilizados para realizar los ensayos que se listaron en la tabla 7.7.

*Material Granular:* las bases granulares se almacenaron en cajones metálicos especialmente diseñados, y que se encontraban ubicados dentro del Laboratorio de Estructuras y Geotecnia de la Universidad de los Andes. En las Figuras 7.18 y 7.19 se pueden apreciar los materiales de Carupa y Patria, respectivamente.



Figura 7.18. Material Granular de Carupa







Figura 7.19. Material Granular de Patria

*Desgaste en la Máquina de los Ángeles:* este ensayo se realizó empleando el procedimiento descrito en la norma INV E – 218, para las siguientes tres condiciones 1) en seco a 500 revoluciones, 2) en seco a 100 revoluciones y 3) después de 48 horas de inmersión a 500 revoluciones. La Figura 7.20 presenta el equipo empleado para realizar estos ensayos.



Figura 7.20. Máquina de los Ángeles





*Micro Deval:* este ensayo se realizó empleando el procedimiento estandarizado por la norma ASTM D – 6928. La Figura 7.21 presenta el equipo empleado para ejecutar este ensayo.



Figura 7.21. Equipo para realizar el ensayo de Micro Deval

10% de Finos: este ensayo se realizó empleando el procedimiento descrito por la norma británica BS 812 PART 111. Se requirió realizar este ensayo en estado seco y en estado húmedo.La Figura 7.22 muestra los moldes requeridos para ejecutar este ensayo.



Figura 7.22. Moldes empleados para realizar el ensayo de 10% de finos





*Límite Líquido:* este ensayo se ejecutó sobre la porción fina del material, por medio del uso de la cazuela de Casagrande (figura 7.23) siguiendo el procedimiento descrito en la norma INV E – 125.



Figura 7.23. Cazuela de Casagrande empleada para encontrar el límite líquido

*Equivalente de Arena:* este ensayo se efectuó a través del procedimiento estandarizado por la norma INV E - 133. En la Figura 7.24 se puede apreciar el equipo empleado para ejecutar este ensayo.



Figura 7.24. Conjunto de instrumentos para encontrar el equivalente de arena





*Valor azul de Metileno:* el procedimiento de este ensayo se describe por medio de la norma EN – 933 – 9, cuyo equipo se muestra en la Figura 7.25.



Figura 7.25. Equipo utilizado para encontrar el valor azul de metileno

*Índice de Aplanamiento:* este valor se encuentra por medio del equipo mostrado en la figura 7.26, cuyo procedimiento se describe en la norma INV E - 230.



Figura 7.26. Equipo utilizado para encontrar el índice de aplanamiento





*Índice de Alargamiento:* al igual que para el índice de aplanamiento, el procedimiento de este ensayo se encuentra estandarizado por la norma INV E - 230. El equipo utilizado para este ensayo se presenta en la figura 7.27.



Figura 7.27. Equipo utilizado para encontrar el índice de alargamiento

*Angularidad del Agregado Fino:* este ensayo se realizó empleando el procedimiento descrito por la norma AASHTO T – 304. La Figura 7.28 presenta el equipo empleado para la realización de este ensayo.



Figura 7.28. Equipo utilizado para encontrar la angularidad del agregado fino





*CBR:* el procedimiento de este ensayo se encuentra descrito en la norma INV E - 148. El equipo utilizado para su ejecución se presenta en la figura 7.29.



Figura 7.29. Molde empleado para ejecutar el ensayo de CBR

*Granulometría:* el procedimiento para este ensayo se encuentra descrito en la norma INV E – 133. Debido al volumen de material que se requería tamizar para este proyecto se empleó un equipo mecánico de tamizado (figura 7.30).



Figura 7.30. Molde empleado para ejecutar el ensayo de CBR





#### 7.3.2. Tablas Resumen de Resultados: Ensayos de Caracterización

A continuación se presentan los resultados de los ensayos de caracterización realizados sobre las bases granulares provenientes de Gravas de Carupa S.A. y Patria S.A. durante el mes de abril de 2010, actividad posterior a la consecución de materiales.

Las Tablas 7.8. a 7.10 presentan los resultados de los ensayos de caracterización realizados sobre el material de Carupa, adicionalmente se incluye una columna que contiene los valores requeridos por las Especificaciones IDU (2005) para los materiales de base granular, base estabilizada con cemento y base estabilizada con emulsión asfáltica y cemento.

En la Tabla 7.11. se pueden apreciar los resultados de los ensayos de caracterización realizados sobre el material de Patria, así como una columna que contiene los valores requeridos por las Especificaciones IDU (2005) para una base para mezcla asfáltica MD 20 para cada uno de los ensayos. En todas las tablas también se incluye una columna que informa si el material cumple con las especificaciones con base en los rangos establecidos por la norma para cada uno de los ensayos de caracterización. El anexo A.3 incluye los resultados detallados de cada experimento.





Tabla 7.8. Resultados de ensayos de caracterización para materiales granulares de Carupa para materiales de basegranular BG\_A Gr 1y cumplimiento de las especificaciones IDU

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN PARA LA BASE GRANULAR BG_A Gr 1 DE CARUPA										
	Ensayo	Norma de	Especificaciones ET 2005 IDU	Car	upa	Cumple?				
Dureza		ensuye	BG_A_Gr1	Ensayo 1 Ensa	yo 2 Ensayo 3					
Desgaste en la Máquina de Los Ángeles (Gradación A)	<ul> <li>En seco, 500 revoluciones, % máximo</li> <li>En seco, 100 revoluciones, % máximo</li> <li>Después de 48 horas de inmersión, 500 revoluciones. % máximo (1)</li> </ul>	INV E-218	30 6 (RO) 45	22 4. 19	.7 9 .8	Si Si Si				
Micro Deval, % máximo 10% de finos	Agregado Grueso (FT) - Valor en seco, kN mínimo - Relación húmedo/seco, % mínimo	ASTM D-6928 BS 812 PART 111	20 100 75	16 179 96	.7 .24 %	Si Si Si				
Durabilidad										
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, % máximo	- Sulfato de Magnesio	INV E-220	18	0.3	39	Si				
Limpieza										
Límite Líquido, % máximo Índice de Plasticidad, % máximo Equivalente de Arena, % mínimo Valor de Azul de Metileno, máxim Terrones de arcilla y partículas de	o eleznables, % máximo	INV E-125 INV E-126 INV E-133 EN-933-9 INV E-211	25 No plástico 25 8 2	21 4 26 2 4.4 0 (Ag. grueso) -	.2 7 27 49 0.33 (Ag. Fino)	Si Nota 1 Si Si Si				
Geometría de las Partículas										
Partículas Fracturadas Mecánicamente, % mínimo	- 1 cara - 2 caras	INVE-227	85 60	97 97	.5 .1	Si Si				
Índice de Aplanamiento, % máxim Índice de Alargamiento, % máxim Angularidad del Agregado Fino, %	no (2) o (3) o mínimo (RO)	INV E-230 INV E-230 AASHTO T-304	35 35 35	18 12 54.	.8 .8 11	Si Si Si				
Capacidad de Soporte										
CBR, % mínimo Referido al 100 % de la densidad s (AASHTO T 180), método D, desp	seca máxima, según el ensayo INV E-142 ués de 4 días de inmersión.	INV E-148	100	18	36	Si				

Nota 1: con el fin de satisfacer la especificación requerida, la fracción fina del material de Carupa fue reemplazada por la fracción fina de material de Patria, para el cual el índice de plasticidad es acorde con las especificaciones.





Tabla 7.9. Resultados de ensayos de caracterización para materiales granulares de Carupa para bases estabilizadascon cemento GEC\_B Gr 2 de Carupa y cumplimiento de las especificaciones IDU

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN PARA LA BASE GRANULAR ESTABILIZADA CON CEMENTO GEC_B Gr 2 DE CARUPA										
	Ensayo	Norma de ensayo	Especificaciones ET 2005 IDU	Carupa	Cumple?					
Dureza			GEC_B GIZ							
Desgaste Los Ángeles (Gradación A)	<ul> <li>En seco, 500 revoluciones, % máximo</li> <li>En seco, 100 revoluciones, % máximo</li> <li>Después de 48 horas de inmersión, 500 revoluciones % máximo (1)</li> </ul>	INV E-218	35 7 (RO) 55 (RO)	22.7 4.9 19.8	Si Si Si					
Micro Deval, % máximo 10% de finos	Agregado Grueso - Valor en seco, kN mínimo - Relación húmedo/seco, % mínimo	ASTM D-6928 BS 812 PART 111	30 50 70	16.7 179.24 96%	Si Si Si					
Durabilidad										
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, % máximo	- Sulfato de Magnesio	INV E-220	18	0.39	Si					
Limpieza										
Límite Líquido, % máximo Índice de Plasticidad, % máximo Equivalente de Arena, % mínimo Valor de Azul de Metileno, máximo Terrones de arcilla y partículas de	o eleznables, % máximo	INV E-125 INV E-126 INV E-133 EN-933-9 INV E-211	25 3 20 10 2	21.2 4 26 27 27 4.49 0 (Ag. grueso) - 0.33 (Ag. Fino)	Si Nota 1 Si Si Si					
Geometría de las Partículas										
Partículas Fracturadas Mecánicamente, % mínimo	- 1 cara - 2 caras	INVE-227	50 NA	97.5 97.1	Si NA					
CBR, % mínimo del material sin ce Referido al 95 % de la densidad se (AASHTO T 180), método D, desp	rmento vca máxima, según el ensayo INV E-142 ués de 4 días de inmersión.	INV E-148	60	186	Si					

Nota 1: con el fin de satisfacer la especificación requerida, la fracción fina del material de Carupa fué reemplazada por la fracción fina de material de Patria, para el cual el índice de plasticidad es acorde con las especificaciones.





 Tabla 7.10. Resultados de ensayos de caracterización para materiales granulares de Carupa para bases estabilizadas con emulsión asfáltica y cemento GEEA\_A Gr 1 de Carupa y cumplimiento de las especificaciones IDU

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN PARA LA BASE GRANULAR ESTABILIZADA CON EMULSIÓN ASFÁLTICA Y CEMENTO GEEA_A Gr 1 DE CARUPA										
	Ensavo	Norma de	Especificaciones ET 2005 IDU	Car	rupa	Cumple?				
	215490	ensayo	GEEA_A Gr1	Ensayo 1 Ens	ayo 2 Ensayo 3	0p. :				
Dureza										
	- En seco, 500 revoluciones, % máximo		35	2	2.7	Si				
Desgaste Los Ángeles	- En seco, 100 revoluciones , % máximo	INV E-218	7 (RO)	4	1.9	Si				
(Gradación A)	- Después de 48 horas de inmersión, 500 revoluciones, % máximo (1)		55 (RO)	1	9.8	Si				
Micro Deval, % máximo	Agregado Grueso	ASTM D-6928	30	1	6.7	Si				
10% de finos	- Valor en seco, kN mínimo	BS 812	60	17	9.24	Si				
1070 de 11105	- Relación húmedo/seco, % mínimo	PART 111	75	9	6%	Si				
Durabilidad										
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, % máximo	- Sulfato de Magnesio	INV E-220	18	0	.39	Si				
Limpieza										
Límite Líquido, % máximo		INV E-125	25	2	1.2	Si				
Índice de Plasticidad, % máximo		INV E-126	3		4	Nota 1				
Equivalente de Arena, % mínimo		INV E-133	8	26	27 27	Si				
Valor de Azul de Metileno, máximo	0	EN-933-9	10	4	.49	Si				
Terrones de arcilla y partículas de	eleznables, % máximo	INV E-211	2	0 (Ag. grueso)	- 0.33 (Ag. Fino)	Si				
Geometría de las Partículas										
Partículas Fracturadas	- 1 cara	INVE 227	70	9	7.5	Si				
Mecánicamente, % mínimo	- 2 caras	11001-227	50	9	7.1	Si				
Capacidad de Soporte										
CBR, % mínimo del material sin er Referido al 100 % de la densidad s (AASHTO T 180), método D, desp	nulsión asfáltica seca máxima, según el ensayo INV E-142 ués de 4 días de inmersión.	INV E-148	60	1	.86	Si				

Nota 1: con el fin de satisfacer la especificación requerida, la fracción fina del material de Carupa fue reemplazada por la fracción fina de material de Patria, para el cual el índice de plasticidad es acorde con las especificaciones.





 Tabla 7.11. Resultados de ensayos de caracterización para materiales granulares de Patria empleado para mezclas asfálticas en caliente y cumplimiento de las especificaciones IDU

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN PARA LA BASE GRANULAR DE PATRIA										
	Fusavo	Norma de	Especificaciones ET 2005 IDU MD 20			Patria		Cumple?		
	Insuyo	ensayo	Agregado Grueso	Agregado Fino	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	cumpic.		
Peso específico		INV E-222			2.49 (Ag. gr	rueso) - 2.63	(Ag. Fino)	-		
Absorción		INV E-223			2.68 (Ag. gr	rueso) - 3.08	(Ag. Fino)	-		
Dureza										
Desgaste Los Ángeles (Gradación A)	<ul> <li>En seco, 500 revoluciones, % máximo</li> <li>En seco, 100 revoluciones, % máximo</li> <li>Después de 48 horas de inmersión, 500</li> </ul>	INV E-218	30 6 (RO) 50	-		23.7 4.5 20.8		Si Si Si		
Micro Deval, % máximo 10% de finos	Agregado Grueso (FT) - Valor en seco, kN mínimo - Relación húmedo/seco, % mínimo	ASTM D-6928 BS 812 PART 111	25 75 (RO) 75	-		14.4 224.5 88%		Si Si Si		
Contenido de Arena Natural										
Proporción máxima de arena natu	ral , en peso	-	-	50		0		Si		
Durabilidad										
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, % máximo	- Sulfato de Magnesio	INV E-220	18	18		2.29		Si		
Limpieza										
Límite Líquido, % máximo Índice de Plasticidad, % máximo Equivalente de Arena, % mínimo Valor de Azul de Metileno, máximo	)	INV E-125 INV E-126 INV E-133 EN-933-9		No plástico No plástico 40 8	No líq 41	uido - No pl 41 1.74	ástico 41	Si Si Si Si		
Geometría de las Partículas										
Partículas Fracturadas Mecánicamente, % mínimo Índice de Aplanamiento, % máxim Índice de Alargamiento, % máxim Angularidad del Agregado Fino, %	- 1 cara - 2 caras o (2) o (3) mínimo (RO)	INVE-227 INV E-230 INV E-230 AASHTO T-304	90 75 20 20	- - - - 40		96.6 97.1 13.3 7.1 66.08		Si Si Si Si Si		
Capacidad de Soporte										
CBR, % mínimo Referido al 100 % de la densidad s (AASHTO T 180), método D, despu	eca máxima, según el ensayo INV E-142 1és de 4 días de inmersión.	INV E-148				242		-		

A partir de las tablas 7.8 a 7.11 es posible concluir que el material granular de las dos fuentes cumple satisfactoriamente con la mayoría de las especificaciones ET del IDU (2005). La única excepción es el experimento de Ensayo de Índice de Plasticidad (INV E-126) para el material granular de Carupa. El resultado del ensayo es muy cercano a la especificación, pero no está dentro del rango permitido. Por esta razón, se tomó la decisión de reemplazar la fracción fina del material de Carupa por el material de fino de la fuente de Patria, ya que este material granular si satisfacía las especificaciones.





# 7.4. Etapa 4: Elaboración de los Diseños y Evaluación de los Módulos

La primera actividad de la etapa de elaboración de los diseños consistió en hacer una planeación de las actividades de diseño, evaluación de módulos y ensayos de erosión, para hacer una estimación del número de especímenes requeridos por cada uno de los materiales para cumplir a cabalidad con todos los productos contratados. Las tablas 7.12 a 7.15 resumen esta información.

Material Granular estabilizado con cemento	Norma	Número de Mezclas	Número de Repeticiones por Mezcla	Número total de Especímenes
Proctor Modificado del Suelo	INV E - 806	3	1	3 curvas Proctor
Resistencia a la compresión en seco	INV E - 809	3	3	9
Resistencia a la tensión en seco		3	3	9
Resistencia a la tensión en húmedo	INV E - 765	3	3	9
Módulo de Elasticidad	NTC 672	3	3	9*

Tabla 7.12. Elaboración de los diseños del material GEC\_B-Gr2

\*Nota: debido a que los ensayos de Módulo de elasticidad son de tipo no-destructivo, se realizaron sobre las mismas probetas de resistencia a la compresión.

Tabla 7.13. Elaboración de los diseños de	el material GEEA_A-Gr1
---	------------------------

Material Granular estabilizado con cemento y emulsión asfáltica	Norma	Número de Mezclas	Número de Repeticiones por Mezcla	Número total de Especímenes
Inmersión - Compresión	Anexo A INV E - 738	3	3	9
Susceptibilidad al agua por tracción indirecta	INV E - 725	3	3	9
Módulo dinámico	INV E - 754	3	3	9*

\*Nota: debido a que los ensayos de Módulo dinámico son de tipo no-destructivo, se realizaron sobre las mismas probetas de los ensayos de Inmersión – Compresión.





Mezcla Asfáltica	Norma	Número de Mezclas	Número de Repeticiones por Mezcla	Número total de Especímenes
Resistencia Marshall	INV E - 748	1	3	3
Susceptibilidad al agua por tracción indirecta	INV E - 725	1	3	3
Módulo dinámico	INV E - 754	1	1	1
Ley de Fatiga	EN- 12697 - 24	1	1	1

#### **Tabla 7.14.** Elaboración de los diseños del material MD 20

Tabla 7.15. Número de especímenes requerido para ensayos de erosión

	Número de especímenes			
Ensayo	BG_A - Gr1	GEC_B - Gr2	GEE_A - Gr1	MD 20
Ensayo de erosión mesa vibratoria	-	9	9 9	9
Ensayo de erosión chorros de agua	3			

Los ensayos de erosión para los materiales estabilizados fueron realizados sobre 3 especímenes para cada uno de los contenidos de cemento (3 contenidos). Es decir, se requirieron 9 especímenes para los ensayos de erosión y cada uno de ellos fue sometido a 3 velocidades de modo consecutivo (los tres niveles de velocidades fueron aplicados sobre el mismo espécimen). Debido a que habían tres tipos de materiales estabilizados: 1) estabilizado con cemento (3 niveles de resistencia), 2) con emulsión asfáltica y cemento (3 contenidos de cemento para el diseño óptimo de emulsión) y 3) mezcla asfáltica en caliente (un tipo de mezcla correspondiente al diseño óptimo), y se requerían tres repeticiones por tipo de material, se necesitaron 21 especímenes en total. En el contrato se mencionaba un total de 27 especímenes para este ensayo. La diferencia de 6 especímenes corresponde a las tres repeticiones de dos resistencias adicionales a la óptima que eran requeridas para el material MD 20. Debido a que no es conveniente ensayar mezclas asfálticas diferentes a la óptima, se tomó la decisión de común acuerdo con el IDU de reemplazar estos 6 especímenes por una nueva mezcla de material GEEA\_A Gr1 y una mezcla MD 20 con poca cantidad de finos (Figura 7.16). Por lo tanto, el número total de especímenes





para el ensayo de erosión en mesa vibratoria fue de 27. Como cada especímen fue sometido a 3 velocidades diferentes, se produjeron 27\*3 resultados, tal como se estableció en el contrato.

Para el ensayo de chorro de agua a presión se emplearon los mismos 27 especímenes empleados en el ensayo de mesa vibratoria. Adicionalmente, en este caso se incluyó también el material de base granular sin tratar. Para este material se emplearon 3 especímenes, cada uno de los cuales fue sometido a 3 velocidades de ensayos diferentes de forma consecutiva. Por lo tanto, el número total de especímenes para el ensayo de erosión mediante chorro de agua fue de 30, tal como se especificaba en el contrato.

Con base en lo anterior, se procedió a ejecutar las actividades de la cuarta etapa del proyecto, correspondiente al diseño de las mezclas y la evaluación de los módulos. La primera sección presenta la metodología empleada para cumplir con los objetivos de la etapa cuatro, a continuación se presenta una descripción detallada del proceso de diseño y evaluación de los módulos para cada uno de los materiales y, finalmente se presenta un resumen de los resultados obtenidos en esta etapa.

#### 7.4.1. Metodología empleada

La metodología empleada para llevar a cabo las actividades de la etapa correspondiente a la elaboración de los diseños y evaluación de los módulos de los materiales estabilizados consta de dos fases principales. Durante la primera fase, se realizaron ensayos para determinar la relación entre el contenido de los agentes cementantes y la resistencia, para cada tipo de material. Lo anterior permitió determinar los valores de los contenidos óptimos de dichos agentes, que garantizan las resistencias exigidas en los términos de referencia del contrato. Una vez obtenidos estos valores, así como la curva de tendencia entre el contenido de material cementante y la resistencia del material, era posible proceder a definir los diseños definitivos que fueron evaluados en las etapas subsiguientes del proyecto. En este orden de ideas, la segunda fase consiste en la preparación de los especímenes con el diseño definitivo. Con base en las fórmulas de trabajo obtenidas durante el proceso de diseño, se inició la segunda fase de trabajo que consistió en fabricar especímenes para su caracterización mecánica (i.e., módulos y, en el caso de las mezclas asfálticas en caliente, resistencia a la fatiga).





# 7.4.2. Diseño de Mezclas Granular-Cemento (GEC\_B\_ Granulometría Gr2)

Las características granulométricas empleadas en el diseño de estas mezclas, así como las propiedades de caracterización básicas de los agregados (agregado fuente Carupa), fueron reportadas previamente en la sección 7.2.

De acuerdo con los términos de referencia, las mezclas de agregado-cemento debían ser diseñadas a compresión siguiendo el procedimiento estipulado en la norma INVIAS INVE-809/INVE-142.Las tres mezclas de agregado-cemento empleadas en el ensayo de erosión debían cumplir con los siguientes rangos de resistencia:

- Mezcla 1. Resistencia a la compresión en seco a 7 días entre 2.5Mpa y 3.0Mpa
- Mezcla 2. Resistencia a la compresión en seco a 7 días entre 3.1Mpa y 3.5Mpa.
- Mezcla 3. Resistencia a la compresión en seco a 7 días entre 3.6Mpa y 4.0Mpa.

Adicionalmente, las resistencias a la tracción indirecta (i.e., ensayo brasileño norma INVIAS INV E - 411) para cada mezcla/tipo de resistencia (3.5Mpa, 3.0Mpa y 2.5Mpa) debía ser de 0.25Mpa a los7 días de curado y la resistencia conservada mínima a la tracción indirecta a los 7 días requerida para todas las mezclas debía ser del 75 por ciento.

Las siguientes indicaciones técnicas particulares estipuladas en el contrato fueron tenidas en cuenta para la realización de los diseños:

 Para la determinación de la humedad óptima y densidad máxima se debe seguir lo descrito en la norma INVIAS E – 142, pero aplicando energía de compactación modificada.





- Para la determinación de la resistencia a la compresión, se debe realizar muestras de acuerdo con la norma de ensayo INVIAS E – 809, pero con un molde que cumpla la relación altura: diámetro de 2 : 1.
- Para la determinación de la resistencia a la compresión es necesario preparar tres probetas para cada contenido de cemento.
- Para la determinación de la resistencia a la tracción se deben preparar seis probetas para cada contenido de cemento (tres se utilizaran para la prueba de tracción en estado seco y las otras tres para la prueba a tracción en estado endurecido).
- Se deben analizar por lo menos tres contenidos de cemento.
- El agua se debe añadir después de mezclado el cemento con el agregado.
- Con el fin de simular las condiciones de construcción, la compactación se debe realizar, a lo sumo, una hora después de efectuada la mezcla del cemento con el agua. El material mezclado y sin compactar se debe colocar en un recipiente hermético para prevenir la pérdida de agua y se debe re-mezclar completamente cada 15 minutos.

Adicionalmente, para el curado de las muestras se siguieron las siguientes indicaciones requeridas en el contrato:

- Si el material carece de suficiente cohesión, es necesario dejar las probetas dentro del molde por 24 horas, permitiendo que desarrolle suficiente resistencia antes de su extracción.
- Las probetas se deben curar durante 7 días a una humedad relativa entre el 95% y 100% y una temperatura entre 20°C y 25°C en un cuarto húmedo o en bolsas de plástico selladas para retener la humedad.
- Las probetas para compresión inconfinada se deben sumergir por 4 horas en agua a temperatura entre 22°C y 25°C antes de la prueba.





- Para determinar la resistencia a la tracción indirecta sumergida, las probetas se deben sumergir en agua a 25°C por 24 horas. Luego se deben sacar y secar superficialmente antes de ensayarlas.
- La mezcla de diseño debe ser sometida a la prueba de humedecimiento secado, en la cual no se debe registrar pérdidas mayores a 14% (i.e., ensayo de cepillado).

Los siguientes fueron los pasos seguidos para realizar el diseño de las tres mezclas:

 Se seleccionaron 6 porcentajes diferentes de cemento: 1.5, 3.0, 4.5, 6.0, 7.5 y 9%. El cemento adicionado a la mezcla reemplazó porcentaje de finos con el fin de mantener la granulometría original (Tabla 7.16).

Contenido de Cemento	Material Fino Pasa No. 200	Total
1.5%	10.5%	
3.0%	9.0%	
4.5%	7.5%	120/
6.0%	6.0%	12%
7.5%	4.5%	
9.0%	3.0%	

Tabla 7.16. Porcentajes de cemento y distribución de finos

 Se realizó el ensayo Proctor Modificado para determinar las densidades máximas secas y humedades óptimas de las mezclas a los diferentes porcentajes de cemento (Tabla 7.17). Estos resultados (Tabla 7.18) fueron empleados para la compactación de las probetas de ensayo. Los resultados detallados de los ensayos Proctor se encuentran en el Anexo A.4 de este documento.




Contenido de Cemento	Densidad Máxima Seca (ton/m <sup>3</sup> )	Humedad Óptima (%)
1.5%	1.987	8.80%
3.0%	1.993	8.50%
4.5%	1.987	8.40%
6.0%	2.029	8.45%
7.5%	2.012	8.90%
9.0%	2.020	9.05%

3. Se fabricaron 3 probetas por cada contenido de cemento. Las probetas se dejaron curando en cuarto húmedo a la humedad y temperatura especificada en el contrato, tal como se puede apreciar en la Figura 7.31.



Figura 7.31. Proceso de curado para los especímenes de suelo-cemento





 Se realizaron los ensayos de compresión siguiendo la norma INVIAS INVE-809. Los resultados de los ensayos se encuentran reportados en el Anexo A.5 y están resumidos en la Figura 7.32



Figura 7.32. Resultados de compresión seca vs. porcentaje de cemento (mezclas GEC\_B-Gr2)

5. Con base en los resultados reportados en la Figura 7.32 se establecieron los porcentajes de cemento correspondientes a los valores medios de los rangos de resistencia requeridos para cada tipo de mezcla. Los resultados finales de porcentaje de cemento correspondientes a los diseños de cada una de las mezclas se muestran en la Tabla 7.19:





Fabla	7.19.	Diseños	de	las	mezcl	las
Fabla	7.19.	Diseños	de	las	mezcl	la

Mezcla	Resistencia a la compresión (MPa)	% de cemento de diseño
Tipo 1	2.75	6.1
Tipo 2	3.3	7.5
Tipo 3	3.8	8.8

 La resistencia de las mezclas a la tracción indirecta a 7 días mediante el ensayo brasileño (norma INV E – 411) fue verificado para los tres valores de diseño especificados en la tabla 7.19. Los resultados de estos ensayos se encuentran en el anexo A.6 y se resumen en la tabla 7.20.

Material	Mezcla	Muestra	Esfuerzo de Tracción (kPa)			
	1	1	21,805			
		2	27,822			
Granular estabilizado con cemento GEC_B- Gr2		3	21,448			
		1	44,850			
	2	2	21,448 44,850 52,073 37,467 40,682			
		3	37,467			
		1	40,682			
	3	2	44,553			
		3	32,964			

 Tabla 7.20. Resumen de resultados de tracción indirecta a 7 días mediante el ensayo brasileño

7. Adicionalmente, se fabricaron las probetas para efectuar el ensayo de cepillado (prueba de humedecimiento – secado) sobre las tres mezclas finales para verificar que no existieran pérdidas mayores a 14%. En la Figura 7.33 se pueden apreciar el estado de los especímenes de suelo-cemento al realizar el ensayo de cepillado. En el anexo A.7 se presentan los resultados de dicho ensayo, no sólo para los tres porcentajes de contenido de cemento de diseño sino para todos los porcentajes de cemento que fueron considerados durante el esta etapa (1.5%, 3%, 4.5%, 6.0%, 7.5% y 9%). La Tabla 7.21 resume los resultados para los tres contenidos de cemento de diseño (6.0%, 7.5% y





9.0%). Con base en esta tabla se puede constatar que la pérdida de masa fue inferior al 14%, tal como era solicitado por los términos de referencia.



Figura 7.33. Ensayo de cepillado sobre especímenes de suelo-cemento

Material	Mezcla	% pérdida de masa por cepillado	% pérdida de masa por cepillado+ciclos de humedecimiento
Granular estabilizado	1	3.64	4.03
con cemento	2	2.4	3.08
GEC_B- Gr2	3	3.43	3.75

 

 Tabla 7.21. Resumen de resultados de los ensayos de cepillado para las diferentes mezclas estabilizadas con cemento

8. Con el fin de determinar las propiedades mecánicas de la mezcla, se fabricaron 3 probetas para cada porcentaje de cemento con el objetivo de determinar el módulo de elasticidad de los materiales, mediante la norma NTC 4025. En las Figuras 7.34 a 7.36 se puede apreciar este procedimiento. Los resultados de estos ensayos se presentan en el Anexo A.8 y se resumen en la sección 4 de este informe.







Figura 7.34. Montaje del ensayo de módulo de elasticidad sobre especímenes de suelo-cemento en equipo MTS







Figura 7.35. Especimen de suelo-cemento antes de comenzar el ensayo



Figura 7.36. Especimen de suelo-cemento después de finalizar el ensayo

9. Finalmente, se fabricaron 3 probetas para el ensayo de erosión mediante el ensayo de mesa vibratoria y aplicación de chorro de agua para cada uno de los tres tipos de mezcla.





# 7.4.3.Diseño de Mezclas de Material Granular estabilizado con Emulsión Asfáltica y Cemento (GEEA\_A\_GranulometríaGr1)

Las características granulométricas empleadas en diseño de estas mezclas, así como las propiedades de caracterización básicas de los agregados (agregado fuente Carupa), fueron reportadas previamente en la sección 7.2. Como se mencionó en esta sección, la emulsión empleada fue provista por IncoAsfaltos; su clasificación era tipo CRL – 1h (catiónica de rompimiento lento) y su concentración fue del 59%.

Después de evaluar las posibles metodologías de diseño, y de común acuerdo con el IDU, se determinó que la filosofía básica del diseño de las mezclas consistió de las siguientes etapas:

- Determinar el contenido de emulsión que maximiza la resistencia a la compresión de las mezclas (con 0% de cemento).
- Verificar el cumplimiento de la resistencia retenida por inmersión/compresión de la mezcla con el porcentaje de emulsión óptima.
- 3. Determinar los 3 diseños requeridos mediante la adición de 3 porcentajes predeterminados de cemento a la mezcla con emulsión determinada en el numeral 1.

Los detalles del procedimiento de diseño empleado para el diseño de estas mezclas se resume a continuación:

- Se seleccionaron 6 porcentajes diferentes de emulsión asfáltica para el diseño de las mezclas: 4.8, 6.8, 8.79, 10.46, 12.12, 13.79%. La determinación de estos valores se obtuvo siguiendo el procedimiento de un método de superficie específico recomendado en la norma (Anexo A.3 de la norma INV E – 738).
- Se prepararon 6 probetas para cada tipo de emulsión con el fin de realizar el ensayo de inmersión-compresión siguiendo el procedimiento descrito en la norma. En la Figura se pueden apreciar algunos especímenes de este material.







Figura 7.37. Especímenes del material GEEA\_A- Gr1

- 3. Las probetas se dejaron curar durante 14 días siguiendo las condiciones especificadas en la norma. Las tres probetas empleadas para la resistencia a la compresión en seco se dejaron curar durante 14 días a una temperatura de 25±1°C y una humedad relativa del 50%.Las probetas destinadas al ensayo de compresión después de inmersión fueron curadas en dos periodos de 7 días: durante el primer periodo se dejaron al aire a temperatura ambiente y durante el segundo fueron sumergidas en agua a temperatura ambiente.
- 4. Se realizaron los ensayos de inmersión/compresión de todas las probetas. Con base en los resultados de los ensayos se analizaron los valores de resistencia a la compresión seca y el índice de retención de resistencia. El Anexo A.9. incluye los resultados de estos ensayos reportados por el laboratorio de Estructuras, Geotecnia y Pavimentos de la Universidad de Los Andes. La Tabla 7.22 resume el Índice de Resistencia Conservada para cada uno de los porcentajes de emulsión que se obtiene con base en estos resultados.





 Tabla 7.22. Índice de Resistencia Conservada para las mezclas estabilizadas con emulsión asfáltica

Material	% emulsión	Índice de Resistencia Conservada(%)
	4.8	94
Granular estabilizad con emulsión	6.8	98
	8.8	52
	10.46	50
	12.12	47
	13.79	49

 Se realizó una gráfica de resistencia a la compresión en seco versus el contenido de emulsión asfáltica con el objetivo de determinar el porcentaje óptimo. La Figura 7.38 ilustra estos resultados.



Figura 7.38. Resistencia en función del porcentaje de cemento para el material granular estabilizado con cemento y emulsión asfáltica

6. Con base en la Figura 7.38. se concluyó que el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica era del 6%. Es importante mencionar que de acuerdo con los valores de Índice de





Resistencia Conservada presentados en la tabla 7.23, el valor óptimo de diseño (i.e. 6% de emulsión) cumplió con el requisito de 75% de retención especificado por la norma.

 Las cuatro mezclas de material granular estabilizado con emulsión asfáltica y cemento fueron fabricadas empleando 6% de emulsión asfáltica por peso y cuatro porcentajes diferentes de cemento: 0%, 0.5%, 1.0% y 1.5%. Las características de las mezclas se especifican en la Tabla 7.23.

Mezcla	% emulsión	% cemento	Observaciones
1	6	0.0	
2	6	0.5	El cemento reemplaza
3	6	1.0	granulometría constante
4	6	1.5	grandioniorità constante

Tabla 7.23. Características de las tres mezclas GEEA\_A- Gr1 con cemento

8. Siguiendo un procedimiento similar al empleado para la compactación de las probetas en el numeral 2, se fabricaron probetas para cada una de las mezclas descritas en la Tabla 7.23 para realizar ensayos de susceptibilidad a daño por agua/humedad mediante tracción indirecta (ensayo TSR), de acuerdo con los especificado en la norma INV-E-725.Adicionalmente, se fabricaron especímenes de cada mezcla para determinar el módulo dinámico de los tres materiales (norma INV-E-754). El procedimiento para la determinación del módulo dinámico de este material recomienda un mínimo de ensayos a temperaturas de 5, 25 y 40°C y frecuencias de carga de 1, 4 y 16Hz para cada temperatura. Lo anterior con el objetivo de cubrir un amplio intervalo tanto de temperatura como de frecuencia, Las Figuras 7.39 y 7.40 muestran el acondicionamiento de las muestras a las temperaturas recomendadas por la norma y las Figura 7.41 permite apreciar el montaje del ensayo para la determinación del módulo dinámico. El Anexo A.10 presenta los resultados de estos ensayos y sus valores finales se encuentran resumidos en la sección 7.4.5.







Figura 7.39. Acondicionamiento de las probetas de material GEEA\_A\_Gr1 a una temperatura de 5°C



Figura 7.40. Acondicionamiento de las probetas de material GEEA\_A\_Gr1 a una temperatura de 40°C





Figura 7.41. Montaje requerido en la MTS para la determinación del módulo dinámico del material GEEA\_A\_Gr1

 Adicionalmente, se fabricaron especímenes para llevar a cabo ensayos de susceptibilidad a daño por agua/humedad mediante tracción indirecta (ensayo TSR) mediante la norma INV E – 725. Los resultados de estos ensayos se encuentran en el Anexo A.11. del presente informe y se resumen en la tabla 7.24.

Mezcla	Relación de Resistencia a la Tensión (%)
1	47
2	-
3	63
4	68

Tabla 7.24. Resultados ensayo TSR sobre material GEEA\_A\_Gr1





10. Finalmente, se fabricaron 3 probetas de cada una de las cuatro mezclas descritas en la Tabla 7.23 para ser empleadas para la determinación de la susceptibilidad a la erosión mediante el ensayo de mesa vibratoria y chorro de agua (etapa 5 y 6 del proyecto). Estas probetas se pueden apreciar en la Figura 7.42:

Figura 7.42. Probetas preparadas para los ensayos de erodabilidad



7.4.4. Diseño de Mezclas Asfálticas (MD 20\_Granulometrías 1 y 2)

Las características granulométricas empleadas en diseño de estas mezclas, así como las propiedades de caracterización básicas de los agregados (agregado fuente Patria), fueron reportadas en secciones anteriores de este documento (7.2 y 7.3). El cemento asfáltico empleado fue provisto por SHELL Colombia y corresponde a un ligante de Barranca de penetración 60/70 (1/10 mm). Las especificaciones del ligante se encuentran en el Anexo A.2. En esta etapa del proyecto se realizaron dos diseños de mezclas asfálticas tipo MD20 con modificaciones en su gradación, de acuerdo con lo acordado por las partes en el comité del día viernes 25 de junio de





2010. Estas dos gradaciones fueron presentadas en la sección 7.2, la primera de ellas corresponde a una gradación clásica ubicada en la mitad de las bandas permitidas para la mezcla MD20. La segunda gradación tiene una modificación en la parte final de la curva en la cual el contenido de finos se llevó al mínimo valor permitido por las especificaciones del IDU. El objetivo de la segunda mezcla es determinar el rol y la influencia de los finos en la susceptibilidad a la erosión de este tipo de materiales.

De acuerdo con el contrato, las mezclas asfálticas deben ser diseñadas por medio del ensayo Marshall siguiendo el procedimiento estipulado en las norma INV E-748. Los criterios del diseño para este material, se encuentran resumidos en la tabla 510.7 de la especificación IDU – ET – 2005 (Tabla 7.25):

Característica	Norma de Ensayo	MD 20
Compactación (golpes/cara)	INV E-748	75
Estabilidad mínima (kg)	INV E-748	900
Flujo (mm)	INV E-748	2 - 3.5
$V_{22}$	INV E - 736	40 60
vacios con alle (%)	Manual MS-2	4.0 - 0.0
Vacíos en agregados (%)	Manual MS-2	$\geq 14$
Vacíos llenos de asfalto (%)	Manual MS-2	65.0 - 75.0
Relación llenante / ligante efectivo, en Peso		0.8 - 1.2
Concentración de Llenante, valor máximo	INV E - 745	Valor Crítico

Tabla 7.25. Criterios de diseño para la mezcla asfáltica MD 20

El procedimiento básico empleado para el diseño de las dos mezclas consta de los siguientes pasos:

- 1. Se seleccionaron 6 porcentajes diferentes de cemento asfáltico para el diseño de las dos mezclas densas en caliente: 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5%.
- Se fabricaron 3 probetas por cada contenido de asfalto siguiendo el ensayo de compactación por el método Marshall previamente mencionado.
- 3. Con base en los resultados y en los ensayos de gravedad específica *bulk*, se determinaron todas las propiedades volumétricas de la mezcla. Los resultados de los ensayos con aparato Marshall (estabilidad y flujo), así como los valores de peso unitario, % de vacíos en la mezcla, % de vacíos en agregados mineral (VAM) y el peso específico máximo





promedio correspondientes a cada especimen para las dos mezclas se encuentran listados en el Anexo A.12 de este documento. Este anexo también incluye información sobre otras propiedades volumétricas de las mezclas (i.e., peso específico de los agregados, gravedad específica del asfalto, porcentaje volumétrico de cada componente constitutivo de la mezcla, porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA), porcentaje de asfalto efectivo, índice de película delgada, etc.).

4. La información presentada en el Anexo A.12. fue empleada para determinar los porcentajes óptimos de asfalto de las dos mezclas (i.e., valores de diseño). La Tabla 7.26 presenta los valores óptimos de porcentaje de asfalto, el porcentaje de vacíos en la mezcla y los valores promedio de estabilidad y flujo correspondientes a los diseños finales:

Mezcla	% óptimo asfalto	% vacíos en la mezcla	Estabilidad (Kg)	Flujo (mm)
1	4.3%	5.7	1600	3.5
2	4.3%	5.6	1420	2.9

Tabla 7.26. Resultados Diseño Mezclas Asfálticas MD20

- 5. Una vez definidos los valores de diseño de las mezclas, se fabricaron las probetas necesarias para efectuar ensayos de módulo dinámico, de acuerdo con los requerimientos establecidos en la norma INV-E-754. El montaje requerido para la ejecución de estos ensayos es el mismo que el realizado para las mezclas estabilizadas con emulsión asfáltica y cemento y fue descrito con anterioridad. Los resultados de estos ensayos se encuentran en el Anexo A.13 del presente informe.
- Adicionalmente, se fabricaron especímenes para llevar a cabo ensayos de susceptibilidad a daño por agua/humedad mediante tracción indirecta (ensayo TSR) mediante la norma INV E – 725. Los resultados de estos ensayos se encuentran en el Anexo A.14. del presente informe y se resumen en la tabla 7.27.

Tabla 7.27. Resultados ensayo TSR sobre Mezclas Asfálticas MD20

Mezcla	Relación de Resistencia a la Tensión (%)
1	65
2	85





7. Con el fin de determinar la resistencia a la fatiga (leyes de fatiga) de las dos mezclas, se fabricaron las probetas trapezoidales necesarias para efectuar dicho ensayo, de acuerdo con la norma francesa EN – 12697 – 24.Los resultados de este ensayo se encuentran en el Anexo A.15. En la Figura 7.43 se presenta un registro fotográfico de este ensayo y los resultados se presentan en la sección 4 del presente informe:



Figura 7.43. Ensayo de fatiga en mezclas asfálticas

8. Finalmente, se prepararon 3 probetas de cada tipo de mezcla para determinar la susceptibilidad de los materiales a la erosión mediante los ensayos de mesa vibratoria y aplicación de chorro de agua, descritos en secciones anteriores.

## 7.4.5. Tablas resumen de resultados: elaboración de los diseños y evaluación de los módulos

La Tabla 7.28 resume los resultados de los diseños de las mezclas estabilizadas descritas en las secciones 7.4.2 a 7.4.4.





Tabla 7.2.8. Resumen de resultados de diseño de mezclas estabilizadas con cemento, emulsión asfál	tica-
cemento, y mezclas asfálticas densas en caliente	

Material	Mezcla	Mezcla	Criterio diseño	Resultado
Granular	GEC_B- Gr2	1	Resistencia compresión: 2.75 MPa	6.1% de cemento
estabilizado con cemento	GEC_B- Gr2	2	Resistencia compresión: 3,30 MPa	7.5% de cemento
	GEC_B- Gr2	3	Resistencia compresión: 3,8 MPa	8.8% de cemento
	GEEA_A- Gr1 1		6% emulsión + 0.0% cemento	
Granular estabilizad con emulsión y cemento	GEEA_A- Gr1	2	Máxima resistencia a la	6% emulsión + 0.5% cemento
	GEEA_A- Gr1	3	con 0% de cemento	6% emulsión + 1.0% cemento
	GEEA_A- Gr1	4		6% emulsión + 1.5% cemento
Mezcla	MD20-Gr1, tipo 1	1	Óptimo porcentaje de	4.3% de asfalto
asfáltica	MD20-Gr1, tipo 2	2	Marshall	4.3% de asfalto





Las Tablas 7.29, 7.30 y 7.31 resumen los resultados de módulo de elasticidad y módulo dinámico para los materiales estudiados.

Material	Mezcla	Muestra	Ensayo/Norma	Módulo Elástico (kgf/cm <sup>2</sup> )
Granular estabilizado con		1	Módulo de Elasticidad / NTC 4025	25,038
	1	2		12,628
		3		17,7
	2	1		27,409
		2		14,990
GEC B- Gr2		3		42,542
020_0 0.2		1		39,049
	3	2		26,820
		Ī	3	

Tabla 7.29. Resumen de resultados de módulos elásticos de las mezclas estabilizadas con cemento





 Tabla 7.30. Resumen de resultados de módulos dinámicos de las mezclas estabilizadas con emulsión asfáltica y cemento

	Mozolo	Ensayo/	Resultados					
Matarial			Frecuencia	T	Módulo (kgf/cm <sup>2</sup> )			
Material	wiezcia	Norma		1 emperatura	Muestra	Muestra	Muestra	
			(112)	( C)	1	2	3	
				5	31,125	26,010	37,832	
			1	25	12,334	10,910	9,900	
				40	9,008	9,392	10,140	
				5	40,196	32,164	47,202	
			4	25	16,056	14,701	14,500	
	1			40	11,190	11,124	12,063	
	1	Módulo Dinámico / INV E – 754	10	5	40,790	34,663	48,240	
				25	18,372	16,191	16,677	
				40	11,747	11,246	12,998	
Granular			16	5	41,325	34,943	48,741	
con				25	20,891	17,105	16,956	
emulsión				40	11,886	13,352	14,099	
asfáltica y			1	5	28,228	31,777	28,228	
cemento				25	8,886	9,962	8,886	
GEEA_A- Cr1				40	6,190	7,864	6,190	
UII			4	5	36,599	38,394	36,599	
				25	12,742	12,765	12,742	
	2			40	7,063	9,423	7,063	
	-			5	36,910	40,306	36,910	
			10	25	14,360	15,832	14,360	
				40	8,547	9,440	8,547	
				5	37,963	42,220	37,963	
			16	25	16,291	16,029	14,368	
				40	8,571	9,643	8,676	





Tabla 7.30 (Continuación). Resumen de resultados de módulos dinámicos	
de las mezclas estabilizadas con emulsión asfáltica y cemento	

	Mozolo	Ensayo/ Norma		Resultados					
Matarial			Frecuencia	<b>T</b>	Módulo (kgf/cm <sup>2</sup> )				
wateria	wiezcia			$(H_{z})$ (%C)	Muestra	Muestra	Muestra		
			(112)	( C)	1	2	3		
				5	36,972	33,138	32,945		
			1	25	15,207	14,182	12,754		
				40	14,079	14,903	11,085		
				5	42,356	38,338	36,625		
			4	25	20,302	17,611	16,330		
	2			40	17,182	17,047	13,377		
	3	Módulo Dinámico / INV E – 754	10	5	43,759	41,396	39,237		
				25	23,326	20,658	19,250		
				40	18,193	18,793	13,481		
Granular			16	5	45,884	42,364	39,388		
con				25	23,393	21,372	19,742		
emulsión				40	18,884	18,987	13,879		
asfáltica y cemento			1	5	27,971	28,706	28,706		
				25	13,654	15,437	15,437		
GEEA_A- Gr1				40	14,139	11,886	11,954		
UII			4	5	33,960	32,870	32,870		
				25	16,058	19,121	19,121		
	4			40	14,708	13,857	13,828		
	•			5	34,983	34,768	34,768		
			10	25	17,282	21,023	21,023		
				40	16,486	15,767	15,669		
				5	35,421	35,520	35,520		
			16	25	17,501	21,106	21,106		
				40	16,765	16,214	16,156		





Tabla 7.31. Resumen de resultados de módulos dinámicos de las mezclas asfálticas en caliente

		Ensayo/	Resultados					
Matarial	Mozelo		<b>F</b>	T	Módulo (kgf/cm <sup>2</sup> )			
	Mezcia	Norma	Frecuencia (Hz)	1 emperatura	Muestra	Muestra	Muestra	
			(112)	( C)	1	2	3	
				5	125,473	125,950	122,769	
			1	25	32,450	49,757	43,646	
				40	11,370	25,633	13,007	
				5	149,769	148,168	162,231	
			4	25	50,782	67,239	62,525	
	1			40	15,728	32,795	20,670	
	1			5	167,187	160,341	165,702	
			10	25	63,581	76,242	75,196	
				40	19,797	41,947	28,910	
1			16	5	169,552	161,110	167,773	
Mezcla		Módulo		25	67,354	78,394	89,057	
asfáltica en		Dinámico		40	22,645	48,897	34,123	
caliente		/ INV E –	1	5	123,416	125,473	122,589	
MD 20		754		25	22,626	49,427	35,318	
1				40	8,275	26,806	11,503	
1				5	158,356	149,524	132,597	
1			4	25	36,230	59,534	51,615	
1	2		<u> </u>	40	11,177	36,223	16,668	
1	-			5	160,925	162,912	140,617	
<b> </b>			10	25	50,664	74,084	62,021	
1				40	15,056	42,494	22,135	
1				5	165,241	170,036	145,499	
1			16	25	53,718	78,204	71,980	
				40	17,104	45,341	25,211	





La Tabla 7.32 resume los resultados del ensayo de ley de fatiga para las mezclas asfálticas consideradas:

Tabla 7.32. Resumen de resultados de resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas en caliente

Material	Mezcla	Mezcla	Ensayo/Norma	Resultado		
				<b>E</b> 6	b	α
Mezcla asfáltica	MD20- Gr1, tipo 1	1	Ley de Fatiga / EN 12697 24	110*10 <sup>-6</sup>	-0.1600	6.25
MD 20	MD20- Gr1, tipo 2	2	EN - 12697 - 24	110*10 <sup>-6</sup>	-0.1600	6.25

7.5. Etapas 5 y 6: Determinación de las Pérdidas por Erosión mediante el Ensayo de Mesa Vibratoria y Flujo de Agua a Velocidad Controlada y Análisis de Datos y Determinación de los Valores Representativos de Pérdida por Erosión para Cada tipo de Material

A continuación se resumen las actividades realizadas durante las etapas cinco y seis del proyecto correspondientes a la evaluación del fenómeno de erosión de los materiales establecidos en los términos de referencia, la descripción de los ensayos de erosión realizados y el análisis de la información obtenida a partir de los mismos.

# 7.5.1. Metodología General

La metodología empleada para llevar a cabo las actividades de las etapas 5 y 6 incluyó las siguientes etapas:

• Elaboración de los especímenes de ensayo de cada material para cada uno de los ensayos programados.





- Montaje del ensayo de erodabilidad mediante aplicación de chorro a presión de agua. Esta actividad incluye la descripción del procedimiento de montaje y un registro fotográfico.
- Montaje del ensayo de erosión mediante mesa vibratoria. Esta actividad incluye descripción del procedimiento de montaje y un registro fotográfico.
- Ejecución de los ensayos de erosión de chorro a presión de agua. Esta actividad incluye descripción del procedimiento de ejecución de los ensayos y un registro fotográfico.
- Ejecución de los ensayos de erosión mediante mesa vibratoria. Esta actividad incluye descripción del procedimiento de ejecución de los ensayos y un registro fotográfico.
- Reporte de resultados de los dos tipos de ensayos de erosión.
- Análisis de resultados de los ensayos de erosión.

A continuación se describen en detalle cada una de estas actividades.

# 7.5.2. Elaboración de los Especímenes de Ensayo de cada Material

En esta etapa del proyecto se elaboraron los diferentes especímenes para realizar los ensayos de erosión. La descripción detallada de los materiales empleados se encuentra reportada en las secciones iniciales de este informe. La Tabla 7.33 presenta un resumen de los materiales a ensayar y del número de especímenes que se elaboraron para dichos ensayos:

Es importante realizar las siguientes aclaraciones con respecto a la tabla 7.33:

- Debido a su naturaleza no cementada, el material de base granular no estabilizada (BG1-Gr1) sólo puede ser sometido al ensayo de erosión de chorro a presión de agua.
- 2. Con excepción del material de base granular, todos los especímenes que se fabricaron para el ensayo de chorro de agua fueron empleados posteriormente para el ensayo de mesa vibratoria. En todos los casos los especímenes fueron usados de tal forma que la





ejecución previa del ensayo de chorro a presión de agua no afecta la confiabilidad y debida ejecución de los ensayos de mesa vibratoria, tal como se describirá en las siguientes secciones.

3. En el caso del ensayo de mesa vibratoria, cada uno de los especímenes fue sometido a tres diferentes condiciones de ensayo. Estas condiciones consistieron en diferentes frecuencias de aplicación de carga. Para cada una de las frecuencias se reportó una pérdida de material diferente. Detalles de los ensayos y de los procedimientos de análisis de los resultados de estos ensayos pueden ser consultados en las secciones posteriores de este informe.





Material	Composición	Ensayo	No. De especímenes	No. de ensayos por especímenes	Total de ensayos	
Dece Cremular	BGA-Gr1	Chorro de agua	3	1	3	
Base Granular		Mesa vibratoria	0	0	0	
	6 120/ somests	Chorro de agua	3	1	3	
	0.15% cemento	Mesa vibratoria	3	3	9	
Base granular	7.520/	Chorro de agua	3	1	3	
cemento	7.55% cemento	Mesa vibratoria	3	3	9	
	8.80/ comente	Chorro de agua	3	1	3	
	8.8% cemento	Mesa vibratoria	3	3	9	
	6% emulsión +	Chorro de agua	3	1	3	
	0.0% cemento	Mesa vibratoria	3	3	9	
Base granular	6% emulsión + 0.5% cemento	Chorro de agua	3	1	3	
estabilizada con		Mesa vibratoria	3	3	9	
emulsión y	6% emulsión + 1.0% cemento	Chorro de agua	3	1	3	
cemento		Mesa vibratoria	3	3	9	
	6% emulsión +	Chorro de agua	3	1	3	
	1.5% cemento	Mesa vibratoria	3	3	9	
	MD 20 original	Chorro de agua	3	1	3	
Mezclas	NID 20 originar	Mesa vibratoria	3	3	9	
en caliente	MD 20 pocos	Chorro de agua	3	1	3	
	finos	Mesa vibratoria	3	3	9	
Total de ensayos de erosión mediante chorro a presión de agua						
Total de ensayos de erosión mediante mesa vibratoria						

#### Tabla 7.33. Especímenes requeridos para los ensayos

Finalmente, es importante mencionar que todos los especímenes fueron elaborados empleando el compactador giratorio Superpave; tal como se especificó en la sección 7.1.





# 7.5.3. Montaje del Ensayo de Erosión mediante Chorro a Presión de Agua

Las siguientes son las etapas requeridas para el montaje del ensayo de erosión mediante chorro de agua a presión:

- Instalación de un tanque de dimensiones suficientes para permitir la ubicación de todos los equipos de ensayo en su interior y para evitar salpicar y ensuciar el sitio circundante al ensayo por efectos del agua que se aplicará durante el ensayo. En este caso se empleó un tanque de agua de plástico de Colempaques de línea cónica con dimensiones de 1 metro de diámetro y 1 metro de profundidad.
- Instalación de la base giratoria, o también llamada tornamesa, en el fondo del tanque. La base giratoria funciona mediante un motor eléctrico que le permite rotar a una velocidad constante de 4 rpm.
- 3. Ubicación de los especímenes de ensayo sobre la base giratoria.
- 4. Ubicación de la manguera y del dispositivo de expulsión de agua. El ángulo de ataque del agua debe ser 45° y la distancia vertical entre el espécimen y la boca de salida del agua debe ser de 2cm (en línea recta).
- 5. La manguera va conectada a una cámara metálica de alta presión que contiene un determinado volumen de agua. La cámara se debe ubicar cerca del tanque y debe estar a su vez conectada al sistema de control de presión de agua.
- 6. Una vez el montaje completo del sistema está listo, se procede a realizar el ensayo, tal como se describe en las subsecciones posteriores de este informe.





Las Figuras 7.44 y 7.45 ilustran los componentes individuales del sistema y el montaje final.



**Figura 7.44.** Componentes individuales del sistema: a) Tanque plástico, b) Cámara metálica de alta presión, c) Montaje para la manguera o jet de agua a 45°.



**Figura 7.45.** Montaje final del sistema: la muestra es ubicada sobre la base del tornamesa y la manguera se encuentra a una distancia vertical de 2 cm sobre el especímen y a un ángulo de 45°. La manguera va conectada a la cámara metálica, por medio de la cual se controla la presión de salida del agua.





# 7.5.4. Montaje del ensayo de erosión mediante mesa vibratoria

Las siguientes son las etapas requeridas para el montaje del ensayo de erosión mediante mesa vibratoria:

 Instalación del gato hidráulico que permitirá la aplicación vertical de carga al sistema molde-especimen. El gato hidráulico empleado en este ensayo es el de la máquina Material Testing System (MTS) del laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad de Los Andes, compuesta por tres actuadores dinámicos servo-controlados de 5, 35 y 100 toneladas (ver Figura 7.46).



Figura 7.46. Instalación del gato hidráulico

2. Instalación del molde sobre la base del gato hidráulico. El molde fue diseñado y construido en acero y posee unas dimensiones de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura. La función de este molde es permitir la ubicación en su interior del especimen de ensayo y de los 350 ml de agua que se requieren como parte del ensayo (Ver Figura 7.47).







Figura 7.47. Instalación del molde sobre la base del gato hidráulico

3. Ubicación de sensores básicos sobre el molde (Ver Figura 7.48). En la base del molde se requiere la instalación de un acelerómetro, mediante el cual se controla que la aplicación de la frecuencia y amplitud son los correctos. Adicionalmente, en la base y en una de las paredes laterales del molde se instalaron sensores de medición de presión de poros.







Figura 7.48. Ubicación de sensores sobre el molde

4. Preparación final del especimen de ensayo. Los especimenes de ensayo requieren ser pegados en una de sus bases a un cilindro de concreto con un diámetro igual al del especimen del material a ensayar (15 cm de diámetro) y con una altura de 15 cm. El espécimen final de ensayo consiste, por lo tanto, en la unión mediante epóxico del cilindro del material a ensayar previamente elaborado mediante el compactador giratorio Superpave (y curado, dependiendo del material) y un cilindro de concreto con las dimensiones especificadas. El objetivo de adherir un cilindro de concreto al material de ensayo es proveer la altura final necesaria para la apropiada ejecución del ensayo. En la Figura 7.49, se ilustra este procedimiento para el material de mezcla asfáltica:







Figura 7.49. Preparación de los especímenes de ensayo para la mezcla asfáltica MD 20

5. Ubicación del especimen de ensayo dentro del molde contenedor (Ver Figura 7.50).



Figura 7.50. Ubicación del especímen de ensayo dentro del molde





6. Adición de 350 ml de agua dentro del molde (Ver Figura 7.51.)



Figura 7.51. Adición de agua al molde

7. Ubicación de un acelerómetro en la parte superior del especimen de ensayo. Este acelerómetro permite la medición y caracterización de la dinámica del especimen, la cual no es igual a la dinámica del molde contenedor que aplica la carga al especimen (Ver Figura 7.52).



Figura 7.52. Ubicación de un acelerómetro en la parte superior del especimen de ensayo





- 8. Preparación y revisión del buen funcionamiento de los equipos de aplicación de carga y adquisición de datos.
- 9. Una vez el montaje completo del sistema está listo, se procede a realizar el ensayo, tal como se describe en las secciones posteriores de este informe.

## 7.5.5. Ejecución del Ensayo de Erosión mediante Chorro a Presión de Agua

En la sección 7.1 se presentó un resumen del procedimiento a emplear para la ejecución del ensayo de erosión. En esta sección se describen en detalle las actividades requeridas para el ensayo de erosión. Dicha descripción se encuentra acompañada de un registro fotográfico.

Los pasos requeridos para realizar el ensayo de erosión bajo chorro de agua de presión son los siguientes:

## i. Preparación de muestras y curado

Las muestras fueron compactadas al 97% de la densidad máxima prevista en los diseños de las mezclas mediante el compactador giratorio Superpave<sup>®</sup>. La densidad de compactación se seleccionó con el fin de realizar los ensayos sobre muestras representativas de las condiciones de compactación del campo.

Las muestras de materiales estabilizados con cemento fueron sometidas a un período de curado en cuarto húmedo durante 28 días.

Los mismos especimenes empleados en esta etapa fueron empleados posteriomente en el ensayo de erosión en mesa vibratoria (tabla 7.33).

#### ii. Saturación de las muestras

La muestra se somete a saturación capilar durante las 24 horas previas al ensayo.

#### iii. Instalación de la muestra en el molde de ensayo

Las muestras se colocan en una mesa giratoria cuya velocidad es de 4 revoluciones/minuto.





## iv. Aplicación de agua sobre la superficie del espécimen a diferentes velocidades

Se aplica progresivamente agua a velocidad creciente aumentando la presión de inyección. El agua es aplicada mediante una manguera que se encuentra conectada al tanque de agua y a la boquilla de expulsión de agua. La boquilla tiene un diámetro de 1mm y se encuentra ubicada a 2 cm de la base superior del especimen. El chorro de agua se aplica a un ángulo de 45°. La Tabla 7.34 resume las presiones y los tiempos a las cuales se realizaron los ensayos y la Figura 7.53 presenta la relación entre las presiones de agua y los caudales correspondientes del ensayo. Con base en la información del caudal relacionado con cada presión y el área de la válvula se obtiene la velocidad mediante la cual sale el agua expulsada.

Presión (bar)	Tiempo de aplicación (min)
5	2
10	2
15	2
20	2

Tabla 7.34. Presiones aplicadas durante el ensayo de chorro a presión de agua



Figura 7.53. Relación entre presión de aplicación de agua y el caudal de agua aplicado sobre el especimen.





## v. Aplicación de agua sobre la superficie del espécimen a diferentes velocidades

Una vez concluido el ensayo se reporta si se hubo o no hubo erosión sobre el especimen a cada una de las presiones a las que fue sometido el material. La valoración de la erosión se realiza mediante inspección visual. Con base en esta información se reporta, de ser posible, la velocidad crítica de erosión para cada uno de los materiales. A continuación en la Figura 7.54 se presenta el registro fotográfico del procedimiento descrito para un especimen del material de base granular:



Figura 7.54. Evolución de un especimen a lo largo de un ensayo de erodabilidad mediante chorro de agua a presión

# 7.5.6. Ejecución del Ensayo de Erosión mediante Mesa Vibratoria

Como se mencionó con anterioridad, el ensayo de erosión en mesa vibratoria simula de forma apropiada el fenómeno hidráulico que promueve el proceso de erosión y bombeo en las bases de pavimento rígido.





El procedimiento para realizar el ensayo de erosión en mesa vibratoria es el siguiente:

## i. Preparación de muestras y curado

Las muestras preparadas para los ensayos de erosión de chorro a presión de agua son posteriormente empleadas para el ensayo de mesa vibratoria.

Con el fin de obtener las dimensiones requeridas para la ejecución del ensayo, las muestras son adheridas mediante epóxico a cilindros de concreto con el mismo diámetro que los especímenes de ensayo y una altura de 15 cm. La cara adherida al cilindro del concreto es aquella sobre la cual se realizó previamente el ensayo de chorro de agua. De esta forma, la cara del especimen de ensayo que quedará en contacto sobre la base del molde, y de la cual se medirá la pérdida de material por erosión, se encuentra intacta al inicio del ensayo.

## ii. Instalación de la muestra en el molde de ensayo

Previa a la instalación de las muestras en el molde de ensayo se adiciona agua en el mismo y se saturan los sensores de presión previamente instalados en el molde. Posteriormente a la saturación se adiciona el agua necesaria para completar 350 ml de agua en el molde y se procede a instalar la muestra.

# iii. Aplicar el primer nivel de frecuencia, $f_1$ , (200.000 ciclos) correspondiente a la primera velocidad de expulsión.

En todos los niveles de aceleración, la amplitud de aplicación de la carga dinámica fue de 0.3 mm. Los tres niveles de frecuencia,  $f_1$ ,  $f_2$  y  $f_3$ , fueron 50, 80 y 100 Hz, respectivamente. Estos niveles de frecuencia se pueden emplear, en combinación con las dimensiones y la dinámica del especimen, para calcular la velocidad de expulsión horizontal del agua en la base del especimen. El procedimiento del cálculo se describe posteriormente en esta sección. Las frecuencias seleccionadas para el ensayo fueron estimadas con el objetivo de obtener velocidades de expulsión de agua en un rango entre 2m/s y 10m/s aproximadamente, las cuales corresponden a los rangos de velocidad de expulsión de agua




en la base de las losas de concreto típicamente reportados en la literatura. La degradación de las muestras debido a la erosión aumenta a medida que la velocidad de expulsión del agua se incrementa. Por esta razón, la medida de la erosión comenzará con la menor velocidad y se incrementará progresivamente. Esto significa a iniciar el ensayo a la frecuencia más baja. i.e., 50 Hz, seguido de los dos siguientes niveles de frecuencia. Para cada nivel de frecuencia la muestra es sujeta a 20,000 ciclos de carga.

# iv. Medir la erosión mediante el peso de material disgregado de la muestra.

Una vez terminados los primeros 200.000 ciclos de erosión se para el ensayo, se retira la muestra y se mide su masa y su altura. Igualmente se retira todo el material disgregado por erosión en una bandeja de aluminio la cual se introduce en el horno con el objetivo de evaporar el agua y cuantificar la masa de material perdido por efecto de los 20,000 ciclos de carga aplicados al molde. A continuación, se completan nuevamente los 350 ml de agua limpia y se continua con el ensayo. En la Figura 7.55 se pueden ver algunos especímenes después de ser sometidos a este ensayo y en la Figura 7.56. se puede apreciar la porción disgregada de los diferentes materiales.



Figura 7.55. Estado final de los especímenes después de ser sometidos a ensayos de erodabilidad







Figura 7.56. Porción de material disgregado al realizar el ensayo de erodabilidad

# v. Repetir los pasos 4 y 5 con los siguientes niveles de aceleraciones $(a_2 y a_3)$ .

En esta etapa del ensayo se repite el procedimiento descrito en los pasos iii y iv empleando los otros dos niveles de velocidades ( $f_2 = 80$  Hz y  $f_3 = 100$  Hz).

# vi. Reportar los resultados de los ensayos y analizar los resultados.

Al finalizar cada uno de las tres etapas del ensayo se procesa la información de la siguiente manera:

- Se reporta el peso de la muestra al iniciar cada ciclo de carga y al finalizar cada etapa del ensayo (i.e., 20,000 ciclos de carga a cada nivel de frecuencia),
- Se reporta el peso del material disgregado del especimen de ensayo en cada etapa del ensayo,
- Se reporta la frecuencia real que fue aplicada al molde, la cual es capturada mediante el acelerómetro instalado en su superficie.
- Se reporta la frecuencia así como la frecuencia real que es sentida por el especimen y captura.





Como se explicó en secciones anteriores, las velocidades de expulsión de agua dependen de la masa y de la rigidez de la muestra tal como se explica a continuación:

La señal vibratoria sinusoidal aplicada al molde y a la probeta están controladas por la amplitud de la señal y por la frecuencia de vibración, f, respectivamente. Durante el proceso vibratorio se mide la aceleración de la probeta y se calcula su desplazamiento  $Z_p$  mediante la ecuación 7.91.

$$Z_p = \frac{a_p}{\left(2\pi f\right)^2} \tag{7.91}$$

en donde  $a_p$  es la aceleración de la probeta y *f* es la frecuencia. La ecuación 7.91 también se puede emplear para calcular el desplazamiento del molde,  $Z_m$ , con base en la aceleración aplicada al molde ( $a_m$ ) y a la frecuencia del ensayo (*f*).

La cavidad *h* que aparece entre el molde de ensayo y la probeta durante el proceso vibratorio es entonces:

$$h = Z_m - Z_p \tag{7.92}$$

Con base en esta información, la velocidad de expulsión de agua se puede calcular utilizando la teoría de discos paralelos:

$$V = \frac{Wa_p h^2}{2\pi\mu R^3} \tag{7.93}$$

en donde *W* es el peso de la muestra,  $a_p$  es la aceleración de la muestra, *h* es el espesor de la cavidad,  $\mu$  es la viscosidad dinámica del agua y *R* es el radio de la muestra.

La información sobre la masa de pérdida de material relacionada con cada una de las velocidades de expulsión de agua fue empleada con el objetivo de analizar la susceptibilidad a la erosión de cada uno de los materiales y la conveniencia de su empleo como material de base en pavimentos rígidos.





# 7.5.7. Resultados y Análisis de Resultados de los Ensayos de Erosión de Chorro a Presión de Agua

El anexo A.16 de este informe contiene los formatos correspondientes a los ensayos de laboratorio de erosión de chorro a presión de agua para todos los materiales evaluados. La Tablas 7.35 y 7.36 resumen los resultados de dichos experimentos:

Material	Especimen	¿Se detectó erosión?							V <sub>crítica</sub>
		1	2	3	5	10	15	20	(111/8)
		bar	bares	bares	bares	bares	bares	bares	
Base Granular BGA_Gr1	1	*	*	*	Sí	Sí	Sí	Sí	< 20.37
	2	*	*	*	Si	Si	Si	Sí	< 20.37
	3	Sí	Sí	Sí	Sí	*	*	*	< 10.10

 Tabla 7.35. Resultados consolidados sobre el material granular sin estabilizar

\* no se evaluó a dichas presiones





Madarial	<b>a</b>	<b>F</b>	2	V <sub>crítica</sub>			
Material	Composition	Especimen	5 bares	10 bar	15 bar	20 bar	(m/s)
	Diseño 1 6.13% cemento	1	Sí	Sí	Sí	Sí	< 20.37
		2	Sí	Sí	Sí	Sí	< 20.37
		3	No	Si	Sí	Sí	33.87
Base granular	D: ~ 0	1	No	No	Sí	Sí	38.41
con cemento	Diseno 2	2	No	Sí	Sí	Sí	33.87
GEC_B_Gr2	7.55% cemento	3	No	Sí	Sí	Sí	33.87
	D: ~ 2	1	No	No	Sí	Sí	38.41
	Diseno 3	2	No	Sí	Sí	Sí	33.87
	8.8% cemento	3	No	Sí	Sí	Sí	33.87
	Diseño 1 6% emulsión + 0.0% cemento	1	No	No	Si	Si	38.41
		2	No	Si	Si	Si	33.87
		3	No	No	Si	Si	38.41
	Diseño 2 6% emulsión + 0.5% cemento	1	No	Si	Si	Si	33.87
Base granular		2	No	Si	Si	Si	33.87
estabilizada		3	No	Si	Si	Si	33.87
y cemento	Diseño 3 6% emulsión + 1.0% cemento	1	Si	Si	Si	Si	< 20.37
GEEA_A_Gr1		2	Si	Si	Si	Si	< 20.37
		3	Si	Si	Si	Si	< 20.37
	Diseño 4	1	Si	Si	Si	Si	< 20.37
	6% emulsión +	2	Si	Si	Si	Si	< 20.37
	1.5% cemento	3	Si	Si	Si	Si	< 20.37
		1	No	No	No	No	> 38.41
Mezclas asfálticas densas en caliente	MD 20 original	2	No	No	No	No	> 38.41
		3	No	No	No	No	> 38.41
		1	No	No	No	No	> 38.41
	MD 20 pocos	2	No	No	No	No	> 38.41
	111105	3	No	No	No	No	> 38.41

#### Tabla 7.36. Resultados consolidados sobre el material granular sin estabilizar





Con base en la información presentada en las Tablas 7.35 y 7.36 se puede concluir que:

- Los materiales que mejor resistieron el inicio del proceso de erosión por la aplicación del chorro a presión de agua fueron las mezclas asfálticas. Ninguno de los especímenes logró erosionarse con las presiones de agua (i.e., las velocidades de expulsión de agua) aplicadas durante el ensayo. Por lo tanto, se puede afirmar que las velocidades críticas de erosión para estos materiales son superiores a las máximas ensayadas (i.e., 38.41 m/s).
- Las mezclas granulares estabilizadas con emulsión y cemento presentaron variadas resistencias a la erodabilidad. De los cuatro diseños la mezcla que presentó mayor resistencia a la erosión fue el diseño 1, aquel constituido por 6% de emulsión y por 0% de cemento. Los diseños con mayor cantidad de cementante (6% de emulsión y 1.0 y 1.5% de cemento), fueron los que presentaron mayores susceptibilidades a la erosión. Estos resultados se pueden explicar con base en la resistencia de los diferentes diseños. De acuerdo con los resultados de resistencia a la tensión indirecta reportados en la sección anterior, la mezcla con emulsión y sin cemento presentó los mayores valores de resistencia mecánica, mientras que las mezclas con 6% de emulsión y el máximo contenido de cemento presentaron los menores valores de resistencia. Resultados similares de la resistencia a la erosión para estos materiales fueron encontrados en los ensayos de mesa vibratoria. Detalles del análisis de estos resultados y las posibles explicaciones para éste fenómeno se presentan en la sección 7.5.8.
- Como era de esperarse, los materiales granulares estabilizados con cemento sí sufrieron, en todos los casos, erosión. La velocidad crítica de erosión disminuye a medida que la resistencia a la compresión en seco de la mezcla a los 7 días de curado cambia de 3.3 a 2.75 MPa (i.e., porcentaje de cemento de 7.5 y 6.1% de cemento respectivamente). La velocidad crítica de erosión observada fue la misma para los materiales con resistencia a la compresión en seco de 3.8 y 3.3 MPa (i.e., contenidos de cemento de 7.5 y 8.8%, respectivamente) después de 7 días de curado e igual a 35.38 m/s.





• Finalmente, los materiales granulares sufrieron altos niveles de erosión en todas las velocidades de ensayo consideradas. De hecho, para el último especimen ensayado de este material se decidió modificar las presiones de agua del ensayo a valores muy inferiores a los empleados para los otros materiales (i.e., 1, 2, 3 y 5 bar), ya que se observó que incluso para la presión mínima de ensayo de 5 bar, la muestra sufría muy altos niveles de erosión. Aun con estos bajos niveles de presión, todos los especímenes presentaron importantes niveles de erosión. Por lo tanto, el ensayo permite concluir que este es el material más erodable y que su velocidad crítica de iniciación de erosión es inferior a los 10.10 m/s.

Con base en la información presentada es posible realizar concluir la siguiente clasificación de la resistencia a la erosión (Tabla 7.37). Esta clasificación se basa en el rango de velocidades (velocidad crítica) a los cuales se presentan indicios de erosión a las diferentes velocidades de aplicación del agua consideradas. Esta información muestra que el material más resistente a la erosión producida por el chorro de agua a presión es la mezcla asfáltica mientras que el material menos resistente es la base granular sin estabilizar. Los resultados para las mezclas estabilizadas con cemento y para las mezclas estabilizadas con emulsión asfáltica y cemento son variados y consistentes con la resistencia mecánica de los materiales.





Material	Código	Código Composición		Clasifi- cación
Mezcla asfáltica	MD 20 diseño 1	Pocos finos	> 38.41	1
Mezcla asfáltica	MD 20 diseño 2	Granulometría Original	> 38.41	1
Granular con emulsión asfáltica y cemento	GEEA_A_Gr1 diseño 1	6% emulsión 0% cemento	36.9	2
Granular-cemento	GEC_B_Gr2 diseño 3	8.8% de cemento	35.38	3
Granular-cemento	GEC_B_Gr2 diseño 2	7.5% cemento	35.38	3
Granular con emulsión asfáltica y cemento	GEEA_A_Gr1 diseño 2	6% emulsión 0.5% cemento	33.87	4
Granular-cemento	GEC_B_Gr2 diseño 1	6.1% cemento	< 28.01	5
Granular con emulsión asfáltica y cemento	GEEA_A_Gr1 diseño 3	6% emulsión 1.0% cemento	< 20.37	6
Granular con emulsión asfáltica y cemento	GEEA_A_Gr1 diseño 4	6% emulsión 1.5% cemento	< 20.37	6
Base Granular	BG_A_Gr1	Sin agentes cementantes	<10.10	7

Tabla	7.37.	Clasificaciór	de la	erodabilidad	de lo	os materiales	mediante	chorro a	presión	de agua
		Ciabilite action		er o ano mana					presson	ac agaa

(\*) en la clasificación 1 representa al material que presentó la menor susceptibilidad a la erosión y 6 el material que presentó la mayor susceptibilidad a la erosión. Dos materiales con la misma clasificación representa un mismo comportamiento a la erosión.

#### 7.5.8. Resultados y Análisis de Resultados de los Ensayos de Erosión en Mesa Vibratoria

El anexo A.17 de este informe contiene los formatos correspondientes a los ensayos de laboratorio de erosión mediante mesa vibratoria para todos los materiales evaluados. En las siguientes secciones se presenta el resumen de resultados y su correspondiente análisis para cada uno de los materiales evaluados:





# • *Material granular estabilizado con cemento (GEC\_B\_Gr2)*

La Tabla 7.38 resume los valores encontrados durante del ensayo de erosión con mesa vibratoria para los especímenes de suelo cemento:

 Tabla 7.38. Resultados consolidados del ensayo de erosión mediante mesa vibratoria para el material granular estabilizado con cemento.

Matarial	Composición	Eana aiman	Pérdida porcentual de masa (%)				
Wateria	Composition	Espe-cimen	50 Hz	80 Hz	100 Hz		
		1	3.05	1.43	2.10		
	6.13% cemento	2	8.79	14.92	19.03		
		3	0.15	45.47*			
		Promedio	4.0	8.2	10.6		
	7.53% cemento	1	0.08	1.31	3.57		
Base granular		2	0.33	7.48	8.11		
cemento		3	4.86	3.28	3.50		
		Promedio	1.8	4.0	5.1		
	8.8% cemento	1	0.10	0.19	0.15		
		2	0.17	0.33	0.11		
		3	0.13	0.52	1.00		
		Promedio	0.15	0.20	0.55		

\* El especimen 2 del primer diseño se desintegró en el segundo ciclo de carga. Los resultados de pérdida de masa para este especimen a esta frecuencia se consideran fuera de los rangos reales y no fueron incluidos en el análisis.

Las Figuras 7.57 a 7.59 muestran las pérdidas de material para los tres diseños (6.1, 7.5 y 8.8% de cemento) para las tres diferentes condiciones diferentes del ensayo (frecuencias de 50, 80 y 100 Hz):







**Figura 7.57.** Porcentaje de pérdida de masa para la mezcla GEC\_B\_Gr2 con 6% de cemento (nota: el especimen 2 no se incluyó porque se desintegro a 80Hz y no se considera representativo)



Figura 7.58. Porcentaje de pérdida de masa para la mezcla GEC\_B\_Gr2 con 7.5% de cemento







Figura 7.59 Porcentaje de pérdida de masa para la mezcla GEC\_B\_Gr2 con 8.8% de cemento

Una observación importante de la Tabla 7.38 y de las Figuras 7.57 a 7.59 es que, en términos generales, existe una dispersión importante entre los resultados de porcentaje de pérdida de material obtenidos para los distintos especímenes correspondientes a un diseño específico de mezcla. La Figura 7.60 resume estas observaciones. De esta figura se concluye que, en la mayoría de los casos, la dispersión de los resultados de pérdida de masa—expresados en función de su coeficiente de variabilidad (COV)—disminuye considerablemente con el aumento del porcentaje de cemento (i.e., la única excepción notable es el aumento en el COV para el ensayo a 50Hz de las mezclas con 6.1 y 7.5% de cemento). Este resultado se puede explicar al considerar que un aumento en la cantidad de material cementante dentro de la mezcla disminuye la incertidumbre en el desempeño del material ante la aplicación de carga cíclica. En otras palabras, mayor adición de material cementante al material granular produce estructuras internas más homogéneas, las cuales disminuyen la incertidumbre (y en consecuencia la dispersión) relacionada con el inicio y desarrollo de procesos de fractura y pérdida de material por socavación al interior de los diferentes especímenes. Esta falta de homogeneidad e incertidumbre en el desempeño de los especímenes explica, por ejemplo, que el segundo especimen del diseño





con menor resistencia (6% de cemento) se haya desintegrado durante el segundo ciclo de aplicación de carga, lo cual no ocurrió en ninguno de los otros especímenes. Por otra parte, es importante mencionar que aunque se observa una relación directa entre la disminución de la variabilidad de resultados con el aumento de material cementante, no se observa una tendencia clara entre la dispersión de los datos y la frecuencia de aplicación de carga.



Figura 7.60 Coeficiente de variabilidad (COV) de los resultados de porcentaje de pérdida de masa para los diferentes diseños de mezclas y las diferentes frecuencias empleadas en el ensayo.

Por su parte, las Figuras 7.61 a 7.63 muestran el promedio de pérdida de masa para los tres diseños de material (6.1, 7.5 y 8.8% de cemento) y la Figura 7.64 compara estos resultados entre los diferentes diseños.







Figura 7.61. Porcentaje promedio de pérdida de masa para la mezcla GEC\_B\_Gr2 con 6.1% de cemento en función de la frecuencia aplicada en cada ciclo



**Figura 7.62.** Porcentaje promedio de pérdida de masa para la mezcla GEC\_B\_Gr2 con 7.53% de cemento en función de la frecuencia aplicada en cada ciclo







Figura 7.63. Porcentaje promedio de pérdida de masa para la mezcla GEC\_B\_Gr2 con 8.8% de cemento en función de la frecuencia aplicada en cada ciclo



Figura 7.64. Porcentaje promedio de pérdida de masa para los tres tipos de mezcla GEC\_B\_Gr2 en función de la frecuencia aplicada en cada ciclo





Con base en la información presentada se pueden extraer las siguientes observaciones:

- Para un diseño de material granular-cemento específico existe una relación proporcional entre el porcentaje de material perdido por efectos de erosión y la magnitud de la frecuencia aplicada al material. Este resultado es esperable debido a que mayores frecuencias de aplicación de carga están relacionadas con mayores velocidades de expulsión de agua en la base del especimen. En promedio, para todos los diseños (6.1 y 7.5 y 8.8% de cemento) se observó un aumento en la pérdida de masa de entre el 200% y el 220% cuando la frecuencia del ensayo se aumentó de 50 a 80 Hz. Para los diseños con 6.1 y 7.5% de reportó un aumento promedio del 130% en el porcentaje de pérdida de material cuando la frecuencia del ensayo pasó de 80 a 100 Hz. Para la muestra con 8.8% dicho aumento alcanzó el 250%.
- Por otra parte, la comparación entre los diferentes diseños muestran que, para cualquier frecuencia de aplicación de carga, el aumento en la cantidad de cementante o de la resistencia de la muestra se relaciona con una disminución en la cantidad de material perdido durante los 20,000 ciclos que dura cada etapa del ensayo. En la sección 7.4 se explicaron las metodologías de diseño de las diferentes mezclas y se demostró que los tres porcentajes de cemento seleccionados satisfacían los rangos de resistencia de los materiales exigidos por el contrato. Estos datos fueron empleados para construir la gráfica de la Figura 7.65, en la cual se muestra la relación entre la resistencia de las mezclas de suelo cemento y el porcentaje de pérdida del material para cada una de las frecuencias empleadas en el ensayo. Esta figura permite concluir que existe una relación inversamente proporcional entre el aumento en la resistencia del material y la disminución en la cantidad de pérdida de material. Es decir, existe una relación directa entre el aumento en la resistencia mecánica de la mezcla y la resistencia a desarrollar procesos de erosión. La figura muestra además que las diferencias entre las pérdidas del material se vuelven menos dependientes de la frecuencia de aplicación de carga (i.e., velocidad de expulsión del agua) a medida en que la resistencia del material aumenta. En otras palabras, las diferentes gráficas tienden a converger a altas resistencias de la mezcla.







Figura 7.65. Relación entre la resistencia de la mezcla (en términos de la resistencia a la compresión después de 7 días de curado) y el porcentaje de pérdida de material por erosión

La Figura 7.66 muestra el resultado final de algunos especímenes que contenían diferentes porcentajes de cemento. En esta fotografía se puede observar la relación proporcional entre la resistencia (o cantidad de cementante) de las mezclas y la pérdida de material.



Figura 7.66. Estado final de las mezclas para especímenes con diferentes contenidos de cemento a) diseño 1, b) diseño 2 y c) diseño 3.





Finalmente, vale la pena recordar que las frecuencias escogidas para la ejecución de los ensayos fueron seleccionadas para que generaran velocidades de expulsión del agua entre la base inferior del especimen de ensayo similares a aquellas reportadas en la literatura en la base de las losas de concreto de pavimento rígidos reales sometidos a fenómenos de bombeo. Relacionar las pérdidas de material para diferentes velocidades de expulsión de agua es importante ya que esto permite tener una estimación de las pérdidas reales de estos materiales en campo. La Figura 7.66 presenta la relación entre el porcentaje de pérdida del material y las velocidades de expulsión del agua para las tres mezclas consideradas. Las velocidades de expulsión fueron calculadas empleando las ecuaciones 7.91 a 7.93 presentadas con anterioridad en este informe. Esta figura es acorde con la teoría y muestra que existe una relación directa entre el aumento de la velocidad de expulsión del agua en campo y el aumento en la pérdida de material por erosión. Adicionalmente, esta figura muestra el rango típico de velocidades que se pueden esperar en campo y sugiere que el efecto de erosión que puede causar la velocidad de expulsión del agua que se puede presentar en la interfase entre las placas de concreto y la base del pavimento es más severo cuando la resistencia a la compresión del material es menor. Esta observación se puede confirmar al calcular las pendientes de las tres curvas mostradas en la Figura 7.67. Para el caso del material con 6.1% de cemento la pendiente de la curva es de  $5.3 \times 10^{-1}$ . Para el material con 7.5% de cemento esta pendiente es de  $2.2*10^{-1}$ . Finalmente, para el caso del material con 8.8% de cemento esta pendiente tiene un valor de  $3 \times 10^{-2}$ . En todos los casos estas pendientes indican el aumento del porcentaje de pérdida de material por erosión ante un aumento marginal en la velocidad de expulsión del agua (i.e. 1m/s). Mientras que un aumento en 1m/s en la velocidad de expulsión de agua puede causar un aumento en el porcentaje de pérdida de material del 0.5% en la mezcla con menor resistencia a la compresión, ese mismo aumento en la velocidad sólo producirá un aumento del 0.03% para el caso de la mezcla con mayor resistencia a la compresión.







Figura 7.67. Relación entre el porcentaje de pérdida del material por efecto del bombeo y las velocidades de expulsión de agua esperadas en campo.





# • Mezclas estabilizadas con emulsión asfáltica y cemento (GEEA\_A\_Gr1)

La Tabla 7.39 resume los valores encontrados durante del ensayo de erosión con mesa vibratoria para los especímenes de suelo cemento:

 Tabla 7.39. Resultados consolidados del ensayo de erosión mediante mesa vibratoria para el material granular

 estabilizado con emulsión asfáltica y cemento

Motorial	Composición	Egnadimon	Pérdida porcentual de masa (%)				
Material	Composition	Especimen	50 Hz	80 Hz	100 Hz		
		1	0.27	0.73	0.9		
	6% emulsión +	2	0.10	0.23	2.3		
	0.0% cemento	3	0.30	0.19	1.0		
		Promedio	0.22	0.38	1.4		
		1	0.21	0.86	1.88		
	6% emulsión + 0.5% cemento	2	0.29	2.79	2.66		
Dece menulor		3	0.27	2.80	5.57		
estabilizada con		Promedio	0.26	2.15	3.37		
emulsión y	6% emulsión + 1.0% cemento	1	0.11	1.25	4.81		
cemento		2	0.24	1.69	11.45*		
		3	0.09	1.36	2.41		
		Promedio	0.15	1.44	3.61		
	6% emulsión + 1.5% cemento	1	0.05	4.37	5.28		
		2	1.79	5.53	5.86		
		3	0.87	3.57	4.53		
		Promedio	0.90	4.49	5.22		

\* Los resultados de pérdida de masa para el especimen 2 del tercer diseño a una frecuencia de 100Hz se consideran fuera de los rangos reales y no fueron incluidos en el análisis.





Las figuras 7.68 a 7.69 muestran las pérdidas de material para los cuatro diseños (6% de emulsión asfáltica y 0.0, 0.5, 1.0 y 1.5% de cemento) correspondientes a las tres diferentes condiciones diferentes del ensayo (frecuencias de 50, 80 y 100 Hz):



Figura 7.68. Porcentaje promedio de pérdida de masa para el diseño 1: 6% emulsión y 0.0% de cemento



Figura 7.69. Porcentaje promedio de pérdida de masa para el diseño 2: 6% emulsión y 0.5% de cemento







**Figura 7.70.** Porcentaje promedio de pérdida de masa para el diseño 3: 6% emulsión y 1.0% de cemento. Nota: el resultado para 100 Hz del especimen 2 (señalado mediante el círculo) se considera un valor *outlayer* (fuera del rango aceptable) y no será considerado en los cálculos subsiguientes



Figura 7.71. Porcentaje promedio de pérdida de masa para el diseño 4: 6% emulsión y 1.5% de cemento





De forma similar a los que se observó en el caso de las mezclas estabilizadas con cemento, en este caso también se constata una dispersión importante entre los resultados de porcentaje de pérdida de materiales obtenidos para los distintos especímenes correspondientes a un diseño específico de mezcla. La Figura 7.72 resume tales resultados en términos del coeficiente de variación (COV) del porcentaje de material perdido.



**Figura 7.72.** Coeficiente de variabilidad (COV) de los resultados de porcentaje de pérdida de masa para los diferentes diseños de mezclas de granular con emulsión-cemento y las diferentes frecuencias empleadas en el ensayo

De la información presentada en la Figura 7.72 se puede observar que para las frecuencias de ensayo de 80 y 100 Hz, los datos muestran una tendencia similar a la observada en las mezclas de granular-cemento, en donde se evidencia que la dispersión de los datos tiende a disminuir con el aumento de la resistencia de los materiales (i.e., aumento en la cantidad de materiales cementantes). En particular, para la frecuencia intermedia de ensayo —80Hz—se observa una disminución gradual en la dispersión de los datos; el COV de los resultados disminuye en casi un 72% cuando la cantidad de cemento de las mezclas pasa del 0 al 1.5%,





respectivamente. La tendencia de disminución en la dispersión en función del aumento en la resistencia de la mezcla, sin embargo, no se reporta en los resultados de los ensayos ejecutados a una frecuencia de 50 Hz. En este caso, la dispersión de los datos muestra una tendencia al aumento de la dispersión de los resultados entre especímenes para las mezclas con mayor cantidad de cementante. Este resultado no es fácil de interpretar y puede ser el resultado de estructuras internas poco homogéneas de los especímenes o de procesos de fractura poco comunes debido a la baja aceleración de carga aplicada al especimen.

Las Figuras 7.73 a 7.76, por su parte, muestran el promedio de pérdida de masa para los cuatro diseños de mezcla (6% de emulsión asfáltica y 0.0, 0.5, 1.0 y 1.5% de cemento) y la Figura 7.77 compara estos resultados entre los diferentes diseños.



**Figura 7.73.** Porcentaje promedio de pérdida de masa para el diseño 1 de la mezcla GEEA\_A\_Gr1 con 6% emulsión y 0% de cemento en función de la frecuencia aplicada en cada ciclo







**Figura 7.74.** Porcentaje promedio de pérdida de masa para el diseño 2 de la mezcla GEEA\_A\_Gr1 con 6% emulsión y 0.5% de cemento en función de la frecuencia aplicada en cada ciclo



**Figura 7.75.** Porcentaje promedio de pérdida de masa para el diseño 3 de la mezcla GEEA\_A\_Gr1 con 6% emulsión y 1.0% de cemento en función de la frecuencia aplicada en cada ciclo







Figura 7.76 Porcentaje promedio de pérdida de masa para el diseño 4 de la mezcla GEEA\_A\_Gr1 con 6% emulsión y 1.5% de cemento en función de la frecuencia aplicada en cada ciclo



Figura 7.77 Porcentaje promedio de pérdida de masa para los cuatro diseños de la mezcla GEEA\_A\_Gr1 en función de la frecuencia aplicada en cada ciclo





La Figura 7.78 muestra el estado final de un espécimen correspondiente a cada uno de los diseños evaluados. Esta figura permite corroborar que la pérdida de material para estas mezclas es considerable.



**Figura 7.78.** Estado final de las mezclas para especímenes con diferentes contenidos de cemento y un mismo contenido de emulsión asfáltica a) diseño 1, b) diseño 2, c) diseño 3 y d) diseño 4.

Las siguientes observaciones y conclusiones se pueden extraer de las figuras anteriores:

• Sin excepción, para cada una de las mezclas de emulsión asfáltica y cemento se observa una relación directa entre el aumento de la frecuencia de ensayo y la pérdida de material. Sin embargo, las relaciones a las que estas cantidades aumentan en función de las frecuencias de ensayo cambian significativamente entre las diferentes mezclas. Por ejemplo, mientras que la pérdida de material aumentó 1.8 veces para la mezcla con menor resistencia (i.e., 6% emulsión y 0% cemento) cuando la frecuencia del ensayo subió de 50 a 80 Hz, este aumento fue 8.2, 9.6 y 4.5 veces para los diseños de mezclas con 0.5, 1.0 y 1.5% de cemento, respectivamente. De forma similar, mientras que la pérdida de material aumentó en 3.7 veces cuando la frecuencia de ensayo se aumentó de 80 a 100Hz para la mezcla que tenía 6% de emulsión y 0% de cemento, el aumento para las muestras que contenían 0.5, 1.0 y 1.5% de cemento correspondiente al mismo cambio de frecuencias de ensayo fue de 1.5, 2.5 y 1.1 veces, respectivamente.





A diferencia de lo reportado para los materiales granulares estabilizados con cemento, en esta oportunidad se observa que en la mayoría de los casos no existe una relación de proporcionalidad entre la resistencia a la erosión del material y la cantidad de material cementante y llenante (emulsión y cemento). En otras palabras, no necesariamente las mezclas con mayores contenidos de emulsión y cemento presentan menores pérdidas porcentuales de material por erosión. Aunque las diferencias entre el peso perdido de material durante los ensayos para las mezclas con 0.5 y 1.0% de contenido de cemento y 6% de emulsión no son significativas, estas diferencias sí son significativas cuando se comparan los valores de pérdida de masa para las mezclas que contienen el mínimo y el máximo porcentaje de cemento (0% y 1.5%, respectivamente) con los valores obtenidos para todas las demás mezclas. Estos resultados se pueden explicar a la luz de las resistencias mecánicas de cada tipo de mezcla. La Figura 7.79 muestra la relación entre la resistencia a tensión indirecta de probetas en condición seca de cada una de las 4 mezclas y el correspondiente porcentaje de pérdida de masa para las diferentes frecuencias evaluadas. En esta figura también se señalan los valores de resistencia que corresponden a cada uno de los diseños de las mezclas estabilizadas. Se puede observar que la mezcla con emulsión asfáltica que no se estabilizó con cemento (diseño 1) presenta una mayor resistencia en comparación con todas las mezclas que incluyeron cemento (diseños 2, 3 y 4). De hecho, se observa que la mezcla que contiene 6% de emulsión y el máximo contenido de cemento, i.e. 1.5%, es la mezcla con la menor resistencia. Los resultados consolidados en la Figura 7.79 son significativos y demuestran que sí existe una relación directa entre resistencia mecánica y la resistencia del material a la erodabilidad a cualquier frecuencia de ensayo (i.e. para todos los rangos de posibles velocidades de expulsión de agua). Es decir, los resultados sugieren que, en términos de la resistencia a la erosión, las mezclas estabilizadas sólo con emulsión asfáltica—aquellas de mayor resistencia—se comportan mejor que aquellas mezclas que son estabilizadas simultáneamente con emulsión y altos contenidos de cemento-aquellas de menor resistencia. La baja resistencia mecánica de las mezclas que fueron estabilizadas simultáneamente con emulsión y cemento se puede deber a las reacciones internas que se generan entre estos materiales y las diferentes fases constitutivas de la mezcla. Estas 168





reacciones determinan en gran medida la estabilidad final de la mezcla, la cual se relaciona no sólo con la resistencia general del compuesto, sino también con la calidad de la adhesión que se genera entre los cementantes y los agregados y con la resistencia de estos cementantes a ser afectados por la acción combinada de fuerza mecánica y agua. Es importante recordar que estas mezclas fueron diseñadas al óptimo de emulsión asfáltica sin presencia de cemento y posteriormente el cemento fue añadido en cuatro proporciones fijas y arbitrarias. Vale la pena aclarar, sin embargo, que estos resultados son sólo válidos para la emulsión asfáltica CRL 1h empleada en este proyecto. Es probable que otro tipo de emulsiones asfálticas provean mejor resistencia a la erosión de las mezclas cuando éstas incluyen cantidades adicionales de cemento.



Figura 7.80. Porcentaje promedio de pérdida de masa para los cuatro diseños de la mezcla GEEA\_A\_Gr1 en función de la resistencia a la tensión indirecta en estado seco del material

Finalmente, la Figura 7.81 presenta las relaciones entre las velocidades de expulsión de agua obtenidas mediante la aplicación de las ecuaciones 7.91. a 7.93, con base en las mediciones del peso del especimen y de las aceleraciones reportadas por los sensores instalados en el molde y en





la probeta de ensayo. Esta Figura permite realizar dos observaciones importantes: 1) como era de esperarse, para una mezcla específica existe una relación de proporcionalidad entre el aumento de la velocidad de expulsión y la pérdida de masa de material por erosión, y 2) la información en esta figura confirma las observaciones realizadas previamente en donde se observa que mayores contenidos de cemento se relacionan con mayores pérdidas por erosión. Con respecto al primer punto vale la pena aclarar que mientras que la relación entre la velocidad de expulsión de agua y la pérdida de masa es directamente proporcional en el caso de la mezcla con 6% de emulsión asfáltica que no contiene cemento (0% cemento), esta relación presenta una tendencia creciente, pero no lineal, para todas las mezclas que contienen cemento. En efecto, para todas las mezclas con algún contenido de cemento se observa un rápido crecimiento en la pérdida de material para velocidades entre 0 y aproximadamente 5 m/s. A partir de este valor la pendiente de las curvas disminuye, indicando que para velocidades mayores de 5 m/s el aumento de la pérdida de masa debido al aumento marginal de la velocidad (i.e., de 1 m/s) es menor que para velocidades inferiores a este valor.



Figura 7.81. Porcentaje promedio de pérdida de masa para los cuatro diseños de la mezcla GEEA\_A\_Gr1 en función de la resistencia a la tensión indirecta del material





# • Mezclas asfálticas densas en caliente (MD 20)

La Tabla 7.40 resume los valores encontrados durante del ensayo de erosión con mesa vibratoria para los especímenes de suelo cemento:

Tabla 7.40. Resultados consolidados del ensayo de erosión mediante mesa vibratoria para las mezclas asfálticas en

caliente

Matarial	Composición	Egna simon	Pérdida p	Pérdida porcentual de masa (%)			
Material	Composition	Espe-cimen	50 Hz	80 Hz	100 Hz		
		1	0.000	0.017	0.021		
	MD 20 original	2	0.009	0.015	0.018		
		3	0.08	0.014	0.017		
Mezclas		Prom	0.006	0.015	0.019		
en caliente		1	0.008	0.013	0.016		
	MD 20 pocos	2	0.005	0.009	0.009		
	finos	3	0.016	0.011	0.010		
		Prom	0.006	0.010	0.012		

Las Figuras 7.82 y 7.83 muestran las pérdidas de material para los dos diseños de mezcla asfáltica MD 20 (diseño con granulometría normal y con bajo contenido de finos) correspondientes a las tres diferentes condiciones diferentes del ensayo (frecuencias de 50, 80 y 100 Hz):







Figura 7.82. Porcentaje promedio de pérdida de masa para el diseño 1 de la mezcla MD20 (granulometría normal)



Figura 7.83. Porcentaje promedio de pérdida de masa para el diseño 2 de la mezcla MD20 (baja cantidad de finos)





La Figura 7.84 presenta el coeficiente de variabilidad (COV) de la pérdida de masa para las dos muestras.



Figura 7.84. Coeficiente de Variabilidad (COV) de los valores de pérdida de masa para los dos diseños de mezclas asfálticas en caliente tipo MD 20

Las primeras dos observaciones que se pueden extraer de los datos consignados en la Tabla 7.40 y en las figuras 7.82 y 7.84 son que: 1) los rangos de valores de pérdida de masa por erosión para las mezclas asfálticas son sustancialmente más bajos que aquellos reportados para las mezclas estabilizadas con cemento o con emulsión asfáltica y cemento; de hecho, estos valores son siempre inferiores al 0.1%, lo cual permite concluir que las mezclas asfálticas **no** son susceptibles a la erosión, y 2) la variabilidad o dispersión de los datos correspondientes a los diferentes especímenes de un mismo material también son sustancialmente inferiores a aquellos reportados para las mezclas para los materiales estabilizados descritos en las secciones anteriores. Con respecto a





la segunda observación, la figura 7.83 sugiere además que la dispersión del primer diseño de la mezclas asfáltica es inferior a aquel reportado para la segunda muestra. Como se mencionó en secciones anteriores, la diferencia entre las dos mezclas asfálticas es la cantidad de finos. Los resultados obtenidos del laboratorio sugieren que los datos de erodabilidad determinados mediante el ensayo de mesa vibratoria son menos dispersos en la mezcla que posee menor cantidad de material granular fino. Con respecto a la primera observación, las Figuras 7.85 y 2.7.3.5 presentan el porcentaje de pérdida de masa promedio obtenido para cada una las muestras y la Figura 7.86 presenta una comparación entre los dos diseños.



Figura 7.85. Porcentaje promedio de pérdida de masa para el diseño 1 de la mezcla MD 20







Figura 7.85. Porcentaje promedio de pérdida de masa para el diseño 2 de la mezcla MD 20



Figura 7.86. Comparación del porcentaje de promedio de pérdida de masa para los dos diseños de la mezcla asfáltica MD 20





Un análisis de las Figuras 7.84 a 7.86 permite obtener las siguientes conclusiones:

- Los bajos valores de pérdida de erosión permiten concluir que las mezclas asfálticas son, prácticamente, no erodables.
- Si se realiza un análisis similar al efectuado para los materiales estabilizados con cemento y con emulsión asfáltica y cemento, se puede verificar que para cada una de las mezclas asfálticas evaluadas existe una relación directa entre el aumento de la frecuencia de ensayo y la pérdida de material. Para el primer diseño tipo MD-20, la pérdida de material aumentó 2.5 veces cuando la frecuencia pasó de 50 a 80 Hz y en 1.26 veces cuando la frecuencia pasó de 80 a 100 Hz. Para el segundo diseño, la pérdida de material aumentó 1.67 veces cuando la frecuencia pasó de 50 a 80 Hz y en 1.2 veces cuando la frecuencia pasó de 80 a 100 Hz.
- Aunque para la frecuencia d ensayo de 50 Hz los resultados promedios de pérdida de masa de las dos mezclas asfálticas es nominalmente el mismo, para las frecuencias de 80 y 100 Hz se observa que los valores de pérdida de masa del diseño 1 son 46 y 52% superiores que los valores de pérdida de masa del diseño 2. En otras palabras, los datos sugieren que la disminución en la cantidad de agregados finos en la mezcla asfáltica está relacionada con una menor susceptibilidad del material a la erosión. Este resultado es muy interesante ya que permite afirmar la proporción de los agregados finos en la mezcla juega un rol importante no sólo en la determinación de propiedades básicas fundamentales de la mezcla, como se describe ampliamente en la bibliografía científica, sino también en su resistencia a la pérdida de masa por erosión. Sin embargo, aun para la primera mezcla la pérdida de material es nominalmente cero, lo que permite concluir que a pesar de las diferencias detectadas, las dos mezclas puedan ser clasificadas como no erodables.





Aun cuando los valores de erosión son inferiores al 0.1% en todos los casos, se decidió analizar la relación entre las velocidades de expulsión de agua en campo y las pérdidas porcentuales de material (Figura 7.87). Esta figura constata que bajo los valores típicos de velocidades de expulsión de agua en campo reportados en la literatura, las mezclas asfálticas no presentarán ninguna pérdida significativa de material por erosión.



Figura 7.87. Pérdidas de material por erosión vs. velocidades de expulsión de agua




## • Comparación de los resultados obtenidos para los diferentes materiales

La Figura 7.88 presenta una comparación entre los valores de porcentaje de pérdida de material para las diferentes mezclas evaluadas en función de las diferentes frecuencias del ensayo y la figura 7.89 presenta las tendencias entre las velocidades de expulsión de agua y las pérdidas de material para cada tipo de mezcla.



Figura 7.88. Comparación de pérdidas de material por erosión en función de la frecuencia de ensayo para las diferentes mezclas estabilizados evaluadas en el proyecto (nota: las mezclas asfálticas no aparecen en la gráfica por la escala, i.e. valores de pérdida de masa inferiores a 0.1%)



Figura 7.89. Comparación de las pérdidas de material por erosión en función de las velocidades de expulsión de agua para las diferentes mezclas estabilizadas evaluadas en el proyecto

12.0 14.0

Velocidad de expulsión del agua (m/s)

16.0

18.0

20.0

22.0

24.0

26.0

1% 0%

0.0

2.0

4.0

6.0

8.0

10.0

Los resultados de las Figuras 7.88 y 7.89 permiten visualizar e identificar los materiales más erodables y los materiales menos erodables. Indiscutiblemente, las mezclas asfálticas en caliente tipo MD 20 son las que tienen mayor resistencia a la erosión. Por su parte, las mezclas estabilizadas con el menor porcentaje de cemento son las que presentan la mayor susceptibilidad a la erosión. La Tabla 7.41 resume estos resultados y presenta una clasificación de los materiales en términos de su susceptibilidad a la erodabilidad en donde 1 simboliza la mezcla menos erodable y 9 la mezcla más erodable. Esta tabla también presenta los rangos de pérdidas de material típicos que pueden ocurrir en campo (i.e., aquellas correspondientes a velocidades de expulsión de agua entre 2 y 7 m/s).





Tabla 7.41. Clasificación de la susceptibilidad de los materiales a la erosión y valores típicos de pérdida de mas	sa
para las velocidades de expulsión de agua esperadas en campo (1: menos erodable y 9: más erodable)	

Material	Código	Composición	Rango pérdida material (%)	Clasifi- cación
Mezcla asfáltica	MD 20 diseño 2	Granulometría original	0.006-0.012	1
Mezcla asfáltica	MD 20 diseño 1	Pocos finos	0.006-0.020	2
Granular-cemento	GEC_B_Gr2 diseño 3	8.8% de cemento	0.3-0.5	3
Granular con emulsión asfáltica y cemento	GEEA_A_Gr1 diseño 1	6% emulsión 0% cemento	0.3-0.7	4
Granular con emulsión asfáltica y cemento	GEEA_A_Gr1 diseño 3	6% emulsión 1.0% cemento	1.0-2.4	5
Granular con emulsión asfáltica y cemento	GEEA_A_Gr1 diseño 2	6% emulsión 0.5% cemento	2.0-2.8	6
Granular-cemento	GEC_B_Gr2 diseño 2	7.5% cemento	3.0-4.5	7
Granular con emulsión asfáltica y cemento	GEEA_A_Gr1 diseño 4	6% emulsión 1.5% cemento	3.0-5.0	8
Granular-cemento	GEC_B_Gr2 diseño 1	6.1% cemento	4.5-8.0	9

Recapitulando la información presentada previamente, durante la ejecución de los ensayos también se instalaron dos sensores de presión de poros. Uno de los sensores estaba ubicado en la base del molde y el segundo en una pared lateral del molde. Los resultados de los valores de presión para cada uno de los materiales y ensayos se pueden encontrar en los formatos de laboratorio anexos. En todos los ensayos las presiones registrada por el sensor instalado en la pared lateral del molde estuvieron en el rango de 0.1 y 0.5 bar, independientemente del material ensayado. Las presiones de poros reportadas en la base del molde son siempre superiores a estos valores y sus rangos típicos se resumen en la Tabla 7.42. De esta tabla se puede concluir que no existen grandes diferencias entre las presiones detectadas entre diferentes materiales ni entre las





diferentes frecuencias de ensayo y que el rango típico para todos los materiales varía entre 0.2 y 0.8 bares. La información reportada en la Tabla 7.42 puede ser eficientemente empleada en modelos analíticos hidráulicos que representen la dinámica de los especímenes durante el ensayo.

Material	Composición	Rango típico de presiones en la base del molde (bar)
	6.13% cemento	0.20 - 0.60
Base granular estabilizada	7.53% cemento	0.20 - 0.9
	8.8% cemento	0.25 - 1.00
	6% emulsión 0.0% cemento	0.30 - 0.55
Base granular estabilizada	6% emulsión + 0.5% cemento	0.30 - 0.55
con emulsión y cemento	6% emulsión + 1.0% cemento	0.25 - 0.60
	6% emulsión + 1.5% cemento	0.40 - 0.85
Mezclas asfálticas densas	MD 20 original	0.45 - 0.80
en caliente	MD 20 pocos finos	0.25 - 0.60

Tabla 7.42 Rangos típicos de presiones de poros durante los ensayos de erosión en mesa vibratoria

## 7.5.9. Tablas Resumen de Resultados: resultados de los ensayos de erosión

La Tabla 7.43 resume los resultados de los ensayos de erosión mediante chorro de agua. Por su parte, la Tabla 7.44 resume los resultados promedio de pérdida de material y de velocidad de expulsión horizontal de agua correspondientes a los ensayos de erosión mediante mesa vibratoria para cada uno de los materiales y de los niveles de aceleración aplicados. Finalmente, la Tabla 7.45 resume la clasificación de resistencia a la erodabilidad de los materiales evaluados.





Material	Código	Composición	Velocidad crítica de erosión (m/s)
Base Granular	BG_A-Gr1	-	< 10.10
		6% emulsión 0% cemento	36.90
Granular con emulsión asfáltica y cemento	GEEA_A_Gr1	6% emulsión 0.5% cemento	33.87
		1.0% cemento	< 20.37
		1.5% cemento	< 20.37
		6.1%	< 28.01
Granular-cemento	GEC_B_Gr2	7.53%	35.38
		8.8%	35.38
Mezclas asfálticas densas en caliente	MD 20	Dos diseños	> 38.41

#### Tabla 7.43 Resumen ensayos de erosión mediante chorro de agua





		Rango	% Pérdida de Masa						
Matarial	Composi-	pérdida	50 Hz		80 1	80 Hz		100 Hz	
Wateria	ción	material (%) *	Prom	COV (%)	Prom	COV (%)	Prom	COV (%)	
Granular-	6.1% cemento	4.5-8.0	4.0	110	8.2	117	10.6	113	
cemento GEC_B_Gr2	7.5% cemento	3.0-4.5	1.8	153	4.0	78	5.1	52	
	8.8% de cemento	0.3-0.5	0.15	31	0.20	56	0.55	80	
Granular con emulsión asfáltica y cemento GEEA_A_Gr1	6% emulsión 0% cemento	0.3-0.7	0.22	49	0.38	79	1.40	56	
	6% emulsión 0.5% cemento	2.0-2.8	0.26	15	2.15	52	3.37	58	
	6% emulsión 1.0% cemento	1.0-2.4	0.15	58	1.44	16	3.61	47	
	6% emulsión 1.5% cemento	3.0-5.0	0.9	96	4.49	22	5.22	13	
Mezcla asfáltica	Pocos finos	0.006- 0.020	0.006	87	0.0015	10.1	0.0019	10.1	
MD 20	Granulometrí a original	0.006- 0.012	0.006	19	0.0010	20.0	0.0012	2.4	

#### Tabla 7.44 Resumen ensayos de erosión mediante mesa vibratoria

\* los valores de rango de pérdida de material corresponden a aquellos valores de pérdida determinados para velocidades de expulsión de agua entre 2 y 7 m/s (valores probables en campo).





Material	Código	Composición	Clasificación ensayo chorro de agua	Clasificación ensayo de mesa vibratoria
Mezclas asfálticas	MD 20	Original	1	2
densas en caliente	MD 20	Menos finos	1	1
Manalan		6% emulsión 0% cemento	2	4
Mezclas estabilizadas con emulsión y cemento	GEEA_A_Gr1	6% emulsión 0.5% cemento	4	6
		1.0% cemento	6	5
		1.5% cemento	6	8
Mezclas		6.1%	5	9
estabilizadas con cemento	GEC_B_Gr2	7.53%	3	7
		8.8%	3	3
Base Granular	BGA-Gr1		7	

<b>I abia</b> 7. <b>TO</b> . Resulted clisayos de crosion mediante mesa vioratori	Tabla 7.46.	Resumen e	ensayos de	erosión	mediante	mesa	vibratoria
---	-------------	-----------	------------	---------	----------	------	------------

Con base en los resultados de la Tabla 7.46 es importante resaltar la similitud y consistencia en la clasificación final de las muestras obtenidas mediante cada tipo de ensayo. Las siguientes observaciones son válidas para los dos tipos de ensayo y sintetizan los principales resultados de este trabajo:

- Para todos los tipos de mezclas se observó una relación directa entre la resistencia mecánica del material y la resistencia a la pérdida de material por erosión.
- El material más resistente a la pérdida de masa por erosión es la mezcla asfáltica. El material más susceptible a la pérdida de masa por erosión es la base granular sin estabilizar, seguida de la mezclas granular estabilizada con el menor contenido de cemento (i.e, 6.1%).
- Existe una relación de proporcionalidad entre las velocidades de expulsión de agua y las pérdidas de masa por erosión. Esta proporcionalidad es directa para los materiales estabilizados con cemento y para la mezcla estabilizada con emulsión (sin cemento).





A diferencia del método de ensayo de chorro a presión de agua, el método de mesa vibratoria empleado en el estudio está diseñado para simular de manera apropiada la hidráulica asociada con el fenómeno de bombeo en pavimentos de concreto en campo. Adicionalmente, los resultados obtenidos mediante estos ensayos pueden ser utilizados como datos de entrada en modelos analíticos para predecir las pérdidas de material que se pueden esperar a diferentes magnitudes de velocidades de expulsión de agua que pueden ocurrir en campo.

## 7.6. Etapa 7: Correlación de los Resultados de Pérdida por Erosión con las Variables de Potencial de Erosión y Consumo por Erosión

La etapa 7 del proyecto consiste en comparar los resultados experimentales obtenidos y analizados durante las etapas 5 y 6 del proyecto con respecto a los parámetros de erosión que emplean los métodos de diseño de pavimentos de concreto hidráulico AASHTO y PCA.

Al igual que todos los métodos de diseño de pavimentos, los métodos de PCA y AASHTO (1993) controlan daños de diversa naturaleza que se pueden desarrollar durante la estructura durante su vida de servicio. El principal modo de falla que la mayoría de métodos de diseño de pavimentos rígidos busca controlar es la fatiga de las placas de concreto por flexión en la base. Sin embargo, otros procesos de deterioro tales como el bombeo o erosión de la capa de base, o la pérdida de resistencia y fractura cerca a las juntas (denominado *joint faulting*), son también considerados de forma directa o indirecta en los diferentes métodos.

En cuanto al control de la erosión por bombeo—tema principal de estudio en este proyecto—varios autores señalan que no existe ningún modelo mecánico que integre simultáneamente los diversos factores que se encuentran involucrados con este proceso de deterioro. Dichos factores incluyen la velocidad de expulsión de agua en la base de la losa, la susceptibilidad a la erosión propia del material de base, la calidad de las obras de drenaje del proyecto, la magnitud y número de repeticiones de la carga aplicada al pavimento expresada en espectros de carga y la cantidad de deflexión en la base de las placas. Los métodos de diseño AASHTO y PCA involucran el efecto de la erosión de forma diferente, incluyendo en el proceso sólo algunos de los aspectos mencionados.





Es importante mencionar que el análisis que se desarrolla en este capítulo se limita a indagar y presentar algunos resultados sobre la metodología en que los métodos mencionados involucran el efecto de la erosión de la capa de base en relación con los diferentes materiales considerados como parte de este proyecto. Sin embargo, como se describirá en las siguientes subsecciones, la forma en la cual el efecto dañino de la erosión del material de base es considerado en estos métodos depende directamente de las condiciones específicas de servicio de un pavimento. En otras palabras, mientras que el objeto de este contrato consiste en determinar la susceptibilidad a la erosión por bombeo de distintos materiales que se pueden emplear como base de pavimentos de concreto independientemente de las condiciones específicas de servicio de la estructura, la manera en que los métodos de diseño involucran la erodabilidad de los materiales depende directamente de las características propias de un proyecto en particular (e.g., resistencia de la subrasante, espesor de la base, condiciones de tráfico, etc.). Esto significa que no es posible realizar una comparación directa entre los resultados reportados y analizados en las etapas 5 y 6 de este proyecto y los resultados presentados en esta sección, ya que la filosofía y el propósito del análisis es diferente en casa caso.

## 7.6.1. Método AASHTO

El método de diseño AASHTO involucra el potencial de pérdida de material de base por efectos de erosión mediante la reducción del módulo de reacción de la subrasante, k, en función del potencial de erosión del material. El módulo k constituye uno de los principales parámetros de entrada de diseño de este método y se define como el módulo compuesto que resulta de combinar las propiedades mecánicas de la subrasante (supuesta como un medio semi-infinito) con las características del material de base (i.e., módulo y espesor de la capa) y se expresa en unidades de presión sobre longitud (i.e., pci en el sistema de unidades inglés o Pa/m en el sistema SI). Este módulo se obtiene típicamente de ensayos estandarizados de placa, aunque el método provee un nomograma empírico para determinar valores de k a partir de un amplio rango de módulos de materiales de base y de espesores de esta capa (Figura 7.90). Al reducir el módulo k por efectos de la pérdida de soporte de la base por erosión, el método modifica los parámetros de





entrada de diseño mediante un incremento en la capacidad estructural que debe satisfacer la estructura. En otras palabras, las condiciones de resistencia estructural requeridas para pavimentos rígidos que incluyen bases poco erodables serán inferiores a aquellas requeridas para pavimentos con bases altamente susceptibles a la erosión.



Figura 7.90. Relación entre módulos elásticos de la subbase y módulos de reacción de la subrasante (Huang 1998)

El análisis desarrollado en este capítulo se limita a analizar la disminución del módulo de reacción de la subrasante por efectos potenciales de erosión para pavimentos constituidos por una subrasante específica y que incluyen los materiales de estudio de este contrato en diversos espesores de capas de base. Es importante mencionar, sin embargo, que el método AASHTO también ha analizado e incluido de forma indirecta la erodabilidad de la base en el control de





otros procesos de deterioro del pavimento, particularmente en el de desplazamiento relativo de juntas (*joint faulting*).

Las características del potencial de erosión de la base son considerados a través de un parámetro denominado *pérdida de soporte* o *LS*, por sus siglas en inglés (i.e., loss of support), el cual depende de la naturaleza del material y de sus resistencia. Los valores de *LS* varían de 0 a 3, en donde 0 representa una situación de contacto completo entre la losa de concreto y 3 representa una situación de poco contacto entre la losa de concreto y la capa de base. De hecho, valores de *LS* iguales a 3 suponen un área de 2.7 m por 2.2 metros en el borde de pavimento en el cual se ha perdido el contacto entre la losa y la capa de base. Valores de *LS* cercanos a 0 están, por lo tanto, relacionados con materiales de base muy poco erodables (o nominalmente no erodable), mientras que valores de *LS* cercanos a 3 simbolizan materiales de base muy susceptibles a la erosión. La Tabla 7.47 presenta los valores recomendados de *LS* para diferentes materiales. Es importante observar que *LS* no depende exclusivamente de la resistencia de un material, sino también de la naturaleza de sus componentes (e.g., tipo de estabilización)

Tabla 7.47.	Valores de pérdida	de erosión (LS) para	diferentes tipos de mat	eriales (Huang 1998)
-------------	--------------------	----------------------	-------------------------	----------------------

Tipo de Material	Rango de Módulos, E, (psi)	LS
Bases granulares tratadas con cemento	1*10 <sup>6</sup> a 2*10 <sup>6</sup>	0.0 a 1.0
Mezclas cemento-agregado	5*10 <sup>5</sup> a 1*10 <sup>6</sup>	0.0 a 1.0
Bases tratadas con asfalto	3.5*10 <sup>5</sup> a 1*10 <sup>6</sup>	0.0 a 1.0
Mezclas estabilizadas con productos bituminosos	4*10 <sup>4</sup> a 3*10 <sup>5</sup>	0.0 a 1.0
Materiales estabilizados con cal	2*10 <sup>4</sup> a 7*10 <sup>4</sup>	1.0 a 3.0
Materiales granulares sin estabilizar	$1.5*10^4$ a $4.5*10^3$	1.0 a 3.0
Materiales granulares finos o subrasantes naturales	$3*10^3$ a $4*10^4$	2.0 a 3.0

Una vez los valores de k y LS han sido determinados para cada material, es posible calcular el módulo reducido, denominado módulo equivalente o efectivo, que tiene en cuenta el potencial





de la pérdida de soporte. El método AASHTO provee un monograma para llevar a cabo estos cálculos. El valor de k efectivo en estos nomogramas fue obtenido tras garantizar que los esfuerzos máximos principales de la condición de contacto completo (*LS*=0) son iguales a aquellos generados en condiciones de contacto parcial (0<*LS*<3). La Figura 7.91 presenta dichas relaciones.



Figura 7.91 Módulo de reacción de la subrasante efectivo después de incluir el potencial de pérdida de soporte (Huang 1998)

El procedimiento descrito con anterioridad fue realizado para los 10 materiales considerados en este proyecto. La Tabla 7.48 lista los valores de *k* para los diferentes materiales, después de suponer una subrasante con un módulo de elasticidad de 50 MPa y espesores de base de 10, 15 y 20 cm. Estos valores fueron obtenidos mediante la Figura 7.90. Es importante mencionar que un espesor de 10 cm es el mínimo espesor considerado en la Figura 7.90. Naturalmente, algunos de los espesores de las capas evaluadas son muy altos para ciertos materiales de base, lo cual los hace no viables en proyectos reales. Sin embargo, el análisis se realizó para los mismos espesores de capa independientemente del material, con el objetivo de realizar un análisis comparativo entre dichos materiales.





## Tabla 7.48. Valores de módulo compuesto de reacción de la subrasante para una subrasante

con módulo de 50 MPa y diferentes espesores de la capa de base

		Médulo	k (pci)			
Material	Código	(psi)	Espesor de la base			
			20 cm	15 cm	10 cm	
Base Granular	BG_A_Gr1	4.2*10 <sup>4</sup>	440	300	180	
Granular con emulsión asfáltica y cemento	GEEA_A_Gr1 diseño 1	2.63*10 <sup>5</sup>	600	440	240	
Granular-cemento	GEC_B_Gr2 diseño 3	4.03*10 <sup>5</sup>	690	460	250	
Granular-cemento	GEC_B_Gr2 diseño 2	4.43*10 <sup>5</sup>	750	490	260	
Granular con emulsión asfáltica y cemento	GEEA_A_Gr1 diseño 2	3.29*10 <sup>5</sup>	690	450	250	
Granular-cemento	GEC_B_Gr2 diseño 1	2.94*10 <sup>5</sup>	680	420	240	
Granular con emulsión asfáltica y cemento	GEEA_A_Gr1 diseño 3	3.72*10 <sup>5</sup>	750	460	260	
Granular con emulsión asfáltica y cemento	GEEA_A_Gr1 diseño 4	3.59*10 <sup>5</sup>	670	400	230	
Mezcla asfáltica	MD 20 diseño 1	1.35*10 <sup>6</sup>	1110	611	444	
Mezcla asfáltica	MD 20 diseño 2	1.21*10 <sup>6</sup>	10000	550	400	

**Nota:** los valores de módulo para los materiales estabilizados con emulsión asfáltica y concreto asfáltico corresponden al módulo dinámico del material a una temperatura de 20°C (temperatura media anual de Bogotá) y a una frecuencia de 10 Hz (velocidad de vehículos de 60 kph)





Por su parte, la Tabla 7.49 lista los valores de pérdida de soporte o *LS* obtenidos para cada unos de los materiales. Estos valores fueron calculados con base en las recomendaciones presentadas en la Tabla 7.47, interpolando linealmente los valores de *LS* con base en los valores límite de los módulos especificados en dicha tabla.

Material	Código	Módulo (psi)	LS
Base Granular	BG_A_Gr1	$4.2*10^4$	1.20
Granular con emulsión asfáltica y cemento	GEEA_A_Gr1 diseño 1	2.63*10 <sup>5</sup>	1.50
Granular-cemento	GEC_B_Gr2 diseño 3	4.03*10 <sup>5</sup>	1.00
Granular-cemento	GEC_B_Gr2 diseño 2	4.43*10 <sup>5</sup>	1.10
Granular con emulsión asfáltica y cemento	GEEA_A_Gr1 diseño 2	3.29*10 <sup>5</sup>	0.13
Granular-cemento	GEC_B_Gr2 diseño 1	2.94*10 <sup>5</sup>	0.24
Granular con emulsión asfáltica y cemento	GEEA_A_Gr1 diseño 3	3.72*10 <sup>5</sup>	0.00
Granular con emulsión asfáltica y cemento	GEEA_A_Gr1 diseño 4	3.59*10 <sup>5</sup>	0.34
Mezcla asfáltica	MD 20 diseño 1	$1.35 \times 10^{6}$	0.00
Mezcla asfáltica	MD 20 diseño 2	$1.21*10^{6}$	0.00

Tabla 7.49	Valores	de pérdi	da de con	tacto, LS,	para los	materiales	evaluados
		1		/ /	1		





Con base en los valores de *LS* se calcularon los módulos efectivos de reacción corregidos por pérdidas potenciales de soporte. La Tabla 7.50 presenta dichos resultados:

 Tabla 7.50 Valores de módulo de reacción de la subrasante corregidos por efecto de potencial pérdida de soporte en la capa de base

		k (pci)				
Material	Código	Espesor de la base				
		20 cm	15 cm	10 cm		
Base Granular	BG_A_Gr1	100	69	45		
Granular con emulsión asfáltica y cemento	GEEA_A_Gr1 diseño 1	80	67	41		
Granular-cemento	GEC_B_Gr2 diseño 3	150	95	60		
Granular-cemento	GEC_B_Gr2 diseño 2	180	120	70		
Granular con emulsión asfáltica y cemento	GEEA_A_Gr1 diseño 2	600	365	210		
Granular-cemento	GEC_B_Gr2 diseño 1	560	300	180		
Granular con emulsión asfáltica y cemento	GEEA_A_Gr1 diseño 3	750	460	260		
Granular con emulsión asfáltica y cemento	GEEA_A_Gr1 diseño 4	400	250	165		
Mezcla asfáltica	MD 20 diseño 1	1110	611	444		
Mezcla asfáltica	MD 20 diseño 2	1000	550	400		





Las Figuras 7.92 a 7.95 presentan los valores de k, originales y corregidos, para tres valores de espesores de capas de base y para los diferentes tipos de materiales analizados.



Figura 7.92. Valores de módulo de reacción originales y corregidos para el material de base granular sin estabilizar



Figura 7.93. Valores de módulo de reacción originales y corregidos para los diferentes diseños de granular estabilizado con cemento







Figura 7.94. Valores de módulo de reacción originales y corregidos para los diferentes diseños de granular estabilizado con emulsión asfáltica y cemento



Figura 7.95. Valores de módulo de reacción originales y corregidos para las mezclas asfálticas densas en caliente





Con base en los valores originales y corregidos de *k*, se calculó el porcentaje de reducción del módulo de reacción efectivo por efecto del potencial de pérdida de soporte. La Figura 7.96 presenta estos resultados para los diferentes materiales:



**Figura 7.96.** Reducción porcentual en el valor de *k* debido a potenciales pérdida de soporte de las losas por erosión

La información presentada en la Figura 7.96 permite observar las diferencias en el efecto de erosión relacionadas con cada material. Con base en esta figura se puede concluir que:

- Los materiales que menos impactan la reducción en el módulo efectivo de reacción son las mezclas asfálticas y la mezcla con 6% de emulsión y 1.0% de cemento (las cuales no aparecen en la Figura ya que su % de reducción fue del 0%).
- En su orden, los siguientes materiales que menos impactan a la estructura por pérdidas estructurales debido a erosión son las mezclas estabilizadas con emulsión y cemento, las mezclas estabilizadas con cemento y la base granular sin estabilizar.
- En todos los casos, no se observa un importante impacto del espesor de la capa de base en el porcentaje de reducción del módulo efectivo de reacción. La máxima diferencia se reporta





para la mezcla estabilizada con 6% de emulsión asfáltica y 1.5% de cemento (GEEA\_A\_Gr1 diseño 4), en donde existe un incremento de 42% en la reducción del módulo cuando el espesor de la capa de base pasa de 10 cm a 20 cm.

Una comparación entre la información presentada en la figura anterior con aquella presentada en la sección de análisis de resultados (etapa 6 del proyecto), en donde se ilustra la pérdida de material en función de la velocidad de expulsión para todos los material, permite concluir que existen similitudes importantes. En los dos casos se puede constatar que las mezclas asfálticas son los materiales menos susceptibles a la erosión, mientras que la base granular estabilizada, la mezcla granular estabilizada con el menor porcentaje de cemento (6.1%) y la mezcla estabilizada con 6% emulsión y el máximo contenido de cemento (1.5%) son los materiales que presentan mayor susceptibilidades a sufrir daño por erosión. En medio de estos dos extremos se ubican el resto de materiales analizados. Sin embargo, el orden en el que los materiales se clasifican en términos de pérdida de material por erosión y reducción de módulo efectivo por erosión no es exactamente igual.

Es importante mencionar una vez más que esta comparación se realiza a manera de ejemplo ya que los resultados presentados anteriormente son función no sólo de las características de erosión de los materiales (los cuales se relacionan directamente con *LS*), sino también de las características en las que ese material se desempeña en campo (espesor de la base, material de subrasante, etc). Esto significa, además, que los resultados presentados con anterioridad pueden cambiar si otra estructura con otro tipo de subrasante es considerada para el análisis.

## 7.6.2. Método PCA

El método de diseño PCA contiene el único modelo disponible en la literatura que tiene bases mecánicas para controlar el fenómeno de bombeo. Este modelo se basó originalmente en metodologías generales de diseño de pavimentos, experiencia obtenida y los resultados AASHO Road Test (1969 en Illinois, USA) y en la deflexiones calculadas y esperadas en las esquinas de la losa. Precisamente, una de las mayores críticas de esta metodología es que los materiales que 196





se usaron en el AASHTO road tests eran muy erodables—de hecho, el bombeo fue la causa principal de falla en la mayoría de los pavimentos rígidos—y por lo tanto no se usan en la actualidad como material de base en Estados Unidos, lo cual genera dudas sobre el alcance real del modelo. El principio de este modelo es estimar el número permisibles de repeticiones para un nivel de carga y tipo de eje específicos que prevendrían la iniciación de fallas por bombeo. De esta forma, el modelo se basa en las características estructurales del pavimento (espesores de losa y base, propiedades de los materiales, existencia de pasadores para transmisión de carga y existencia de bermas de concreto) para determinar el número de ciclos de carga que generarían falla por bombeo (*N*) mediante:

$$\log(N) = 14.524 - 6.777 (C_1 P - 9.0)^{0.103}$$
(7.94)

donde *P* es la tasa de trabajo, definida por la ecuación 7.95 y  $C_1$  es un factor de calibración, el cual toma un valor de 1 para bases sin tratar y de 0.9 para bases estabilizadas.

$$P = 286.7 \frac{p^2}{hk^{0.73}} \tag{7.95}$$

en donde p es la presión sobre la base en la esquina de la losa (en psi), h es el espesor de la placa de concreto en pulgadas y k es el módulo de reacción del sistema subrasante-subbase (i.e., el mismo empleado por el método AASHTO descrito con anterioridad).

El valor de repeticiones admisibles para controlar fatiga, *N*, es posteriormente empleado para calcular el porcentaje de erosión de daño. Este porcentaje emplea una expresión equivalente a ley de Miner, la cual constituye un método estándar para cuantificar el daño causado en pavimento por efecto de la aplicación repetida de carga:

$$\% erosión = 100 \sum_{i=1}^{m} \frac{C_2 n_i}{N_i}$$
(7.96)





en donde  $C_2$  es un factor igual a 0.06 para pavimentos que no incluyen bermas de concreto y 0.94 para pavimentos que sí incluyen dichas bermas y  $n_i$  es el número de repeticiones esperadas de la carga tipo *i* que produce una presión *p*.

La aplicación de la ecuación (7.94) requiere el empleo de un modelo mecánico que permita el cálculo de la presión en el contacto de la losa y la base y de la deflexión de la esquina de la losa. Debido a que el objetivo de este análisis es observar el comportamiento de los materiales investigados cuando se emplean como parte del método PCA, se van a utilizar los monogramas desarrollados por PCA para el cálculo de los factores de erosión y del número de repeticiones admisiones. Para este fin, los cálculos se realizarán para las siguientes condiciones específicas de un pavimento:

- Carga aplicada: eje estándar simple de 8.2 ton (18 kips) con llantas duales.
- Espesor de la losa de concreto: 25 cm.
- Espesor de los materiales de base: 10, 15 y 20 cm.
- Materiales: los 10 materiales considerados en este proyecto.

Adicionalmente, las talas desarrolladas por el PCA para el cálculo de los factores de erosión se limitan a las siguientes características:

- Módulo elástico del concreto: 4\*10<sup>6</sup> psi
- Relación de Poisson del concreto: 0.15
- Diámetro de los pasadores para transmisión de carga: 1/8 in. por pulgada de losa
- Espaciamiento de los pasadores: 12 in.
- Módulo de soporte de los pasadores: 2\*106 psi.
- Constante de rigidez para las juntas con trabazón de agregados: 5000 psi

• Constante de rigidez para la interfase entre la junta de concreto y la berma de concreto: 25,000 psi.





Con base en esta información, en las tablas y gráficas de diseño y empleando los valores de módulo de reacción subrasante-base (k) especificados mediante la Figura 7.90 y resumidos en la Tabla 7.51, se determinaron los siguientes factores de erosión para dos casos extremos de estudio: 1) pavimento sin pasadores y sin berma de concreto y 2) pavimento con pasadores y bermas de concreto:

	Código	Factor de erosión					
Material		Sin pasadores y sin berma de concreto			Con pasadores y con berma de concreto		
		Espesor de la base			Espesor de la base		
		20 cm	15 cm	10 cm	20 cm	15 cm	10 cm
Base Granular	BG_A_Gr1	2.70	2.72	2.74	2.05	2.07	2.10
Granular con emulsión asfáltica y cemento	GEEA_A_Gr1 diseño 1	2.67	2.70	2.73	2.02	2.05	2.08
Granular-cemento	GEC_B_Gr2 diseño 3	2.66	2.70	2.73	2.00	2.05	2.08
Granular-cemento	GEC_B_Gr2 diseño 2	2.65	2.69	2.72	1.99	2.04	2.08
Granular con emulsión asfáltica y cemento	GEEA_A_Gr1 diseño 2	2.66	2.70	2.73	2.00	2.05	2.08
Granular-cemento	GEC_B_Gr2 diseño 1	2.66	2.70	2.73	2.01	2.05	2.08
Granular con emulsión asfáltica y cemento	GEEA_A_Gr1 diseño 3	2.65	2.69	2.72	1.99	2.05	2.08
Granular con emulsión asfáltica y cemento	GEEA_A_Gr1 diseño 4	2.66	2.70	2.73	2.01	2.06	2.09
Mezcla asfáltica	MD 20 diseño 1	2.60	2.67	2.70	1.93	2.02	2.05
Mezcla asfáltica	MD 20 diseño 2	2.61	2.68	2.70	1.95	2.03	2.96

 Tabla 7.51. Factores de erosión para el caso de pavimento sin pasadores y sin berma de concreto (losa de concreto de 25 cm de espesor)





Con base en los valores consignados en la tabla anterior, se emplearon las gráficas de diseño para calcular el número admisible de repeticiones para los diferentes materiales y espesores de base, dando como resultado los siguientes valores:

 Tabla 7.52. Factores de erosión para el caso de pavimento sin pasadores y sin berma de concreto (losa de concreto de 25 cm de espesor)

	Código	Factor de erosión					
Material		Sin pasadores y sin berma de concreto			Con pasadores y con berma de concreto		
		Espesor de la base			Espesor de la base		
		20 cm	15 cm	10 cm	20 cm	15 cm	10 cm
Base Granular	BG_A_Gr1	9.0*10 <sup>7</sup>	6.8*10 <sup>7</sup>	5.0*10 <sup>7</sup>	> 1*10 <sup>8</sup>	> 1*10 <sup>8</sup>	> 1*10 <sup>8</sup>
Granular con emulsión asfáltica y cemento	GEEA_A_Gr1 diseño 1	> 1*10 <sup>8</sup>	9.0*10 <sup>7</sup>	6.1*10 <sup>7</sup>	> 1*10 <sup>8</sup>	> 1*10 <sup>8</sup>	> 1*10 <sup>8</sup>
Granular-cemento	GEC_B_Gr2 diseño 3	> 1*10 <sup>8</sup>	9.0*10 <sup>7</sup>	6.1*10 <sup>7</sup>	> 1*10 <sup>8</sup>	> 1*10 <sup>8</sup>	> 1*10 <sup>8</sup>
Granular-cemento	GEC_B_Gr2 diseño 2	> 1*10 <sup>8</sup>	1*10 <sup>8</sup>	6.8*10 <sup>7</sup>	> 1*10 <sup>8</sup>	> 1*10 <sup>8</sup>	> 1*10 <sup>8</sup>
Granular con emulsión asfáltica y cemento	GEEA_A_Gr1 diseño 2	> 1*10 <sup>8</sup>	9.0*10 <sup>7</sup>	6.1*10 <sup>7</sup>	> 1*10 <sup>8</sup>	> 1*10 <sup>8</sup>	> 1*10 <sup>8</sup>
Granular-cemento	GEC_B_Gr2 diseño 1	> 1*10 <sup>8</sup>	9.0*10 <sup>7</sup>	6.1*10 <sup>7</sup>	> 1*10 <sup>8</sup>	> 1*10 <sup>8</sup>	> 1*10 <sup>8</sup>
Granular con emulsión asfáltica y cemento	GEEA_A_Gr1 diseño 3	> 1*10 <sup>8</sup>	1*10 <sup>8</sup>	6.8*10 <sup>7</sup>	> 1*10 <sup>8</sup>	> 1*10 <sup>8</sup>	> 1*10 <sup>8</sup>
Granular con emulsión asfáltica y cemento	GEEA_A_Gr1 diseño 4	> 1*10 <sup>8</sup>	9.0*10 <sup>7</sup>	6.8*10 <sup>7</sup>	> 1*10 <sup>8</sup>	> 1*10 <sup>8</sup>	> 1*10 <sup>8</sup>
Mezcla asfáltica	MD 20 diseño 1	> 1*10 <sup>8</sup>	> 1*10 <sup>8</sup>	9.0*10 <sup>7</sup>	> 1*10 <sup>8</sup>	> 1*10 <sup>8</sup>	> 1*10 <sup>8</sup>
Mezcla asfáltica	MD 20 diseño 2	> 1*10 <sup>8</sup>	> 1*10 <sup>8</sup>	9.0*10 <sup>7</sup>	> 1*10 <sup>8</sup>	> 1*10 <sup>8</sup>	> 1*10 <sup>8</sup>





Las Figuras 7.97 a 7.100 ilustran estos resultados para el caso en el que el pavimento no tiene pasadores ni berma de concreto; el cual se considera el más favorable para el desarrollo de procesos de erosión. Para el caso menos favorable, i.e., cuando el pavimento cuenta con pasadores para la transmisión de carga y con bermas de concreto, el número de repeticiones permitidas de carga es muy alto, indicando la baja probabilidad de que ocurra este fenómeno.



Figura 7.97. Número de repeticiones admisibles para un pavimento sin pasadores y sin berma de concreto con base granular sin estabilizar y espesor de losa de concreto de 25 cm







Figura 7.98. Número de repeticiones admisibles para un pavimento sin pasadores y sin berma de concreto con base granular estabilizada con cemento y espesor de losa de concreto de 25 cm



**Figura 7.99.** Número de repeticiones admisibles para un pavimento sin pasadores y sin berma de concreto con granular estabilizada con emulsión y cemento y espesor de losa de concreto de 25 cm







Figura 7.100. Número de repeticiones admisibles un pavimento sin pasadores y sin berma de concreto con base de mezcla asfáltica y espesor de losa de concreto de 25 cm

Con el fin de comparar los resultados entre diferentes materiales, las Figuras 7.101 a 7.103 resumen los resultados de repeticiones admisibles de carga para los diferentes materiales y para los diferentes espesores de la capa de base.



Figura 7.101. Número de repeticiones admisibles un pavimento sin pasadores y sin berma de concreto con diferentes bases, espesor de losa de concreto de 25 cm y

espesor de base de 1 0 cm







Figura 7.102. Número de repeticiones admisibles un pavimento sin pasadores y sin berma de concreto con diferentes bases, espesor de losa de concreto de 25 cm y espesor de base de 15 cm



Figura 7.103. Número de repeticiones admisibles un pavimento sin pasadores y sin berma de concreto con diferentes bases, espesor de losa de concreto de 25 cm y

espesor de base de 20 cm





El análisis de los resultados presentados con anterioridad permite obtener las siguientes conclusiones:

- Los factores de erosión no sufren cambios relevantes entre diferentes tipos de materiales. Este resultado, que demuestra una insensibilidad de los factores de erosión al tipo de material, también muestra que el método sólo considera la resistencia del material y las características de la subrasante y del espesor de la capa de base (i.e., módulo de reacción *k*) como parámetros determinantes de la erodabilidad. A diferencia del método AASHTO, en este caso no existe una consideración adicional por el tipo específico de material que se va a emplear.
- La estructura seleccionada como base para desarrollar este ejemplo es bastante resistente ya que el espesor de la losa de concreto es de 25 cm y los espesores de la capa de base varían entre 10 y 20 cm. Los espesores de la capa de base producen altos valores de *k* de reacción subrasante-subbase. Estas condiciones estructurales se relacionan con bajas presiones bajo la losa y bajos niveles de deflexión de la esquina de la losa, dos de los parámetros fundamentales en el modelo de erosión de este método. Como consecuencia, los valores del número de repeticiones de carga para controlar fatiga son bastante altos y, para el caso de un pavimento con pasadores en las juntas y berma de concreto, este valor es siempre superior a 1\*10<sup>8</sup>, el máximo reportado en las gráficas de diseño.
- A diferencia del método AASHTO, en este método se observa una dependencia en el efecto del espesor de la base en el efecto de procesos de erosión. Bases más gruesas proveen mayores repeticiones admisibles. Este resultado no es sorpresivo debido a que el modelo de erosión está fundamentado en el desempeño mecánico de la estructura.
- En todos los casos, el material de base granular sin estabilizar es el que presenta los menores números admisibles de repeticiones de carga seguida, en el mismo nivel, por la mayoría de materiales estabilizados con cemento y emulsión asfáltica y cemento.
- Al igual que en el método AASHTO y que en los resultados obtenidos en este estudio, las mezclas asfálticas son los materiales que presentan las condiciones más favorables para





prevenir el desarrollo de fenómenos de erosión, seguidos por la mezcla con estabilizada con el mayor porcentaje de cemento (8.8%, GEC\_B\_Gr2\_diseño 3) y la mezcla estabilizada con emulsión y 1.0% de cemento.

 Finalmente, es importante recordar que los resultados obtenidos en este ejercicio sólo son válidos para los materiales y las características de la estructura mencionados con anterioridad. Otro tipo de condiciones pueden producir resultados diferentes, los cuales requerirían el desarrollo de un nuevo análisis.

Una comparación de estos resultados con los obtenidos en este proyecto y en el análisis realizado mediante método AASHTO muestra que existe una consistencia entre los materiales que se relacionan con procesos más o menos probables de erosión. Sin embargo, la clasificación de los materiales que se encuentran en el rango intermedio es diferente en cada caso.

## 7.6.3. Observaciones finales

Complementando la información presentada en el numeral anterior, es importante mencionar nuevamente que la comparación entre los métodos se encuentra limitada por las características propias de cada uno, algunas de las cuales se mencionan a continuación.

- Método AASHTO: considera la erosión como un fenómeno que depende de la pérdida de contacto entre la base de la losa y la capa de base. Dicha pérdida depende de las propiedades de la subrasante, del espesor de la capa de base y de la susceptibilidad a la erodabilidad del material de base. Este método no incluye otros parámetros mecánicos, tales como las deflexiones que se producen en las juntas por diversas cargas de tráfico, como elementos que se relacionen con el proceso de bombeo.
- Método PCA: considera la erosión como un fenómeno mecánico que depende de las propiedades mecánicas de cada capa, de los espesores de las capas y de elementos adicionales como el sistema de transmisión de carga entre losas y la existencia de bermas de concreto. El método no incluye un parámetro que involucre la erodabilidad propia de los





materiales de base (sólo distingue entre bases estabilizadas y no estabilizadas, pero no discrimina entre el tipo de estabilizante).

• El presente estudio: evalúa la susceptibilidad de materiales de base a sufrir erosión por causa de las fuerzas cortantes generadas por la expulsión de agua entre la losa de concreto y la capa de base. Estos resultados son independientes de la estructura específica del pavimento y de las condiciones particulares de servicio a las cuales se somete la estructura.

Estas condiciones ponen en evidencia la dificultad de comparar los dos métodos y sugieren, además, que no es teóricamente apropiado comparar los resultados obtenidos mediante estos métodos con los resultados obtenidos en este proyecto. Esto se debe a que una comparación válida requeriría evaluar el desempeño real de los materiales evaluados en este estudio en campo y no sólo caracterizar su erodabilidad natural. Dicha caracterización requeriría estudios más completos que involucren todas las demás características que afectan y promueven el fenómeno de bombeo y que incluyen diversas características del pavimento, las cuales fueron descritas en detalle en las secciones iniciales de este informe. Dicho tipo de estudio se puede realizar, por ejemplo, mediante el desarrollo de pistas de prueba en donde el inicio y desarrollo del fenómeno de bombeo ante condiciones específicas de servicio se puede controlar y monitorear en detalle.

En conclusión, los resultados obtenidos en esta fase del proyecto sólo se deben emplear como una explicación adicional del fenómeno del bombeo y no como una fuente de validación de los resultados de este proyecto y/o como una fuente que permita determinar el desempeño de los materiales en campo con base en las características de erodabilidad obtenidas en este estudio.

# 7.7. Etapa 8. Generación del documento técnico final y ejecución de una capacitación técnica.

El presente informe constituye el documento técnico final producto de la consultoría realizada por parte de la Universidad de los Andes para el Instituto de Desarrollo Urbano, el cual incluye la consolidación de todas las actividades contempladas en los términos de referencia y permite dar cumplimiento a las actividades contempladas en la etapa 8 del proyecto.





De conformidad con los lineamientos descritos en los Apéndices A y B del contrato, el pasado jueves 25 de noviembre de 2010 entre las 8:00 y las 10:00 a.m., se llevó a cabo la divulgación de los resultados de la consultoría, durante las Primeras Jornadas Académicas realizadas entre el 25 y el 26 de Noviembre de 2010 en el auditorio del segundo piso de la sede principal del Instituto de Desarrollo Urbano. La divulgación incluyó la presentación de los objetivos y antecedentes del proyecto, un marco conceptual del fenómeno de erosión, la metodología y plan de trabajo empleados, una descripción de las actividades realizadas durante cada una de las etapas, y las conclusiones y recomendaciones obtenidas a partir de la consultoría. El Anexo A.18 incluye la presentación realizada y el Anexo A.19 contiene una copia del listado de asistencia de los funcionarios del Instituto de Desarrollo Urbano, que acudieron a la divulgación de los resultados de la consultoría. Vale la pena mencionar que los comentarios realizados por los asistentes al finalizar la presentación, fueron tenidos en cuenta e incluidos como parte de las secciones de Conclusiones y Recomendaciones.





## 8. Conclusiones

A continuación se presentan las principales conclusiones obtenidas durante la ejecución del presente proyecto:

- Las tareas especificadas en cada una de las siete fases descritas en los términos de referencia del presente contrato fueron ejecutadas a satisfacción. El proyecto cumplió sus dos objetivos principales: 1) determinar la susceptibilidad al daño por erosión de 10 materiales diferentes que pueden ser potencialmente empleados en las capas de base de pavimentos de concreto hidráulico y 2) emplear estos resultados para evaluar la viabilidad de emplear dichos materiales como capas de soporte de las losas de concreto en este tipo de pavimentos.
- 2. Como parte de la etapa inicial del proyecto, se elaboraron 10 diseños de mezclas, de acuerdo con las especificaciones exigidas en los términos de referencia. De estos diseños, uno correspondió a material de base granular, tres a mezclas de material granular y cemento con tres niveles de resistencia diferentes, cuatro a mezclas de material granular estabilizado con emulsión asfáltica y cemento y dos a mezclas asfálticas densas en caliente. Sobre cada uno de los materiales individuales (i.e., granulares y ligantes asfálticos) se realizaron los ensayos de caracterización básica requeridos en el contrato, así como los ensayos de caracterización de la resistencia de todos los materiales granulares estabilizados con cemento y módulos dinámicos para materiales estabilizados con productos asfálticos) y caracterización de las leyes de fatiga para las mezclas asfálticas. La caracterización de los materiales permitió verificar el cumplimiento de las diversas especificaciones, lo cual a su vez permitió garantizar la calidad global de los materiales. Así mismo, esta información fue vital para llevar a cabo el análisis de los resultados obtenidos a partir de la ejecución de los ensayos de laboratorio de erosión.
- 3. Una de las contribuciones más importantes de este proyecto consistió en el diseño y la implementación de dos montajes experimentales cuyo objetivo fue evaluar la susceptibilidad a





la erosión de los diferentes materiales. Los principios básicos de los dos ensayos fueron definidos después de analizar críticamente la viabilidad y validez de montajes experimentales de esta naturaleza reportados en la literatura científica internacional durante los últimos 40 años, y se resumen a continuación:

- El primer montaje experimental, denominado *ensayo de erosión mediante chorro a presión de agua*, permite la evaluación cualitativa de la pérdida de material a diferentes presiones de aplicación de carga. Este ensayo se puede efectuar sobre materiales cementados y no cementados y consiste en la aplicación durante 2 minutos de un chorro a presión ubicado a 2 cm de la base superior de los especímenes cilíndricos y a 45<sup>a</sup> de inclinación. El resultado de estos ensayos consiste en la determinación de la *velocidad crítica de erosión*, la cual se define como el mínimo valor de la velocidad del agua para el cual se reportan las primeras pérdidas de material en la cara superior del especimen.
- El segundo ensavo experimental, denominado ensavo de erosión mediante mesa vibratoria, permite la simulación de procesos hidráulicos similares a los que ocurren en campo y que promueven el fenómeno de erosión. Este ensayo se puede efectuar únicamente sobre materiales cementados y consiste en la aplicación de una carga vertical cíclica controlada sobre un molde que contiene 350 ml de agua y el especimen de material a evaluar. La aplicación de carga cíclica genera un levantamiento vertical del especimen el cual, al caer, promueve la expulsión horizontal del agua en su base. Los esfuerzos asociados con la expulsión del agua generan el desprendimiento de partículas de material de la base del especimen. Este proceso de pérdida de material es similar al que puede ocurrir en la parte superior de la capa de base en un pavimento de concreto hidráulico como consecuencia de los esfuerzos cortantes que genera el agua localizada en la interfase entre la losa y la capa de base ante el paso de carga vehicular. El ensayo se realiza aplicando una señal con una amplitud constante (0.3 mm) y con tres niveles diferentes de frecuencias (50, 80 y 100 Hz), cada una de la cuales actúa durante un periodo de 20,000 ciclos. Mediante la medición de la aceleración del molde y del especimen-las cuales se obtienen a partir de las mediciones de los acelerómetros instalados en el montaje-es posible medir la magnitud de la velocidad de expulsión del agua y relacionar este valor con





la pérdida de masa del material. Por lo tanto, el resultado de estos ensayos consiste en la cuantificación de la pérdida porcentual de material en función de la velocidad de expulsión de agua.

- Cabe resaltar que los ensayos desarrollados, en particular el ensayo en mesa vibratoria, constituyen un avance significativo en la caracterización ante la erosión de materiales de base de pavimentos rígidos. En efecto, el ensayo utilizado hasta el momento consiste en cepillar el material con un cepillo de acero estándar. Este ensayo no guarda ninguna relación con el fenómeno de erosión que ocurre en un pavimento. Una mejor caracterización de los materiales de base permitirá escoger de una manera más apropiada los materiales adecuados para ser utilizados como capas de base de pavimentos rígidos.
- 4. Los ensayos de erosión se ejecutaron siguiendo los protocolos propuestos en las etapas iniciales del contrato. El análisis de los resultados permitió obtener las siguientes conclusiones:
  - El material que sufrió el mayor grado de erosión durante el ensayo de chorro de agua fue la base granular sin estabilizar. Los materiales con mayor resistencia a la erosión en este ensayo fueron las mezclas asfálticas, seguidas de la mezcla estabilizada con emulsión asfáltica (sin cemento).
  - La magnitud de la velocidad crítica requerida para la iniciación de pérdida de material por erosión obtenida mediante este ensayo fue cercana a los 33 m/s para los materiales estabilizados con cemento y para las mezclas estabilizadas con emulsión y asfalto. Para la base granular este valor fue menor al mínimo valor de velocidad considerado en el ensayo (10 m/s) y para las mezclas asfálticas este valor fue superior a los 38 m/s.
  - El material que sufrió mayor grado de pérdida porcentual de masa durante el ensayo de erosión mediante mesa vibratoria fue la mezcla de granular estabilizado con 6% de cemento (i.e., la mezcla con la menor cantidad de cemento: GEC\_B\_Gr2 diseño 1). El segundo material que presentó mayor pérdida porcentual de masa fue la mezcla de granular con 6% de emulsión y 1.5% de cemento (GEEA\_A\_Gr1 diseño 4). Los porcentajes de pérdida de masa de estos dos materiales correspondientes a posibles rangos de velocidades de expulsión del agua en pavimentos en servicio, variaron en un rango de 4.5 a 8% y de 3 a





5%, respectivamente. Al igual que en el ensayo de chorro de agua, el material que presentó los menores valores porcentuales de pérdida de masa fueron las mezclas asfálticas, seguidas de la mezcla de granular estabilizada con el mayor porcentaje de cemento (8.8%), GEC\_B\_Gr2 diseño 3) y de la mezcla de material granular estabilizado con emulsión asfáltica (0% de cemento, GEEA\_A\_Gr1 diseño 1). Los rangos de pérdida porcentual de masa para estos materiales que corresponden a velocidades de expulsión de agua probables en un pavimento en servicio fueron de 0.006-0.02%, 0.3-0.5% y 0.3-0.7%, respectivamente. Los valores de pérdidas porcentuales de masa a dichas velocidades variaron entre 1.0 y 4.5% para todos los materiales restantes. Cabe aclarar que sobre la base granular no se realizó ensayo de mesa vibratoria dado que el material se disgrega por completo durante el ensayo.

- Los resultados de los ensayos de erosión mediante este ensayo permitieron observar que existe una relación entre la resistencia mecánica del material y el porcentaje de pérdida de masa, independientemente de la velocidad de expulsión del agua.
- Los resultados de este ensayo también demostraron que existe una relación inversa entre la resistencia a la erosión de los material estabilizados con cemento y emulsión asfáltica y la cantidad de cemento empleado en la mezcla. Efectivamente, los valores de tracción indirecta de los materiales muestran que existe una relación inversa entre el contenido de cemento de la mezcla y su resistencia a la tracción indirecta. La mezcla con 6% de emulsión y 0% de cemento presentó la mayor resistencia a la erosión y la mayor resistencia mecánica, mientras que la mezcla con 6% de emulsión y el mayor contenido de cemento (1.5%) presentó la mayor susceptibilidad a la erosión y la menor resistencia mecánica. Los fenómenos físicos y químicos que pueden explicar el comportamiento de este material se encuentran fuera del alcance de este proyecto. Sin embargo, es importante aclarar que los resultados mencionados son sólo válidos para la emulsión asfáltica y la metodología de diseño de las mezclas empleadas en este estudio, y que éstos pueden variar si se utilizan otros materiales u otro procedimiento de diseño.
- Los resultados obtenidos mediante los dos montajes experimentales demostraron que las mezclas asfálticas densas en caliente (tipo MD 20) son prácticamente no-erodables. Las





pequeñas diferencias obtenidas en la pérdida porcentual de masa entre las dos mezclas no son estadísticamente significativas. En otras palabras, las diferencias en el porcentaje de material granular fino que diferencia el diseño MD 20-1 del diseño MD 20-2 no afectan la resistencia de la mezcla a sufrir procesos de erosión.

- Finalmente, vale la pena resaltar que los resultados obtenidos reportados en este proyecto son válidos únicamente para las mezclas y materiales descritos en este documento. Esta información es difícilmente extrapolable a otros materiales. Por esta razón, es recomendable realizar ensayos de caracterización de pérdida de masa por erosión sobre cualquier material diferente a aquellos considerados en este estudio.
- 5. En la etapa final del proyecto se realizó un análisis de los valores de erosión que se obtienen con los materiales empleados en este estudio a partir de los métodos de diseño de pavimentos rígidos AASHTO y PCA. En el método de la AASHTO, el análisis consistió en cuantificar para cada uno de los materiales la disminución en el módulo de reacción efectivo de la subrasante/subbase, *k*, por efectos de la posible pérdida de contacto entre la losa de concreto y la capa de base. En el método de la PCA, el análisis consistió en cuantificar el número de repeticiones admisibles de un eje estándar de 8.2 ton que se requiere para controlar el efecto de erosión en un pavimento de concreto que contiene diferentes materiales de base. En los dos casos, los métodos suponen la existencia de una estructura de pavimento rígida específica. Por esta razón, el análisis se realizó para diferentes valores de espesor de la capa de base y para valores constantes de la resistencia de la subrasante y de las propiedades y espesores de la losa de concreto. Los siguientes son los resultados obtenidos en este análisis:
  - En los dos métodos se observó que los materiales con mayores probabilidades de promover procesos de erosión en la base de soporte de las losas de concreto hidráulico fueron la base granular sin estabilizar y la base granular estabilizada con el menor porcentaje de cemento (6.1%). Por su parte, los materiales que promueven una mayor resistencia de la estructura a desarrollar procesos de pérdida de material de base por erosión son las mezclas asfálticas seguidas, en diferente orden, por la mezcla de material granular estabilizado con emulsión asfáltica y 0% de cemento y la mezcla de material granular estabilizada con el mayor contenido de cemento (8.8%).




- Los resultados mencionados en el numeral anterior son cualitativamente similares a los encontrados experimentalmente en este proyecto. Sin embargo, tal como se menciona en la sección 7.6.3, no es posible realizar un análisis comparativo rigoroso entre los resultados obtenidos mediante los métodos PCA y AASHTO y los resultados experimentales obtenidos en este estudio. Esto se debe a que el objetivo primordial de los ensayos realizados en este proyecto fue la caracterización de los niveles de pérdida de masa por efecto de potenciales procesos de bombeo, independientemente de las condiciones de servicio específicas en las que este material podría emplearse. Los métodos PCA y AASHTO, por el contrario, buscan controlar directa o indirectamente el desarrollo de procesos de erodabilidad en la base de un pavimento rígido que está caracterizado por una geometría y por materiales específicos y que se encuentra sujeto a condiciones particulares de servicio. En la sección 7.6.3. también se discute como, aunque los modelos de erosión de los dos métodos de diseño trabajan sobre una misma estructura de análisis, es difícil comparar sus resultados debido a las diferencias conceptuales de sus modelos. El modelo de la AASHTO supone que la erosión es función de las propiedades mecánicas de la subrasante, del espesor y las propiedades de la capa de base y de la posible pérdida de contacto entre la losa y la capa de base. Por su parte, el modelo de la PCA supone que la erosión es función de la deflexión máxima de la esquina de la losa, la cual depende a su vez de las características mecánicas y geométricas del pavimento y de las exigencias de carga a las cuales éste es sometido.
- 6. Finalmente, es importante mencionar que la normativa existente para el empleo de diferentes materiales como base en pavimentos de concreto hidráulico (Especificaciones Técnicas IDU 2005) incluye una evaluación cualitativa de los materiales en función de las categorías de tránsito, de la siguiente manera:
  - De acuerdo con la Tabla 400.1 de las Especificaciones Técnicas IDU 2005, la cual contiene la "Correspondencia entre las clases de capas granulares, el tipo de pavimento y las categorías de tránsito", el empleo del material granular sin estabilizar, como base para pavimentos de concreto hidráulico, solo aplica para categorías de tránsito bajo y medio.





- De acuerdo con la Tabla 420.1 de las Especificaciones Técnicas IDU 2005, la cual contiene el "Uso de capas de materiales granulares estabilizados con cemento", el empleo del material granular estabilizado con cemento, como base para pavimentos de concreto hidráulico, solo aplica para categorías de tránsito bajo.
- De acuerdo con la Tabla 440.1 de las Especificaciones Técnicas IDU 2005, la cual contiene el "Uso de capas de materiales granulares estabilizados con emulsión asfáltica", el empleo del material granular estabilizado con emulsión asfáltica, como base para pavimentos de concreto hidráulico, solo aplica para categorías de tránsito bajo.

Como se puede observar, las recomendaciones generales estipuladas en las especificaciones actuales son congruentes con las principales conclusiones obtenidas en este estudio. Por ejemplo, la alta susceptibilidad a la erosión de los materiales de base granular sin estabilizar hacen que su uso se deba limitar a vías de bajo tráfico, en donde los bajos niveles de carga van a controlar las condiciones de servicio que usualmente promueven el desarrollo de erosión. Sin embrago, un resultado importante de este estudio fue que el nivel de resistencia de una mezcla específica tiene un gran impacto en la susceptibilidad del material a la erosión. Por ejemplo, si bien los resultados catalogan a la mezcla de material granular estabilizado con 6.1% de cemento como una de las más erodables, el estudio también muestra que el mismo material granular estabilizado con 8.8% de cemento es altamente resistente a la erosión y, por lo tanto, podría emplearse en proyectos con mayores niveles de carga vehicular. Por lo tanto, este estudio muestra que el control de la erosión para un proyecto específico no se debe limitar a restringir el uso de materiales de base de acuerdo con la naturaleza general de dicho material (e.g., mezcla de material granular estabilizado con setabilizado con setabilizado con cemento o con emulsión asfáltica), sino también de acuerdo con la resistencia específica del mismo.





#### 9. Recomendaciones

A continuación se presentan las principales recomendaciones obtenidas con base en los análisis realizados durante este proyecto:

- No se recomienda el empleo de material granular sin estabilizar para la conformación de capas de base de pavimentos rígidos. La susceptibilidad a la erosión de este material es muy alta, tal como se constató con los resultados obtenidos de los dos ensayos experimentales efectuados.
- 2. El empleo de mezclas asfálticas como material de base de estos pavimentos constituye una opción segura para garantizar un soporte continuo y duradero a las losas de concreto. Esta alternativa, sin embargo, puede no ser la más económica. Por este motivo, sería conveniente realizar un análisis adicional para evaluar cual es el contenido mínimo de asfalto que permite obtener mezclas asfálticas resistentes a la erosión, con el fin de optimizar su empleo como base en pavimentos de concreto hidráulico.
- 3. No se recomienda el empleo de mezclas de material granular estabilizados simultáneamente con emulsión asfáltica y cemento—fabricadas con los materiales descritos en este proyecto—como material de bases de este tipo de pavimentos. Estas mezclas, para las cuales no existe un procedimiento de diseño estandarizado ni especificaciones técnicas que garanticen un desempeño apropiado en campo, presentan grandes incertidumbre en cuanto a su desempeño mecánico y a su susceptibilidad a la erosión. Los resultados de este estudio permiten concluir que la mezcla estabilizada exclusivamente con emulsión asfáltica posee una mayor resistencia mecánica y una mayor resistencia al daño por erosión que aquellas estabilizadas con emulsión y cemento y que la mayoría de las estabilizadas exclusivamente con cemento.
- 4. Existe una relación directa entre la resistencia a la erosión y la resistencia mecánica de las mezclas granulares estabilizadas con cemento (tipo GEC\_B\_Gr2). Los rangos de pérdida de masa reportados en este estudio permiten concluir que mezclas de este tipo con módulos de





elasticidad superiores a los 3.8 Mpa (porcentaje de cemento superior a 8.8%) poseen baja susceptibilidad a la erosión. Por el contrario, las mezclas con módulos inferiores a este valor son altamente susceptibles a la pérdida de masa por erosión; razón por lo cual no se recomienda su empleo en la conformación de capas de base de pavimentos rígidos.

- 5. Los análisis de los criterios de erosión obtenidos mediante los métodos de la AASHTO y de la PCA desarrollados en este estudio son ilustrativos y no se recomienda usar esta información con el fin de extrapolar los resultados obtenidos en las actividades experimentales de este proyecto a condiciones reales de pavimentos en servicio. Vale la pena recordar que los dos métodos considerados (AASHTO y PCA) emplean como parte de sus modelos de erosión los resultados experimentales obtenidos en las pistas de prueba del proyecto AASHO Road Test. Este proyecto fue desarrollado en el estado de Illinois (USA) en la década de los 60 y dio origen a los comúnmente empleados métodos de diseño AASHTO de pavimentos rígidos y flexibles. Debido a esta condición, estos modelos tienen un alto contenido empírico que limita sus resultados a los materiales y condiciones de servicio propias de dicho proyecto, poniendo en duda la confiabilidad de dichos resultados cuando es usado con otro tipo de materiales.
- 6. Los datos obtenidos en este proyecto pueden ser empleados como una guía de las características de erodabilidad de diversos materiales. Sin embargo, no es recomendable usar estos resultados para extrapolar la susceptibilidad a la erosión de otras mezclas o de materiales diferentes a los considerados en este estudio. La caracterización de la susceptibilidad a la erosión de otros materiales requiere la ejecución de nuevos ensayos de laboratorio.
- 7. Con el fin de caracterizar la erodabilidad de los materiales evaluados en este estudio bajo condiciones reales de servicio, es recomendable realizar análisis adicionales que involucren la construcción de pistas de prueba. Esta información permitiría incorporar variables adicionales que promueven el desarrollo de procesos de erosión en las capas de base de pavimentos de concreto (e.g., efecto de cargas, magnitudes de deflexión de la base, velocidades reales de expulsión del agua en la interfase entre la losa y la capa de base, entre otras).





#### Bibliografia

Akky, M. R. (1974) Erodability of Soil-Cement. Department of Civil Engineering. Ph.D dissertation. Davis, California (USA) University of California at Davis.

Balay, J., Gomes Correia A., Jouve P., Hornych, P., Paute J.L. (1998) Etude expérimentale et modélisation du comportement mécanique des graves non traitées et des sols supports de chaussées - Dernières avancées, Bull. Liaison Labo. des P. et Ch., n° 216, pp 3-18, Juillet - Août 1998.

Bhasin, R. N. (1969) Erodability of Sand-Clay Mixtures as Evaluated by a Water Jet. MSc Thesis. West Lafayette, Indiana (USA) Purdue University.

Caicedo, B. (2001). Concepto Técnico Sobre Las Causas De Los Daños Prematuros en los Pavimentos Rígidos de la Autopista Norte. Proyecto Final presentado a Conciviles. Bogotá (Colombia), Centro de Materiales y Obras Civiles, CIMOC, Universidad de Los Andes.

Dash, U. (1968) Erosive Behavior of Cohesive Soil. Ph.D Dissertation. West Lafayette, Indiana (USA) Purdue University

de Beer, M. (1989). Aspects of the Erodibility of Lightly Cementitious Materials. Research Report DPVT 39. Pretoria, South Africa, Roads and Transport Technology, Council for Scientific and Industrial Research.

Espey, W. H. (1963). A New test to Measure teh Scour of Cohesive Sediment. Report 0-1-6301. Austin, Texas (USA), Departament of Civil Engineering, University of Texas at Austin.

Faisca, J. S., Baena, J., Baltzer, S., Gajewska, B., Nousiainen, A., Hermansson, A., Erlingsson, S., Brecic, M. and Dawson, A. (2009). Control of Pavement Water and Pollution Prevention, Springer Science+Business Media.

Hansen, E. C., Johannesen, R. and Armaghani, J. M. (1991). "Field Effects of Water Pumping beneath Concrete Pavement Slabs." Journal of the Transporation Engineering (ASCE) 17(6): 679-696.

Huang, Y. H. (1998). Pavement Analysis And Design

IDU and Bogotá, A. m. d. (2005). ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GENERALES DE MATERIALES Y CONSTRUCCIÓN para Proyectos de Infraestructura Vial y de Espacio Público en Bogotá D.C. Bogotá D.C.





Jung, Y. S., Zollinger, D. G., Won, H. and Wimsatt, A. J. (2009). Subbase and Subgrade Performance Investigation for Concrete Pavements. Report FHWA/TX-09/0-6037-1. College Station, Texas, Texas Transportation Institute (TTI)-Texas A&M University.

Neal, B. F. and Woodstrom, J. H. (1977). Faulting of Portland Cement Concrete Pavements. Report FHWA-CA-TL-5167-77-20. Sacramento, California (USA), California Departament of Transportation.

Phu, M. N. C. (1979) Hydraulique du Pompage des Chaussées en Béton, et Erodabilité des Matériaux de Couche de Fondation et de Couche de Forme. Paris, France Université Pierre et Marie Curie, Paris VI Ph.D.

Ray, M., Cristory, O. J. and Polaine, P. (1985). Drainage and erodability: international seminar synthesis and new research results related to field performance. Third international Conference on Concrete Paviment Design and Rehabilitation. Purdue University.

Sánchez-López, B. (1988). "Efectos del Agua sobre los Pavimentos de Carreteras." Revista de Obras Públicas 135(3272): 833-856.

Van Wijk, A. J. (1985). Pavement Pumping: (1) Subbase Erosion and (2) Economic Modeling. Joint Highway Research Project File 5-10. West Lafayette, Indiana, School of Civil Engineering, Purdue University.





#### Anexos

En esta sección se encuentran los documentos anexos mencionados a lo largo del texto, organizados de la siguiente manera:

#### • Anexo A.1.:

Certificaciones que demuestran que los proveedores del material granular adquirido pertenecen al Directorio de Proveedores activos a enero 30 de 2010 del IDU.

#### • Anexo A.2.:

Especificaciones del cemento asfáltico proporcionado por el proveedor.

#### • Anexo A.3.:

Resultados de los ensayos de caracterización reportados por el Laboratorio de Estructuras y Geotecnia de la Universidad de Los Andes.

#### • Anexo A.4.:

Resultados del ensayo Proctor Modificado, realizado para los especímenes de suelo-cemento.

#### • Anexo A.5.:

Resultados detallados del ensayo de resistencia a la compresión de los especímenes de suelocemento.

#### • Anexo A.6.:

Resultados de los ensayos de tracción indirecta a los 7 días, realizado sobre los especímenes de suelo-cemento.





### • Anexo A.7.:

Resultados del ensayo de cepillado, realizado sobre el material de suelo-cemento.

### • Anexo A.8.:

Resultados del ensayo de módulo de elasticidad del material de suelo-cemento.

### • Anexo A.9.:

Resultados de los ensayos de inmersión-compresión de los especímenes de material granular estabilizado con emulsión asfáltica y cemento.

### • Anexo A.10.:

Resultados del ensayo de módulo dinámico del material granular estabilizado con emulsión asfáltica y cemento.

### • Anexo A.11.:

Resultados del ensayo de tracción indirecta, realizado sobre el material granular estabilizado con emulsión asfáltica y cemento.

### • Anexo A.12.:

Resultados de los ensayos del diseño Marshall para las dos mezclas asfálticas evaluadas.

### • Anexo A.13.:

Resultados del ensayo de módulo dinámico de las mezclas asfálticas evaluadas.

### • Anexo A.14.:

Resultados del ensayo de tracción indirecta, realizado sobre las mezclas asfálticas.





### • Anexo A.15.:

Resultados del ensayo de Ley de Fatiga sobre el material de mezcla asfáltica.

### • Anexo A.16.:

Resultados experimentales de los ensayos de erosión mediante chorro a presión de agua.

### • Anexo A.17.:

Resultados experimentales de los ensayos de erosión mediante mesa vibratoria.

• Anexo A.18.:

Presentación empleada para la divulgación de los resultados de la consultoría.

### • Anexo A.19.:

Copia del listado de asistencia de los funcionarios del Instituto de Desarrollo Urbano que acudieron a la divulgación de los resultados de la consultoría.





## ANEXO A.1.

Certificaciones que demuestran que los proveedores del material granular adquirido pertenecen al Directorio de Proveedores activos a enero 30 de 2010 del IDU





### ANEXO A.2.

Especificaciones del cemento asfáltico proporcionado por el proveedor





## ANEXO A.3.

Resultados de los ensayos de caracterización reportados por el Laboratorio de Estructuras y Geotecnia de la Universidad de Los Andes





# ANEXO A.4.

Resultados del ensayo Proctor Modificado, realizado para los especímenes de suelo-cemento





# ANEXO A.5.

Resultados del ensayo de resistencia a la compresión de los especímenes de suelo-cemento





### ANEXO A.6.

Resultados de los ensayos de tracción indirecta a los 7 días, realizado sobre los especímenes de suelo-cemento





## ANEXO A.7.

Resultados del ensayo de cepillado, realizado sobre el material de suelo-cemento





### ANEXO A.8.

Resultados del ensayo de módulo de elasticidad del material de suelo-cemento





## ANEXO A.9.

Resultados de los ensayos de inmersión-compresión de los especímenes de material granular estabilizado con emulsión asfáltica y cemento





# ANEXO A.10.

Resultados del ensayo de módulo dinámico del material granular estabilizado con emulsión asfáltica y cemento





# ANEXO A.11.

Resultados del ensayo de tracción indirecta, realizado sobre el material granular estabilizado con emulsión asfáltica y cemento.





# ANEXO A.12.

Resultados de los ensayos del diseño Marshall para las dos mezclas asfálticas evaluadas





## ANEXO A.13.

Resultados del ensayo de módulo dinámico de las mezclas asfálticas evaluadas.





## ANEXO A.14.

Resultados del ensayo de tracción indirecta, realizado sobre las mezclas asfálticas.





# ANEXO A.15.

Resultados del ensayo de Ley de Fatiga sobre el material de mezcla asfáltica.





## ANEXO A.16.

Resultados del ensayo de erodabilidad por medio de chorros de agua a presión.





# ANEXO A.17.

Resultados del ensayo de erodabilidad en mesa vibratoria.





## ANEXO A.18.

Presentación empleada para la divulgación de los resultados de la consultoría.





## ANEXO A.19.

Copia del listado de asistencia de los funcionarios del Instituto de Desarrollo Urbano que acudieron a la divulgación de los resultados de la consultoría.