SEGUIMIENTO CONTRATO No. 029 DE 2012

Estudio de la Resistencia a la Erosión de materiales empleados como Bases en Pavimentos de Concreto Hidráulico, Fase II -





INFORME FINAL (ETAPA 10)

Marzo de 2016



TABLA DE CONTENIDO

AC	GRAD	ECIMIENTOS	14	
DI	ESCAF	RGO DE RESPONSABILIDADES	16	
RF	ESUM	EN	17	
1. OBJETIVOS				
	1.1.	OBJETIVO GENERAL DEL PROYECTO	.21	
	1.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	.21	
2		ΙΝΤΡΟΠΙΙΟΟΙΟΝ Υ ΟΟΝΤΕΥΤΟ	22	
2.	21	PRINCIPIOS RÁSICOS DEL EUNCIONAMIENTO DE LOS PAVIMENTOS RÍCIDOS	22	
	2.1.	PROCESO DE DETERIORO POR EROSIÓN EN BASES DE PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁILLICO	23	
	2.3.	MATERIALES EMPLEADOS EN BASES DE PAVIMENTOS RÍGIDOS	.27	
	2.4.	AVANCES EN EL DESARROLLO DE METODOLOGÍAS PARA LA IDENTIFICACIÓN Y CONTROL DEL		
		BOMBEO EN PAVIMENTOS RÍGIDOS	.28	
	2.5.	DISEÑOS EXPERIMENTALES PARA CUANTIFICAR LA SUSCEPTIBILIDAD A LA EROSIÓN DE		
		MATERIALES EMPLEADOS EN CAPAS DE BASE	.29	
	2.5	.1. Máquina de ensayo con cepillo (Phu 1979)	.29	
	2.5	.2. Máquina rotacional de cortante (adaptación de Van Wijk 1985)	.30	
	2.5	.3. Máquina de inyección de agua (adaptación de Van Wijk, 1985)	.30	
	2.5	.4. Ensayo de desgaste por rodamiento (de Beer 1989)	.30	
	2.5	.5. Ensayo de erosión sobre mesa vibratoria (Phu 1979; Caicedo 2001)	.31	
	2.5	.6. Ensayo triaxial para la cuantificación de la erodabilidad (Jung et al. 2009)	.31	
2		ANTECEDENTES	ว ว	
J.			33	
з. 4.		METODOLOGÍA DE ESTUDIO	35 35	
3. 4.	4.1.	METODOLOGÍA DE ESTUDIO ETAPA 1: DISEÑO DEL EXPERIMENTO DE EROSIÓN A ESCALA REAL	33 35 35	
3. 4.	4.1. 4.2.	METODOLOGÍA DE ESTUDIO ETAPA 1: DISEÑO DEL EXPERIMENTO DE EROSIÓN A ESCALA REAL. ETAPA 2: ADQUISICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.	35 .35 .35	
3. 4.	4.1. 4.2. 4.3.	METODOLOGÍA DE ESTUDIO ETAPA 1: DISEÑO DEL EXPERIMENTO DE EROSIÓN A ESCALA REAL ETAPA 2: ADQUISICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES ETAPA 3: CONSTRUCCIÓN Y PUESTA A PUNTO DEL MONTAJE EXPERIMENTAL	35 .35 .35 .35 .35	
4 .	 4.1. 4.2. 4.3. 4.4. 	METODOLOGÍA DE ESTUDIO ETAPA 1: DISEÑO DEL EXPERIMENTO DE EROSIÓN A ESCALA REAL ETAPA 2: ADQUISICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES ETAPA 3: CONSTRUCCIÓN Y PUESTA A PUNTO DEL MONTAJE EXPERIMENTAL ETAPA 4: ENSAYOS DE EROSIÓN A ESCALA REAL	35 .35 .35 .35 .35 .36	
4.	 4.1. 4.2. 4.3. 4.4. 4.5. 	METODOLOGÍA DE ESTUDIO ETAPA 1: DISEÑO DEL EXPERIMENTO DE EROSIÓN A ESCALA REAL. ETAPA 2: ADQUISICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES ETAPA 3: CONSTRUCCIÓN Y PUESTA A PUNTO DEL MONTAJE EXPERIMENTAL ETAPA 4: ENSAYOS DE EROSIÓN A ESCALA REAL ETAPA 5: MODELACIÓN EN COMPUTADOR DEL COMPORTAMIENTO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS.	35 .35 .35 .35 .35 .36 .36	
4.	 4.1. 4.2. 4.3. 4.4. 4.5. 4.6. 	METODOLOGÍA DE ESTUDIO ETAPA 1: DISEÑO DEL EXPERIMENTO DE EROSIÓN A ESCALA REAL ETAPA 2: ADQUISICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES ETAPA 3: CONSTRUCCIÓN Y PUESTA A PUNTO DEL MONTAJE EXPERIMENTAL ETAPA 4: ENSAYOS DE EROSIÓN A ESCALA REAL ETAPA 5: MODELACIÓN EN COMPUTADOR DEL COMPORTAMIENTO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS ETAPA 6: DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE AUSCULTACIÓN DINÁMICA PARA DETERMINA	35 .35 .35 .35 .36 .36 .36	
4.	4.1. 4.2. 4.3. 4.4. 4.5. 4.6.	METODOLOGÍA DE ESTUDIO ETAPA 1: DISEÑO DEL EXPERIMENTO DE EROSIÓN A ESCALA REAL. ETAPA 2: ADQUISICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES ETAPA 3: CONSTRUCCIÓN Y PUESTA A PUNTO DEL MONTAJE EXPERIMENTAL ETAPA 4: ENSAYOS DE EROSIÓN A ESCALA REAL ETAPA 5: MODELACIÓN EN COMPUTADOR DEL COMPORTAMIENTO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS ETAPA 6: DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE AUSCULTACIÓN DINÁMICA PARA DETERMINA EL DETERIORO POR EROSIÓN DE LAS BASES DE PAVIMENTO RÍGIDO	35 .35 .35 .35 .36 .36 .36 .R .36	
4.	 4.1. 4.2. 4.3. 4.4. 4.5. 4.6. 4.7. 	METODOLOGÍA DE ESTUDIO ETAPA 1: DISEÑO DEL EXPERIMENTO DE EROSIÓN A ESCALA REAL. ETAPA 2: ADQUISICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES ETAPA 3: CONSTRUCCIÓN Y PUESTA A PUNTO DEL MONTAJE EXPERIMENTAL ETAPA 4: ENSAYOS DE EROSIÓN A ESCALA REAL ETAPA 4: ENSAYOS DE EROSIÓN A ESCALA REAL ETAPA 5: MODELACIÓN EN COMPUTADOR DEL COMPORTAMIENTO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS ETAPA 6: DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE AUSCULTACIÓN DINÁMICA PARA DETERMINA EL DETERIORO POR EROSIÓN DE LAS BASES DE PAVIMENTO RÍGIDO ETAPA 7:ANÁLISIS DE RESULTADOS.	35 .35 .35 .35 .36 .36 .36 .36 .36	
4.	 4.1. 4.2. 4.3. 4.4. 4.5. 4.6. 4.7. 4.8. 	METODOLOGÍA DE ESTUDIO ETAPA 1: DISEÑO DEL EXPERIMENTO DE EROSIÓN A ESCALA REAL ETAPA 2: ADQUISICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES ETAPA 3: CONSTRUCCIÓN Y PUESTA A PUNTO DEL MONTAJE EXPERIMENTAL ETAPA 4: ENSAYOS DE EROSIÓN A ESCALA REAL ETAPA 5: MODELACIÓN EN COMPUTADOR DEL COMPORTAMIENTO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS ETAPA 6: DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE AUSCULTACIÓN DINÁMICA PARA DETERMINA EL DETERIORO POR EROSIÓN DE LAS BASES DE PAVIMENTO RÍGIDO ETAPA 7:ANÁLISIS DE RESULTADOS ETAPA 8 Y 9: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES	35 .35 .35 .35 .36 .36 .36 .36 .36 .36	
4.	 4.1. 4.2. 4.3. 4.4. 4.5. 4.6. 4.7. 4.8. 4.9. 	METODOLOGÍA DE ESTUDIO ETAPA 1: DISEÑO DEL EXPERIMENTO DE EROSIÓN A ESCALA REAL. ETAPA 2: ADQUISICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES ETAPA 3: CONSTRUCCIÓN Y PUESTA A PUNTO DEL MONTAJE EXPERIMENTAL ETAPA 4: ENSAYOS DE EROSIÓN A ESCALA REAL ETAPA 4: ENSAYOS DE EROSIÓN A ESCALA REAL ETAPA 5: MODELACIÓN EN COMPUTADOR DEL COMPORTAMIENTO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS ETAPA 6: DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE AUSCULTACIÓN DINÁMICA PARA DETERMINA EL DETERIORO POR EROSIÓN DE LAS BASES DE PAVIMENTO RÍGIDO ETAPA 7:ANÁLISIS DE RESULTADOS ETAPAS 8 Y 9: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES ETAPA 10: GENERACIÓN DEL DOCUMENTO TÉCNICO FINAL	35 35 .35 .35 .35 .36 .36 .36 .36 .36 .36 .37	
5. 5.	4.1. 4.2. 4.3. 4.4. 4.5. 4.6. 4.7. 4.8. 4.9.	METODOLOGÍA DE ESTUDIO ETAPA 1: DISEÑO DEL EXPERIMENTO DE EROSIÓN A ESCALA REAL ETAPA 2: ADQUISICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES ETAPA 3: CONSTRUCCIÓN Y PUESTA A PUNTO DEL MONTAJE EXPERIMENTAL ETAPA 4: ENSAYOS DE EROSIÓN A ESCALA REAL ETAPA 5: MODELACIÓN EN COMPUTADOR DEL COMPORTAMIENTO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS ETAPA 6: DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE AUSCULTACIÓN DINÁMICA PARA DETERMINA EL DETERIORO POR EROSIÓN DE LAS BASES DE PAVIMENTO RÍGIDO ETAPA 7: ANÁLISIS DE RESULTADOS ETAPA 8 Y 9: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES ETAPA 10: GENERACIÓN DEL DOCUMENTO TÉCNICO FINAL	35 35 .35 .35 .36 .36 .36 .36 .36 .36 .37 39	
5. 5.	 4.1. 4.2. 4.3. 4.4. 4.5. 4.6. 4.7. 4.8. 4.9. 5.1. 	METODOLOGÍA DE ESTUDIO ETAPA 1: DISEÑO DEL EXPERIMENTO DE EROSIÓN A ESCALA REAL. ETAPA 2: ADQUISICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES ETAPA 3: CONSTRUCCIÓN Y PUESTA A PUNTO DEL MONTAJE EXPERIMENTAL ETAPA 4: ENSAYOS DE EROSIÓN A ESCALA REAL ETAPA 5: MODELACIÓN EN COMPUTADOR DEL COMPORTAMIENTO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS ETAPA 6: DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE AUSCULTACIÓN DINÁMICA PARA DETERMINA EL DETERIORO POR EROSIÓN DE LAS BASES DE PAVIMENTO RÍGIDO ETAPA 7: ANÁLISIS DE RESULTADOS ETAPA 8 Y 9: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES ETAPA 10: GENERACIÓN DEL DOCUMENTO TÉCNICO FINAL ENSAYOS DE EROSIÓN A ESCALA REAL (ETAPAS 1, 2 Y 3) DESCRIPCIÓN GENERAL	35 35 .35 .35 .36 .36 .36 .36 .36 .36 .36 .36 .37 39 .39	
5. 5.	4.1. 4.2. 4.3. 4.4. 4.5. 4.6. 4.7. 4.8. 4.9. 5.1. 5.2.	METODOLOGÍA DE ESTUDIO ETAPA 1: DISEÑO DEL EXPERIMENTO DE EROSIÓN A ESCALA REAL ETAPA 2: ADQUISICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES ETAPA 3: CONSTRUCCIÓN Y PUESTA A PUNTO DEL MONTAJE EXPERIMENTAL ETAPA 4: ENSAYOS DE EROSIÓN A ESCALA REAL ETAPA 5: MODELACIÓN EN COMPUTADOR DEL COMPORTAMIENTO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS ETAPA 6: DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE AUSCULTACIÓN DINÁMICA PARA DETERMINA EL DETERIORO POR EROSIÓN DE LAS BASES DE PAVIMENTO RÍGIDO ETAPA 7: ANÁLISIS DE RESULTADOS ETAPA 8 Y 9: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES ETAPA 10: GENERACIÓN DEL DOCUMENTO TÉCNICO FINAL ENSAYOS DE EROSIÓN A ESCALA REAL (ETAPAS 1, 2 Y 3) DESCRIPCIÓN GENERAL CONSTRUCCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO RÍGIDO	35 35 .35 .35 .35 .36 .36 .36 .36 .36 .36 .36 .37 39 .39 .42	
 4. 5. 	4.1. 4.2. 4.3. 4.4. 4.5. 4.6. 4.7. 4.8. 4.9. 5.1. 5.2. 5.2.	METODOLOGÍA DE ESTUDIO ETAPA 1: DISEÑO DEL EXPERIMENTO DE EROSIÓN A ESCALA REAL. ETAPA 2: ADQUISICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES. ETAPA 3: CONSTRUCCIÓN Y PUESTA A PUNTO DEL MONTAJE EXPERIMENTAL ETAPA 4: ENSAYOS DE EROSIÓN A ESCALA REAL ETAPA 5: MODELACIÓN EN COMPUTADOR DEL COMPORTAMIENTO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS ETAPA 6: DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE AUSCULTACIÓN DINÁMICA PARA DETERMINA EL DETERIORO POR EROSIÓN DE LAS BASES DE PAVIMENTO RÍGIDO ETAPA 7: ANÁLISIS DE RESULTADOS. ETAPA 8 9 9: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES. ETAPA 10: GENERACIÓN DEL DOCUMENTO TÉCNICO FINAL ENSAYOS DE EROSIÓN A ESCALA REAL (ETAPAS 1, 2 Y 3) DESCRIPCIÓN GENERAL CONSTRUCCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO RÍGIDO	35 35 .35 .35 .35 .35 .35 .36 .36 .36 .36 .36 .36 .36 .37 39 .42 .50	
5. 5.	4.1. 4.2. 4.3. 4.4. 4.5. 4.6. 4.7. 4.8. 4.9. 5.1. 5.2. 5.2 5.2	METODOLOGÍA DE ESTUDIO ETAPA 1: DISEÑO DEL EXPERIMENTO DE EROSIÓN A ESCALA REAL ETAPA 2: ADQUISICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES ETAPA 3: CONSTRUCCIÓN Y PUESTA A PUNTO DEL MONTAJE EXPERIMENTAL ETAPA 4: ENSAYOS DE EROSIÓN A ESCALA REAL ETAPA 5: MODELACIÓN EN COMPUTADOR DEL COMPORTAMIENTO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS ETAPA 6: DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE AUSCULTACIÓN DINÁMICA PARA DETERMINA EL DETERIORO POR EROSIÓN DE LAS BASES DE PAVIMENTO RÍGIDO ETAPA 7: ANÁLISIS DE RESULTADOS ETAPA 8 Y 9: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES ETAPA 10: GENERACIÓN DEL DOCUMENTO TÉCNICO FINAL ENSAYOS DE EROSIÓN A ESCALA REAL (ETAPAS 1, 2 Y 3) DESCRIPCIÓN GENERAL CONSTRUCCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO RÍGIDO .1. Conjunto de ensayos 1 .2. Conjunto de ansayos 2	33 35 .35 .35 .35 .35 .36 .36 .36 .36 .36 .36 .36 .37 39 .42 .50 .57	
5. 5.	4.1. 4.2. 4.3. 4.4. 4.5. 4.6. 4.7. 4.8. 4.9. 5.1. 5.2. 5.2 5.2 5.2 5.2	METODOLOGÍA DE ESTUDIO ETAPA 1: DISEÑO DEL EXPERIMENTO DE EROSIÓN A ESCALA REAL. ETAPA 2: ADQUISICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES. ETAPA 3: CONSTRUCCIÓN Y PUESTA A PUNTO DEL MONTAJE EXPERIMENTAL ETAPA 4: ENSAYOS DE EROSIÓN A ESCALA REAL ETAPA 5: MODELACIÓN EN COMPUTADOR DEL COMPORTAMIENTO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS ETAPA 6: DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE AUSCULTACIÓN DINÁMICA PARA DETERMINA EL DETERIORO POR EROSIÓN DE LAS BASES DE PAVIMENTO RÍGIDO ETAPA 7: ANÁLISIS DE RESULTADOS ETAPA 8 9 9: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES ETAPA 10: GENERACIÓN DEL DOCUMENTO TÉCNICO FINAL ENSAYOS DE EROSIÓN A ESCALA REAL (ETAPAS 1, 2 Y 3) DESCRIPCIÓN GENERAL CONSTRUCCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO RÍGIDO .1. Conjunto de ensayos 1 .2. Conjunto de ensayos 2 .3. Conjunto de ensayos 3	33 35 .35 .35 .35 .36 .36 .36 .36 .36 .36 .36 .36 .37 39 .42 .57 .63	
5. 4.	4.1. 4.2. 4.3. 4.4. 4.5. 4.6. 4.7. 4.8. 4.9. 5.1. 5.2. 5.2 5.2 5.2 5.2 5.2	METODOLOGÍA DE ESTUDIO ETAPA 1: DISEÑO DEL EXPERIMENTO DE EROSIÓN A ESCALA REAL ETAPA 2: ADQUISICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES ETAPA 3: CONSTRUCCIÓN Y PUESTA A PUNTO DEL MONTAJE EXPERIMENTAL ETAPA 4: ENSAYOS DE EROSIÓN A ESCALA REAL ETAPA 5: MODELACIÓN EN COMPUTADOR DEL COMPORTAMIENTO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS ETAPA 6: DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE AUSCULTACIÓN DINÁMICA PARA DETERMINA EL DETERIORO POR EROSIÓN DE LAS BASES DE PAVIMENTO RÍGIDO ETAPA 7: ANÁLISIS DE RESULTADOS ETAPA 8 9 9: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES ETAPA 10: GENERACIÓN DEL DOCUMENTO TÉCNICO FINAL ENSAYOS DE EROSIÓN A ESCALA REAL (ETAPAS 1, 2 Y 3) DESCRIPCIÓN GENERAL CONSTRUCCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO RÍGIDO .1. Conjunto de ensayos 1 .2. Conjunto de ensayos 2 .3. Conjunto de ensayos 3 .4. Conjunto de ensayos 4	33 35 .35 .35 .35 .36 .36 .36 .36 .36 .37 39 .42 .57 .63 .67 .68	
5.	$\begin{array}{c} 4.1.\\ 4.2.\\ 4.3.\\ 4.4.\\ 4.5.\\ 4.6.\\ 4.7.\\ 4.8.\\ 4.9.\\ 5.1.\\ 5.2.\\ 5.2\\ 5.2\\ 5.2\\ 5.2\\ 5.2\\ 5.3.\\ 5.4. \end{array}$	METODOLOGÍA DE ESTUDIO ETAPA 1: DISEÑO DEL EXPERIMENTO DE EROSIÓN A ESCALA REAL ETAPA 2: ADQUISICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES ETAPA 3: CONSTRUCCIÓN Y PUESTA A PUNTO DEL MONTAJE EXPERIMENTAL ETAPA 4: ENSAYOS DE EROSIÓN A ESCALA REAL ETAPA 5: MODELACIÓN EN COMPUTADOR DEL COMPORTAMIENTO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS ETAPA 6: DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE AUSCULTACIÓN DINÁMICA PARA DETERMINA EL DETERIORO POR EROSIÓN DE LAS BASES DE PAVIMENTO RÍGIDO ETAPA 7: ANÁLISIS DE RESULTADOS. ETAPA 8 Y 9: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES. ETAPA 10: GENERACIÓN DEL DOCUMENTO TÉCNICO FINAL ENSAYOS DE EROSIÓN A ESCALA REAL (ETAPAS 1, 2 Y 3) DESCRIPCIÓN GENERAL CONSTRUCCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO RÍGIDO. 1. Conjunto de ensayos 1 .2. Conjunto de ensayos 2 .3. Conjunto de ensayos 3 .4. Conjunto de ensayos 4 SISTEMA DE APLICACIÓN DE CARGA.	33 35 .35 .35 .35 .35 .36 .36 .36 .36 .36 .37 39 .42 .57 .63 .67 .68 .76	
5.	$\begin{array}{c} 4.1.\\ 4.2.\\ 4.3.\\ 4.4.\\ 4.5.\\ 4.6.\\ 4.7.\\ 4.8.\\ 4.9.\\ 5.1.\\ 5.2.\\ 5.2\\ 5.2\\ 5.2\\ 5.2\\ 5.2\\ 5.2\\ 5$	METODOLOGÍA DE ESTUDIO ETAPA 1: DISEÑO DEL EXPERIMENTO DE EROSIÓN A ESCALA REAL ETAPA 2: ADQUISICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES ETAPA 3: CONSTRUCCIÓN Y PUESTA A PUNTO DEL MONTAJE EXPERIMENTAL ETAPA 4: ENSAYOS DE EROSIÓN A ESCALA REAL ETAPA 5: MODELACIÓN EN COMPUTADOR DEL COMPORTAMIENTO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS ETAPA 6: DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE AUSCULTACIÓN DINÁMICA PARA DETERMINA EL DETERIORO POR EROSIÓN DE LAS BASES DE PAVIMENTO RÍGIDO ETAPA 7: ANÁLISIS DE RESULTADOS. ETAPA 8 Y 9: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES. ETAPA 10: GENERACIÓN DEL DOCUMENTO TÉCNICO FINAL ENSAYOS DE EROSIÓN A ESCALA REAL (ETAPAS 1, 2 Y 3) DESCRIPCIÓN GENERAL CONSTRUCCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO RÍGIDO. 1. Conjunto de ensayos 1 .2. Conjunto de ensayos 2 .3. Conjunto de ensayos 3 .4. Conjunto de ensayos 4 .5ISTEMA DE APLICACIÓN DE CARGA. SISTEMA HIDRÁULICO	33 35 .35 .35 .35 .36 .36 .36 .36 .36 .36 .36 .36 .37 39 .42 .57 .63 .67 .68 .76	

	5.5.2. Calibración de los sensores in-situ	
	5.6. SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y ALMACENAMIENTO DE DATOS	
	5.7. EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS DE EROSIÓN A ESCALA REAL (ETAPA 4)	
	5.7.1. Protocolo de inicio y terminación de los sistemas de carga y de instrum	entación 85
	5.7.2. Estado de finalización de los ensayos de erosión a escala real	
	5.8. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE RESULTADOS	91
6	ΜΩΠΕΙ Ο ΝΙΙΜΈΡΙCΟ ΠΕ ΡΡΟCΕSOS ΠΕ ΕΡΟSΙÓΝ ΕΝ ΡΑΥΙΜΕΝΤΟς ΡΙ	
0.	6.1 PARÁMETROS PRINCIPALES QUE CONTROLAN EL FENÓMENO DEL ROMBEO EN PAVIM	ENTOS
	RÍCIDOS Y DETERMINAN I AS METODOLOCÍAS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERI	AIFS 99
	6.2 REVISIÓN BIBLIOCRÁFICA	100
	6.2.1 Modelos empíricos	100
	6.2.2. Modelos con elementos finitos y métodos empíricos	102
	6.3 ALCANCE DEL MODELO NUMÉRICO PROPILESTO	105
	6.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO	106
	6.4.1. Deflexión dinámica de una losa sin presencia de aqua	
	6.4.2. Consideraciones para el acoplamiento de las formulaciones mecánica e	hidráulica
	113	
	6.4.3. Modelo Hidráulico	
	6.4.4. Proceso de erosión del material de base en el modelo	
	6.5. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO A COMPUTADOR	
	6.6. SIMULACIONES NUMÉRICAS	
	6.6.1. Calibración de la variable del modelo 'delta (intervalo) de tiempo'	
	6.6.2. Análisis de sensibilidad de las principales variables en el fenómeno de e	rosión con
	respecto al desplazamiento de la placa de concreto	
	6.6.3. Análisis de sensibilidad de principales variables en el fenómeno con resp	pecto al
	volumen de material erodado	134
7	FNSAVOS DE AUSCULTACIÓN NO-DESTRUCTIVA EN PAVIMENTOS (E	TAPA 6)
<i>'</i> .	145	i i i i oj
	7.1. MEDICIÓN MANUAL DE LA DEFORMACIÓN PERMANENTE DE LAS PLACAS	
	7.2. PRINCIPIO DE LA METODOLOGÍA DE AUSCULTACIÓN DINÁMICA DE EROSIÓN NO-DEST	RUCTIVA. 147
	7.2.1. Técnica Impact-Echo	
	7.2.2. Componentes del sistema de auscultación dinámica no-destructiva	
	7.2.3. Instalación del sistema de auscultación no destructiva	
	7.2.4. Metodología de análisis de resultados para ensayos de auscultación	
0	ΑΝΆΙ ΙΣΙΣ DE DESIJI ΤΑ DOS (ΕΤΑDA 7)	150
0.	ANALISIS DE RESULTADOS (ETAPA /)	130 1 0
	0.1. RESULTADOS Y ANALISIS DE LOS ENSAYOS MECANICOS DE EROSION A ESCALA REAL.	
	8.1.1. Consider actiones iniciales por garungciones generales de estructuras	130
	8.1.2. Analisis iniciales por agriable	
	8.2 Desult tados y análisis de las mediciones de decodmación dedmanente a tra	
	0.2. Resolution fermanente a fraAdjucación de ciclos de cadea	183 DE LA
	8 2 1 Variable de análisis: espesor de la placa de concreto	
	822 Variable de análisis: espesor de la placa de concreto	
	8.2.3. Variable de análisis: precuencia de las canas de hase aranular estabiliza	ndas con
	cemento	189
	8.2.4. Variable de análisis: tipo de material empleado en la cana de hase del n	avimento



8.3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA AUSCULTACIÓN NO-	
	DESTRUCTIVA DE EROSIÓN EN PAVIMENTOS RÍGIDOS EN SERVICIO	195
8.3	2.1. Variable de análisis: espesor de la placa de concreto	195
8.3	2.2. Variable de análisis: frecuencia de aplicación de carga	201
8.3	<i>.3. Variable de análisis: resistencia de las capas de base granular estabilizadas con</i>	
	cemento	205
8.3	<i>1.4. Variable de análisis: tipo de material empleado en la capa de base del pavimento</i> 208)
8.4.	Comparación entre los resultados de los ensayos de erosión a escala real, los	
	ENSAYOS DE AUSCULTACIÓN NO-DESTRUCTIVA Y LAS MEDICIONES DE DEFORMACIÓN	
	PERMANENTE	212
9	CONCLUSIONES	216
9.1.	CONCLUSIONES GENERALES SOBRE EL ENSAYO MECÁNICO DE EROSIÓN A ESCALA REAL	216
9.1	.1. Influencia del tipo de material y del espesor de la losa de concreto	216
9.1	.2. Influencia de la frecuencia de aplicación de carga	218
9.2.	CONCLUSIONES GENERALES SOBRE LA METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA AUSCULTACIÓN NO	-
	DESTRUCTIVA DE EROSIÓN EN PAVIMENTOS EN SERVICIO Y SOBRE LAS MEDICIONES DE	
	DEFORMACIÓN PERMANENTE DE LOS PAVIMENTOS ENSAYADOS	219
9.3.	CONCLUSIONES GENERALES SOBRE EL MODELO NUMÉRICO DE EROSIÓN DE PAVIMENTOS RÍGID	OS
		220
10.	RECOMENDACIONES	222
10.1.	RECOMENDACIONES GENERALES	222
10.2.	COMENTARIOS A LAS ESPECIFICACIONES IDU VIGENTES	224
11.	ACTIVIDADES DE DIVULGACIÓN	226
12.	BIBLIOGRAFÍA	228
ANEXO	S	230

Lista de Figuras

Figura 1. Proceso de bombeo en pavimentos rígidos con capas de base de a	alta
susceptibilidad a la erosión	.26
Figura 2. Relación entre las diferentes etapas del proyecto	. 38
Figura 3. Esquema general de las pistas de ensayo	.40
Figura 4. Corte transversal de una estructura a ensayar.	.42
Figura 5. Vista en planta de la pista de pruebas.	.43
Figura 6. Detalle de configuración de las juntas.	.44
Figura 7. Detalle del material remanente que se utilizará como subbase en la construcc	ión
de las estructuras del ensayo	.45
Figura 8. Levantamiento, limpieza y homogenización del material granular remaner	nte.
Subbase granular	.46
Figura 9. Muestreo del material granular remanente a emplear con subbase de	las
estructuras de pavimento.	.46
Figura 10. Muestra de las geoceldas retiradas de un proyecto anterior	.47
Figura 11. Remoción del material granular remanente, para su limpieza y remezclado	.47
Figura 12. Nivel de subrasante de la pista de pruebas. Recubrimiento con geotextil	de
limpieza	.47
Figura 13. Compactación del material de subbase granular sin estabilizar	.47
Figura 14. Control de espesores de las capas.	.48
Figura 15. Separación de las estructuras con configuraciones de capas distintas	.48
Figura 16. Extendido del material para la estructura con base granular sin estabilizar en	n la
pista de pruebas. Capas con espesores entre 10 v 15 cm.	.48
Figura 17. Compactación del material de base granular sin estabilizar.	.48
Figura 18. Ensavo de proctor modificado al material de subbase granular	.48
Figura 19. Ensavo de densidad con cono y arena a nivel de base granular.	.48
Figura 20. Configuración geométrica de primer conjunto de estructuras	.50
Figura 21. Ensavo de Proctor modificado al material de base granular.	.51
Figura 22. Homogenización v extendido de la base granular con 6.1% de cemento.	.54
Figura 23 Compactación de la base granular estabilizada con 6 1% de cemento	54
Figura 24 Demarcación con cimbra para instalación de formaletas para la fundición	de
losas	54
Figura 25. Instalación de formaleta de madera debidamente acodalada.	.54
Figura 26 Fundición/Llenado de losas en forma de ajedrez	54
Figura 27 Nivelación de la mezcla con boquillera de aluminio	54
Figura 28 Curado de las 5 primeras losas fundidas (suministro de agua por 15 días)	55
Figura 29. Detalle de la separación de juntas empleando láminas de iconor	55
Figura 30 Segundo par de losas fundidas en forma de ajedrez	55
Figura 31 Segundo par de losas fundidas en forma de ajedrez.	55
Figura 32 Ubicación del montaje de aplicación de carga dentro de la pista de pavimen	tos
rigara 52. Obreación del montaje de apreación de carga dentro de la pista de pavinien	55
Figura 33 Perforación de las losas para la instalación de los sensores de carga	55
Figura 34 Proceso de demolición de placas	56
Figura 35 Pista parcialmente demolida	56
1 15ara 55. 1 15ta paretamente demonda.	.50

Figura 36. Martillos usados en el proceso de demolición.	.56
Figura 37. Escombros del primer conjunto de placas	.56
Figura 38. Remoción de escombros de la pista. de pruebas.	. 57
Figura 39. Remoción de capas de base. existentes.	. 57
Figura 40. Configuración geométrica del segundo conjunto de estructuras.	.58
Figura 41. Resultados de ensayo de compactación Proctor Modificado	. 59
Figura 42. Compactación de capa de subbase.	. 60
Figura 43. División de la pista para diferenciación del nivel de subbase	. 60
Figura 44. Proceso de compactación de capas de base.	. 60
Figura 45. Formaletas para fundición de concreto.	. 60
Figura 46. Fundición de las primeras 5 losas.	.61
Figura 47. Fundición de 5 losas restantes	.61
Figura 48. Sistema de vigas-gato hidráulico para la extracción de las placas	. 62
Figura 49. Proceso de corte de una de las placas.	. 62
Figura 50. Extracción del tercio central de la primera placa.	. 62
Figura 51. Transporte de la placa fuera de la pista de prueba.	. 62
Figura 52. Proceso de transporte de las placas de concreto desde la pista hasta el laborato	orio
adjunto de estructuras.	. 62
Figura 53. Pista de pruebas luego de la extracción total de las placas de concreto	. 62
Figura 54. Configuración geométrica del tercer conjunto de ensayos.	.63
Figura 55. Nivelación de la capa de subbase para la construcción de nuevas estructuras	. 64
Figura 56. Construcción de nuevas bases estabilizadas con cemento.	. 64
Figura 57. Construcción de la base asfáltica (mezcla densa en caliente MD20)	. 65
Figura 58. Compactación de la base asfáltica (mezcla densa en caliente MD20)	.65
Figura 59. Proceso de estabilización in-situ de material granular con emulsión asfáltica	.65
Figura 60. Fundición de las primeras 5 placas del conjunto.	.65
Figura 61. Proceso de fundición terminado.	. 66
Figura 62. Montaje del sistema de aplicación de carga.	. 66
Figura 63. Proceso de corte de las placas para su posterior extracción	. 66
Figura 64. Espacio para la construcción del último conjunto de ensayos.	. 66
Figura 65. Configuración geométrica del cuarto conjunto de estructuras	. 67
Figura 66. Construcción de estructuras del cuarto conjunto de ensayos.	. 68
Figura 67. Diseño definitivo del sistema de aplicación de carga.	. 69
Figura 68. Localización del montaje de aplicación de cargas en el Laboratorio	.70
Figura 69. Diseño e implementación de las barras de apoyo para la instrumentación de	las
losas.	.70
Figura 70. Diseño, construcción e implementación de los anclajes al piso	.70
Figura 71. Diseño y fabricación de los elementos de neopreno (apoyo y transmisión	de
cargas).	.70
Figura 72. Pegado de los elementos de apoyo a las placas de aplicación de carga o	con
"boxer"	.71
Figura 73. Detalle de la rótula y la celda de carga usadas en el montaje de aplicación	de
carga	.71
Figura 74. Limpieza, lubricación y armado de la celda de carga con la rótula	.71

Figura 75. Detalle de las placas con las celdas de carga armadas completamente71
Figura 76. Detalle de la posición original de la viga principal del sistema de carga. (encima)
Figura 77. Detalle de la posición corregida de la viga principal del sistema de carga (debajo)
Figura 78. Vigas instaladas con los actuadores y celdas de carga: sistema completo de aplicación de carga
Figura 79. Refuerzo de las vigas del sistema de aplicación de carga73
Figura 80. Modificación del sistema de aplicación de carga para la última tanda de estructuras
Figura 81. Sistema de aplicación de carga en operación: carga y descarga en un pavimento con placa de 15 cm de espesor y capa de base de material granular sin estabilizar
Figura 82. Material granular de la capa de base expulsado a la superficie como consecuencia de los procesos de erosión generados por la presencia de agua y la aplicación de carga mecánica cíclica
Figura 83. Sistema de almacenaje y suministro de agua para los ensayos de erosión76
Figura 84. Pruebas iniciales del sistema de aplicación de agua. Corrección de fugas en las tuberías
Figura 85. Detalle de las dos (2) mangueras que transportan el agua al interior de la estructura en una de las losas de ensayo
Figura 86. Convención empleada para la numeración de las placas y para los sensores (vista de planta del montaje experimental)
Figura 87. Curvas de calibración de los sensores de una estructura correspondiente al primer conjunto de ensayos
Figura 88. Sistema de adquisición de datos
Figura 89. Ventana general del programa de captura y control: "EROSION II"
Figura 90. Componente de parámetros de ensayo del programa "EROSION II"
Figura 91. Componente de control del programa "EROSION II"
Figura 92. Componente registro de lecturas por variables instrumentadas. Programa "EROSION II"
Figura 93. Gráficas de señal de carga para cada una de las 4 losas; programa "EROSION II"
Figura 94. Ubicación de los instrumentos
Figura 95. Computador destinado al software de control
Figura 96. Fuente de energía de instrumentación
Figura 97. Encendedor del sistema 2
Figura 98. Válvula reguladora de presión de la unidad hidráulica
Figura 99. Panel para 'Bomba 2' y 'Torre 2'
Figura 100. Panel para encender la bomba
Figura 101. Válvula reguladora de presión de la unidad hidráulica en 500 psi
Figura 102. Estabilización del sistema 1
Figura 103. Identificación de rangos de datos erróneos en un grupo de archivos92 Figura 104. Ampliación y recorte del rango de datos erróneos durante el pre-procesamiento.



Figura 105. Ondas de carga y desplazamiento medidas y corregidas en el pre-tratamiento.93
Figura 106. Señal de entrada típica aplicada a una estructura (Estructura 7)
Figura 107. Desplazamiento a nivel de base típico de una estructura (sensor DC3,
Estructura 7)
Figura 108. Estructura 7, sensor DC3
Figura 109. Estructura 7, sensor DC3 ciclos de histéresis de 10,000 a 350,000 ciclos97
Figura 110. Estructura 7, cambio en el constante de rigidez y en la energía disipada para el
sensor S2 en función del tiempo
Figura 111. Estructura 7, cambio en el desplazamiento máximo detectado por el sensor
DC3 en función del tiempo
Figura 112. Representación esquemática del modelo de Westergard con cavidad
Figura 113. Representación esquemática del modelo de periodicidad
Figura 114. Esquematización de la transferencia de carga entre losas
Figura 115. Esquematización del sistema de carga mediante una carga rodante o una carga
fija
Figura 116. Función de contacto
Figura 117. Caudal resultante del movimiento de la placa por causa de una aplicación de
carga
Figura 118, mm/ciclo de erosión vs. velocidad agua para el material GEC (los términos
'Diseño 1, 2 o 3' corresponden a los materiales granulares estabilizados con
cemento en proporción baja, media y alta, respectivamente),
Figura 119. mm/ciclo de erosión vs. velocidad de agua para GEE (el término 'Diseño 1, 2,
3 o 4' corresponden a los materiales granulares estabilizados con emulsión
asfáltica al 6% y cemento en proporción 0% 0.5% 1% y 1.5%
respectivamente) 118
Figura 120. Gráfica de mm/ciclo vs velocidad agua para el material MD20 ('Diseño 1'
corresponde a la mezcla convencional v 'Diseño 2' a la mezcla con
granulometría modificada al mínimo de finos)
Figura 121 Diagrama de fluio del modelo numérico
Figura 127. Calibración delta de tiempo para el caso estático sobre los parámetros a)
desplazamiento en placa cargada para diferentes valores de espesor de la
cavidad (Ye) y b) yelocidad de agua para diferentes valores de espesor de la
cavidad (Ve) 123
Figura 123 Calibración delta de tiempo para el Caso Dinámico (valores de velocidad vel
en km/h) sobre los parámetros a) desplazamiento en placa cargada y h)
velocidad de agua
Figura 124 Deflexión de un sistema de dos losas con cavidad inicial de 3 mm 125
Figura 125. Resultado tínico de una simulación para desplazamiento en placa cargada para
diferentes valores de espesor de la cavidad (Y_{ℓ}) 126
Figura 126 Resultado tínico de una simulación para velocidad máxima de agua para
distintos valores de espesor de la cavidad (V_a) 127
Figura 127 Influencia del espesor de la placa en el desplazamiento vertical máximo: a)
nara una cavidad de espesor necueño o etena temprena de erosión $(V_a - 0.2)$
para una cavidad de espesor pequeno o ciapa temprana de crosion (1e-0.2



mm), y b) para una etapa avanzada de los procesos de erosión (Ye=20 mm). 128 Figura 128. Influencia del tamaño de cavidad de erosión en el desplazamiento vertical máximo: a) carga de 250 KN y b) carga de 350 KN. 129 Figura 130. Influencia del espesor de la placa y la velocidad del vehículo en el desplazamiento máximo de la primera placa para diferentes espesor de la placa Figura 131. Influencia del espesor de la placa en la velocidad máxima de agua para estructuras con placas de concreto de diferente espesor: 1) 0.15 m, y b) 0.25 m. Figura 132. Ilustración del sistema de placas que confirman el modelo acoplado y del rango de abscisas del sistema graficadas para ilustrar el proceso de erosión durante las Figura 133. Evolución de la erosión, descrita como el perfil de la capa de base para las placas cargada y vecina, a lo largo de 40,000 ciclos simulados en el modelo. Figura 134. Comparación de la erosión, descrita como el perfil de la capa de base, el perfil de la capa de base para las placas cargada y vecina, a lo largo de 40,000 ciclos simulados en el modelo. Materiales: granulares estabilizados con cemento de Figura 135. Volumen de material perdido después de 40,000 ciclos de carga en el modelo para materiales granulares estabilizados con cemento de baja y alta resistencia y Figura 136. Comparación de la erosión, descrita como el perfil de la capa de base, después Figura 137. Relación entre la carga aplicada al pavimento y el volumen de material expulsado de la capa de base, después de 20,000 ciclos de carga......140 Figura 138. Comparación de la erosión, descrita como el perfil de la capa de base, después Figura 139. Relación entre la frecuencia de aplicación de carga y el volumen de material expulsado de la capa de base, después de 20,000 ciclos de carga.....141 Figura 140. Comparación de la erosión, descrita como el perfil de la capa de base, después de 20,000 ciclos de carga para diferentes espesores de la placa de concreto. 142 Figura 141. Relación entre el espesor de la placa de concreto y el volumen de material expulsado de la capa de base, después de 20,000 ciclos de carga......143 Figura 142. Comparación de la erosión, descrita como el perfil de la capa de base, después de 20,000 ciclos de carga para diferentes magnitudes de cavidad inicial. 144 Figura 143. Relación entre el tamaño de cavidad de erosión y el volumen de material expulsado de la capa de base, después de 20,000 ciclos de carga.....144 Figura 144. Ubicación de los puntos de control para las mediciones de deformación Figura 145. Ejemplo de la gráfica altura medida desde la viga vs. número de ciclos de carga para una estructura con base granular estabilizada con resistencia media. 146 Figura 146. Esquema general del método Impact-Echo y el método de dispersión de ondas



(a) "P" y "O" (adaptado de Sarria 2004)
Figura 147. Respuestas y ecuaciones fundamentales para el método Impact-Echo
(Sansalone 1997)150
Figura 148. (a) caso de propagación de la onda en el espesor de una placa que tiene una
imperfección, y (b) caso de propagación de la onda entre la superficie y la
imperfección (adaptado de Sansalone, 1997).
Figura 149. Sistema para la auscultación no destructiva de erosión en pavimentos rígidos.
152
Figura 150. Procedimiento de caída masa de impacto
Figura 151. Esquema de ubicación de los acelerómetros
Figura 152. Pantalla del programa diseñado para el control del sistema de auscultación. 155
Figura 153. Montaje definitivo de la metodología auscultación
Figura 154. Ejemplo datos crudos de aceleración vs tiempo ensayo auscultación
Figura 155. a) Velocidad vs tiempo (primera integral de la señal de aceleración), y b)
desplazamiento vs tiempo (segunda integral de la señal de aceleración)157
Figura 156. Ejemplo ciclos de histéresis a través de los ciclos de carga aplicados al sistema
que se consideran válidos para el sensor DC3–Estructura 2 (losa original)160
Figura 157. Ejemplo ciclos de histéresis a través de los ciclos de carga aplicados al sistema
que se consideran "no válidos" para el sensor DC3– Estructura 3 (losa original).
Figura 158. Ejemplo de intervalo de desplazamiento en función del número de ciclos -
Estructura 11
Figura 159. Intervalo de desplazamiento instantánea en función de los ciclos de carga -
análisis general y en conjunto de todas las estructuras en conjunto
Figura 160. Intervalo de desplazamiento instantáneo en función de los ciclos de carga -
análisis conjunto por espesor de placa o losa de concreto165
Figura 161. Intervalo de desplazamiento instantáneo en función de los ciclos de carga-
análisis conjunto por frecuencia de aplicación de carga166
Figura 162. Intervalo de desplazamiento instantáneo en función de los ciclos de carga-
análisis conjunto por material de base168
Figura 163. Intervalo de desplazamiento instantáneo para las estructuras E11 y E13170
Figura 164. Intervalo de desplazamiento instantáneo para las estructuras E4 y E5171
Figura 165. Intervalo de desplazamiento instantáneo para las estructuras E6 y E7172
Figura 166. Intervalo de desplazamiento instantáneo para las estructuras E11 y E12174
Figura 167. Intervalo de desplazamiento instantáneo para las estructuras E2 y E6176
Figura 168. Intervalo de desplazamiento instantáneo para las estructuras E7 y E8177
Figura 169. Intervalo de desplazamiento instantáneo para las estructuras E9 y E10 179
Figura 170. Intervalo de desplazamiento instantáneo para las estructuras E7, E8 y E11. 181
Figura 171. Intervalo de desplazamiento instantáneo para las estructuras E7, E8, E9 y E10.
Figura 172. Deformación permanente en estructuras E11 y E13185
Figura 173. Deformación permanente en estructuras E4 y E5
Figura 174. Deformación permanente en estructuras E6 y E7187
Figura 175. Deformación permanente en estructuras E11 v E12

Figura	176.	Deformación permanente en estructuras E2 y E31	89
Figura	177.	Deformación permanente en estructuras E2 y E61	90
Figura	178.	Deformación permanente en estructuras E7 y E81	91
Figura	179.	Deformación permanente en estructuras E9, E10 y E111	93
Figura	180.	Deformación permanente en estructuras E7, E8 y E111	94
Figura	181.	Aceleración máxima en estructuras E11 y E131	96
Figura	182.	Desplazamiento máximo en estructuras E11 y E131	97
Figura	183.	Aceleración máxima en estructuras E4 y E5 para el Sensor A21	98
Figura	184.	Desplazamiento máximo en estructuras E4 y E5 para el Sensor A2 1	99
Figura	185.	Aceleración máxima en estructuras E6 y E7 para el Sensor A22	200
Figura	186.	Desplazamiento máximo en estructuras E6 y E7 para el Sensor A22	200
Figura	187.	Aceleración máxima en estructuras E11 v E12 para los sensores A1 v A22	202
0			
Figura	188.	Desplazamiento máximo en estructuras E11 y E12 para los sensores A1 y A	42.
Figura	188.	Desplazamiento máximo en estructuras E11 y E12 para los sensores A1 y A	A2. 202
Figura Figura	188. 189.	Desplazamiento máximo en estructuras E11 y E12 para los sensores A1 y A Aceleración máxima en estructuras E2 y E3 para el Sensor A22	A2. 202 203
Figura Figura Figura	188. 189. 190.	Desplazamiento máximo en estructuras E11 y E12 para los sensores A1 y A Aceleración máxima en estructuras E2 y E3 para el Sensor A2	A2. 202 203 204
Figura Figura Figura Figura	188. 189. 190. 191.	Desplazamiento máximo en estructuras E11 y E12 para los sensores A1 y A Aceleración máxima en estructuras E2 y E3 para el Sensor A2	A2. 202 203 204 206
Figura Figura Figura Figura Figura	188. 189. 190. 191. 192.	Desplazamiento máximo en estructuras E11 y E12 para los sensores A1 y A Aceleración máxima en estructuras E2 y E3 para el Sensor A2	A2. 202 203 204 206 206
Figura Figura Figura Figura Figura	 188. 189. 190. 191. 192. 193. 	Desplazamiento máximo en estructuras E11 y E12 para los sensores A1 y A Aceleración máxima en estructuras E2 y E3 para el Sensor A2	A2. 202 203 204 206 206 206
Figura Figura Figura Figura Figura Figura	 188. 189. 190. 191. 192. 193. 194. 	Desplazamiento máximo en estructuras E11 y E12 para los sensores A1 y A Aceleración máxima en estructuras E2 y E3 para el Sensor A2	A2. 202 203 204 206 206 206 207 208
Figura Figura Figura Figura Figura Figura Figura	 188. 189. 190. 191. 192. 193. 194. 195. 	Desplazamiento máximo en estructuras E11 y E12 para los sensores A1 y A Aceleración máxima en estructuras E2 y E3 para el Sensor A2	A2. 202 203 204 206 206 206 207 208 209
Figura Figura Figura Figura Figura Figura Figura Figura	 188. 189. 190. 191. 192. 193. 194. 195. 196. 	Desplazamiento máximo en estructuras E11 y E12 para los sensores A1 y A Aceleración máxima en estructuras E2 y E3 para el Sensor A2	A2. 202 203 204 206 206 206 207 208 209 210
Figura Figura Figura Figura Figura Figura Figura Figura Figura	 188. 189. 190. 191. 192. 193. 194. 195. 196. 197. 	Desplazamiento máximo en estructuras E11 y E12 para los sensores A1 y A Aceleración máxima en estructuras E2 y E3 para el Sensor A2	A2. 202 203 204 206 206 206 207 208 209 210 211



Lista de Tablas

Tabla 1. Resumen de la clasificación a la susceptibilidad de los materiales ensayados a
través de los dos montajes experimentales diseñados e implementados en la Fase
I de este proyecto (entre menor el número de clasificación menos erodable es el
material)
Tabla 2. Configuración de las 13 estructuras ensayadas.40
Tabla 3. Características de la muestra de arcilla de subrasante
Tabla 4. Características de la muestra de subbase granular. 46
Tabla 5. Conjuntos de estructuras ensayadas. 49
Tabla 6. Estructuras del primer conjunto de ensayos.50
Tabla 7. Resultados ensayo densidad y peso unitario de base granular
Tabla 8. Porcentajes de modificación de cemento (por peso total de material) para los
materiales estabilizados con cemento
Tabla 9. Resultados ensayo densidad y peso unitario de base estabilizada con cemento de
resistencia baja
Tabla 10. Estructuras del segundo conjunto de ensayos.57
Tabla 11. Resultado ensayo de humedad natural sobre el material granular sin estabilizar.58
Tabla 12. Estructuras del tercer conjunto de ensayos
Tabla 13. Estructura del 4 conjunto de ensayos. 67
Tabla 14. Listado de sensores empleados en el proyecto. 77
Tabla 15. Condición de finalización de cada uno de los ensayos
Tabla 16. Resumen de materiales evaluados durante Erosión Fase I. 117
Tabla 17. Datos iniciales del modelo 121
Tabla 18. Casos estáticos simulados. 125
Tabla 19. Casos dinámicos simulados. 131
Tabla 20. Simulaciones realizadas con el fin de determinar la consistencia del modelo con
respecto a los materiales estudiados135
Tabla 21. Simulaciones realizadas con el fin de determinar la consistencia del modelo con
respecto a los las variables de carga, frecuencia de carga aplicadas, espesor de
losa y cavidad inicial138
Tabla 22. Formato de toma de datos para deformación permanente de las placas
Tabla 23. Ejemplo de intervalos de desplazamiento por ciclo – Estructura 10
Tabla 24. Ejemplo de intervalos de desplazamiento por ciclo – Estructura 9161
Tabla 25. Estructuras seleccionadas para el análisis de la influencia del espesor de la losa de
concreto en la deformación instantánea de la base de los pavimentos
Tabla 26. Estructuras seleccionadas para el análisis de la influencia de la frecuencia de
aplicación de carga en la deformación permanente de los pavimentos
Tabla 27. Estructuras seleccionadas para el análisis de la influencia de la resistencia de los
materiales de base granular estabilizados con cemento en la deformación



	permanente de los pavimentos
Tabla 28	Estructuras seleccionadas para el análisis de la influencia del tipo de material
	empleado en la base en la deformación permanente de los pavimentos178
Tabla 29	Estructuras seleccionadas para el análisis de la influencia de la frecuencia de
	aplicación de carga en la deformación permanente de los pavimentos
Tabla 30	Estructuras seleccionadas para el análisis de la influencia de la frecuencia de
	aplicación de carga en la deformación permanente de los pavimentos
Tabla 31.	Estructuras seleccionadas para el análisis de la influencia de la resistencia de los
	materiales de base granular estabilizados con cemento en la deformación
	permanente de los pavimentos
Tabla 32	Estructuras seleccionadas para el análisis de la influencia del tipo de material
	empleado en la base en la deformación permanente de los pavimentos192
Tabla 33.	Estructuras seleccionadas para el análisis de la influencia del espesor de la placa
	de concreto en la respuesta de las estructuras ante una carga de impacto 195
Tabla 34	Estructuras seleccionadas para el análisis de la influencia de la frecuencia de
	aplicación de carga en la respuesta de las estructuras ante una carga de impacto.
Tabla 35.	Estructuras seleccionadas para el análisis de la influencia de la resistencia de los
	materiales de base granular estabilizados con cemento en la respuesta de las
	estructuras ante una carga de impacto
Tabla 36	Estructuras seleccionadas para el análisis de la influencia del tipo de material
	empleado en la base en la respuesta de las estructuras ante carga de impacto 209



AGRADECIMIENTOS

Los profesores Bernardo Caicedo y Silvia Caro, del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de los Andes y quienes lideraron la ejecución de este proyecto, quisieran extender su agradecimiento a todos los ingenieros, estudiantes y técnicos que participaron y apoyaron las actividades realizadas como parte del mismo. En particular, agradecemos la constante colaboración de la ingeniera Julieth Monroy y de Jairo Acosta, quienes hicieron posible el montaje experimental de modelos físicos de pavimentos rígidos sometidos a carga mecánica y procesos de erosión a través de la implementación y puesta a punto de los sistemas de aplicación de carga, instrumentación y adquisición y captura de datos de los ensayos a escala real. Adicionalmente, ellos lideraron la implementación de las actividades relacionadas con el sistema de auscultación no destructivo propuesto como parte de este proyecto. Este agradecimiento se extiende también al técnico de instrumentación Oscar Mauricio Tobar. Adicionalmente, quisiéramos agradecer a los ingenieros Edwin Ricardo Medina y a Eduardo José Rueda por su apoyo en la coordinación de las actividades realizadas en las diferentes etapas del proyecto. El ingeniero Daniel Ricardo Varela merece un reconocimiento especial por su compromiso y apoyo durante más de dos años en todas y cada una de las actividades relacionadas con este contrato. Quisiéramos también destacar el apoyo brindado por el ingeniero Jaime Wills en el desarrollo y consolidación de la metodología de procesamiento y análisis de información de los ensayos de erosión. Nuestro agradecimientos también se extienden a la ingeniera María Alejandra Hernández y al ingeniero Cristian David Saavedra, quienes durante un periodo total de dos años supervisaron y apoyaron diversas actividades relacionados con el montaje experimental y con el procesamiento de la información obtenida de dicho montaje. En la etapa final del proyecto, recibimos el apoyo adicional de la ingeniera Lina Marcela Arrieta y de los estudiantes María Lleras y Amílcar Loaiza, quienes nos ayudaron a consolidar los procesos de análisis de información y participaron activamente de la elaboración de los informes finales. Además, durante la ejecución de los ensayos mecánicos de erosión, contamos con la ayuda y el apoyo de los siguientes estudiantes de pregrado: Andrés Bonilla, Mara Fernández, Orlando Fragozo, Mario García, Juan Fernando Marthán, Julián Solano, Alberto Consuegra, Juan Felipe Rincón, Andrés Felipe González. A todos ellos nuestro agradecimiento.

Finalmente, deseamos reconocer y agradecer el constante apoyo y la oportuna y valiosa retroalimentación brindados por el ingeniero Oscar Mauricio Velásquez, de la Dirección Técnica Estratégica del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), quien estuvo a cargo de la supervisión de este contrato. Nuestro agradecimiento se extiende igualmente a todo el equipo de trabajo de dicha división y, en particular, a su directora, la doctora Sully Magalis Rojas. La Universidad considera que estudios de esta naturaleza son fundamentales para avanzar en la consecución de una infraestructura vial de alta calidad para la ciudad y agradece al IDU por su permanente interés en realizar proyectos de consultoría con una



gran componente investigativa que, indiscutiblemente, producen un alto impacto para la ciudad.

- Estudio de la Resistencia a la Erosión de materiales empleados como Bases en Pavimentos de Concreto Hidráulico, Fase



DESCARGO DE RESPONSABILIDADES

Las ideas, opiniones, análisis y conclusiones presentados en este documento corresponden exclusivamente a la del equipo de trabajo de la Universidad de los Andes que estuvo a cargo del desarrollo del proyecto. Éstos no corresponden necesariamente con las ideas y opiniones del Instituto del Desarrollo Urbano de Bogotá (IDU), ni comprometen de forma directa o indirecta a esta entidad.



RESUMEN

Los pavimentos rígidos, también conocidos como pavimentos de concreto hidráulico, han sido empleados desde hace más de un siglo en la construcción de proyectos de infraestructura vial. Estos pavimentos, que se caracterizan por tener una larga vida de servicio en comparación con los pavimentos flexibles o asfálticos, están conformados por una placa de concreto—la cual asume la mayoría de la responsabilidad de estructural del sistema—una o varias capas de base o subbase—cuya función es proveer soporte continuo y duradero a las placas de concreto—, y por el suelo natural existente en el terreno o suelo de subrasante.

Uno de los principales mecanismos de daño que afectan el buen desempeño, la durabilidad y el nivel de servicio de estas estructuras es la erosión de la capa base, fenómeno también conocido como bombeo (o 'pumping', en la literatura internacional). Este fenómeno se desarrolla cuando el agua libre que se encuentra en la superficie del pavimento ingresa a la estructura a través de las juntas y, ante la presencia de carga de un vehículo que se aproxima a esta zona, es impulsada a altas velocidades sobre la interface horizontal que existe entre la placa de concreto y la capa de base. Esta condición genera esfuerzos de corte, los cuales, dependiendo de su magnitud y del tipo de material que constituye la capa de base, pueden desprender algunas partículas de la parte superficial de esta capa. Dichas partículas son arrastradas por el agua y expulsadas fuera del pavimento en el momento en el que ésta sale expulsada de la estructura en forma de chorro, debido al paso de la carga sobre la junta ubicada entre dos placas contiguas. Como consecuencia de la pérdida de material de la capa de base, se forma una cavidad en la parte baja de las placas de concreto en la zona circundante a las juntas. Al perder su apoyo, las placas de concreto empiezan a desarrollar procesos severos y acelerados de fisuración, típicamente en una etapa temprana de la vida de la estructura.

El fenómeno de erosión es el resultado de la interacción de distintos factores, entre los cuales se destacan: (1) la susceptibilidad a la erosión de los materiales usados como capa de base en el pavimento, (2) la presencia de agua en la estructura, debido tanto a causas climáticas como a deficiencias en los sistemas de drenaje, (3) la magnitud y frecuencia de la carga aplicada sobre el pavimento, y (4) las características propias de la estructura misma de pavimento (i.e., resistencia estructura).

Dado que las estructuras de pavimento rígido se caracterizan por tener una mayor inversión inicial en comparación con los pavimentos flexibles pero, así mismo, una mayor durabilidad, es necesario comprender sus modos de falla para tomar medidas acertadas que permitan la prevención de procesos de degradación tempranos no previstos. De esta manera, el desarrollo de métodos generalizados que ayuden a la comprensión, cuantificación y estimación del deterioro por mecanismos de erosión en pavimentos rígidos es una prioridad para conseguir obras de infraestructura vial duraderas y de alta calidad.



Dentro de este contexto, el interés por el estudio de nuevos materiales que pueden servir como base de pavimentos rígidos ha puesto en evidencia la necesidad de contar con ensayos experimentales y con modelos numéricos que permitan evaluar, e incluso prever, el comportamiento de este tipo de pavimentos ante fenómenos de deterioro severo, tal como la erosión. En efecto, una caracterización adecuada de estos nuevos materiales y de los factores que impactan el desempeño de estas estructuras son necesarios para prevenir el daño temprano de la estructura por bombeo. La velocidad del agua en la interface entre la base y la losa de pavimento, la interacción entre el comportamiento mecánico y el hidráulico del sistema, y las modificaciones en las propiedades de la base a medida que ésta se deteriora, son algunos de los retos que se pueden comprender mejor a través del desarrollo de modelos físicos y numéricos.

El presente estudio constituye la segunda fase de un proyecto de investigación cuyo objetivo es determinar, precisamente, las condiciones estructurales de los pavimentos y los materiales más apropiados que podrían ser empleados en las capas de base de pavimentos rígidos en la ciudad de Bogotá, con el fin de prevenir fenómenos de erosión. En la primera fase del estudio se desarrolló una nueva metodología experimental, la cual consistió en mejorar un ensayo de mesa vibratoria vertical que reproduce de forma apropiada los mecanismos mecánicos e hidráulicos que se relacionan con el fenómeno de bombeo. En el estudio se consideraron seis (6) tipos distintos de materiales de base, incluyendo material granular sin estabilizar, material granular estabilizado con tres porcentajes de cemento, mezcla asfáltica densa fría (i.e., material granular estabilizado con emulsión asfáltica) y mezcla asfáltica densa en caliente. Los resultados de esta primera fase del proyecto permitieron: 1) corroborar la validez de la metodología propuesta como una herramienta eficaz para cuantificar el potencial de erosión o la erodabilidad de materiales cementados de capa de base, y 2) cuantificar y clasificar la susceptibilidad a la erosión de diferentes materiales de uso común en el mundo en la conformación capas de base de pavimento rígido.

El presente estudio constituye la segunda fase de análisis, e incluyó la evaluación del impacto que tienen los aspectos estructurales, los tipos de materiales y las condiciones de carga en la probabilidad de que un pavimento desarrolle procesos de erosión cuando éste emplea un material de base con factores de erodabilidad conocidos. Para esto, la Universidad desarrolló un montaje experimental de erosión sobre modelos físicos a escala real de pavimentos rígidos, el cual contó con sistemas avanzado de aplicación de carga, de instrumentación y de adquisición y almacenamiento de datos. El estudio incluyó además el diseño y desarrollo de una metodología de auscultación no destructiva, con el objetivo de evaluar si ésta podría ser empleada de forma confiable para determinar el inicio y/o la evolución de procesos de erosión en estructuras de pavimento rígido en servicio. Dicha metodología consistió en la aplicación de una carga de impacto sobre la placa de concreto en cercanías a una junta de cada una de las estructuras consideradas y en la evaluación de las señales capturadas por acelerómetros ubicados en cercanía a la zona de impacto. Este ensayo se repitió a través del tiempo (i.e., en distintos momentos del ensayos mecánico de erosión de las estructuras), con el objetivo de identificar si se presentaban cambios en las



señales capturadas por los acelerómetros que pudieran dar indicios de posibles procesos de degradación causados por erosión.

El presente documento corresponde al Informe Final del proyecto de consultoría en cuestión y contiene la descripción detallada de las distintas etapas que conformaron la metodología de estudio. Dichas etapas incluyeron, entre otras actividades, el diseño del montaje experimental para realizar los ensayos de erosión en pistas de prueba a escala real, la adquisición de los diferentes materiales y la construcción de las pistas de prueba a escala real, el diseño y evaluación de la metodología de evaluación no-destructiva de procesos de erosión en pavimentos en servicio, el diseño e implementación de un modelo numérico de erosión desarrollado mediante la técnica de diferencias finitas y, finalmente, el análisis de los resultados de los ensayos experimentales de erosión a escala real y de auscultación no-destructiva.

Dentro de los principales resultados, se debe destacar que el montaje experimental de erosión a escala real—el cual es único en el mundo—demostró ser una herramienta robusta para estudiar el impacto relativo de las diferentes variables que afectan la existencia de procesos de erosión.

Los resultados obtenidos de los ensayos demostraron la evidente diferencia en la resistencia al bombeo entre los pavimentos que incluyeron material granular sin estabilizar en su capa de base y los que incluyeron material granular estabilizado con cemento o con productos asfálticos. Así mismo, los ensayos demostraron que el impacto que tiene el espesor de la losa o placa de concreto en la resistencia de la estructura contra este fenómeno es principalmente relevante en pavimentos que emplean bases de material granular sin cementar, pero que cuando la estructura incluye bases ligadas el impacto que tiene un aumento en el espesor de la placa de concreto es menos significativo.

En cuanto al rol que tiene la resistencia de las capas de base estabilizadas con cemento (i.e., porcentaje de cemento empleado en la estabilización), se observó una relación entre la resistencia mecánica de la capa de base y la resistencia de la estructura a degradarse por erosión. No obstante, dichas diferencias fueron poco notorias, en especial cuando se emplean bajos o intermedios porcentajes de cemento para la estabilización o placas de concreto de espesor intermedio o alto.

En contraste con el impacto que tienen el tipo de material empleado en la base y el espesor de la losa de concreto, la frecuencia de aplicación de carga sólo mostró ser relevante en el desarrollo de procesos de erosión, y de forma muy sutil, cuando la carga fue aplicada a alta frecuencia. Indiscutiblemente, esta variable demostró ser menos determinante en el desarrollo de bombeo, en comparación con las otras dos variables consideradas.

En cuanto a la metodología de auscultación no-destructiva propuesta, ésta consistió en aplicar una carga de impacto en la superficie del pavimento en cercanías a una junta y en evaluar las señales de respuesta capturadas por acelerómetros a través del avance de los



ensayos de carga (i.e., a través de los ciclos de carga). Los resultados obtenidos de las pruebas realizadas mostraron que la técnica es capaz de diferenciar la capacidad estructural entre diferentes pavimentos y, en algunas ocasiones, se observó que ésta también pudo detectar cambios internos en la estructura del pavimento. No obstante, los resultados mostraron que la técnica no es suficientemente precisa para permitir identificar si dichos cambios son consecuencia directa de procesos de erosión o si son el resultado de otros procesos de deterioro mecánico que se desarrollan dentro de la estructura. Adicionalmente, no fue posible determinar valores típicos de crecimiento de las variables de control seleccionadas (i.e., desplazamiento y aceleración máxima registradas en cercanías de la zona de aplicación de la carga de impacto) que permitieran establecer con un mínimo de certeza la existencia de procesos de erosión. No obstante, se puede afirmar que la técnica es prometedora y que podría ser refinada y evaluada en mayor detalle como parte de proyectos futuros con el fin de evaluar si puede ser modificada o mejorada para cuantificar estos procesos de deterioro.

Finalmente, el grupo de trabajo fue capaz de implementar exitosamente un modelo numérico de procesos de erosión en pavimentos de concreto hidráulico. El modelo fue calibrado con base en los resultados obtenidos en la Fase I del proyecto y sirvió para realizar un análisis de sensibilidad del impacto relativo de diferentes condiciones estructurales y de carga en la degradación de pavimentos rígidos por bombeo. Los resultados de estas actividades fueron acordes con la mayoría de los resultados obtenidos en las etapas experimentales del estudio y permitieron complementar el conocimiento sobre este complejo fenómeno de deterioro.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo general del proyecto

El objetivo general de este contrato de consultoría es determinar la pérdida por erosión de los materiales que fueron estudiados como parte de la primera fase del proyecto denominado "Estudio de la Resistencia a la Erosión de los materiales empleados como Bases en Pavimentos de Concreto Hidráulico" (IDU-Uniandes 089-2009) mediante ensayos de simulación a escala real en pistas de prueba, modelación numérica en computador y pruebas de auscultación no-destructiva. Los materiales de base de pavimentos de concreto hidráulico a evaluar incluyen: 1) materiales granulares sin ligar, 2) materiales granulares estabilizados con emulsión asfáltica, y 3) mezclas asfálticas densas en caliente.

1.2. Objetivos específicos

El principal objetivo de este informe es presentar los resultados consolidados de las actividades realizadas durante la segunda fase del proyecto, dentro de las que se encuentran:

- Identificar y describir el fenómeno de erosión en pavimentos rígidos mediante la ejecución de ensayos de modelos físicos de pavimento a escala real sometidos a carga dinámica.
- Describir el diseño correspondiente al montaje experimental mencionado.
- Describir proceso constructivo de los diferentes sistemas que componen el montaje experimental.
- Reportar los datos obtenidos a partir de la realización de los ensayos de erosión a escala real.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos de los diferentes ensayos realizados para identificar la influencia relativa de diferentes parámetros o variable de interés (i.e., tipo de material empleado en la capa de base, espesor de la placa de concreto y frecuencia de aplicación de carga) en la susceptibilidad de un pavimento rígido a desarrollar deterioro por erosión.
- Describir el diseño, desarrollo e implementación de la metodología de auscultación dinámica no-destructiva aplicada al ensayo en cuestión cuyo objetivo es determinar potenciales procesos de erosión en pavimentos en servicio.
- Describir el diseño, desarrollo e implementación del modelo numérico capaz de simular el fenómeno de erosión el pavimentos.
- Resumir las principales conclusiones y emitir recomendaciones acerca de los materiales de base apropiados en la construcción de distintos tipos de estructuras de pavimento rígido.



2. INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO

Los pavimentos se definen como estructuras multicapa diseñadas para resistir solicitaciones de la carga mecánica que es inducida por el tráfico y los cambios en las condiciones ambientales que caracterizan la zona circundante al proyecto, ofreciendo niveles de servicio apropiados a lo largo de su vida útil.

Los dos grandes grupos de estructuras de pavimento tradicionales incluyen los pavimentos flexibles o de concreto asfáltico y los rígidos o de concreto hidráulico. La diferencia principal entre estos dos tipos de estructuras radica en el tipo de materiales empleados para su construcción (i.e., mezcla asfáltica o concreto asfáltico vs. concreto hidráulico), lo que a su vez produce un cambio en su comportamiento mecánico y en sus procesos de deterioro. En general, los pavimentos flexibles presentan mayores deformaciones puntuales bajo la zona de aplicación de carga vehicular y los esfuerzos son transmitidos verticalmente de arriba hacia abajo de la estructura. Los mecanismos de daño asociados a este tipo de pavimento, incluyen los fenómeno de fisuramiento por fatiga, ahuellamiento o deformaciones permanentes superficiales o estructurales y fisuración o agrietamiento por gradiente térmico o bajas temperaturas. Por su parte, los pavimentos rígidos se caracterizan porque la responsabilidad de resistencia estructural es asumida casi en su totalidad por la losa o placa de concreto. Esto genera la presencia de menores deformaciones en la zona superior de la llamada capa de base o subbase. Los principales procesos de deterioro asociados con estas estructuras incluyen el alabeo de las losas por los cambios térmicos, el asentamiento relativo de las losas, el desprendimiento de material en las juntas de las losas de concreto, el fisuramiento por fatiga de la losa de concreto y la pérdida de material de la capa de base o soporte por erosión o bombeo. A continuación, se presenta con mayor detalle el funcionamiento de los pavimentos rígidos y el rol que juega el proceso de erosión de la capa de base en el deterioro de estas estructuras. Estos conceptos son necesarios para enmarcar las actividades realizadas como parte del presente proyecto.

2.1. Principios básicos del funcionamiento de los pavimentos rígidos

Los pavimentos rígidos se caracterizan por presentar bajas deformaciones superficiales y presentar largos periodos de servicio sin necesidad de realizar intervenciones, reparaciones o rehabilitaciones relevantes. Los mecanismos básicos de falla y las manifestaciones de daño de estas estructuras se encuentran relacionados con la carga, la temperatura y la humedad. Entre las principales manifestaciones de daño de estos pavimentos se encuentran: fisuras longitudinales y transversales de la losa, ruptura de las esquinas de la losa, daño transversal y longitudinal en las juntas, variación en el nivel superficial de las losas (i.e., asentamiento diferencial) y flujo de agua fuera de la estructura del pavimento con presencia de material pétreo fino de la capa de base como resultado de procesos de erosión o bombeo, siendo este último el fenómeno de interés para este proyecto.



Como se describió con anterioridad, la estructura típica de un pavimento rígido incluye la capa superficial que corresponde a la losa de concreto hidráulico y por unas capas de soporte que incluyen la base, la subbase y la subrasante. En muchas oportunidades sólo existe una capa de material entre la losa de concreto y la subrasante, la cual es llamada en este caso de forma indistinta como capa de base o subbase. La respuesta mecánica de las losas depende de la existencia e instalación de refuerzo al interior de la misma (i.e., pavimento sin reforzar, continuamente reforzado, etc.), la configuración de las juntas y el uso de dispositivos de transferencia de carga entre las losas (i.e., pasadores). Las capas de base y/o subbase de los pavimentos rígidos juegan un papel crucial en el desempeño mecánico de la estructura. Por esta razón, una buena selección de los materiales que se emplean en estas capas es vital para proveer a la placa de concreto un soporte continuo y homogéneo, evitando el desgaste de dicho apoyo por acción del agua; es decir, controlando el fenómeno de erosión.

Es importante mencionar que 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—incluyendo las dos fases de este proyecto—es una muestra clara de que este problema persiste en la actualidad y que requiere la atención de las agencias encargadas de la administración de la infraestructura vial. Los detalles de los mecanismos de degradación por erosión, así como los esfuerzos que se han realizado y reportado en la literatura para caracterizar este fenómeno, se describen en las siguientes secciones.

2.2. Proceso de deterioro por erosión en bases de pavimentos de concreto hidráulico

Como se explicó previamente, las capas de base empleadas en pavimentos rígidos cumplen una serie de funciones que son necesarias para garantizar la durabilidad y el buen desempeño de la estructura, dentro de las cuales se destacan (Huang 1998; Jung et al. 2009):

- 1. Proveer una base estable y homogénea para las placas de concreto hidráulico.
- 2. Aumentar la rigidez o resistencia general de la estructura.
- 3. Proveer buenas condiciones de drenaje de la estructura.
- 4. Permitir una transición vertical gradual entre los módulos de las diferentes capas (i.e., desde las placas de concreto hasta la capa de subrasante).
- 5. Prevenir el deterioro por erosión de la base que soporta las placas.

Vale la pena aclarar que no todas las funciones listadas anteriormente se deben cumplir de forma simultánea. El tipo de material seleccionado para la capa de base, las características del pavimento (e.g., existencia de refuerzo o de mecanismos eficientes de transmisión de carga entre losas) 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 caso particular. Sin embargo, dos de estas funciones son particularmente deseables en todo proyecto de infraestructura vial que involucre pavimentos rígidos: 1) proveer un soporte continuo y homogéneo para las placas de concreto hidráulico, y 2) evitar la erosión y el desgaste de dicho soporte por la acción del agua o de otros agentes adversos. Naturalmente, para garantizar la primera condición es necesario, aunque no suficiente, garantizar el cumplimiento de la segunda.

De acuerdo con lo anterior, 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 podría perder 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 nivel de servicio 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 controlada de forma rigurosa con el fin de garantizar un desempeño satisfactorio de la estructura durante su vida de servicio. Por esta razón, la caracterización de la susceptibilidad a la erosión de los materiales empleados en estas capas es una prioridad para garantizar estructuras eficientes, económicas-desde el punto de vista del análisis de costo de ciclo de vida del proyecto-, y duraderas.

Los mecanismos físicos asociados a la erosión de pavimentos rígidos tiene su origen en los esfuerzos cortantes inducidos por el movimiento de agua a altas velocidades en la interface 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 en estado líquido en la zona de interface. Los esfuerzos de cortante que se desarrollan en la interface entre las dos capas son generados por el movimiento relativo entre placas ante el paso vehicular en la superficie y por las presiones inducidas por el agua líquida que se encuentra presente en la zona. 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. 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, de la magnitud de la carga, de la resistencia estructural del pavimento (principalmente del espesor de la placa de concreto) y de la velocidad del paso de dicha carga.

Dependiendo de su magnitud y de las características del material de la capa de base, los esfuerzos cortantes pueden promover el desprendimiento de material fino de las capas de base. Cuando esto ocurre, los fragmentos de material desprendido o socavado son



arrastrados por el agua a través de la interface y expulsados o *bombeados* en forma de *micro-chorros* fuera del pavimento en el momento en el que 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, 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 por parte de las capas de base. La Figura 1 ilustra el proceso de bombeo.

- Estudio de la Resistencia a la Erosión de materiales empleados como Bases en Pavimentos de Concreto Hidráulico, Fase





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

Es importante mencionar que si bien el mecanismo de erosión más común consiste en el desprendimiento de partículas finas de las capas de base, existe evidencia experimental (en campo y en laboratorio) que sugiere que existen dos fuentes adicionales de generación de esfuerzos cortantes en la zona de interface, las cuales contribuyen sustancialmente a la pérdida de material fino y a la pérdida acelerada de la resistencia estructural del pavimento por erosión: 1) los esfuerzos de fricción generados entre la base de las losas de concreto y

- Estudio de la Resistencia a la Erosión de materiales empleados como Bases en Pavimentos de Concreto Hidráulico, Fase

II -



el material de base , y 2) el efecto de las deflexiones inducidas en las placas de concreto por efecto de expansión térmica. Como se explicará más adelante, este proyecto se concentró exclusivamente en los efectos de deterioro por erosión relacionados con la presencia de agua libre al interior de la estructura.

En general, la velocidad a la que evolucionan 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. Lo anterior se debe, en parte, a la existencia de nuevas grietas o fisuras en la placa de concreto que generan nuevas rutas de acceso de agua y, por ende, nuevas zonas de alta susceptibilidad a la erosión.

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 se puede encontrar en Van Wijk (1985).

2.3. Materiales empleados en bases de pavimentos rígidos

La práctica de la ingeniería de pavimentos rígidos de las últimas décadas ha incluido diversas tendencias en la selección y 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; lo que significa que las placas de concreto eran directamente apoyadas sobre la subrasante. No obstante, la repetida deficiencia en el funcionamiento de las estructuras y el aumento paulatino de las exigencias estructurales causados por el incremento de la carga de tráfico, exigió la inclusión de una capa intermedia cuyo objetivo primordial era separar las placas de consistió inicialmente en material granular sin estabilizar o 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. 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. Más recientemente, nuevos materiales granulares estabilizados con otros materiales, particularmente con productos asfálticos, se han empezado a usar con gran frecuencia en este tipo de estructuras. En este sentido, vale la pena mencionar que el empleo de bases estabilizadas con productos asfálticos no se



considera un reemplazo de las bases tradicionales, ya que usualmente 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" entre las dos capas mencionadas con el objetivo de: 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.

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 exigencias de carga moderadas o altas. Por el contrario, el uso de materiales granulares sin tratar es una práctica que ha sido limitada a pavimentos sometidos a bajas o medianas-bajas exigencias de tráfico.

2.4. Avances en el desarrollo de metodologías para la identificación y control del bombeo en pavimentos rígidos

Existen diferentes entidades a nivel internacional que promueven el desarrollo y el uso de los pavimentos rígidos en la construcción de proyectos de infraestructura vial, dentro de las que 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) y el Instituto del Cemento Pórtland Argentino (ICPA). En relación con el tema de erosión de las capas de base de los pavimentos rígidos, estas entidades han realizado las siguientes recomendaciones:

- La ACPA busca identificar materiales resistentes a la erosión controlando parámetros de caracterización de los materiales de base granular, como lo son el porcentaje de finos, la dureza y la granulometría. Adicionalmente, esta entidad propone el empleo de materiales granulares estabilizados con cemento y emulsión asfáltica en vías de alto tráfico, por proveer resistencia a potenciales procesos de erosión.
- La PCA incluye en su método de diseño un modelo con bases semi-analíticas o mecánicas-empíricas para controlar el fenómeno de bombeo. Este modelo permite estimar el número de repeticiones admisibles para un nivel de carga y un tipo de eje específicos que evitarían la iniciación de fallas por bombeo.
- El ICPA clasifica los tipos de manifestaciones de daño asociados con el fenómeno de bombeo y propone limitar el contenido de finos de la base y garantizar una densidad máxima para evitar problemas de erosión de estas capas.
- La PIARC ha realizado estudios enfocados al desarrollo de ensayos para determinar la erodabilidad de los materiales, por medio del empleo de las técnicas experimentales de cepillado, mesa vibratoria y aplicación chorro de agua a presión.

- La FHWA a través del estudio "Improved Prediction Model for PCC Pavement Performance - Related Specifications, Volume I", introdujo unos *coeficientes de erosión* que varían entre 0.5 y 5.0 y que son definidos como la relación entre las fallas transversales en las juntas en función del número de ejes acumulados, para unas condiciones específicas de configuración de la losa. Estos coeficientes sirven, de alguna manera, de factores de seguridad para asegurar el buen desempeño del pavimento.
- La AASHTO, por su parte, involucra el potencial de pérdida de material de base por efectos de erosión mediante la reducción del módulo de reacción de subrasante, en función del potencial de erosión del material. La reducción del módulo de reacción de la subrasante modifica los parámetros de entrada de diseño al incrementar la capacidad estructural que debe soportar la estructura.
- Finalmente, a nivel local, el IDU en sus Especificaciones Técnicas de Materiales y de Construcción IDU ET 2013 define 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 no cuentan con una variable directa o indirecta explícita que permita clasificar a los materiales en función de su susceptibilidad a la erosión. La primera Fase de este proyecto presentó un nuevo ensayo de caracterización del potencial de erosión de materiales de base y clasificó en función del grado de susceptibilidad a la erosión una gran cantidad de materiales que cumplen con las especificaciones mencionadas.

2.5. Diseños experimentales para cuantificar la susceptibilidad a la erosión de materiales empleados en capas de base

En la bibliografía se reporta un interés importante desde la década de 1960 por diseñar e implementar ensayos experimentales que permitieran cuantificar la susceptibilidad a la erosión de los materiales empleados en las capas de base de pavimentos de concreto hidráulico. Estos ensayos tienen 2 objetivos principales: 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 interface 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. Los principales ensayos disponibles para dicha caracterización se describen a continuación:

2.5.1. 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 es provocar la pérdida de material de un especimen mediante la aplicación del paso de un cepillo en la superficie en movimientos lineales o rotacionales. 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 ensayo 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 cual se define 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 los 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).

2.5.2. Máquina rotacional de cortante (adaptación de Van Wijk 1985)

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 estos montajes es que la erosión ocurre cuando el esfuerzo cortante inducido por el agua supera la resistencia al corte 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 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.

2.5.3. Máquina de inyección de agua (adaptación de Van Wijk, 1985)

Este montaje corresponde al segundo diseño experimental propuesto por Van Wijk en la década de 1980 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 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 200. La medición de la susceptibilidad a la erosión se deriva de la pérdida final de peso del espécimen.

2.5.4. Ensayo de desgaste por rodamiento (de Beer 1989)

Este montaje fue desarrollado en Sur África a finales de la década de 1990 para simular el desgaste producido en pavimentos rígidos por efectos de erosión. El ensayo consiste en



someter la superficie de un espécimen al efecto de fricción generado por una membrana de neopropeno 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 generados de una forma semejante a la que ocurre durante el bombeo, la muestra es sumergida en agua. El resultado del ensayo es 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 del espécimen.

2.5.5. Ensayo de erosión sobre mesa vibratoria (Phu 1979; Caicedo 2001)

Este ensavo fue propuesto originalmente por Phu en 1979 con el objetivo de determinar la susceptibilidad a la erosión de materiales cementados empleados en pavimentos rígidos (Phu 1979). El diseño de este experimento tiene como fin simular adecuadamente los mecanismos mecánicos e hidráulicos que caracterizan los procesos de erosión en estos pavimentos. El montaje experimental consiste en producir vibraciones en la dirección vertical 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 a gran velocidad. 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 interface entre las placas de concreto y la capa de base en campo. Esta acción del agua en la interface promueve la pérdida del material por erosión. 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. Adicionalmente, una versión mejorada de este montaje fue empleado en el año 2010 para realizar la cuantificación de la susceptibilidad a la erosión de diversos materiales en la primera fase de este proyecto (referirse al Informe Final de la Etapa I de este proyecto).

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

Este ensayo consiste en someter especímenes cilíndricos conformados por concreto hidráulico de alta resistencia y por el material de ensayo (los cuales forman una interface diagonal entre los dos materiales,) 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 σ_1 - σ_3) son aplicados al espécimen de tal forma que se generan diferentes niveles de esfuerzo cortante en la interface entre los dos materiales. Los resultados de este experimento permiten determinar tres parámetros diferentes: 1) la resistencia crítica a cortante del material en la interface 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.

En general, la revisión del estado del arte en cuanto a los ensayos disponibles para cuantificar la erodabilidad de los materiales utilizados como base de pavimentos rígidos permite concluir que:

- No existe una gran variedad de artículos internacionales en revistas indexadas, informes o reportes de investigación sobre este tema.
- No existen ensayos estandarizados (e.g., normas AASHTO, ASTM, etc.) para cuantificar la erodabilidad por efectos del agua de los materiales en cuestión. La única excepción 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.
- 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 Department 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.

3. ANTECEDENTES

En la Fase I de este proyecto (IDU-Uniandes 089-2009) se diseñaron e implementaron dos experimentos (erosión por chorro a presión de agua y pérdida de masa por erosión empleando una mesa vibratoria) con el objetivo de cuantificar la susceptibilidad a la erosión propia de 4 materiales típicamente empleados en capas de base de pavimentos rígidos. Estos materiales fueron los siguientes:

- 1. Base Granular BG_A Granulometría Gr1
- 2. Material Granular estabilizado con Cemento GEC_B Granulometría Gr2 (con tres niveles de resistencia diferentes)
- 3. Material Granular estabilizado con Emulsión asfáltica y Cemento GEEA_A Granulometría Gr1 (con cuatro niveles de resistencia diferentes)
- 4. Mezcla asfáltica en caliente tipo MD 20 (con dos niveles de estabilidad diferentes).

Los detalles de los materiales así como de los montajes experimentales pueden ser consultados en el Informe Final de la Fase I de este proyecto.

A manera de resumen, la Tabla 1 presenta la clasificación de erodabilidad de los materiales evaluados a través de cada uno de los dos ensayos. Es importante notar que el criterio de clasificación consistió en la velocidad crítica requerida para generar erosión en el material, para el caso del ensayo de chorro a presión de agua, y en la cantidad de masa perdida de los especímenes de ensayo, en el caso del ensayo de mesa vibratoria.

Tabla 1. Resum montajes exp	nen de la perimen	a clasificación a la tales diseñados e número de clasif	a susceptibilidad de implementados en l ficación menos erod	los materiales ensay a Fase I de este proy able es el material).	ados a través de los dos vecto (entre menor el

Material	Código	Composición	Clasificación ensayo chorro de agua	Clasificación ensayo de mesa vibratoria
Mezclas asfálticas densas en caliente	MD 20	Original	1	2
		Menos finos	1	1
Mezclas estabilizadas con emulsión y cemento	GEE_A_Gr1	6% emulsión 0% cemento	2	4
		6% emulsión 0.5% cemento	4	6
		1.0% cemento	6	5
		1.5% cemento	6	8



Material	Código	Composición	Clasificación ensayo chorro de agua	Clasificación ensayo de mesa vibratoria
Mezclas estabilizadas con cemento	GEC_B_Gr2	6.1%	5	9
		7.53%	3	7
		8.8%	3	3
Base Granular	BGA-Gr1		7	

(*) En la clasificación, 1 representa al material que presentó la menor susceptibilidad a la erosión y 9 el material que presentó la mayor susceptibilidad a la erosión. Dos materiales con la misma clasificación representa un mismo comportamiento a la erosión.

La Tabla 1 muestra consistencia entre los resultados obtenidos mediante los dos experimentos realizados sobre los diferentes materiales. De acuerdo a esto, las siguientes observaciones fueron determinadas como válidas para los dos tipos de ensayo y sintetizan los principales resultados obtenidos en la experimentación de la Fase I del proyecto:

- 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 en caliente, mientras 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 mezclas estabilizada con emulsión (sin cemento).

Los resultados presentados anteriormente describen la susceptibilidad *natural* de los materiales a sufrir procesos de erosión. No obstante, el fenómeno de bombeo en campo no depende sólo de la susceptibilidad de un material a sufrir erosión sino de muchas otras variables propias de la estructura del pavimento y del entorno del proyecto, tal como se describió en la primera sección de este documento. De esta importante realidad surge y se justifica la ejecución de la Fase II del proyecto, la cual pretende determinar la influencia de estas otras variables sobre la degradación por bombeo de pavimentos rígidos, incluyendo el espesor de la placa y la magnitud y velocidad de aplicación de carga.

A continuación se describe en detalle las etapas que constituyen la metodología general de estudio, seguida de la descripción detallada de cada una de estas etapas o actividades.

4. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

Para la ejecución de la Fase II del proyecto se establecieron diez (10) etapas encargadas de cubrir las diferentes actividades inherentes al mismo. A continuación, se presenta cada una de las etapas, con sus correspondientes objetivos.

4.1. Etapa 1: Diseño del experimento de erosión a escala real

Esta etapa tuvo como principal objetivo el diseño experimental del proyecto, buscando optimizar los recursos materiales, el tiempo y la calidad de los resultados a obtener. Entre los procedimientos a diseñar en esta etapa se encuentran:

- El montaje experimental.
- El sistema de instrumentación (sensores).
- El sistema de aplicación de carga.
- El sistema de adquisición y almacenamiento de datos.
- El sistema de visualización y procesamiento de la información.

4.2. Etapa 2: Adquisición y caracterización de los materiales

Con el fin de garantizar la comparabilidad de los resultados de la Fase II del proyecto con los obtenidos en la Fase I, era fundamental emplear en los ensayos materiales de base con las mismas características que aquellos empleados en esta fase inicial. Bajo este orden de ideas, el principal objetivo de la Etapa 2 fue asegurar la obtención de materiales con características similares a los usados en la Fase I. Es decir, adquirir materiales por parte de los mismos proveedores, así como la coordinación de transporte y almacenamiento de los mismos. Adicionalmente, en esta etapa se incluyeron también actividades de caracterización de materiales por medio de ensayos estandarizados.

4.3. Etapa 3: Construcción y puesta a punto del montaje experimental

Esta etapa se refiere a todo lo relacionado al proceso constructivo de las pistas o modelos físicos de pruebas a escala real. En éste se incluye el diseño detallado de cada una de las estructuras, así como los procesos de construcción y demolición de las mismas. Adicionalmente, esta etapa contiene las actividades encargadas del montaje del sistema de carga e instalación de los sensores y equipos de adquisición de datos.



4.4. Etapa 4: Ensayos de erosión a escala real

El principal objetivo de esta etapa fue la descripción detallada de la puesta a punto y funcionamiento de los ensayos realizados sobre las estructuras de pavimento rígido a escala real.

4.5. Etapa 5: Modelación en computador del comportamiento de pavimentos rígidos

Además del diseño de un montaje experimental a escala real sin precedentes, este proyecto también incluyó el diseño y desarrollo de un modelo matemático capaz de simular los fenómenos de erosión en pavimentos rígidos. De esta manera, esta etapa corresponde a el proceso de diseño, implementación y puesta a punto de dicho modelo numérico, el cual empleó modelos mecánicos e hidráulicos mediante la formulación de la técnica de *diferencias finitas*.

4.6. Etapa 6: Desarrollo de una metodología de auscultación dinámica para determinar el deterioro por erosión de las bases de pavimento rígido

Esa etapa incluyó todas las labores relacionadas con el diseño, implementación y ejecución de una metodología de auscultación no-destructiva de procesos de erosión. La verificación de la metodología propuesta con respecto a los datos experimentales capturados y analizados en las etapas 4 y 7, buscaba tuvo como objetivo determinar la conveniencia y confiabilidad para su empleo en pavimentos rígidos en servicio.

4.7. Etapa 7: Análisis de resultados

Esta etapa consistió en el diseño y aplicación de una metodología para el análisis cualitativo y cuantitativo eficiente de los resultados obtenidos durante la ejecución de los ensayos de erosión a escala real. así como de los resultados obtenidos mediante la metodología de auscultación dinámica no-destructiva.

4.8. Etapas 8 y 9: Conclusiones y recomendaciones generales

A partir de los resultados obtenidos a lo largo de las diferentes etapas del proyecto, esta etapa permitió obtener una serie de conclusiones y recomendaciones generales acerca del empleo de materiales apropiados para las capas de base en distintas estructuras de pavimento, mediante los resultados obtenidos de las etapas previas.


37

4.9. Etapa 10: Generación del documento técnico final

El principal objetivo de esta etapa fue recopilar las actividades realizadas en todas las etapas del proyecto generando un documento técnico capaz de divulgar de forma clara y detallada todos los resultados obtenidos.

El la Figura 2 se presenta un diagrama de flujo que muestra como las diferentes etapas del proyecto se integran entre sí.



38



Figura 2. Relación entre las diferentes etapas del proyecto.

5. ENSAYOS DE EROSIÓN A ESCALA REAL (Etapas 1, 2 y 3)

5.1. Descripción general

El equipo de trabajo del área de Infraestructura Vial de Uniandes a cargo del proyecto dedicó los primeros meses de trabajo al diseño de los diferentes elementos del montaje experimental. Producto de esto, se establecieron los esquemas constructivos de las pistas de prueba de pavimentos rígidos a escala real, donde se incluyen los sistemas de instrumentación, aplicación de carga y adquisición y almacenamiento de datos.

En términos generales, el montaje consistió en la construcción simultánea de cuatro (4) de un total de trece (13) estructuras de pavimento rígido a ensayar. Esto significa que en total fue necesario construir tres montajes completos de estructuras (denominados conjuntos o 'tandas') y un montaje parcial para la última estructura. Adicionalmente, esto implicó actividades de demolición y extracción de material de la pista después de la finalización de cada uno de los conjuntos de estructuras.

La Figura 3 muestra un esquema general del montaje típico de cada conjunto de estructuras a construir (se denominan Ensayo A, B, C y D, de forma genérica a cuatro (4) de los trece (13) ensayos realizados). En esta figura se ilustra la posición final de las estructuras en donde se observa que existen dos (2) filas con cinco (5) placas cada una para un total de diez (10) placas. Las dos (2) placas enmarcadas en cada rectángulo de color de la Figura 3 corresponden a un experimento o estructura y su correspondiente duplicado. Por otro lado, las dos placas intermedias (en óvalo de color violeta), que fueron denominadas "placas de interface", tenían como objetivo eliminar el efecto de borde o de frontera en el ensayo y se construyeron hasta la mitad de su longitud con el material de base de los ensayos adjuntos; es decir, dando continuidad a los materiales y espesores de las capas de las estructuras subyacentes. Es relevante recordar que el objetivo de contar con estructuras de réplica fue obtener resultados del desempeño de cada uno de los ensayos por duplicado, lo que aumenta la confiabilidad del experimento. De igual manera, en esta figura también se esquematiza el sistema general de aplicación de carga, que se diseñó y construyó para reproducir el fenómeno de erosión en los pavimentos y el cual se describe en secciones posteriores.

Los detalles del funcionamiento del montaje experimental, incluyendo las dimensiones de la pista, los espacios disponibles para cada estructura, las características de las cargas, etc., se explican en las siguientes secciones de este informe.



Universidad de

los Andes

Figura 3. Esquema general de las pistas de ensayo.

En la Tabla 2 se presentan los trece (13) tipos de estructuras ensayadas a lo largo del proyecto. Como se puede observar en esta tabla, en cada ensayo se modificaron todas las variables involucradas en el fenómeno de bombeo en pavimentos rígidos, con el fin de estudiar su efecto en el comportamiento de la estructura.

Ensayo o Estructura		Variables		
	Material de base:	Base estabilizada con cemento, resistencia baja		
1	Espesor de losa de concreto:	15 cm		
1	Espesor capa de base:	15 cm		
	Frecuencia de aplicación de carga:	Alta		
	Material de base:	Base estabilizada con cemento, resistencia baja		
2	Espesor de losa de concreto:	25 cm		
2	Espesor capa de base:	15 cm		
	Frecuencia de aplicación de carga:	Media		
	Material de base:	Base estabilizada con cemento, resistencia baja		
2	Espesor de losa de concreto:	25 cm		
C	Espesor capa de base:	15 cm		
	Frecuencia de aplicación de carga:	Baja		
	Material de base:	Base estabilizada con cemento, resistencia baja		
4	Espesor de losa de concreto:	22 cm		
	Espesor capa de base:	15 cm		

abla 2. Configuración de las 15 estructuras ensayadas.	Fabla	2.	Configuración	de	las 13	estructuras	ensayadas.
--	-------	----	---------------	----	--------	-------------	------------

Ensayo o Estructura	Variables			
	Frecuencia de aplicación de carga:	Baja		
	Material de base:	Base estabilizada con cemento, resistencia baja		
5	Espesor de losa de concreto:	28 cm		
5	Espesor capa de base:	15 cm		
	Frecuencia de aplicación de carga:	Baja		
	Material de base:	Base estabilizada con cemento, resistencia media		
6	Espesor de losa de concreto:	25 cm		
0	Espesor capa de base:	15 cm		
	Frecuencia de aplicación de carga:	Media		
	Material de base:	Base estabilizada con cemento, resistencia media		
7	Espesor de losa de concreto:	15 cm		
/	Espesor capa de base:	15 cm		
	Frecuencia de aplicación de carga:	Media		
	Material de base:	Base estabilizada con cemento, resistencia alta		
8	Espesor de losa de concreto:	15 cm		
0	Espesor capa de base:	15 cm		
	Frecuencia de aplicación de carga:	Media		
	Material de base:	Base estabilizada con emulsión		
9	Espesor de losa de concreto:	15 cm		
,	Espesor capa de base:	5 cm		
	Frecuencia de aplicación de carga:	Media		
	Material de base:	Base asfáltica		
10	Espesor de losa de concreto:	15 cm		
10	Espesor capa de base:	5 cm		
	Frecuencia de aplicación de carga:	Media		
	Material de base:	Granular sin estabilizar		
11	Espesor de losa de concreto:	15 cm		
	Espesor capa de base:	15 cm		
	Frecuencia de aplicación de carga:	Media		
	Material de base:	Granular sin estabilizar		
12	Espesor de losa de concreto:	15 cm		
	Espesor capa de base:	15 cm		
	Frecuencia de aplicación de carga:	Baja		
	Material de base:	Granular sin estabilizar		
13	Espesor de losa de concreto:	20 cm		
	Espesor capa de base:	15 cm		
	Frecuencia de aplicación de carga:	Media		

La Figura 4 ilustra la configuración general de una estructura típica de pavimento a



ensayar. En términos generales, estas estructuras estuvieron compuestas por cuatro capas que incluyen: 1) una capa de subrasante típica de suelos arcillosos de Bogotá, 2) una capa de subbase de material granular existente (homogeneizado y recompactado), 3) la capa de la base a evaluar (éste es el material que cambia entre ensayos o estructuras) y, 4) en la superficie de pavimento, una losa o placa de concreto hidráulico (con espesor variable).

En la parte superior de la losa se encuentra el sistema de aplicación de carga, el cual estuvo conformado por un actuador de alta potencia y una viga, elementos que permitieron aplicar ciclos de carga sobre la superficie de la losa a través de un sistema diseñado para simular el paso de los vehículos sobre el pavimento. Este sistema será expuesto con mayor detalle en una sección posterior de este documento.



Figura 4. Corte transversal de una estructura a ensayar.

Adicionalmente, como parte del diseño experimental, se establecieron las variables iniciales a instrumentar, dentro de las que se encuentran: 1) la presión del agua en la interface entre la losa de concreto y la capa de base a ensayar, 2) los desplazamientos verticales superficiales y a nivel de base, y 3) la carga aplicada a la estructura. De acuerdo a esto, se diseñó el sistema de instrumentación del protocolo de ensayo, así como el software correspondiente para la adquisición y almacenamiento de datos. Como se explicará más adelante, algunos de estos sistemas sufrieron modificaciones durante el transcurso de los ensayos. Estos sistemas serán explicados en detalle a continuación.

5.2. Construcción de las estructuras de pavimento rígido

De acuerdo al esquema constructivo de las pistas de prueba y al número de estructuras a ensayar, fue necesario realizar cuatro (4) conjuntos de ensayos. Es necesario aclarar que a



pesar del cambio en las configuraciones del tipo de estructuras a ensayar en cada una de los conjuntos del ensayo, las características geométricas de la pista se mantuvieron constantes a lo largo de todo el proyecto. En la Figura 5 se ilustran las dimensiones determinadas para las estructuras de pavimento.



Figura 5. Vista en planta de la pista de pruebas.

Las dimensiones de las estructuras, expresadas, en este caso, en función de las dimensiones de las losas de concreto, son las siguientes:

- Longitud: 2.24 m.
- Ancho: 1.70 m
- Espesor: variable (de acuerdo con las especificaciones de los pavimentos a evaluar).

Con el ánimo de separar cada una de las estructuras durante el proceso constructivo, se empleó una lámina de poliestireno expandido, usualmente conocido como icopor, de 5 mm de espesor. La Figura 6 muestra el detalle de la ubicación de estas láminas, las cuales fueron eliminadas antes de iniciar las pruebas de carga para permitir la entrada y salida de agua entre las juntas. Es importante mencionar que las placas mostradas en esta figura son esquemáticas (su espesor no representa una medida real).





Figura 6. Detalle de configuración de las juntas.

Al igual que las características geométricas de la pista de prueba, los materiales de las capas de subrasante y subbase granular también se mantuvieron constantes para los cuatro (4) conjuntos o tandas de ensayos. Así, la subrasante de la pista de pruebas de la Universidad – que consiste de arcillas blandas típicas de la subrasante de la ciudad de Bogotá- y la subbase granular remanente de un proyecto previo (Figura 7) constituyeron la plataforma para las diferentes estructuras ensayadas. Por lo tanto, el primer paso para la construcción de los diferentes conjuntos de ensayos consistió en la nivelación de la subbase granular y en la instalación de un geotextil cuya principal función fue el de evitar el mezclado de material entre capas.

Es importante mencionar que el proceso de adecuación de la capa de subbase requirió limpiar, caracterizar, remezclar y compactar dicho material. Este proceso de limpieza consistió en retirar el material correspondiente a residuos de unas geoceldas que se emplearon en ensayos previos.

Por otro lado, en cuanto a la caracterización básica realizada a los materiales de subrasante y subbase granular, se realizaron una serie de ensayos para determinar la naturaleza de sus componentes. Entre dichos ensayos se encuentran: Módulo Resiliente para Suelos Granulares, Proctor Modificado y el ensayo Triaxial Cíclico con Deformación Controlada. En la Tabla 3 y Tabla 4 se muestra un resumen de los resultados obtenidos en la caracterización de la subrasante y la subbase granular, respectivamente.





Figura 7. Detalle del material remanente que se utilizará como subbase en la construcción de las estructuras del ensayo.

Característica	Valor	Unidad
Peso húmedo inicial	307.12	g
Peso húmedo final	308.77	g
Peso seco	179.87	g
Humedad inicial	70.75	%
Humedad final	71.66	%
Clasificación de la muestra	CH	-
IP	74.07	%
σ ₃	1.0	kgf/cm ²
Peso unitario húmedo	15.08	kN/m ³
Peso unitario saturado	15.08	kN/m ³
Peso unitario seco	8.83	kN/m ³
$G_{ m s}$	2.48	-
e	1.75	-
n	63.69	%
S	100.00	%
WL	120.07	%

Fabla 3. Característica	s de la muestra	de arcilla de subrasante.
-------------------------	-----------------	---------------------------



Característica	Valor	Unidad
Masa suelo húmedo	11965	σ
Inicial	11705	5
Masa suelo húmedo	110/15	σ
Final	11945	g
Masa suelo seco	11136	g
Humedad inicial	7.4	%
Humedad final	7.3	%
Masa unitaria húmedo	2.22	g/cm ³
Masa unitaria seco	2.07	g/cm ³
Gs	2.44	_

Tabla 4. Características de la muestra de subbase granular.

Una vez se caracterizaron los materiales de subbase y se recompactó el material, se procedió a formar la capa correspondiente con el espesor del diseño establecido de la subbase granular. A continuación se presenta un resumen fotográfico de las actividades señaladas para el caso del primer conjunto de estructuras construidas.



Figura 8. Levantamiento, limpieza y homogenización del material granular remanente. Subbase granular.

Figura 9. Muestreo del material granular remanente a emplear con subbase de las estructuras de pavimento.





Figura 10. Muestra de las geoceldas retiradas de un proyecto anterior.



Figura 11. Remoción del material granular remanente, para su limpieza y remezclado.



Figura 12. Nivel de subrasante de la pista de pruebas. Recubrimiento con geotextil de limpieza.



Figura 13. Compactación del material de subbase granular sin estabilizar.





Figura 14. Control de espesores de las capas.



Figura 15. Separación de las estructuras con configuraciones de capas distintas.



Figura 16. Extendido del material para la estructura con base granular sin estabilizar en la pista de pruebas. Capas con espesores entre 10 y 15 cm.



Figura 17. Compactación del material de base granular sin estabilizar.



Figura 18. Ensayo de proctor modificado al material de subbase granular.



Figura 19. Ensayo de densidad con cono y arena a nivel de base granular.

En general, el método constructivo de cada conjunto de ensayos y estructuras consistió en los siguientes pasos:

- 1. Selección de las cuatro (4) estructuras a construir en el conjunto de ensayo.
- 2. Planeación de la ubicación de las estructuras y de sus réplicas en la pista de pruebas.
- 3. Realización de planos detallados de la construcción como guía del proceso constructivo.
- 4. Preparación de la plataforma de soporte de las estructuras (Subrasante y Subbase).
- 5. Adquisición de los materiales de construcción.
- 6. Extensión y compactación de los materiales de las capas de base.
- 7. Fundición las placas de concreto, dejando el espacio requerido para los montajes de instrumentación necesarios.

En las siguientes secciones se expondrá, por medio de registros fotográficos, el proceso constructivo de cada uno de los conjuntos de estructuras ensayados durante el proyecto. A manera de resumen, la Tabla 4 muestra las estructuras que se consideraron en cada conjunto o tanda de ensayos realizados. Dicha tabla corresponde al orden cronológico real en el que se ensayaron las trece (13) estructuras de pavimento que fueron evaluadas.

Conjunto	Ensayo	Material Base	
	3	Base estabilizada con cemento, resistencia baja	
1	11	Granular sin estabilizar	
T	12	Granular sin estabilizar	
	13	Granular sin estabilizar	
	2	Base estabilizada con cemento, resistencia baja	
2	4	Base estabilizada con cemento, resistencia baja	
Z	5	Base estabilizada con cemento, resistencia baja	
	6	Base estabilizada con cemento, resistencia baja	
	7	Base estabilizada con cemento, resistencia media	
2	8 Base estabilizada con cemento, resistencia		
5	9	Base estabilizada con emulsión	
	10	Base asfáltica	
4	1	Base estabilizada con cemento, resistencia baja	

Tabla 5. Conjuntos de estructuras ensayadas.

5.2.1. Conjunto de ensayos 1

En la Tabla 6 se presenta el conjunto de estructuras que conformaron el primer conjunto de ensayos del proyecto. La ubicación de cada una de las estructuras sobre la pista se muestra en la Figura 20.

Ensayo	Variables			
	Material de base:	Base estabilizada con cemento, resistencia baja		
3	Espesor de losa:	25 cm		
5	Espesor capa de base:	15 cm		
	Frecuencia de aplicación de carga:	20 km/h		
	Material de base:	Granular sin estabilizar		
11	Espesor de losa:	15 cm		
11	Espesor capa de base:	15 cm		
	Frecuencia de aplicación de carga:	Media		
	Material de base:	Granular sin estabilizar		
12	Espesor de losa:	15 cm		
12	Espesor capa de base:	15 cm		
	Frecuencia de aplicación de carga:	Baja		
	Material de base:	Granular sin estabilizar		
12	Espesor de losa:	20 cm		
15	Espesor capa de base:	15 cm		
	Frecuencia de aplicación de carga:	Media		

Tabla 6. Estructuras del primer conjunto de ensayos.



Figura 20. Configuración geométrica de primer conjunto de estructuras



Para este primer conjunto de estructuras se utilizaron tres (3) bases granulares y una (1) base granular estabilizada con cemento, cuyo procedimiento constructivo y de caracterización se describe a continuación.

Ensayos de caracterización del material de base granular sin estabilizar

Además de garantizar la granulometría y el cumplimiento de la normativa básica para este tipo de materiales, se realizaron los ensayos de Proctor Modificado y Densidad y Peso Unitario en Campo, cuyos resultados se muestran a continuación.

• Ensayo Proctor Modificado

Para este ensayo se siguió el procedimiento descrito en la norma ASTM D-1556, Método C. De acuerdo con las especificaciones de esta norma, el ensayo se realiza empleando un molde de 6 in de diámetro (15.2 cm), 1/13.3 ft³ (2105 cm³) de volumen y 4.584 in (11.6 cm) de altura. Se colocaron cinco (5) capas de material, dejando caer cincuenta y seis (56) veces sobre cada capa un martillo de 10 lb desde una altura de 18 in. De este ensayo se obtuvo una masa unitaria seca máxima de 1.92 g/cm³ y un contenido de humedad óptimo del 11%. Este valor fue empleado tanto para las estructuras con capas de base granular sin estabilizar como para las de material estabilizado con bajo porcentaje de cemento. La Figura 21 muestra la relación entre estas dos variables, de acuerdo a los resultados obtenidos en el laboratorio.



Figura 21. Ensayo de Proctor modificado al material de base granular.

• Densidad y Peso Unitario en Campo

Con el fin de determinar la densidad y el peso unitario del material se llevó a cabo el ensayo cono de arena, el cual consiste en excavar manualmente un hueco en el suelo a estudiar y guardar este material en un recipiente; posteriormente se llena el hueco con arena de densidad conocida, y se determina el volumen de excavación. Para calcular la densidad

del suelo húmedo, in situ, se divide la masa del material húmedo removido por el volumen del hueco. Después de realizar el ensayo se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla 7).

Parámetro	Valor
Densidad de campo húmeda (g/cm ²)	1,92
Densidad de campo seca (g/cm ²)	1,78
Densidad seca máxima (g/cm ²)	1,92
Humedad natural (%)	7,59
Porcentaje de compactación (%)	92,86

Tabla 7. Resultados ensayo densidad y peso unitario de base granular

Ensayos de caracterización para base granular estabilizada con cemento

Para este tipo de bases, el primer paso consistió en identificar la cantidad de cemento necesaria para la estabilización del material. Esto se realizó con base en la información reportada en la Fase I del presente proyecto en donde se diseñaron diferentes mezclas de material granular estabilizado con diferentes cantidades de cemento y se determinaron los porcentajes necesarios para alcanzar valores de resistencia a la compresión seca a los 28 días dentro del rango de valores exigidos por el IDU. La Tabla 8 muestra dichos porcentajes y los valores de resistencia correspondientes.

Tabla 8. Porcentajes de modificación de cemento (por peso total de material) para los materiales
estabilizados con cemento.

Nombre	% de cemento (por peso total)	Resistencia a la compresión (MPa)
Granular estabilizado con cemento de resistencia baja	6.1%	2.75
Granular estabilizado con cemento de resistencia baja	7.5%	3.30
Granular estabilizado con cemento de resistencia baja	8.8%	3.80

Con esta información, y conociendo el valor del volumen total requerido en la capa de base calculada, se realizó el cómputo de la cantidad de cemento requerido en la estabilización. A continuación se muestra el ejemplo para el caso del material granular estabilizado con cemento de resistencia baja, pero el mismo procedimiento se siguió para las estructuras con porcentajes de cemento diferentes al mostrado a continuación:



Volumen de estabilización = 5,2 m × 1,80 m × 0.17 m = 1,5912 m³ Densidad volumen a estabilizar base granular = 1,82 ton/m³ Porcentaje de cemento = 6.1% **Masa de cemento** = $(0,061 \times 1820 \frac{kg}{m^3}) \times 1.5912 m^3$ = **176,66 kg**

Después de estabilizar la base con cemento fue necesario determinar las nuevas propiedades del material con el cual se iba a trabajar. Con el fin de determinar la densidad y peso unitario del material se llevó a cabo el ensayo cono de arena, el cual se describió previamente. En la Tabla 9 se presentan los resultados obtenidos de la caracterización del material estabilizado.

Tabla 9. Resultados ensayo densidad y peso unitario de base estabilizada con cemento de
resistencia baja

Parámetro	Valor
Densidad de campo húmeda (g/cm ²)	2,12
Densidad de campo seca (g/cm ²)	1,97
Densidad seca máxima (g/cm ²)	2,00
Humedad natural (%)	7,59
Porcentaje de compactación (%)	98,73

Construcción de las capas de base

Una vez caracterizados los materiales a emplear en la construcción del primer conjunto o tanda de estructuras, se dió inicio al proceso constructivo de las capas superiores de las estructuras de pavimento rígido. Dicho proceso consistió principalmente en el extendido y compactación de las diferentes capas de base para la posterior fundición de las placas de concreto hidráulico. Lo anterior, acatando las dimensiones mostradas en la Tabla 6.

A continuación, se presenta un resumen fotográfico explicativo de las actividades desarrolladas durante el mes de Septiembre de 2013 en la pista de pavimentos de la Universidad de los Andes. Las últimas dos figuras muestran el proceso subsecuente a la culminación de la construcción, el cual incluye la instalación de los sistemas de carga e instrumentación. Las características de estos sistemas se presentan más adelante en este informe.





Figura 22. Homogenización y extendido de la base granular con 6,1% de cemento.



Figura 23. Compactación de la base granular estabilizada con 6,1% de cemento.



Figura 24. Demarcación con cimbra para instalación de formaletas para la fundición de losas.



Figura 25. Instalación de formaleta de madera debidamente acodalada.



Figura 26. Fundición/Llenado de losas en forma de ajedrez.



Figura 27. Nivelación de la mezcla con boquillera de aluminio.





Figura 28. Curado de las 5 primeras losas. fundidas (suministro de agua por 15 días).

Figura 29. Detalle de la separación de juntas empleando láminas de icopor.



Figura 30. Segundo par de losas fundidas en forma de ajedrez.



Figura 31. Segundo par de losas fundidas en forma de ajedrez.



Figura 32. Ubicación del montaje de aplicación de carga dentro de la pista de pavimentos.



Figura 33. Perforación de las losas para la instalación de los sensores de carga.



Proceso de demolición del primer conjunto de estructuras

Después de culminar todos los ensayos sobre las estructuras "originales" y las "réplicas", para poder dar inicio a la construcción del segundo conjunto de ensayo fue necesaria la demolición de los pavimentos existentes sobre la pista. Para este primer conjunto de estructuras, el proceso de demolición consistió en la demolición o rompimiento de las placas en pista mediante taladros. Es importante mencionar que fue necesario detener el proceso de demolición de manera constante debido a que éste implicaba el levantamiento de una gran cantidad de polvo y escombros que requería la limpieza continúa de los laboratorios adyacentes y el desplazamiento de los escombros fuera de la pista de prueba.

En el siguiente registro fotográfico se podrán observar en detalle algunas de las imágenes obtenidas en estas actividades.



Figura 34. Proceso de demolición de placas.



Figura 35. Pista parcialmente demolida.



Figura 36. Martillos usados en el proceso de demolición.



Figura 37. Escombros del primer conjunto de placas.





Figura 38. Remoción de escombros de la pista. de pruebas.



Figura 39. Remoción de capas de base. existentes.

5.2.2. Conjunto de ensayos 2

En la Tabla 10 se presenta el grupo de estructuras que conformaron el segundo conjunto de ensayos del proyecto, la ubicación de cada una de las estructuras sobre la pista se expone en la Figura 40.

Ensayo	Variables	
2	Material de base:	Base estabilizada con cemento, resistencia baja
	Espesor de losa:	25 cm
	Espesor capa de base:	15 cm
	Frecuencia de aplicación de carga:	40 km/h
4	Material de base:	Base estabilizada con cemento, resistencia baja
	Espesor de losa:	22 cm
	Espesor capa de base:	15 cm
	Frecuencia de aplicación de carga:	20 km/h
5	Material de base:	Base estabilizada con cemento, resistencia baja
	Espesor de losa:	28 cm
	Espesor capa de base:	15 cm
	Frecuencia de aplicación de carga:	20 km/h
6	Material de base:	Base estabilizada con cemento, resistencia media
	Espesor de losa:	25 cm
	Espesor capa de base:	15 cm
	Frecuencia de aplicación de carga:	40 km/h

Tabla 10. Estructuras	del segundo conjunto	de ensayos.
-----------------------	----------------------	-------------



Figura 40. Configuración geométrica del segundo conjunto de estructuras.

Ensayos de caracterización de base granular

Universidad de

los Andes

En este caso, los ensayos realizados en la caracterización del material granular de base incluyeron ensayos de humedad natural y Proctor modificado, cuyos resultados son presentados a continuación.

• Ensayo de humedad natural

Tabla 11. Resultado ensayo de humedad natural sobre el material granular sin estabilizar.

Muestra	% Humedad
1	1.179
2	0.908
Promedio	1.043

• Ensayo Proctor Modificado

El ensayo de compactación Proctor modificado se realizó para determinar la humedad óptima del material granular para las estructuras a construir con material estabilizado (i.e.,



resistencia baja y media). La Figura 41 muestra los resultados del mismo, del cual se determinó que la humedad óptima de compactación era de 8.8%.



Figura 41. Resultados de ensayo de compactación Proctor Modificado.

Construcción de las capas de base

Para este conjunto de ensayos, debido a la diferencia en el espesor de las capas de base y la losa de concreto para cada uno de los ensayos, el proceso de construcción comenzó con la colocación de separadores de madera, los cuales garantizaban que para cada estructura se cumplieran los grosores especificados en la Tabla 10. Una vez montados los separadores se procedió a depositar el material de base granular y a realizar la homogenización y conformación con el porcentaje de cemento correspondiente a cada estructura, para fabricar in-situ el material de base granular estabilizado con cemento. Posteriormente se realizó el proceso de fundición de las losas.

A continuación se presenta un resumen fotográfico de las actividades desarrolladas durante los meses de Septiembre y Octubre de 2014 en la pista de pavimentos de la Universidad de los Andes.





Figura 42. Compactación de capa de subbase.



Figura 43. División de la pista para diferenciación del nivel de subbase.



Figura 44. Proceso de compactación de capas de base.



Figura 45. Formaletas para fundición de concreto.





Figura 46. Fundición de las primeras 5 losas.



Figura 47. Fundición de 5 losas restantes.

Proceso de demolición del segundo conjunto de estructuras

A partir de la experiencia con la demolición del primer conjunto de estructuras, la cual supuso imprevistos y requirió más recursos de los presupuestados inicialmente (en términos de tiempo, recursos, maquinaria y personal), se tomó la decisión de desarrollar un sistema mecánico capaz de extraer las placas de concreto sin necesidad de destruirlas completamente.

Inicialmente, se intentó sacar las placas directamente colocando un gato hidráulico sobre un sistema de vigas de apoyo, el cual iba ajustado a una serie de tornillos que se colocaron durante la fase de construcción para tal fin. Sin embargo, no fue posible extraer la placa a pesar de que se le aplicó un alto nivel de fuerza. Se supuso que la razón de esta situación era que la placa estaba parcialmente adherida a la capa de base (dado que era cementada en todas las estructuras).

Teniendo en cuenta lo anterior, se decidió realizar ciertos cortes a una de las placas para reducir tanto su peso propio como la fuerza de adhesión entre las capas. Luego de los cortes, se llevó a cabo con éxito el proceso de extracción del tercio central de la placa usando un sistema de carga y palanca. Por otro lado, para el tercio ubicado junto a la pared se montó un sistema diferente dado que se determinó que la placa podía estar adherida a la pared. Así, se perforó la placa horizontalmente buscando reducir la fuerza necesaria para la extracción.

Teniendo en cuenta que el sistema de extracción por medio de perforaciones horizontales fue exitoso y requirió de un bajo nivel de fuerza, se decidió probar el sistema para una placa completa y se obtuvieron resultados positivos, razón por la cual se extrajeron las placas restantes mediante este proceso.

A continuación se describe brevemente a través de registro fotográfico el proceso llevado a cabo:





Figura 48. Sistema de vigas-gato hidráulico para la extracción de las placas.



Figura 49. Proceso de corte de una de las placas.



Figura 50. Extracción del tercio central de la primera placa.



Figura 51. Transporte de la placa fuera de la pista de prueba.



Figura 52. Proceso de transporte de las placas de concreto desde la pista hasta el laboratorio adjunto de estructuras.



Figura 53. Pista de pruebas luego de la extracción total de las placas de concreto.

5.2.3. Conjunto de ensayos 3

En la Tabla 12 se presenta el grupo de estructuras que conformaron el tercer conjunto de ensayos del proyecto. La ubicación de cada una de las estructuras sobre la pista se expone en la Figura 54.

Ensayo	Variables	
7	Material de base:	Base estabilizada con cemento, resistencia media
	Espesor de losa:	15 cm
	Espesor capa de base:	15 cm
	Frecuencia de aplicación de carga:	40 km/h
8	Material de base:	Base estabilizada con cemento, resistencia alta
	Espesor de losa:	15 cm
	Espesor capa de base:	15 cm
	Frecuencia de aplicación de carga:	40 km/h
9	Material de base:	Base estabilizada con emulsión
	Espesor de losa:	15 cm
	Espesor capa de base:	5 cm
	Frecuencia de aplicación de carga:	40 km/h
10	Material de base:	Base asfáltica
	Espesor de losa:	15 cm
	Espesor capa de base:	5 cm
	Frecuencia de aplicación de carga:	40 km/h

Tabla 12. Estructuras del tercer conjunto de ensayos.



Figura 54. Configuración geométrica del tercer conjunto de ensayos.



Proceso constructivo

Es pertinente aclarar que, originalmente, las estructuras de pavimento del tercer conjunto de ensayos se diseñaron con espesores de losa cercanos a los 25 cm. No obstante, las estructuras del segundo conjunto de ensayos mostraron que las losas con dicho espesor dificultaban el análisis de los datos. Esto se debía que la alta rigidez de las estructura generaba muy bajas deflexiones en los puntos de control, lo que generaba una resistencia muy alta ante los procesos erosivos que se querían caracterizar. Debido al rango de medición limitado de los sensores, las mediciones que se obtuvieron en esos casos no fueron confiables y no permitían un adecuado análisis de los procesos reales de deterioro que pueden estar ocurriendo en la estructura. Debido a esta situación, se tomó la decisión unánime entre la Universidad de los Andes y el IDU de modificar la variable de espesor de losa del tercer conjunto de estructuras a 15cm; esto, con el propósito de obtener un mejor desarrollo técnico del proyecto.

En cuanto al espesor de la capa de base, en los casos de base estabilizada con cemento, el espesor establecido fue de 15 cm, mientras para las bases estabilizadas con emulsión asfáltica y las bases con mezcla asfáltica en caliente se definió un espesor de 5 cm. Es de destacar que debido a las difíciles condiciones relacionadas con la pista de prueba (i.e., espacio disponible de trabajo, facilidad de ingreso y salida de material, etc.), durante el proceso de extendido y compactación de estos materiales asfálticos se detectaron algunas deficiencias que, se cree, afectaron la densidad final alcanzada por los materiales.

A continuación, se presenta un registro fotográfico explicativo de las actividades llevadas a cabo durante el mes de marzo de 2015:



Figura 55. Nivelación de la capa de subbase para la construcción de nuevas estructuras.

Figura 56. Construcción de nuevas bases estabilizadas con cemento.





Figura 57. Construcción de la base asfáltica (mezcla densa en caliente MD20).

Figura 58. Compactación de la base asfáltica (mezcla densa en caliente MD20).



Figura 59. Proceso de estabilización in-situ de material granular con emulsión asfáltica.



Figura 60. Fundición de las primeras 5 placas del conjunto.





Figura 61. Proceso de fundición terminado.



Figura 62. Montaje del sistema de aplicación de carga.

Proceso de demolición

En cuanto al proceso de demolición, se mantuvo el mecanismo de extracción de placas descrito anteriormente para el segundo conjunto de ensayos. Sin embargo, teniendo en cuenta que para este momento sólo faltaba realizar los ensayos sobre una de las estructuras, con el fin de optimizar tiempo, se decidió no demoler toda la pista sino realizar dos cortes a las estructuras existentes de tal forma que la nueva estructura y su correspondiente réplica pudieran ser construidas dentro de las estructuras actuales. Esto se muestra de manera gráfica en las Figura 63Figura 64.



Figura 63. Proceso de corte de las placas para su posterior extracción.



Figura 64. Espacio para la construcción del último conjunto de ensayos.

5.2.4. Conjunto de ensayos 4

La descripción del último conjunto de estructuras, conformado por un sólo ensayo con su réplica, se presenta en la Tabla 13 y la Figura 65, respectivamente.

Ensayo	Variables	
	Material de base:	Base estabilizada con cemento, resistencia baja
1	Espesor de losa:	15 cm
1	Espesor capa de base:	15 cm
	Frecuencia de aplicación de carga:	60 km/h

Tabla 13. Estructura del 4 conjunto de ensayos.



Figura 65. Configuración geométrica del cuarto conjunto de estructuras.

Durante el mes de Septiembre de 2015 se realizó la construcción de las capas de base (estabilizada con cemento de baja resistencia) y la fundición de las losas de concreto correspondientes al ensayo mencionado (ensayo o estructura número 1). La Figura 66 muestra el registro fotográfico de estas actividades.





Figura 66. Construcción de estructuras del cuarto conjunto de ensayos.

Como se explicará más adelante, en esta oportunidad se requirió modificar el sistema de carga debido a que la totalidad de la carga ejercida por el actuador en la viga existente fue aplicada sobre una sola estructura, con el fin de aplicar carga sobre una (1) y no dos (2) estructuras de forma simultánea.

5.3. Sistema de aplicación de carga

El sistema de aplicación de carga fue el responsable de aplicar carga cíclica controlada sobre las estructuras de pavimento a ensayar. Con respecto a este sistema, es relevante mencionar, como primera medida, que aunque en el esquema general de la pista de ensayo (

Figura 3) se observan cuatro (4) vigas de carga, en el experimento se contó únicamente con dos (2) vigas. Estas dos (2) vigas se emplearon para realizar ensayos sobre cuatro (4) de las estructuras de forma simultánea y, una vez finalizados dichos ensayos, éstas fueron trasladadas para realizar el ensayo sobre las cuatro estructuras de réplica. Es decir que se realizaron los ensayos sobre cuatro estructuras de forma secuencial: primero sobre cada una de las estructuras y luego sobre sus respectivos réplicas o duplicados.

El diseño de este sistema consistió en unas vigas de apoyo que permitieron la ubicación de las celdas de carga en los sitios en los cuales se iba a aplicar la carga que simulaba el paso vehicular. Esta carga se aplicó sobre unos dispositivos especialmente diseñados para este fin, cuyo contacto con la placa de concreto se realizaba a través de unas bases de neoprenos



que simulaban el contacto típico entre una llanta de un vehículo comercial y la superficie del pavimento. El esquema presentando en la Figura 67 corresponde al diseño definitivo del montaje de aplicación de carga.



Figura 67. Diseño definitivo del sistema de aplicación de carga.

El proceso de instalación consistió en la implementación de todas las piezas que componen este sistema, descritas en la figura anterior. El principal reto de la instalación fue la necesidad de asegurar un anclaje apropiado de las estructuras de aplicación de carga en posición para poder efectuar los ensayos mecánicos de forma segura (i.e., asegurar que la viga se encontraba debidamente restringida en todos sus grados de libertad).

A continuación se describen las diversas actividades relacionadas con la instalación y puesta a punto de este sistema de carga. Cabe resaltar que lo único que cambió en el sistema a lo largo de los diferentes ensayos fue el lugar de instalación de los anclajes, y las condiciones del último ensayo en donde se modificó la geometría para aplicar carga únicamente sobre una estructura de pavimento.

En primer lugar, se localizaron e instalaron los materiales de apoyo como barras y neoprenos, los cuales daban soporte a la estructuras de carga centrada en las vigas principales. Para esto, se incluyeron dos (2) anclajes adicionales a los cuatro (4) inicialmente estipulados en el extremo de una de las dos (2) vigas de carga que colinda con la pared. Una vez anclada la viga, se culminó la instalación de los dos (2) actuadores, de las

cuatro (4) celdas de carga y de las plataformas o bases circulares de neopreno que simulaban el contacto llanta-pavimento. El proceso se ilustra en las siguientes figuras:



Figura 68. Localización del montaje de aplicación de cargas en el Laboratorio.



Figura 70. Diseño, construcción e implementación de los anclajes al piso.

Figura 69. Diseño e implementación de las barras de apoyo para la instrumentación de las losas.



Figura 71. Diseño y fabricación de los elementos de neopreno (apoyo y transmisión de cargas).





Figura 72. Pegado de los elementos de apoyo a las placas de aplicación de carga con "bóxer".



Figura 74. Limpieza, lubricación y armado de la celda de carga con la rótula.



Figura 73. Detalle de la rótula y la celda de carga usadas en el montaje de aplicación de carga.



Figura 75. Detalle de las placas con las celdas de carga armadas completamente.



Figura 76. Detalle de la posición original de la viga principal del sistema de carga. (encima).

Figura 77. Detalle de la posición corregida de la viga principal del sistema de carga (debajo).





Figura 78. Vigas instaladas con los actuadores y celdas de carga: sistema completo de aplicación de carga.

Uno de los principales retos que se detectaron en las pruebas iniciales realizadas al sistema fue el exceso de deflexiones indeseadas en las vigas de apoyo durante la aplicación de ciclos de carga. A partir de una serie de pruebas, se estableció como solución al problema el refuerzo estructural de dichos elementos. Este refuerzo consistió en la soldadura de seis (6) placas/platinas del mismo material a cada viga dispuestas de la siguiente manera:

- Horizontalmente, en la parte superior (dos (2) placas) e inferior (dos (2) placas) de la viga.
- Verticalmente, encima de las placas dispuestas de forma horizontal en el refuerzo inicial (dos (2) platinas).

En la Figura 79 se pueden apreciar las placas soldadas en la parte superior de la viga, así como las platinas soldadas encima de las mismas. Estas modificaciones permitieron aumentar de manera significativa el área sometida a tensión de la estructura y, por lo tanto, reducir las deflexiones que fueron observados en los ensayos de prueba. Como complemento a estas modificaciones, también se soldaron dos (2) placas en la parte inferior de cada una de las vigas.




Figura 79. Refuerzo de las vigas del sistema de aplicación de carga.

Finalmente, en la Figura 80 se puede apreciar la modificación realizada al sistema de carga para la última tanda de ensayos. Dicha modificación consistió en la habilitación de un punto de carga (en vez de dos como en todos los ensayos anteriores), puesto que en este caso existe solamente una placa ubicada en el centro de la pista. Esta modificación se hace con el fin de concentrar el trabajo de los pistones usados en un solo punto de carga, con el fin de lograr una frecuencia mucho mayor (i.e., 6-8 Hz) a la lograda en los ensayos anteriores.





Figura 80. Modificación del sistema de aplicación de carga para la última tanda de estructuras.

La Figura 81 ilustra el funcionamiento del sistema de carga instalado y en operación en el primer conjunto de ensayos (estructura con capa de base granular sin estabilizar). En esta figura, se puede observar el momento de carga y descarga de las estructuras y el chorro de agua que es expulsado en el pavimento en el proceso. Adicionalmente, en la Figura 82 se observa el material granular en la superficie del pavimento que ha sido expulsado y que da evidencia de un sistema severo de erosión.





Figura 81. Sistema de aplicación de carga en operación: carga y descarga en un pavimento con placa de 15 cm de espesor y capa de base de material granular sin estabilizar



Figura 82. Material granular de la capa de base expulsado a la superficie como consecuencia de los procesos de erosión generados por la presencia de agua y la aplicación de carga mecánica cíclica.

Finalmente, se debe destacar que luego de las pruebas iniciales y de puesta a punto del sistema, se seleccionaron las frecuencias de aplicación de carga bajo las cuales se realizaron los trece (13) ensayos listados en las secciones iniciales de este informe. Dichas frecuencias fueron las siguientes:

- Frecuencia baja: 1 Hz.
- Frecuencia media: 2 Hz.
- Frecuencia alta: 6 Hz.

De esta forma, cuando un ensayo fue realizado bajo una condición de frecuencia de carga 'media', por ejemplo, significa que la carga fue aplicada al pavimento a una frecuencia de 2Hz.

5.4. Sistema hidráulico

Como se mencionó anteriormente, para simular el fenómeno de bombeo en las estructuras de pavimento rígido es necesario contar con la presencia de agua de manera permanente. Por esta razón se diseñó un sistema hidráulico encargado de esta tarea.

Dicho sistema lleva el agua desde un tanque de almacenamiento situado en el centro de la pista (Figura 83) hacia la zona de ensayo, mediante el empleo de dos (2) mangueras que fueron enterradas a 7 cm de distancia de la junta de la placa instrumentada, y a una profundidad igual al espesor de la placa (i.e., desde la superficie a la altura de la capa de base, la cual varía según la placa entre 15 y 28 cm) en dos puntos diferentes en cada placa de ensayo. La Figura 85 muestra el detalle de la instalación final del sistema de aprovisionamiento de agua para una de las placas de ensayo.



Figura 83. Sistema de almacenaje y suministro de agua para los ensayos de erosión.



Figura 84. Pruebas iniciales del sistema de aplicación de agua. Corrección de fugas en las tuberías.





Figura 85. Detalle de las dos (2) mangueras que transportan el agua al interior de la estructura en una de las losas de ensayo.

5.5. Sistema de instrumentación

Una vez finalizado el montaje experimental, se procedió a la instalación del sistema de instrumentación. Dicho sistema se compone de una serie de sensores encargados de medir las diferentes variables a evaluar en el ensayo. En la Tabla 14 se presenta un listado completo de los sensores utilizados en el montaje.

Sensores						
Uso	Canti- dad	Compañía	Referencia	Rango	Variable	Aplicabilidad
Celdas de carga	4	Load Shop	100 Series of Low Profile Load Cells	100 k N	Carga	La medida corresponde a la carga aplicada por los servo-actuadores hidráulicos en cada una de las juntas.

Tabla	14.	Listado	de sensores	empleados	en el	proyecto.
				-		1 2



Sensores						
Uso	Canti- dad	Compañía	Referencia	Rango	Variable	Aplicabilidad
Sensor de presión de agua	8	Metrollux	ME506-R- 002-1-01-01	0-2 bar	Presión de agua	La medida corresponde a la presión del agua bajo de la placa de concreto.
Desplaza- miento superficia l	8	Waycon	SM10-SG- KA-IP68	10 mm	Desplazamie nto	Mide el desplazamiento en dos puntos de la placa a medida que se aplica la carga con el servo- actuador.
Desplaza- miento de base	4	Waycon	SM10-SG- KA-IP68	10 mm	Desplazamie nto	Mide el desplazamiento en la base a medida que se aplica la carga con el servo-actuador.

5.5.1. Instalación del sistema de instrumentación

En la Figura 86 se muestra un esquema detallado de la ubicación de los sensores sobre las placas de ensayo. Como se explicará más adelante, en el transcurso de los ensayos se tomó la decisión de cambiar y/o eliminar algunos de los sensores, al comprobar mediante el procesamiento de datos que éstos no proveían información confiable de la variable que se esperaba medir.

5.5.2. Calibración de los sensores in-situ

Al finalizar el proceso de cableado y conexión de los sensores fue necesario realizar la calibración de los sensores in-situ.

Para el caso de los deformímetros (H1, H2, S1, S2 y DC3, de acuerdo a la convención de la Figura 86) se emplearon galgas (platinas con espesor conocido de 4 mm) y se revisó el voltaje reportado por cada sensor en la medición de los grupos de galgas. El resultado final de este proceso se conoce como curva de calibración. Esta curva provee la denominada constante de calibración, la cual permite convertir los valores de voltaje reportados por los deformímetros a valores de desplazamiento (o deformación unitaria, en algunos casos).

Para el caso de los sensores de presión de agua (PP4 y PP5, de acuerdo con la Figura 86), la calibración consistió en utilizar una válvula y un manómetro para aplicar escalones de presión (controladas con la válvulas) a 0.25 bares y medir el voltaje respuesta del sensor. Los resultados se graficaron para obtener la relación entre la medida de voltaje reportada por el sensor y el valor correspondiente a la presión (curvas de calibración).

Finalmente, para el caso de las celdas de carga (C-P3, C-P4, C-P9, C-P10, de acuerdo con la convención mostrada en la Figura 86), la verificación consistió en comparar los valores de calibración enviados de fábrica con los obtenidos en las pruebas. Para esto, se aplicó una

carga conocida a través de los actuadores de carga y se verificó que el valor en cada celda correspondiera a la carga esperada.



Figura 86. Convención empleada para la numeración de las placas y para los sensores (vista de planta del montaje experimental).

A manera de ejemplo, las siguientes gráficas presentan las curvas de calibración de todos los sensores de desplazamiento y de presión de agua de una de las estructuras construidas en el primer conjunto de ensayos.

Una vez finalizó el proceso de calibración, fue necesario realizar pruebas preliminares de aplicación de carga en el montaje experimental. Dichas pruebas consistieron en aplicar escalones de carga para verificar que todos los sensores se encontraran capturando datos y que la señal de carga obtenida correspondiera a la señal deseada. Estas pruebas fueron fundamentales para verificar la capacidad del sistema de aplicar rangos máximos de



frecuencias de carga o tiempos de carga, los cuales se relacionan con la velocidad del paso de los vehículos en la superficie del pavimento.



Figura 87. Curvas de calibración de los sensores de una estructura correspondiente al primer conjunto de ensayos.

5.6. Sistema de adquisición y almacenamiento de datos

La captura, organización, filtrado, procesamiento y análisis de datos provenientes de las variables instrumentadas en las diferentes estructuras dependió de un sistema de adquisición y almacenamiento de datos. Este sistema está conformado por una serie de



equipos conectados a los diferentes sensores (Figura 88), los cuales tiene como función recolectar la información medida durante el ensayo.

Adicional a estos equipos, se desarrolló un programa para la captura de la información y el control de los equipos de aplicación de carga. Este software, denominado "EROSIÓN II", fue desarrollado en el lenguaje de programación dirigida a objetos LabView.



Figura 88. Sistema de adquisición de datos.

En la Figura 89 se puede observar la ventana general del programa. Se destacan las siguientes características y componentes:



Figura 89. Ventana general del programa de captura y control: "EROSION II".

- El programa permite controlar en simultáneo los dos sistemas de aplicación de carga, llamados en la ventana: "Sistema 1" y "Sistema 2".
- En el componente: "Parámetros de ensayo" (Figura 90), se configuran los datos de entrada de la carga de ensayo:
 - Amplitud: magnitud de la carga aplicada en Kg.
 - Frecuencia en Hz.

Universidad de

los Andes

- Número de ciclos de carga del ensayo.
- Tiempo de reposo, en segundos, el cual corresponde al tiempo simulado de paso entre ejes de un vehículo articulado de Transmilenio.
- Archivo: en esta celda se puede asignar nombre al archivo de almacenamiento de los datos.



Figura 90. Componente de parámetros de ensayo del programa "EROSION II".

- El segundo componente es el control de los equipos de carga y consta de (Ver Figura 91):
 - "Cero 1": botón que permite "cerar" o poner en ceros el Sistema 1 de aplicación de carga, llevándolo a su posición de origen a nivel de superficie, antes de iniciar el ensayo.
 - "Control 1": botón que permite iniciar el ensayo para el Sistema 1.
 - "Grabar 1": botón que permite iniciar la grabación de la información generada en el ensayo del Sistema 1.
 - "STOP": permite la detención inmediata del ensayo en el sistema de carga No. 1.





Figura 91. Componente de control del programa "EROSION II".

- El tercer componente incluye cuatro pestañas con la abreviación "Pi", donde "*i*" es el número de identificación de la placa de ensayo, y para cada una de las cuatro (4) placas que se ensayan en simultáneo. La pestaña contiene las siguientes celdas de visualización de las variables instrumentadas (Ver Figura 92):
 - "Celda 1": muestra el valor real de la carga aplicada en el ensayo.
 - "Presión de poros": reporta el valor medido de succión, en términos de presión de poros a nivel de la base.
 - "LVDT superficial": permite registrar la deformación vertical medida a nivel de superficie (sobre la estructura).
 - "LVDT granular": permite registrar la deformación vertical a nivel de la base del pavimento.
 - "LVDT Horizontal 1": muestra la medida de la deformación horizontal de la placa en el punto 1 localizado en el primer tercio cercano a la aplicación de la carga.
 - "LVDT Horizontal 2": muestra la medida de la deformación horizontal de la placa en el punto 2 localizado en el primer tercio cercano a la aplicación de la carga.
 - "LVDT Central": muestra la deformación vertical medida en el punto central de las dos huellas de aplicación de carga.



Figura 92. Componente registro de lecturas por variables instrumentadas. Programa "EROSION II".

• Al costado derecho de la ventana, se ubicaron cuatro espacios destinados a ilustrar la onda de la carga aplicada en cada una de las cuatro (4) losas ensayadas en simultáneo (Ver Figura 93), lo que permitió realizar un monitoreo de la calidad de la información en tiempo real. En las abscisas se registra el tiempo de aplicación de la carga, mientras que en las ordenadas se registra la amplitud de la onda asociada a la carga en Kgf.

Universidad de

los Andes



Figura 93. Gráficas de señal de carga para cada una de las 4 losas; programa "EROSION II".

El programa se diseñó para generar un archivo de texto por cada una de las cuatro (4) estructuras ensayadas de forma simultánea (cuatro (4) originales o cuatro (4) réplicas), con el registro de cada una de las variables instrumentadas y mencionadas anteriormente en función del tiempo.

5.7. Ejecución de los ensayos de erosión a escala real (Etapa 4)

Después de realizar los primeros ensayos sobre las estructuras originales del primer conjunto o tanda de ensayos, se tomó la decisión de aplicar un total de 350,000 ciclos de carga sobre cada una de las estructuras de pavimento. Adicionalmente, es pertinente mencionar que la carga fue aplicada de manera consecutiva durante lapsos típicos de cuatro (3) a cinco (5) horas, con una duración diaria típica de ocho (8) a nueve (9) horas.

El desarrollo de las pruebas del modelo a escala real fue supervisado en todo momento por al menos uno de los miembros del equipo de trabajo. Por esta razón, se realizó un protocolo



de inicio y terminación del ensayo de manera que cualquier participante estuviera en la capacidad de comenzar o terminar el procedimiento, el cual se presenta a continuación.

5.7.1. Protocolo de inicio y terminación de los sistemas de carga y de instrumentación

Protocolo de inicio del ensayo

Procedimiento de verificación inicial:

1. Revisar que todos los instrumentos estén ubicados correctamente. Es importante verificar que la placa que aplica la carga no esté en contacto con los sensores de desplazamiento (Figura 94).



Figura 94. Ubicación de los instrumentos.

- 2. Verificar que todas las tuercas de anclaje estén bien ajustadas.
- 3. Abrir las llaves del tanque para dar paso al flujo de agua.

Procedimiento de encendido del equipo:

1. Encender el computador (Figura 95).





Figura 95. Computador destinado al software de control.

- 2. Encender el multi-toma de instrumentación.
- 3. Prender la fuente de energía con el botón 'Power'. Una vez hecho esto, el sistema debe indicar 'Output off'. A Continuación se debe presionar el botón 'Outuput' y a continuación la fuente debe dar una lectura de 12 voltios (Figura 96).



Figura 96. Fuente de energía de instrumentación.

4. Activar el encendedor del 'sistema 2' y verificar que la luz roja esté prendida (Figura 97). Este sistema corresponde la bomba hidráulica del sistema de carga.





Figura 97. Encendedor del sistema 2.

Procedimiento de arranque del Software:

- 1. En el escritorio hacer doble click en EROSIÓN II, el programa de control.
- 2. Iniciar el programa con el ícono de flecha blanca ubicado en la parte superior izquierda.

Procedimiento de encendido de la unidad hidráulica de carga:

3. Verificar que la válvula reguladora de presión de la unidad hidráulica (Figura 98) esté abierta. Esta válvula se abre en sentido contrario a las manecillas del reloj, de tal forma que quede girando libremente.



Figura 98. Válvula reguladora de presión de la unidad hidráulica.

 En el panel ubicado cerca a la entrada del laboratorio, encender 'Bomba 2' y 'Torre 2' (Figura 99).





Figura 99. Panel para 'Bomba 2' y 'Torre 2'.

- 5. Asegurar que los dos botones de emergencias estén desactivados (dar medio giro).
- 6. Encender la bomba con el pulsador verde en el panel ubicado cerca al computador. Para esto es importante asegurarse que el programa esté funcionando (Figura 100).



Figura 100. Panel para encender la bomba.

7. Después de encendido, es necesario cerrar de forma paulatina la válvula reguladora de presión de la unidad hidráulica hasta que marque 500 psi (Figura 101).





Figura 101. Válvula reguladora de presión de la unidad hidráulica en 500 psi.

Proceso de inicialización del Software:

- 1. Dirigirse a la pestaña 'Sistema 1'.
- 2. Hacer click en 'Aplicar carga'.
- 3. Una vez estabilizado el sistema, dirigirse a la pestaña Sistema 2 y realizar la misma función para la anterior (Figura 102).



Figura 102. Estabilización del sistema 1.

Proceso de ajuste de la unidad hidráulica:



1. Dirigirse a la válvula reguladora de presión de la unidad hidráulica y aumentar la presión a 2000 psi.

Proceso de almacenamiento de datos en el Software:

- 1. En la parte de lectura de instrumentos, hacer click en 'P3' y en el botón 'Play'.
- 2. Esperar a que el botón 'Guardar datos' se encuentre apagado.
- 3. Dirigirse a P9 y realizar el mismo proceso que el anterior.

Protocolo de finalización del ensayo

El protocolo de finalización del ensayo consistió en realizar los siguientes siete pasos:

- 1. En el programa de computador pulsar el botón stop en la esquina inferior derecha.
- 2. En el panel cercano al computador oprimir el botón de paro de emergencia.
- 3. Proceder a apagar el computador.
- 4. Luego apagar la fuente ubicada arriba del computador oprimiendo el botón 'Power'.
- 5. Después, apagar el 'Sistema de Adquisición de datos 2' ubicado en la parte izquierda e inferior del computador, dejando la perilla en posición vertical.
- 6. Dirigirse hacia al panel de enfriamiento ubicado cerca a la puerta de ingreso y girar las perillas (posición vertical) 'Bomba 2' y 'Torre 2' hasta que se apaguen las luces.
- 7. Chequear si la llave del agua está cerrada, en caso de que no lo esté, cerrar la perilla dejándola en posición horizontal.

5.7.2. Estado de finalización de los ensayos de erosión a escala real

Con el fin de obtener resultados comparables, se estableció como meta aplicar 350,000 ciclos de carga sobre cada una de las trece (13) estructuras, como se mencionó previamente. Dependiendo de la frecuencia de aplicación de carga, esto significó realizar ensayos continuos durante días hábiles en periodos de cerca de tres (3) meses (frecuencia baja) hasta periodos de tan sólo un par de días (frecuencia alta). Sin embargo, en algunas de las estructuras se presentaron una serie de dificultades, principalmente deformación permanente excesiva de las placas o falla prematura de la estructura, que impidieron la aplicación de la totalidad de los ciclos de carga propuesto sobre dichas estructuras. En la Tabla 15 se presenta el número de ciclos realmente aplicado a cada una de las estructuras del proyecto.

Tabla 15. Condición de finalización	n de cada uno de los ensayos.
-------------------------------------	-------------------------------

Ensayo	Placa	Ciclos	Estado
1	Original	200,000	Detenido - deformación excesiva

Ensayo	Placa	Ciclos	Estado		
	Réplica	240,000	Detenido - deformación excesiva		
2	Original	350,070	Finalizado - completo		
2	Réplica	350,000	Finalizado - completo		
2	Réplica	355,680	Finalizado - completo		
3	Original	352,288	Finalizado - completo		
4	Original	350,592	Finalizado - completo		
4	Réplica	350,000	Finalizado - completo		
~	Original	350,592	Finalizado - completo		
5	Réplica	350,000	Finalizado - completo		
C	Original	350,070	Finalizado - completo		
0	Réplica	350,000	Finalizado - completo		
7	Original	350,000	Finalizado - completo		
/	Réplica	285,592	Detenido - deformación excesiva		
0	Original	350,000	Finalizado - completo		
0	Réplica	285,592	Detenido - deformación excesiva		
0	Original	350,000	Finalizado - completo		
9	Réplica	172,086	Detenido - deformación excesiva		
10	Original	350,000	Finalizado- completo		
10	Réplica	172,086	Detenido - deformación excesiva		
11	Réplica	24,710	Falla-fractura transversal en su centro		
11	Original	374,306	Finalizado - completo		
12	Réplica	263,830	Detenido - deformación excesiva		
12	Original	374,306	Finalizado - completo		
12	Réplica	355,680	Finalizado - completo		
13	Original	352,288	Finalizado - completo		

5.8. Metodología de análisis de resultados

El procedimiento de análisis realizado para los datos recopilados en cada una de las estructuras ensayadas constó de varias etapas. Como primera medida, se realizó un preprocesamiento de los datos capturados por los diferentes sensores, el cual consistió en suprimir todos aquellos grupos de datos que estuviesen fuera de los rangos comunes o esperados de los instrumentos con que cuenta el sistema. Dichos rangos comunes fueron determinados por medio de un programa elaborado en LabView, donde se presentan los datos graficados. El programa permite visualizar las ondas de carga de cada una de las placas frente a las ondas medidas por los sensores de desplazamiento y de presión de agua. Una comparación visual mediante este método permitió confirmar si algunos datos eran



erróneos, con el fin de omitirlos en el análisis y disminuir así la variabilidad e incertidumbre de los mismos.

En la Figura 103 se puede observar un grupo de 60 archivos cargados mediante el programa (en este caso en particular cada archivo contiene más de 200,000 datos). Como se aprecia en la figura, hay zonas de datos que no corresponden al comportamiento normal medido, como la que se encierra en un ovalo rojo. Así mismo, la Figura 104 hace una ampliación de esta zona, que parece ser una falla momentánea en la unidad de carga y que, por lo tanto, representa un salto en las mediciones de los sensores en las placas. Este rango de datos fue recortado por medio del programa para lograr que las ondas medidas tengan continuidad y generar un análisis válido (Figura 105).



Figura 103. Identificación de rangos de datos erróneos en un grupo de archivos.





Figura 104. Ampliación y recorte del rango de datos erróneos durante el pre-procesamiento.



Figura 105. Ondas de carga y desplazamiento medidas y corregidas en el pre-tratamiento.

Una vez eliminados los datos no representativos de las mediciones, se procedió a realizar dos tipos de análisis:

• Por una parte, se analizó la evolución de las amplitudes de las ondas medidas en los sensores de desplazamiento, cuyo comportamiento esperado en caso de que la



estructura desarrollara procesos de erosión notorios era un cambio evolutivo en sus valores. Específicamente, se evaluó la diferencia o el intervalo entre el máximo y el mínimo desplazamiento reportado en cada uno de los ciclos de carga aplicados al pavimento.

Por otra parte, para los sensores superficiales se realizó un análisis teniendo en cuenta los ciclos de histéresis (Carga vs. Desplazamiento) y su cambio a través de la aplicación de ciclos de carga. Al igual que para ensayos de acero u otros materiales, se esperaba ver un deterioro de la rigidez en función de los ciclos de carga y un cambio en la energía disipada por la estructura. La energía disipada por el sistema se define como el área dentro de los ciclos de histéresis y la rigidez de las estructuras, y más específicamente la constante de rigidez, se define como la pendiente de dichos ciclos de histéresis para cierto número de ejes aplicados. Es importante aclarar que en el caso de los sensores de desplazamiento ubicados en la capa base, una variable de análisis adicional fue la deformación reportada (directamente) en lugar de la rigidez, ya que en este punto exacto de la base de la losa de concreto se desconoce el valor de carga verdadero que existe en cada caso (va que depende de la capacidad de disipación de carga o esfuerzos de la losa de concreto). En este sentido, los diagramas de fuerza-desplazamiento presentados a continuación para ese sensor (DC3) son ilustrativos del comportamiento del mismo, puesto que permiten verificar las deformaciones sufridas por el material. No obstante, éstos no se emplearon en el análisis de resultados, por la razón mencionada respecto al desconocimiento de los valores reales de carga a esta profundidad de la estructura.

El análisis cuantitativo realizado a través de todos los datos recolectados se encuentra complementado por las inspecciones visuales efectuadas en cada sesión de los ensayos mecánicos y por la medición manual de la deformación plástica reportada en las placas. Estas imágenes fueron reportadas a través de cada uno de los informes mensuales con el fin de compararlas con los resultados de los análisis.

Finalmente, vale la pena mencionar que después de procesar y analizar los datos obtenidos de la primera tanda o conjunto de ensayos, se tomó la decisión de descartar los datos arrojados por los sensores ubicados en la parte central y superficial de la placa (H1 y H2), debido a que los valores de deformación y desplazamiento medidos eran tan bajos que los sensores no los podían reportar y, por lo tanto, las mediciones no eran válidas. La misma situación se reportó con los sensores de presión de agua (denominados PP4 y PP5) los cuales sugerían que éstos habían fallado durante las pruebas.

De acuerdo a esto, para el análisis de resultados consolidado final se tuvieron en cuenta sólo los datos arrojados por los sensores listados a continuación. Sin embargo, en la mayoría de los ensayos los otros sensores sirvieron como medida de control interno para verificar el debido funcionamiento del sistema:

1. Sensor de desplazamiento a nivel de base (Sensor DC3),



- 2. Sensor de desplazamiento vertical superficial en la placa cargada (Sensor S2),
- 3. Celda de carga (CP).

Vale la pena mencionar que el sistema de adquisición de datos proporcionaba 800 resultados por minuto, lo que implicó el diseño de una metodología para el manejo y procesamiento eficiente de esta información. La Figura 106, presenta una señal típica de aplicación de carga en función del tiempo. Los picos muestran la carga máxima aplicada en cada ciclo, teniendo una carga cíclica aproximadamente de 50 KN. La Figura 107, presenta el desplazamiento vertical de la base del pavimento ante dicha carga que fue aplicada en superficie (Figura 106). La señal es una respuesta típica de la deformación en la base del pavimento usando los resultados del sensor DC3.



Figura 106. Señal de entrada típica aplicada a una estructura (Estructura 7).



Figura 107. Desplazamiento a nivel de base típico de una estructura (sensor DC3, Estructura 7).



La gráfica de la señal de aplicación de carga en función de la señal de desplazamiento permitió la obtención de los ciclos de histéresis que caracterizan la mecánica y la dinámica del proceso. En la Figura 108 se presentan diez (10) ciclos de histéresis a partir de los diez (10) ciclos de aplicación de carga y deformación presentados anteriormente en las Figura 106 y Figura 107 (tercera señal enmarcada en una línea punteada) a partir de cuales se construye el ciclo de histéresis punteado en la Figura 108.



Figura 108. Estructura 7, sensor DC3.

Así, los resultados arrojados de este sensor a través de los ciclos de carga aplicados, proveen información sobre la evolución del sistema, como la que se observa en la siguiente figura:





Figura 109. Estructura 7, sensor DC3 ciclos de histéresis de 10,000 a 350,000 ciclos.

Como se describió con anterioridad, para el caso del sensor de superficie estudiado (S2), los ciclos de histéresis se emplearon para obtener los dos parámetros descritos para evaluar la respuesta del pavimento (i.e., pendiente o constante de rigidez y área dentro del ciclo de histéresis o energía disipada).



Figura 110. Estructura 7, cambio en el constante de rigidez y en la energía disipada para el sensor S2 en función del tiempo.

Finalmente, para el caso de los sensores ubicados a nivel de la capa de base se analizó el cambio en el intervalo desplazamiento máximo de la señal de desplazamiento a través del tiempo, tal como se describió previamente y como se observa a continuación:





Figura 111. Estructura 7, cambio en el desplazamiento máximo detectado por el sensor DC3 en función del tiempo.

Después de evaluar la calidad de la información obtenida mediante estos procedimientos, se determinó que se emplearían únicamente dos (2) parámetros o variables de análisis para caracterizar el comportamiento de cada estructura a través del tiempo: 1) el cambio en la rigidez (K) de los sensores de superficie S2, para aquellos casos en los que existiera información confiable, y 2) el cambio en el intervalo de desplazamientos en cada ciclo de carga reportado por el sensor DC3, ubicado a nivel de la capa de base. Los resultados consolidados para cada una de las estructuras evaluadas se encuentran consolidados en el Anexo 1 del presente informe. Es de destacar que es difícil obtener información válida y confiable del sensor S2, ubicado en la superficie del pavimento cerca de la zona de aplicación de carga, debido a las condiciones agresivas del sistema de carga, a la presencia de agua y de material erosionado de las capas de base y a la existencia de otros componentes que pueden alterar el sensor y que están presentes durante la ejecución del ensayo mecánico. Esta situación ha sido reportada por diferentes grupos de investigación en el mundo, quienes evitan tomar mediciones mediante sensores ubicados directamente en la superficie de los pavimentos, debido a la dificultad de obtener información válida. En este sentido, es de destacar que en la metodología de ensayo propuesta sí logró obtener información confiable en el sensor superficial S2 para algunas de las estructuras de pavimento, lo que da muestras de la calidad general del sistema experimental propuesto. Los resultados de este sensor y de los sensores de desplazamiento ubicados a nivel de base fueron empleados para llevar a cabo la Etapa 7 del proyecto, tal como se describe en una sección posterior.

6. MODELO NUMÉRICO DE PROCESOS DE EROSIÓN EN PAVIMENTOS RÍGIDOS

A continuación se describen los diferentes componentes y etapas realizadas como parte de la

del proyecto, la cual consistió en el diseño, implementación y aplicación de un modelo numérico para evaluar fenómenos de erosión.

6.1. Parámetros principales que controlan el fenómeno del bombeo en pavimentos rígidos y determinan las metodologías de caracterización de los materiales

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

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

en donde:

B representa el bombeo

P representa la carga por eje

- V_e es la velocidad de expulsión del agua
- *E* representa la susceptibilidad a la erosión o 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 interface 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*. La evaluación del parámetro de erodabilidad debe entonces tener en cuenta de una manera clara el efecto de la velocidad de expulsión del agua. Por otra parte, la reducción en la vida útil de un pavimento rígido afectado por el fenómeno de erosión debe, adicionalmente, considerar los esfuerzos internos que se desarrollan en la losa de concreto por efecto de las cargas externas aplicadas a la estructura.



6.2. Revisión bibliográfica

A continuación se hace un breve listado de distintos trabajos reportados en la bibliografía que buscan modelar y/o caracterizar el fenómeno de erosión en pavimentos rígidos:

6.2.1. Modelos empíricos

Modelo de Crovetti & Darter (1984)

Fue desarrollado a partir del Software EAROMAR propuesto por Markow & Brademeyer en 1984, el cual se basa en una amplia base de datos experimentales tomados en campo durante el ensayo AASHO Road Test desarrollado en el estado de Illinois (USA) a comienzos de la década de 1960. Su ajuste propone un índice de bombeo descrito por la siguiente ecuación:

$$P_i = m \sum ESAL * Fd \tag{2}$$

Siendo

$$\log m = 1.07 - 0.34 D \tag{3}$$

en donde,

*P*_i: índice de bombeo

ESAL: número de ejes estándar simples de llantas duales 8.2 ton u 82 KN acumulados durante el periodo de diseño.

D: espesor de la placa de concreto en pulgadas.

 F_{d} : factor de ajuste por drenaje (de 0.2 a 1 dependiendo de la permeabilidad de la subrasante).

Modelo de Darter & Barenberg (1977)

Este modelo fue uno de los primeros en diferenciar algunas condiciones intrínsecas de un pavimento rígido. Las ecuaciones mostradas a continuación corresponden al comportamiento de estructuras de pavimento rígido con y sin refuerzo aplicado.

$$\ln(\rho) = 1.39 \, DRAIN + 4.13 \tag{4}$$

$$\beta = \frac{0.772(d-2.3)^{1.61}}{PPTN} + 0.0157JLTS * D + 0.104STAB + 0.17DRAIN + 0.137SOILTYP - 0.247$$
(5)

$$\ln(\rho) = 1.028STAB + 0.0004966D^{3.47} - 0.1248FRINDEX + 1.667CBR + 5.476$$
(6)

$$\beta = -0.01363DMOIST + 0.02527D - 0.423 \tag{7}$$

$$g = \left(\frac{ESAL}{\rho}\right)\beta \tag{8}$$

en donde,

g: factor de daño DRAIN = 0 si no hay drenes y 1 si existen. PPTN: precipitación media anual en cm. JLTS=0 si no está enclavijado y 1 si lo está. STAB = 0 para subbase no estabilizada y 1 para estabilizada. SOILTYP = 0 para subbase granular y 1 para subrasante gruesa granular. DMOIST: índice de humedad de Thornthwaite. FRINDEX: índice de congelamiento. CBR : California Bearing Ratio de la subrasante. D: espesor de la placa de concreto en pulgadas.

Modelo PCA

Teniendo en cuenta que los resultados de los ensayos del AASHO Road Test no presentaban correlaciones confiables, la PCA propuso un modelo empírico que buscaba predecir la cantidad de ciclos que soportaba la base granular antes de presentar erosión. Las ecuaciones 9 y 10 describen este modelo:

$$\log N = 14.524 - 6.777(C1 * P - 9.0)^{0.103}$$
(9)

$$P = 268.7 \frac{p^2}{hk^{0.73}} \tag{10}$$

en donde,

N: número de repeticiones admisibles de carga
P: tasa de trabajo o potencia
p: presión en el cimiento debajo de la esquina de la placa (psi)
h: espesor de la placa en pulgadas
k: módulo de la subrasante
C₁=1 para subbase no estabilizada y 0.9 para subbase estabilizada.



6.2.2. Modelos con elementos finitos y métodos empíricos

Teniendo en cuenta el desarrollo de modelos empíricos de los años anteriores, así como el surgimiento de herramientas computacionales, algunos investigadores implementaron análisis modelos en elementos finitos usando bases de datos de modelos empíricos para estudiar el daño por erosión. A continuación se describen estos modelos brevemente:

Modelo de Purdue (Van Wijk el al, 1989)

Este modelo, llamado PMARP, parte del hecho de que el fenómeno de bombeo se presenta en las juntas de las placas, en la interacción con el material granular. Además, se sustenta con un modelo de criterio de deflexión por energía propuesto por Larralde en 1984 y Witczak en 1975, descrito por la ecuación 11:

$$DE = \sum_{l=1}^{n} K_l * A_l * \Delta_l^2 \tag{11}$$

en donde,

DE: energía de deformación impuesta por una carga simple (lb*pulg) *n*: número de nodos con deflexión excedida a 0.02 pulg K_i : módulo de la subbase en cada nodo (lb/pulg³) A_i : área asociada a cada nodo (pulg²) Δ i: deflexión en cada nodo (pulg)

Teniendo en cuenta esta energía de deformación, además de algunos valores experimentales obtenidos del ensayo AASHO Road Test, los autores generaron una ecuación que describe un índice de bombeo normalizado. Esta expresión fue obtenida a través de regresiones cuyo coeficiente de correlación R^2 fue menor a 0.78.

$$NPI = \exp\left(1.652 \log\left(\frac{DE * ESAL}{10.000}\right) - 2.884\right)$$
(12)

en donde,

NPI: índice de bombeo Normalizado *ESAL*: equivalencia de tráfico acumulada en Ejes Estándar de 82kN *DE*: energía de deformación impuesta por una carga simple (lb.pulg)

De esta manera, se puede determinar el volumen de erosión eyectado en función de NPI (Ecuación 13):

$$V = NPI * L * N \tag{13}$$

donde,

L: largo de una placa de concreto.



N: número de nodos transversales cada 100 ft de pavimento. *V*: volumen de erosión eyectado en $pulg^3$.

Este modelo presentaba limitaciones en cuanto a que el volumen de material expulsado no consideraba la redistribución de partículas en la subbase granular, las condiciones de fractura no eran consideradas y estaba limitado por las condiciones iniciales del condado de Illinois donde se realizó este experimento de escala real.

Por esta razón, Van Wijk et al. (1989) realizaron ajustes al modelo apoyándose en modelación con elementos finitos. El modelo ajustado se puede describir por medio de las siguientes ecuaciones:

$$NPI = F * \exp\left(1.652 \log\left(\frac{DE * ESAL}{10.000}\right) - 2.884\right)$$
(14)

$$\log DE = 3.5754 - 0.3323D \tag{15}$$

$$P = 36.67NPI \tag{16}$$

$$nP = \frac{p}{V_{void}} \tag{17}$$

$$PU = P + (1 * nP) \tag{18}$$

en donde,

D: espesor de la placa de concreto en pulgadas.

P: volumen de material bombeado (in^3) .

nP: número de nodos con fenómeno de bombeo por cada milla de pavimento.

 V_{void} : promedio de volumen de vacíos por cada nodo (Pulg³).

PU: volumen de material necesario (pies/mi)

F: factor de ajuste $F=F_{JPCP}$ para losas no reforzadas y $F=F_{JRCP}$ para losas reforzadas. Este factor se calcula de acuerdo a condiciones de base, subbase, drenaje, transferencia de carga y clima.

Modelo de Iowa (Bhatti et al, 1996).

Este modelo (IAPUMP) tiene en cuenta cuatro (4) consideraciones adicionales en comparación con el modelo de PMARP:

• El factor ESAL correspondiente al acumulado de ejes estándar de 82 KN fue cambiado por el número total de pases de cualquier tipo de vehículo, evitando así extrapolaciones de equivalencias AASHO.



• Se introdujo un parámetro correspondiente a fuerza de bombeo en vez de *energía por bombeo*. Éste se describe por medio de la siguiente ecuación :

$$PF = \sum_{l=1}^{n} K_l * W_l * \Delta_l^2 \tag{19}$$

en donde,

PF: fuerza de bombeo debida a una sola aplicación (lb) *n*: número de nodos distribuidos en la zona de referencia influenciada por bombeo. K_i : módulo de la subbase en cada nodo (lb/pulg³) W_i : espesor asociado a cada nodo (pulg²) Δi : deflexión en cada nodo (pulg).

Teniendo en cuenta esto, el modelo de IAPUMP propone:

$$NPI = \exp\left(1.65 \log\left(\frac{\sum ESAL*PF}{10.000}\right) - 2.884\right)$$
(20)

• Se implementó la consideración de vacíos en la zona de fluencia para encontrar el volumen erosionado:

$$V_i = \frac{DE_i}{DE_i} V \tag{21}$$

donde,

 V_i : volumen de material de la subbase bombeado desde el elemento "i" (pulg³).

 DE_i : contribución del elemento "i" a la energía total de deformación de la zona de bombeo "j" (lb.in)

 DE_j : energía total de deformación en la zona de bombeo "j" (lb.in). *V*: volumen Total de material bombeado (pulg³).

• Se incluyó un análisis con elementos finitos para predecir daño en el pavimento, teniendo en cuenta daño en la losa por fatiga o agrietamiento.

El resultado final de este modelo resultó ser un 15% más preciso que el PMARP.

Modelo de erosión por fricción – Texas A&M University (Jung et al, 2012)

Éste consiste en un modelo Empírico-Mecanicista desarrollado en la Universidad de Texas A&M, basado en distintos ensayos encaminados a determinar el comportamiento a la erosión de distintos tipos de subbase. En este trabajo se llegó a la conclusión de que los



esfuerzos cortantes responsables del fenómeno de erosión se desarrollan por el movimiento de la losa. Se incluyeron además factores determinantes como la carga del vehículo, su velocidad, la transferencia de carga entre placas, el número de aplicaciones de carga y el clima. El modelo es descrito por la siguiente ecuación:

$$F_i = F_0 * e^{-\left(\frac{\rho}{N_i - \nu}\right)a} \tag{22}$$

en donde,

F_i: profundidad de erosión (m) *F₀*: última profundidad de erosión (m) *N_i*: número de ejes de carga que contribuye a la erosión.
p: factor de calibración basada en el rendimiento local. *v*: factor de calibración que representa el número de cargas para desligar las capas .

a: inverso de la tasa de rendimiento de vacíos.

Modelos Mecánicos (Universidad de los Andes)

Phu & Ray en la década de los 70'se Francia, construyeron un modelo dinámico para evaluar la erosión del material granular en una estructura sometida al paso de un vehículo, teniendo en cuenta diferentes ensayos de cortante rotacional y mesa vibratoria (Phu,1979). Sin embargo, este modelo no presentaba ecuaciones explícitas que permitieran describir la mecánica o hidráulica del proceso.

Recientemente en la Universidad de los Andes, Caicedo (2014), desarrolló un modelo dinámico que parte de los principios propuestos por el método francés. Los principios básicos de este modelo fueron usados en la etapa inicial del presente modelo y serán explicado con mayor detalle en el siguiente numeral.

6.3. Alcance del modelo numérico propuesto

El propósito del modelo que se presenta a continuación es contar con una formulación numérica que acople el comportamiento mecánico e hidráulico del pavimento, de tal forma que se pueda emplear para analizar y predecir el comportamiento de un pavimento rígido sometido a erosión. El modelo propuesto integra los principales factores que determinan los fenómenos de bombeo y permite calcular la velocidad de expulsión del agua bajo un pavimento rígido y su integración con los resultados de los ensayos en mesa vibratoria desarrollados durante la primera fase de este proyecto.

Sin embargo, 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.

Una vez descrito el problema de deflexión dinámica de una losa de concreto se presentan los detalles del acoplamiento hidráulico. Finalmente se presenta la manera de involucrar los resultados de los ensayos de mesa vibratoria en el modelo numérico.

6.4. Descripción del modelo numérico

En esta sección se describen en detalle las ecuaciones de comportamiento que fueron empleadas para formular el modelo numérico, la metodología de discretización de las ecuaciones diferenciales y la estrategia de acoplamiento entre los fenómenos mecánicos e hidráulicos.

6.4.1. Deflexión dinámica de una losa sin presencia de agua

Tal como se describió anteriormente, el cálculo de la velocidad de expulsión de agua depende de la deflexión dinámica que se produzca en la losa ante el paso de los vehículos. Para el cálculo de esta deflexión dinámica se suponen las siguientes hipótesis:

H₁: El pavimento rígido puede modelarse como losas separadas por una junta las cuales están soportadas por un sólido del tipo Westergard (Figura 112).

H2: Puede aparecer una cavidad bajo las losas del pavimento aún en el caso en que no exista erosión; la profundidad de esta cavidad es y_e . La reacción del sólido de Westergard solamente es positiva si la deflexión de la losa, y, es superior a la profundidad de la cavidad $(y>y_e)$, en caso contrario la reacción es cero, tal como se muestra en la Figura 112.

H3: Los dos extremos de la losa están conectados entre ellos, esto representa una condición de periodicidad (Figura 113).

H4: Las juntas entre las losas transfieren momento nulo, el cortante transferido en el contacto es proporcional a la diferencia entre los desplazamientos verticales de la losa (Figura 114).

H5: El problema puede ser considerado como bidimensional.





Figura 112. Representación esquemática del modelo de Westergard con cavidad



Figura 113. Representación esquemática del modelo de periodicidad.



Figura 114. Esquematización de la transferencia de carga entre losas.

La hipótesis H1 es comúnmente utilizada para similar el comportamiento de pavimentos rígidos. La hipótesis H2 se adopta para poder simular el efecto del bombeo y la erosión en



pavimentos rígidos. En efecto, es importante resaltar que el modelo de cavidad bajo las losas también aplica para pavimentos que no hayan sufrido erosión ya que 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). La hipótesis H3 es conveniente para simular la respuesta de estructuras continuas que se convierten en problemas periódicos. La hipótesis H4 representa la transferencia de carga entre los bordes de losas contiguas. Finalmente, la hipótesis H5 se adopta como una primera aproximación de un modelo tridimensional más complejo.

La carga sobre las losas se puede aplicar de dos maneras: (1) una carga rodante, la cual corresponde a una situación próxima a la de campo, o (2) una carga fija aplicada en un punto la cual puede representar una condición de laboratorio, Figura 115.



Figura 115. Esquematización del sistema de carga mediante una carga rodante o una carga fija.

De acuerdo con la hipótesis H1, el modelo de carga y reacción en las losas se puede describir mediante una ecuación diferencial de la siguiente forma:

$$EI\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + m\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + c\frac{\partial y}{\partial t} + f_1(y - y_e)k(y - y_e) = q\delta(|x - vt|| \le a/2) + w_s - p_w \qquad \text{Carga rodante}$$
(23)


ó

$$EI\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + m\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + c\frac{\partial y}{\partial t} + f_1(y - y_e)k(y - y_e) = qF(t) + w_s - p_w$$
 Carga fija (24)

en donde,

m: masa por unidad de longitud de la placa de concreto. *c*: coeficiente de amortiguamiento de la estructura. *k*: módulo de reacción de la subrasante. *q*: esfuerzo aplicado por el eje. δ : delta de Kronecker : 1 si |x-vt| <a/2 $f_1(y-y_e)$: función de contacto *x*: coordenada horizontal del eje móvil. *y*: deflexión de la placa en el tiempo t y coordenada x. *v*: velocidad del eje. *t*: tiempo. *E*: módulo de Young del concreto. *I*: momento de inercia de la placa de concreto. *w_s*: peso de la losa *p_w*: presión del agua

La función de contacto $f_1(y-y_e)$ se adopta con el fin de evitar inestabilidades en la solución numérica del problema. Esta función tiene los siguientes valores, Figura 116:

$$f_{1}(y - y_{e}) = 1 \qquad \text{si } y - y_{e} < 0 \qquad (25)$$

$$f_{1}(y - y_{e}) = \frac{1}{\delta_{c}}(y - y_{e}) \qquad \text{si } 0 < y - y_{e} < \delta_{c} \qquad (26)$$

$$f_{1}(y - y_{e}) = 0 \qquad \text{si } y - y_{e} > \delta_{c} \qquad (27)$$

en donde,

 $\delta_c\!\!:$ es una distancia suficientemente pequeña para la cual la reacción de la base comienza a activarse.



Figura 116. Función de contacto.



La ecuación fundamental de comportamiento se puede linearizar utilizando el método de las diferencias finitas usando una aproximación explícita. Para este propósito el espacio representado por la longitud de la losa se divide en tramos de longitud igual a Δx , obteniendo la siguiente ecuación:

$$EI\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} \approx \frac{EI}{\Delta x^4} [y_{i+2} - 4y_{i+1} + 6y_i - 4y_{i-1} + y_{i-2}]^{t+\Delta t}$$
(28)

Del mismo modo, el tiempo se puede linearizar en intervalos Δt de la manera siguiente:

$$m\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \approx \frac{m}{\Delta t^2} \left[y_i^{t+\Delta t} - 2y_i^t + y_i^{t-\Delta t} \right]$$
(29)

$$c \frac{\partial y}{\partial t} \approx \frac{c}{\Delta t} \left[y_i^{t+\Delta t} - y_i^t \right]$$
(30)

Las ecuaciones de continuidad en la junta, descritas en la hipótesis H4, se pueden plantear en forma de ecuaciones diferenciales de la siguiente manera:

$$EI\frac{\partial y^2}{\partial z^2}\Big|_J = 0 \tag{31}$$

$$EI\frac{\partial y^3}{\partial z^3}\Big|_J = K_J \Delta y_J \tag{32}$$

donde,

 K_J : es la rigidez al corte en la junta y, Δ_{yJ} : es la diferencia de desplazamientos entre cada lado de la junta.

Estas ecuaciones de continuidad se pueden linearizar usando el método de las diferencias finitas de la siguiente manera (Figura 114): la junta tiene un lado en cada semi-losa, cada losa se discretiza en n elementos lo cual conduce a tener n+1 nodos. La discretización referente al momento y al esfuerzo cortante requiere la inclusión de nodos virtuales contiguos al final de cada losa. Por lo tanto el número total de nodos es de 2n+3. Las ecuaciones 31 y 32 se discretizan como se muestra a continuación:

$$\begin{bmatrix} y_{n+2} - 2y_{n+1} + y_n \end{bmatrix}^{t+\Delta t} = 0$$
 Momento del lado izquierdo (33)
$$\begin{bmatrix} y_{n+2} - 2y_{n+1} + y_n \end{bmatrix}^{t+\Delta t} = 0$$
 (24)

$$\left[y_{n+5} - 2y_{n+4} + y_{n+3}\right]^{t+\Delta t} = 0 \qquad \text{Momento del lado derecho}$$
(34)

$$\frac{EI}{\Delta x^{3}} [y_{n+2} - 3y_{n+1} + 3y_{n} - y_{n-1}]^{t+\Delta t} = -K_{J} (y_{n+4} - y_{n+1})^{t+\Delta t}$$
 Cortante del lado izquierdo (35)

$$\frac{EI}{\Delta x^{3}} [y_{n+5} - 3y_{n+4} + 3y_{n+3} - y_{n+2}]^{t+\Delta t} = -K_{J} (y_{n+4} - y_{n+1})^{t+\Delta t} \quad \text{Cortante del lado derecho}$$
(36)

Las ecuaciones 28 a 36 conllevan a la siguiente ecuación matricial para la solución de la deflexión dinámica en una losa de pavimento rígido con presencia de una cavidad:

$$[y]^{t+\Delta t} = \frac{\Delta x^4}{EI} [F_D]^{-1} \left\{ q[\delta] + [w_s] - [p_w]^{t-\Delta t} + \left(\frac{2m}{\Delta t^2} + \frac{c}{\Delta t}\right) [y]^t - \frac{m}{\Delta t^2} [y]^{t-\Delta t} \right\}$$
Carga rodante (37)
ó

$$\left[y\right]^{t+\Delta t} = \frac{\Delta x^4}{EI} \left[F_D\right]^{-1} \left\{q\left[F(t)\right] + \left[w_s\right] - \left[p_w\right]^{t-\Delta t} + \left(\frac{2m}{\Delta t^2} + \frac{c}{\Delta t}\right)\left[y\right]^t - \frac{m}{\Delta t^2}\left[y\right]^{t-\Delta t}\right\}$$
Carga fija (38)

Los componentes de la matriz de flexibilidad dinámica $[F_D]$, y los vectores $[\delta]$, $[y]^t$, y $[y]^{t-\Delta t}$ incluidos en las ecuaciones 39-41 se obtienen con base en las linearizaciones realizadas. Estas matrices son las siguientes:

[- 6+A1	-4	1								1	-4]
	-4	6+A ₂	-4	1								1	
	1	-4	6+A ₃	-4	1								
				1	-2	1							
			-1	3	$-3-K_{J}'$	1	0	K_J					(39)
$\begin{bmatrix} F \end{bmatrix}_{-}$					K_J	0	-1	$3+K_J'$					
							1	-2	1				
								1	-4	$6 + A_{2n+1}$	-4	1	
	1								1	-4	6+A _{2n+2}	-4	
	-4	1								1	-4	$6 + A_{2n+3}$	
	_]

$$\begin{bmatrix} y_{1}^{*} \uparrow^{+\Delta t} = \begin{bmatrix} y_{1} \\ y_{$$

Respecto al vector de carga se pueden tener dos posibilidades, como ya se mencionó: carga rodante o carga fija. En este segundo caso la función de carga debe aplicarse en el nodo cargado:

Los valores de las constantes A y K_J son los siguientes:

Universidad de los Andes

$$A_{i} = \frac{\Delta x^{4}}{EI} \left(\frac{m_{i}}{\Delta t^{2}} + \frac{c_{i}}{\Delta t} + f_{1}(y - y_{e})K_{i} \right), \tag{42}$$

$$K_{J}' = K_{J} \frac{\Delta x^{3}}{EI}$$
(43)



6.4.2. Consideraciones para el acoplamiento de las formulaciones mecánica e hidráulica

Para acoplar las formulaciones mecánica e hidráulica es necesario establecer una tasa de flujo del agua presente entre la losa y la base. Teniendo en cuenta que el modelo se desarrolla por diferencias finitas, y que por ende el espacio longitudinal está discretizado en nodos, se puede calcular el caudal en cada punto como:

$$Q_i = Q_{i-1} + \Delta x. \frac{\Delta z_i}{\Delta t} \tag{44}$$

donde $\Delta_{Zi}/\Delta t$ es la velocidad de deflexión de la placa en ese punto. Para entender con mayor facilidad el proceso de cálculo del caudal se puede observar en la Figura 117.



Figura 117. Caudal resultante del movimiento de la placa por causa de una aplicación de carga.

6.4.3. Modelo Hidráulico

El acoplamiento del efecto que tiene el agua es esencial para la descripción completa del fenómeno de erosión. Para el caso de este modelo, se usó una aproximación al flujo de agua en discos planos paralelos estudiada por Armengol et al. (2008). Según este estudio, los cambios de presión en un ducto entre planos paralelos puede ser descrita como:

$$\Delta p = \frac{12L\eta Q}{WH^3} \tag{45}$$

en donde,

L: longitud del flujo *Q*: caudal η: viscosidad dinámica del fluido.



W: ancho del ducto H: altura del flujo

Además, debe cumplirse la relación H << W. Teniendo en cuenta la naturaleza del fenómeno y el modelo planteado, este supuesto se cumple dado que el ancho de la placa es mucho mayor que el espesor de la cavidad de erosión.

Para el caso del modelo, este cambio de presión corresponde a la diferencia entre las presión p_i y p_{i+1} , siendo 'i' el número de nodo y ΔX la longitud 'L' de la ecuación usada. Es decir que por medio de la presión calculada en el primer punto, se calcula la del segundo, y así consecutivamente. Es importante mencionar que se emplea un proceso iterativo, dado que el desplazamiento de la placa en un determinado espacio de tiempo depende de la presión de agua bajo ella, presión que a su vez, como se mencionó anteriormente, depende de la altura del flujo que es función del desplazamiento en este mismo espacio temporal.

Por ende, dentro del modelo se determinan diferentes matrices relacionadas con la presión, las cuales se describen a continuación:

Matriz de presión por nodo

La matriz de presión por nodo calcula de forma individual parte de la expresión usada para el cálculo de la presión en cada uno de los nodos ubicados dentro de la longitud de erosión '*le*' y en los cuales no hay contacto entre la base y la placa, es decir, donde existen cavidades a pesar de la deflexión de la placa.

La expresión calculada en esta matriz, a la cual se designó como 'G' por motivos netamente explicativos, es:

$$G = \frac{12 \, (\Delta x)^2 \, \eta}{H_i^3} \tag{46}$$

Teniendo en cuenta lo anterior se pueden realizar dos aclaraciones importantes: (1) la parte restante de la ecuación de presión corresponde a $\Delta z/\Delta t$, o velocidad de deflexión de la placa, valor que será calculado iterativamente; y (2) la matriz no acumula la presión del nodo anterior sino que calcula cada presión como si fuera un sistema de ducto entre planos 'individual'. Sin embargo, para efectos del cálculo de acumulación de presión a través de los nodos en pasos posteriores, se calcula este mismo valor y se ubica en la misma fila cierto número de veces, relacionado con la distancia al nodo en la junta.

Por otra parte, es relevante mencionar que se tiene como suposición inicial que la presión en el nodo correspondiente a la junta es cero. La matriz de presión por nodo se muestra en la ecuación 47.



	-											
[P]=		 	$\ldots G_{n-3}$	Gn-3	Gn-3	 				 		
		 		G_{n-2}	G_{n-2}	 				 		
		 			G_{n-1}	 				 		
		 			0	 				 		(47)
		 				 				 		(47)
L ⁻ n]		 				 				 		
		 				 	0			 	ļ	
		 				 	$G_{2n+1} \\$			 		
		 				 	$G_{2n+2} \\$	$G_{2n+2} \\$		 		
		 				 	$G_{2n+3} \\$	$G_{2n+3} \\$	$G_{2n+3} \\$	 		
	L	 				 				 		

Matriz de acumulación de presión

La matriz de acumulación de presión tiene una estructura triangular superior (en la primera placa) y triangular inferior (en la segunda placa) y tiene como objetivo acumular las presiones a través del todos los nodos ubicados dentro de la cavidad de erosión (Ecuación 49).

Vector de presión final

El vector que describe la presión final en cada uno de los nodos será calculado como:

$$[P_F] = [P_n][P_{acum}][DYDT]$$
(48)

siendo,

 $[P_n]$: matriz de presión por nodo. $[P_{acum}]$: matriz de acumulación de presión. [DYDT]: vector resultado del análisis mecánico que describe la diferencia de posición vertical de la placa en cada nodo para los tiempos "t" y "t+ Δ t", dividido en el delta de tiempo usado para su cálculo (Ecuación 50).



	1	1	1	1	1	 						7	
[P]_		1	1	1	1	 							
			1	1	1	 							
				1	1	 							
					1	 							(40)
						 							(49)
						 	1						
						 	1	1					
						 	1	1	1				
						 	1	1	1	1			
						 	1	1	1	1	1		

$$\left(\frac{dy}{dt}\right)_{i} = \frac{\left(y_{i}^{t+dt} - y_{i}^{t}\right)}{dt} \qquad \begin{bmatrix} DYDT \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{dy}{dt_{i+1}} \\ \vdots \\ \frac{dy}{dt_{n}} \\ \vdots \\ \frac{dy}{dt_{n}} \\ \vdots \\ \frac{dy}{dt_{2n}} \\ \vdots \\ \frac{dy}{dt_{2n+n}} \end{bmatrix}$$
(50)

El valor de presión de cada una de las filas en el vector (nodo) es el usado en el cálculo mecánico para la deflexión de la placa.

6.4.4. Proceso de erosión del material de base en el modelo

Teniendo en cuenta los datos recopilados durante la Fase I de este proyecto, en el cual se evaluó el desempeño frente a la erosión de distintos materiales de base de pavimentos rígidos, el equipo de trabajo organizó y parametrizó todos los datos con el fin de acoplar al modelo a computador la velocidad de erosión de distintos materiales (i.e., curva de deterioro del sistema).

Recapitulando, los materiales evaluados durante esta fase corresponden a diferentes diseños de material granular estabilizado con cemento, material granular estabilizado con emulsión y cemento, y mezcla asfáltica (Tabla 16).

Material	Mezcla	No. Diseño	Criterio diseño	Resultado	
Granular	GEC_B- Gr2	1	Resistencia compresión: 2.75 MPa	6.1% de cemento	
estabilizado con	GEC_B- Gr2	2	Resistencia compresión: 3,30 MPa	7.5% de cemento	
cemento	GEC_B-Gr2	3	Resistencia compresión: 3,8 MPa	8.8% de cemento	
	GEEA_A- Gr1	1		6% emulsión + 0.0% cemento	
estabilizad	GEEA_A- Gr1	2	Máxima resistencia a la	6% emulsión + 0.5% cemento	
emulsión y	GEEA_A- Gr1	3	con 0% de cemento	6% emulsión + 1.0% cemento	
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	

Tabla 16.	Resumen de	materiales	evaluados o	durante	Erosión	Fase I.
			•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••			

De esta manera, se realizaron curvas de erosión en términos de milímetros de material erosionado por ciclo vs. velocidad de agua para cada uno de los diseños evaluados durante la Fase I del proyecto. Las siguientes figuras muestran las curvas realizadas para cada uno de los materiales: GEC, GEE y MD20 en su orden.





Figura 118. mm/ciclo de erosión vs. velocidad agua para el material GEC (los términos 'Diseño 1, 2 o 3' corresponden a los materiales granulares estabilizados con cemento en proporción baja, media y alta, respectivamente).



Figura 119. mm/ciclo de erosión vs. velocidad de agua para GEE (el término 'Diseño 1, 2, 3 o 4' corresponden a los materiales granulares estabilizados con emulsión asfáltica al 6% y cemento en proporción 0%, 0.5%, 1% y 1.5%, respectivamente).





Figura 120. Gráfica de mm/ciclo vs velocidad agua para el material MD20 ('Diseño 1' corresponde a la mezcla convencional y 'Diseño 2' a la mezcla con granulometría modificada al mínimo de finos)

Es importante resaltar que las ecuaciones correspondientes a los ajustes realizados fueron determinadas por medio de Excel en algunos casos, y también por medio del Software 2R Data, programa de análisis de datos.

De esta manera, teniendo en cuenta la velocidad del ciclo calculada por el modelo y el material usado en el mismo, el modelo puede asignar una magnitud de erosión por cada ciclo de carga aplicado.

6.5. Implementación del modelo numérico a computador

Teniendo en cuenta el planteamiento mencionado anteriormente, se desarrolló inicialmente un modelo base que sólo involucró la componente mecánica del fenómeno. Esta implementación se desarrolló en Microsoft Excel con el fin de llevar un registro paso a paso de las diferentes variables y poder detectar errores con mayor facilidad. Una vez se comprobó la coherencia y/o confiabilidad del modelo mecánico, se procedió a acoplar el modelo hidráulico. Posteriormente se realizó el mismo proceso de verificación para el modelo acoplado, en el cual se evaluaron diferentes parámetros:

- Convergencia de los cálculos de presión y deflexión en el proceso iterativo para un periodo de tiempo específico.
- Coherencia de la magnitud y dirección de presión y deflexión en los nodos para un periodo de tiempo específico.
- Consistencia entre los resultados de deflexión y presión evaluados en tiempos consecutivos, de acuerdo a la función de carga (periodo de carga o descarga).



• Estabilidad de los valores encontrados contra cambios en valores de variables de entrada (dentro de los rangos típicos de cada una).

Una vez que se constató el buen funcionamiento del modelo, éste fue programado en el software MATLAB. La Figura 121 muestra el procedimiento llevado a cabo por el programa mediante un diagrama de flujo.

Así mismo, los datos iniciales del modelo desarrollado en Matlab son establecidos a partir de datos típicos y son leídos desde un archivo de entrada de Microsoft Excel cuya estructura se muestra en la Tabla 17:



Tabla 17	. Datos	iniciales	del	modelo.
----------	---------	-----------	-----	---------

MOD	ELO DE DEFLEX	(IÓN DINÁMI	CA 2D
Variable	Magnitud	Unidades	Descripción
δς	3,0,E-04	m	Parametro de la función de contacto
gama	2,4		Densidad del concreto
n	100		número de nudos por losa
E	2,00E+07	КРа	Módulo de Young de la losa
h	0,2	m	Espesor de la losa
Ι	6,67,E-04	m3	Inercia por unidad de ancho
m	0,48	ton/m2	Masa/unidad de área
c	1000	KPa*s/m	Amortiguamiento/unidad de área
q	215	KN/m2	carga externa
Kz	1,00E+05	KN/m3	Coef de reacción Westergard
Т	1	S	Periodo de la señal
L	4	m	Longitud de la losa
Δt	0,2	S	Lapso de tiempo
Δx	0,040	m	Discretización en espacio
$\Delta x^4/EI$	2,00E-10		
Α,	2,10E-05		Constante A
Y _{emax}	1,50E-02	m	Espesor de la cavidad
L _{eros}	1,33E+00		Longitud de la zona con cavidad
а	0,2		Radio de la carga rodante
KJ	1,00E+02	KN/m2	Coeficiente de transferencia de carga
g	9,80E+00	m/s2	Gravedad
V	1,01E-06	m2/s	viscosidad cinematica del agua
ρ	1,00E+03	kg/m3	densidad agua
3 3	5,00E-05	m	rugosidad abosluta concreto
G	1,9727E-08		Coeficiente para el calculo de presión
тс	1		Tipo de carga. (1)Estática(2)Dinámica
DJ	0,3	m	Distancia junta-carga (Estáica)
VEL	40	km/h	Velocidad de carga (Dinámica)
nplacas	4		Número de placas en el modelo
no de ciclos	1		Número de ciclos a evaluar





Figura 121. Diagrama de flujo del modelo numérico.



6.6. Simulaciones numéricas

6.6.1. Calibración de la variable del modelo 'delta (intervalo) de tiempo'

Como parte del desarrollo del modelo, se realizó un análisis de sensibilidad con respecto a algunas variables iniciales que pueden tener efecto en el desplazamiento máximo de la junta de la placa cargada y de la placa vecina, y en la velocidad y presión del agua bajo las mismas.

Sin embargo, fue necesario primero realizar una calibración de la variable intervalo de tiempo (Δt), para asegurar que la precisión de los resultados no dependiera del tamaño de la misma, principalmente para variables directamente relacionadas con la erosión, tales como el desplazamiento vertical y velocidad de agua.

La Figura 122 muestra las gráficas de desplazamiento máximo en la placa cargada en cercanías a la junta y la velocidad de agua versus el intervalo de tiempo usado en el análisis estático para distintos espesores de cavidad de erosión (de 2 a 30 mm). Se puede observar que el resultado de desplazamiento se estabiliza para valores de delta o intervalos de tiempo mayores a 0.05 s. Sin embargo, es posible también notar que en el caso de la variable velocidad de agua este intervalo de tiempo es insuficiente para la estabilización del resultado (ver líneas de y=2 o 10 mm). Por esta razón, se usó para todos los análisis de Caso Estático un delta o intervalo de tiempo igual a 0,1 s.



Figura 122. Calibración delta de tiempo para el caso estático sobre los parámetros a) desplazamiento en placa cargada para diferentes valores de espesor de la cavidad (*Ye*), y b) velocidad de agua para diferentes valores de espesor de la cavidad (*Ye*).



Por otro lado, la Figura 123 muestra las gráficas de desplazamiento máximo en la placa cargada en cercanías a la junta de la velocidad de agua versus el intervalo de tiempo usado en el análisis dinámico para distintas velocidades del vehículo (de 20 a 80 km/h). En este caso, el resultado de velocidad de agua se estabiliza para valores más pequeños de delta de tiempo (aproximadamente 0.05 s). Sin embargo, la variable desplazamiento no se estabiliza para valores menores a 0.2 s. Por esta razón, se usó para todos los análisis de Caso Dinámico un delta de tiempo igual a 0.2 s.



Figura 123. Calibración delta de tiempo para el Caso Dinámico (valores de velocidad, vel, en km/h) sobre los parámetros a) desplazamiento en placa cargada y b) velocidad de agua.

6.6.2. Análisis de sensibilidad de las principales variables en el fenómeno de erosión con respecto al desplazamiento de la placa de concreto

Posterior a la calibración del intervalo de tiempo a usar en el modelo, se realizó un análisis de sensibilidad de distintas variables que tienen una gran influencia sobre el fenómeno de erosión: el espesor de la placa de concreto (E), el tamaño de la cavidad de erosión (que da una idea de la etapa de avance de la erosión, Y_e), la carga que transita sobre la estructura (q) y la velocidad de dicha carga en el caso dinámico. Así mismo, en cada simulación realizada se calculó la deformación máxima en la placa cargada y en la placa vecina, las presiones máximas (positivas y negativas) y la velocidad del agua. A continuación se describen las simulaciones realizadas, algunos resultados típicos y resultados consolidados de todas las simulaciones para los casos estático y dinámico, de forma individual.

Caso Estático

Con respecto al *caso estático* (llanta ubicada en la junta sin movimiento), se realizaron 144 simulaciones correspondientes a la evaluación de ocho (8) tamaños de cavidad de erosión

 (Y_e) en cada una de las seis (6) magnitudes de carga, a su vez evaluada cada una en tres (3) espesores de placa distintos (Tabla 18).

Espesor de placa(m)	Magnitud de carga (kPa)	Tamaño de cavidad (mm)
	100	0.2
0.1	150	0.5
		2
0.2	200	5
0.2	250	10
		15
0.3		20
0.5	350	30

Tabla 18. Casos estáticos simulados.

La Figura 124 muestra un resultado típico (correspondiente a una sola simulación) para los desplazamientos verticales a los largo de las placas erosionadas. En este caso, el valor de la cavidad inicial es de 3 mm y los valores de desplazamiento están en metros. Teniendo en cuenta esta figura, se puede verificar la coherencia de los resultados teniendo en cuenta la distribución de los desplazamientos a lo largo de las dos placas, dado que, como es de esperarse, los desplazamientos son mayores para la placa cargada y se concentran alrededor del nodo cargado. La placa "vecina" se desplaza también pero con una menor magnitud.



Figura 124. Deflexión de un sistema de dos losas con cavidad inicial de 3 mm.



Por otro lado, la Figura 125 muestra un resumen de 48 simulaciones realizadas sobre una placa de espesor 0.2 m. En esta figura se puede apreciar la deformación máxima ubicada en la junta de la placa cargada en función tanto de la carga aplicada como de la profundidad de la cavidad de erosión. De esta figura es posible afirmar que la cavidad de erosión deja de ser un factor importante en la deflexión de la placa cuando toma valores superiores a 10 mm, dado que una variación del 200% en la cavidad (de 10 mm a 30 mm) solo causa una diferencia de 7% en el desplazamiento, para el caso de la carga más alta. En contraste con este hecho, la cavidad provoca grandes cambios porcentuales en la deflexión (303% aprox.) cuando pasa de valores pequeños a medios en el rango propuesto (300% de 0.5 a 2 mm). Por otro lado, todas las líneas son crecientes con respecto a la carga, lo cual constituye un resultado esperado.



Figura 125. Resultado típico de una simulación para desplazamiento en placa cargada para diferentes valores de espesor de la cavidad (*Ye*).

Así mismo, la Figura 126 muestra un resumen de los resultados típicos para la velocidad máxima del agua, factor relacionado directamente con el proceso de erosión. En primer lugar, es importante mencionar que, en este caso, las velocidades encontradas varían en un rango de 0.5-1.7 m/s; valores que son coherentes con la literatura relacionada, como los medidos por Hansen et al (1991). Por otro lado, se observa que la velocidad del agua aumenta con la carga y tiene valores máximos para cavidades medias (5-10mm).





Figura 126. Resultado típico de una simulación para velocidad máxima de agua para distintos valores de espesor de la cavidad (*Ye*).

Ahora bien, si se integran los resultados correspondientes a todos los espesores de placa evaluados, es posible analizar la influencia del espesor de la placa de concreto en la deformación, de forma cuantitativa. La Figura 127a relaciona el espesor de la placa con el desplazamiento vertical de la placa cargada para dos cargas diferentes, cuando el espesor de la cavidad de erosión es mínima. En este caso, el desplazamiento aumenta un 44% cuando se varía el espesor de la placa de 0.1 a 0.3 metros, valor que podría considerarse bajo en comparación con el aumento de 376% que provoca este mismo cambio de espesor cuando la cavidad es media-alta: 20 mm (Figura 127b). De esta forma, se puede afirmar que el espesor de la placa juega un papel muy importante en el desplazamiento de la placa cargada cuando la erosión se encuentra en una etapa media y/o avanzada.

De forma análoga, se realizó un análisis para determinar la influencia del tamaño de la cavidad de erosión (etapa de la erosión) a través de todos los valores que toma durante su evolución, dentro de un rango coherente de valores. La Figura 128a muestra como este factor tiene una gran repercusión en el desplazamiento de la placa, si esta es de un espesor pequeño. Además, se puede afirmar que en todos los casos de espesor de placa y carga hay un tamaño de cavidad para la cual el desplazamiento se 'estabiliza'. Para cargas altas y espesores de losa de baja magnitud, cambios de 900% en el tamaño de la cavidad pueden llevar a diferencias de 598% en el desplazamiento de la placa.





Figura 127. Influencia del espesor de la placa en el desplazamiento vertical máximo: a) para una cavidad de espesor pequeño o etapa temprana de erosión (*Ye*=0.2 mm), y b) para una etapa avanzada de los procesos de erosión (*Ye*=20 mm).





Figura 128. Influencia del tamaño de cavidad de erosión en el desplazamiento vertical máximo: a) carga de 250 KN y b) carga de 350 KN.

Finalmente para el caso estático, se evaluó la influencia del espesor de la placa, para diferentes valores de cargas, en la velocidad del agua en la interface entre la parte inferior de la placa y la parte superior de la subbase (Figura 129):





Figura 129. Influencia del espesor de la placa en la velocidad máxima de agua.

Al igual que para los desplazamientos verticales en la losa cargada, en el caso estático la velocidad del agua sufre aumentos significativos en etapas avanzadas de erosión cuando la placa es delgada. Para el análisis realizado, la magnitud de este cambio es de por lo menos 148% entre placas de 0.2 y 0.3 metros de espesor y cavidad de erosión de 20 mm. Este valor es mucho mayor que el encontrado en etapas tempranas (Y_e pequeño), que corresponde al 38%.



Caso Dinámico

Se realizaron 240 simulaciones en las cuales se evaluaron las diferentes combinaciones posibles entre dos (2) espesores de placa, tres (3) magnitudes de carga, cinco (5) velocidades de vehículo y ocho (8) tamaños de cavidad de erosión (Tabla 19). Al igual que para el caso estático, se evaluó la influencia de estas variables tanto en el desplazamiento máximo en la primera placa erosionada (en este caso las dos placas tienen carga en algún momento del ciclo), como en la velocidad de agua máxima en el sistema, tal como se resume en la siguiente tabla.

Espesor de Placa (m)	Magnitudes de Carga (kPa)	Velocidades (km/h)	Tamaños de Cavidad(mm)
	215	20	0.2
0.15		30	2
	300	40	$\frac{5}{10}$
0.25		60	15
	350	80	30

Tabla 19. Casos dinámicos simulados.

En la Figura 130a se muestran los desplazamientos máximos en la junta de la primera¹ placa para diferentes velocidades del vehículo y alturas de cavidad de erosión cuando pasa una carga alta (350 kPa) sobre una losa de 0.15 m de espesor. La gráfica muestra que, principalmente para cavidades mayores a 0.5 mm, velocidades del vehículo entre 20 y 80 km/h causan el mismo nivel de desplazamiento independientemente del tamaño de la cavidad. Por otra parte, este comportamiento se caracteriza por una disminución radical en los desplazamientos de al menos 85% cuando la velocidad aumenta de 20 km/h a 30km/h. También es importante mencionar que para las cavidades muy pequeñas, la velocidad, en todo el rango estudiado, no muestra una influencia importante.

Si se realiza una comparación de este comportamiento con el presentado en la Figura 130b, en donde se muestra el comportamiento para una placa de 0.25 m de espesor sometida a la misma carga, es posible afirmar que es muy parecido en términos generales. La reducción del desplazamiento entre velocidades de 20 a 30 km/h es de 74% para las cavidades más grandes, en donde se ve más la influencia de la velocidad del agua. Sin embargo, es importante resaltar que, como era de esperarse, las magnitudes del desplazamiento vertical en el borde de la losa cargada disminuyen considerablemente dado el espesor de la placa.

¹ Para el caso dinámico, la 'primera placa' corresponde a la segunda estructura del conjunto de cuatro placas. Se denota 'primera' porque la placa No.1 del sistema no se somete a efectos de erosión en el modelo como se mencionó durante las hipótesis mencionadas. De esta manera, la placa No.2 es la primera placa 'erodable' en soportar la carga móvil que se mueve de izquierda a derecha.



La disminución porcentual entre los valores para pavimentos con losas de concreto de 0.15 y de 0.25 m de espesor, es de 47-48% para los espesores entre 2-30mm.



(b)

Figura 130. Influencia del espesor de la placa y la velocidad del vehículo en el desplazamiento máximo de la primera placa para diferentes espesor de la placa de concreto: 1) 0.15 m, y b) 0.25 m.

Los resultados de la velocidad de agua provocada por el proceso simulado dinámicamente se pueden apreciar en la Figura 131a y Figura 131b. En la Figura 131a se puede ver que a diferencia de los desplazamientos verticales, las velocidades de agua son afectadas de manera importante por la cavidad de erosión bajo la placa, sobre todo cuando la velocidad del vehículo es baja: estas velocidades son bajas para el estado más temprano de erosión (i.e., cavidades poco profundas) pero aumentan de forma importante (822%) cuando la



cavidad tiene 0.5 mm de altura. Luego de esto, para cavidades más grandes, comienza a disminuir de nuevo. Esta diferencia disminuye a medida que la velocidad del vehículo aumenta hasta que se torna insignificante cuando la velocidad es de 80 km/h.

Finalmente, comparando los resultados obtenidos para una placa de 0.25 m de espesor, se observa en la Figura 131b que no existen diferencias significativas en el comportamiento ni en las magnitudes de la velocidad de agua. En otras palabras, la velocidad del agua que se genera en la interface entre la placa y la base por el paso del agua parece ser poco sensible a cambios en el espesor de la losa de concreto.



Figura 131. Influencia del espesor de la placa en la velocidad máxima de agua para estructuras con placas de concreto de diferente espesor: 1) 0.15 m, y b) 0.25 m.

(b)

40

Velocidad del vehículo(km/h)

50

60

70

80

Ye^l (mm)

10

 $\frac{5}{20}$

20

30

0.2

30

1,5

1 0,5

0

0



6.6.3. Análisis de sensibilidad de principales variables en el fenómeno con respecto al volumen de material erodado

Posterior al análisis realizado para el desplazamiento de las placas de concreto, se realizó un análisis de sensibilidad enfocado a determinar el efecto de los factores de carga aplicada, frecuencia de aplicación de la carga, espesor de losa y cavidad inicial de erosión en la cantidad de material que se puede perder por erosión.

Sin embargo, se consideró necesario realizar primero un conjunto de simulaciones que demostraran que el modelo era coherente y apropiado para calcular la erodabilidad de diferentes materiales de base. Los resultados de estás simulaciones, así como las realizadas para determinar el efecto de las variables ya mencionadas, se describen en el presente numeral.

Con el fin de proveer un contexto que permita interpretar correctamente las figuras y datos que resultan de las simulaciones realizadas, la Figura 132 ilustra la configuración del sistema de placas que conforma el modelo acoplado mecánico- hidráulico. Tal como se observa en esta figura, el sistema está conformado por cuatro (4) placas de igual longitud (en este caso la longitud individual de cada losa es de 4 metros), lo que configura un sistema de 16 metros lineales en total. La primera y última losa de concreto son usadas como estructuras de transición en el sistema periódico que conforma el modelo (ver Numeral 6.4.1). Por otro lado, las placas 2 y 3 son la placa cargada y vecina, respectivamente. Es importante mencionar que en los análisis posteriores se graficará en su mayoría sólo un rango de este sistema que abarca la zona erodable en las losas carga y vecina (2 y 3, respectivamente), y caracterizado como "rango graficado" en la Figura 132. Este rango abarca aproximadamente 6m-10m en el abscisado mostrado.



Figura 132. Ilustración del sistema de placas que confirman el modelo acoplado y del rango de abscisas del sistema graficadas para ilustrar el proceso de erosión durante las simulaciones realizadas.



Simulaciones con diferentes tipos de material de base

Como se mencionó anteriormente, se realizó un conjunto de simulaciones encaminadas a determinar la consistencia del modelo en cuanto a la erodabilidad de distintos materiales de base, tal como s describe en la Tabla 20. En esta tabla se muestran las magnitudes de las variables que se supusieron constantes, así como los materiales empleados en cada una de las pruebas realizadas. Naturalmente, estos materiales son los mismos estudiados en la Fase I del proyecto (Numeral 6.4.4) y empleados en los ensayos experimentales de erosión descritos en secciones anteriores. Es importante mencionar que este conjunto de simulaciones se efectuó hasta 40,000 ciclos de carga aplicados, lo que implica un tiempo computacional de 5-8 horas por simulación dependiendo del procesador del que se disponga.

Tabla 20. Simulaciones realizadas con el fin de determinar la consistencia del modelo con respecto a los
materiales estudiados.

No. Sim		Variable	Carga (KN/m2)	Frecuencia (Hz)	Espesor Losa(m)	Cavidad inicial(mm)	Material
1	iada		215	1	0.1		GEC B-Gr2 resistencia Baja
2	able estud	Material				2	GEC_B Gr-2 Resistencia Alta
3	Vari						MDC-20 - Gr1

A modo de ejemplo, la Figura 133 muestra un resumen de los datos de erosión a través de la simulación realizada para material granular de base estabilizado con cemento de resistencia baja. Esta figura incluye una curva por cada 8,000 ciclos de carga. Estas curvas ilustran el perfil de la capa de material de base de material granular estabilizado con cemento de resistencia baja, dentro de la zona erodable entre las placas 2 y 3 del sistema. Con respecto a esta figura, es posible observar como el material de base mencionado sufre de proceso de erosión notorios a medida que se aplican los ciclos de carga, comenzando desde una cavidad inicial de 0.002 m hasta llegar a una cavidad con una altura máxima de 0.013 m al finalizar la simulación.





Figura 133. Evolución de la erosión, descrita como el perfil de la capa de base para las placas cargada y vecina, a lo largo de 40,000 ciclos simulados en el modelo. Material granular estabilizado con cemento de resistencia baja.

La Figura 134 muestra la comparación entre la erosión sufrida por los tres materiales evaluados al final de la aplicación de los 40,000 ciclos de carga. Como se puede observar, el material cuya erosión es más evidente corresponde al estabilizado con cemento de resistencia baja. De manera contraria, el material menos afectado corresponde a la mezcla densa en caliente. Estos resultados son acordes con los obtenidos en la primera fase del proyecto y en los ensayos de erosión realizados (ver siguiente capítulo).

Finalmente, la Figura 135 cuantifica las afirmaciones previamente realizadas. En ella se puede observar la magnitud de la erosión en términos de volumen de material perdido por erosión durante el transcurso de los ciclos de carga. El volumen perdido en el caso del material estabilizado con cemento de resistencia baja es 11.6 veces más grande con respecto al material estabilizado de resistencia alta y 162 veces más alto que cuando se compara con la estructura que tiene una base con mezcla densa en caliente.





Figura 134. Comparación de la erosión, descrita como el perfil de la capa de base, el perfil de la capa de base para las placas cargada y vecina, a lo largo de 40,000 ciclos simulados en el modelo. Materiales: granulares estabilizados con cemento de baja y alta resistencia y mezcla densa en caliente.



Figura 135. Volumen de material perdido después de 40,000 ciclos de carga en el modelo para materiales granulares estabilizados con cemento de baja y alta resistencia y mezcla densa en caliente.

Teniendo en cuenta lo anterior, es posible afirmar que el modelo es capaz de reproducir ensayos de erosión de forma coherente con los resultados experimentales tanto de la Fase I



del proyecto como con los encontrados en los ensayos a escala real correspondientes a la Fase II del mismo.

<u>Simulaciones para diferentes condiciones de carga, frecuencia, espesor de losa de</u> <u>concreto y valores de cavidad inicial</u>

Al igual que para las simulaciones realizadas anteriormente para los diferentes tipos de materiales, se realizó un análisis de sensibilidad de las otras variables que pueden tener influencia en el desarrollo de fenómenos de erosión. La mayoría de estas variables son las mismas que se consideraron para los ensayos de erosión a escala real. Estas simulaciones se realizaron hasta 20,000 ciclos de carga aplicada.

La Tabla 21 muestra el conjunto de diez (10) simulaciones realizadas con el fin de estudiar la influencia de cada una de estas variables. El proceso consistió en establecer valores estándar para cada una de las variables y establecer también rangos de variación de cada una de ellas. Así pues, si se quería estudiar la variable 'carga', por ejemplo, todas las demás variables menos ésta tomaban un valor constante y estándar, mientras que la carga se estudió con 3 valores diferentes en un rango de 165 a 265 kN/m² (simulaciones 1 a 3 en la tabla mostrada).

No. Sim		Variable	Carga (KN/m2)	Frecuencia (Hz)	Espesor Losa(m)	Cavidad inicial(mm)	Material
1			215				GEC_B-Gr2
1			215		0.1		resistencia Baja
2		Corgo(VN/m)	165	1		1	GEC_B-Gr2
2		Carga(KIV/III)	105	1	0.1	1	resistencia Baja
3			265				GEC_B-Gr2
3			203				resistencia Baja
1	_	frecuencia(Hz)		1			GEC_B-Gr2
1	adɛ		215	1	0.1		resistencia Baja
6	idi			6		1	GEC_B-Gr2
0	esti			0	0.1	1	resistencia Baja
7	ole			10			GEC_B-Gr2
/	riał			10			resistencia Baja
1	Vai				0.1		GEC_B-Gr2
1					0.1		resistencia Baja
4		Espesor	215	1	0.15	1	GEC_B-Gr2
4		Losa(m)	215	1	0.15	1	resistencia Baja
5					0.2		GEC_B-Gr2
5					0.2		resistencia Baja
8		Cavidad	215	1	0.1	0.2	GEC_B-Gr2
0		inicial(mm)	215	1	0.1	0.2	resistencia Baja

Tabla 21. Simulaciones realizadas con el fin de determinar la consistencia del modelo con respecto a los las variables de carga, frecuencia de carga aplicadas, espesor de losa y cavidad inicial.



No. Sim		Variable	Carga (KN/m2)	Frecuencia (Hz)	Espesor Losa(m)	Cavidad inicial(mm)	Material
0						0.5	GEC_B-Gr2
9						0.5	resistencia Baja
1						1	GEC_B-Gr2
1						1	resistencia Baja
10					2	GEC_B-Gr2	
						2	resistencia Baja

• Efecto de la magnitud de la carga aplicada

La Figura 136 muestra una comparación del tamaño de la cavidad de erosión, ilustrada como el perfil de la capa de base del pavimento en las placas cargada (hasta la abscisa 8 m) y vecina (abscisa 8 m hasta 12 m), a medida que la carga cambia de magnitud. De estos resultados, se observa que a medida que la magnitud de la carga aumenta, la afectación de la capa de base en cuanto a erosión es mayor, como era de esperarse. Así mismo, la Figura 137 muestra cuantitativamente la magnitud de la erosión en términos del número de metros cúbicos expulsados del sistema. Tal como se puede observar, la relación entre la magnitud de la carga y el volumen de material expulsado es proporcional o lineal. En general , un aumento de 30% en la carga implica un aumento de un 10% en el volumen de material expulsado.



Figura 136. Comparación de la erosión, descrita como el perfil de la capa de base, después de 20,000 ciclos de carga para diferentes magnitudes de carga.





Figura 137. Relación entre la carga aplicada al pavimento y el volumen de material expulsado de la capa de base, después de 20,000 ciclos de carga.

• Efecto de la frecuencia de aplicación de carga (velocidad del vehículo)

Por otro lado, en la Figura 138 se puede apreciar una comparación del tamaño de la cavidad de erosión, representado como el perfil topográfico vertical de la capa de base del pavimento en las placas cargada (hasta la abscisa 8 m) y vecina (abscisa 8 m hasta 12 m), para diferentes frecuencias de aplicación de carga. Estos resultados sugieren que un aumento en la magnitud de la frecuencia genera una menor afectación de la capa de base por efectos de erosión. Así mismo, la Figura 139 muestran cuantitativamente la erosión en términos del número de metros cúbicos expulsados del sistema. Tal como se puede observar, la relación entre la magnitud de la frecuencia y el volumen de material expulsado puede ser expresada mediante una ecuación cuadrática. Para el caso particular de las simulaciones realizadas, un aumento de frecuencia de 1 Hz a 10 Hz implicó una disminución de 87% en el volumen de material erodado. Si bien este resultado no es coherente con las conclusiones de la Fase I del proyecto de erosión, en el cual se usó el ensayo de mesa vibratoria para determinar la erodabilidad de ciertos materiales, es importante tener en cuenta que en este caso se está evaluando la variable en un sistema más complejo y más cercano a la realidad. Además, se cree que factores como el espesor de la placa pueden tener una repercusión importante en la evaluación y comportamiento de la frecuencia como factor impulsador del fenómeno de erosión. En otras palabras, es posible que bajo otras condiciones estructurales del pavimento o de la carga aplicada al sistema, esta relación sea diferente o, inclusive, inversa.





Figura 138. Comparación de la erosión, descrita como el perfil de la capa de base, después de 20,000 ciclos de carga, para diferentes magnitudes de frecuencia.



Figura 139. Relación entre la frecuencia de aplicación de carga y el volumen de material expulsado de la capa de base, después de 20,000 ciclos de carga.



• Efecto del espesor de placa de concreto

La Figura 140 presenta una comparación del tamaño de la cavidad de erosión generada en las placas cargada y vecina, en función del espesor de la placa de concreto. De esta figura se puede concluir que mayores espesores de la placa de concreto disminuyen la afectación de la capa de base a procesos de erosión. Esta situación se ilustra en la Figura 141, en donde se muestra dicha erosión en términos del número de metros cúbicos de la capa de base expulsados del sistema. La relación entre el espesor de la placa y el volumen de material expulsado puede ser expresada, nuevamente, mediante una ecuación cuadrática, tal como se aprecia en esta figura. Por lo tanto, un aumento de 0.1 m en el espesor de la placa implica una disminución de al menos 23% del volumen de material expulsado o perdido por erosión en la placa cargada del sistema.



Figura 140. Comparación de la erosión, descrita como el perfil de la capa de base, después de 20,000 ciclos de carga para diferentes espesores de la placa de concreto.





Figura 141. Relación entre el espesor de la placa de concreto y el volumen de material expulsado de la capa de base, después de 20,000 ciclos de carga.

• Efecto del tamaño de la cavidad inicial

Finalmente, se evaluó la influencia del tamaño de la cavidad inicial en el progreso de la erosión. La Figura 142 muestra la cavidad de la erosión, ilustrada como el perfil de la capa de base del pavimento en la placa cargada (hasta la abscisa 8 m) y vecina (abscisa 8 m hasta 12 m), teniendo en cuenta el tamaño de dicha cavidad a través de 20,000 ciclos de carga aplicados. Por otro lado, en la Figura 141 se puede apreciar cuantitativamente dicha erosión en términos del número de metros cúbicos de la capa de base que son expulsados del sistema. La relación entre el tamaño de la cavidad inicial y el volumen de material de base expulsado puede ser expresada mediante una ecuación cuadrática, con un mínimo local cerca de valores medios de cavidad (0.7 a 1.4 mm de cavidad inicial), en donde el volumen de material perdido por erosión es hasta 7% menor. Esto podría sugerir que los momentos críticos durante el proceso de erosión ocurren al inicio, cuando la cavidad es muy pequeña y se generan altas velocidades, y al final, cuando la cavidad es muy grande y genera deflexiones excesivas en la placa.





Figura 142. Comparación de la erosión, descrita como el perfil de la capa de base, después de 20,000 ciclos de carga para diferentes magnitudes de cavidad inicial.



Figura 143. Relación entre el tamaño de cavidad de erosión y el volumen de material expulsado de la capa de base, después de 20,000 ciclos de carga.
7. ENSAYOS DE AUSCULTACIÓN NO-DESTRUCTIVA EN PAVIMENTOS (Etapa 6)

7.1. Medición manual de la deformación permanente de las placas

Como se explicó con anterioridad, después de dar inicio a los ensayos de carga sobre las primeras estructuras se tomó la determinación de realizar mediciones directas o manuales de la deformación permanente en la superficie de cada estructura que ocurría con el paso del tiempo del ensayo. Dado que esta prueba es manual y consiste en examinar la evolución de una característica de la estructura in-situ, se incluyó como parte de las metodologías de auscultación desarrolladas en este proyecto.

La prueba consistió en emplear un calibrador para tomar valores de distancia vertical entre una viga que no se deforma durante el ensayo (i.e., *datum*, el cual correspondió a la viga del sistema de aplicación de carga) y seis (6) puntos de control de las estructuras previamente establecidos a lo ancho de la placa. Tomando en cuenta que el ancho de la placa es de 1.8 metros, los puntos de medición se localizaron de la siguiente manera (Figura 144):



Figura 144. Ubicación de los puntos de control para las mediciones de deformación permanente o plástica.

Las mediciones se realizaron dos veces al día: en la mañana y al principio de la tarde, cuando todos los equipos del sistema de carga se encontraban apagados. En la Tabla 22 se presenta el formato de toma de datos que permitió identificar y analizar la tendencia y comportamiento de las deformaciones verticales a lo ancho de las placas a través de tiempo.



		Placa Altura (mm)					
Fecha	Hora						
		1	2	3	4	5	6

Tabla 22. Formato de toma de datos para deformación permanente de las placas.

El análisis de datos de la deformación consistió en dos actividades principales: 1) analizar la pendiente de la gráfica de la altura medida desde la viga vs ciclos para ver cómo ésta va cambiando a medida que se aplica carga, y 2) analizar la deformación permanente al final del ensayo, es decir al finalizar los 350,000 ciclos. La Figura 145 evidencia un ejemplo de cómo se ven unos resultados típicos de la medición de deformación permanente.



Figura 145. Ejemplo de la gráfica altura medida desde la viga vs. número de ciclos de carga para una estructura con base granular estabilizada con resistencia media.

Para un análisis más sencillo, se normalizaron los valores de medición con respecto al valor del ciclo cero. Es decir, se supuso que al inicio del ensayo de carga la deformación permanente de cada estructura era nula y los valores de desplazamiento adicionales que se midieron a partir de ese momento constituyen la deformación plástica acumulada que sufre la estructura. Finalmente, para la determinación de la pendiente de cada curva se empleó la herramienta de ajuste de Excel. Los resultados obtenidos se describen en detalle en la sección 5.1.

7.2. Principio de la metodología de auscultación dinámica de erosión no-destructiva

Como parte de este proyecto, se propuso una metodología para desarrollar un sistema de auscultación dinámica no-destructiva que, de demostrar proveer información confiable, podría emplearse para identificar procesos de erosión en pavimentos rígidos en servicio. Esta metodología consiste en la aplicación de una carga de impacto predeterminada a una altura específica y en la medición de la respuesta capturada en la superficie del pavimento mediante el empleo de acelerómetros localizados a una distancia específica de la zona de impacto. El principio que rige esta metodología se conoce como Impact-Echo y se describe a continuación.

7.2.1. Técnica Impact-Echo

La técnica utilizada en el proyecto se fundamenta en la tecnología denominada *Impact-Echo*. Esta metodología es "técnica basada en el uso de ondas de esfuerzo (sonido) transitorio para el ensayo no-destructivo." (Sansalone, 1997). Es decir, las ondas generadas dentro de los elementos de concreto a ensayar, que son provocadas por un impacto sobre el material, son utilizadas para determinar imperfecciones y otras características físicas del elemento o sistema, pues éstas reflejan de forma diferente la onda cuando encuentran otros materiales o imperfecciones como, por ejemplo, vacíos o grietas en la muestra o interfaces de materiales en un sistema compuesto por múltiples materiales. Por esta razón, esta técnica ofrece una posibilidad interesante para determinar la presencia de erosión en sistemas de pavimentos rígidos sin la necesidad de demoler o remover material de la estructura.

De acuerdo a Sansalone (1997), las aplicaciones del método Impact-Echo se pueden clasificar bajo tres criterios, dependiendo de su aplicación:

- 1. Detección de aspectos geométricos de una estructura.
- 2. Detección de diversos tipos de imperfecciones en materiales o en estructuras.
- 3. Estudio del comportamiento de calidad de las interfaces entre materiales, como en estructuras multicapas, estructuras reparadas y en estructuras reforzadas o pre-esforzadas.

Esta tecnología surgió principalmente de la necesidad de realizar ensayos y análisis sobre elementos de concreto sin provocar daños en el elemento como tal. Como es bien conocido, la práctica común para llevar a cabo actividades de evaluación de funcionalidad y deterioro en sistemas estructurales de concreto hidráulico consiste en extraer núcleos o muestras adquiridas del elemento que luego eran ensayadas en laboratorio. Sin embargo, a pesar de que los resultados de estos ensayos proveían la información necesaria para caracterizar por completo el elemento, siempre implicaba la afectación del material o elemento, lo que, en algunos casos, podía comprometer su integridad estructural.



Otra dificultad de las prácticas de auscultación destructivas convencionales es que la selección de uno o varios núcleos podría resultar en un espécimen poco representativo del elemento o sistema general, ya que la respuesta de dichos especímenes se puede ver alterada drásticamente si, por ejemplo, existen exceso de vacíos o discontinuidades importantes; características que además se ven afectadas por el tamaño del núcleo. La solución natural a este problema fue ampliar la muestra de núcleos de modo que fuera posible obtener una representación más fiel de las características generales del elemento. No obstante, esta solución contribuía a agravar el primer problema mencionado con anterioridad: la afectación del elemento o sistema a caracterizar.

Esta situación despertó el interés por desarrollar metodologías que permitieran obtener información sobre el elemento de concreto sin causarle daño alguno, es decir, de forma no destructiva. En este sentido, el Ingeniero colombiano experto en ingeniería sísmica, Dr. Alberto Sarria, resalta el avance en las técnicas de auscultación de sistemas de ingeniería de forma no destructiva afirmando que, "la ingeniería moderna emplea los sondeos que son exploraciones no invasivas del terreno logradas mediante diferentes procedimientos (...). La débil perturbación introducida mediante el sondeo o no altera el medio o simplemente produce alteraciones puramente locales que no afectan el conjunto. De allí el término no invasivo o no destructivo que se emplea en la bibliografía internacional." (Sarria, 2004). Adicionalmente, el Ingeniero Sarria describe el principio general en el que se basan dichas técnicas no destructivas: "El objeto de un sondeo es introducir una perturbación muy débil que puede ser eléctrica, electromagnética o mecánica y registrar su propagación dentro del terreno [o elemento de concreto] mediante sensores localizados en lugares estratégicamente seleccionados de tal manera que mediante una inspección visual y analítica de la señal registrada, se pueda extraer propiedades del terreno recorrido por la perturbación. El terreno imprime ciertas particularidades que pueden 'leerse' mediante procedimientos inversos especiales." (Sarria, 2004).

La Figura 146 ilustra el funcionamiento general del método *Impact-Echo* utilizado en pavimentos junto con el método de dispersión de ondas superficiales, tal como lo describe Sarria (2004).





⁽b)

Figura 146. Esquema general del método Impact-Echo y el método de dispersión de ondas (a) "P" y "O" (adaptado de Sarria 2004).

De igual manera, Mary Sansalone, una ingeniera estructural que trabajó en el desarrollo del método de *Impact-Echo*, quien posee además una amplia experiencia en el análisis de sistemas estructurales mediante técnicas de elementos finitos y quien ocupó puestos académicos y administrativos en las Universidad de Cornell y Washington St. Luis, presenta en su trabajo '*Impact-Echo*: The Complete Story', un esquema de las diferentes respuestas que tienen los elementos sólidos cuando se aplica éste método. Este esquema se presenta en la Figura 147.





Figura 147. Respuestas y ecuaciones fundamentales para el método Impact-Echo (Sansalone 1997).

Las lecturas de la respuesta del sistema a analizar con este método y su correspondiente interpretación, se basan en el cambio de frecuencia que tienen las ondas producidas por el impacto generado en el sistema. Este cambio depende del medio por el que se transmiten las ondas el cual, en el caso de este proyecto, consiste en el conjunto de capas que conforman las diferentes estructuras de pavimento de concreto hidráulico a ensayar. Sarria ofrece una explicación resumida de la aplicación del método para el caso de los pavimentos: "Cuando el frente de onda del rayo vertical llega a la superficie de contacto con el primer material granular compactado que hace parte del sistema general de apoyo del pavimento, parte de la energía se refleja y parte se refracta hacia adentro de la base formando un nuevo frente de onda que se propaga con una velocidad diferente a la del pavimento mismo." (Sarria 2004).



Es importante mencionar que este método no sólo permite identificar los espesores y la composición de las diferentes capas que conforman un pavimento, en caso de no conocerlos, sino que también permite detectar fallas e imperfecciones dentro de la estructura, como se mencionó con anterioridad. Esto se debe a que cambios bruscos dentro de los materiales (como fisuras, vacíos, etc.) cambian la forma de propagación de las ondas generadas por el impacto y, de este modo, cuando la reflexión de estas ondas se registra, es posible detectar una anomalía dentro en el material o en el sistema. La Figura 148 ilustra el principio de detección de anomalías.



Figura 148. (a) caso de propagación de la onda en el espesor de una placa que tiene una imperfección, y (b) caso de propagación de la onda entre la superficie y la imperfección (adaptado de Sansalone, 1997).

Con base en la descripción realizada del método de *Impact-Echo*, se puede concluir que éste constituye una alternativa interesante para proponer una metodología de auscultación no destructiva en los sistemas de pavimento rígido a estudiar, ya que de demostrar ser confiable, se podría emplear para la identificación y posterior análisis de los efectos causados por las cargas repetidas de tráfico en el fenómeno de bombeo y erosión de las capas de base de los pavimentos.

7.2.2. Componentes del sistema de auscultación dinámica no-destructiva

El sistema diseñado estuvo compuesto por tres elementos principales: 1) acelerómetros, 2) una base de neopreno de 22 cm de diámetro y 1.25 cm de altura, en donde se aplica una carga de impacto, y 3) una masa metálica o masa de impacto guiada por una varilla que sirve de eje y que permite una caída libre de hasta 35 cm. Es importante resaltar que el rol de la base de neopreno es proteger a la losa de un deterioro no deseado por el impacto que genera la caída de la masa metálica. La Figura 149 muestra un detalle del sistema:





Figura 149. Sistema para la auscultación no destructiva de erosión en pavimentos rígidos.



Universidad de

los Andes

Los elementos del sistema funcionan de la siguiente manera: se deja caer la masa de impacto, la cual posee un peso estandarizado de 10304 g y corresponde al martillo estandarizado del ensayo de Estabilidad y Flujo Marshall, desde una altura definida (35 cm) y se mide la señal de respuesta del acelerómetro como se muestra en la siguiente figura.



Figura 150. Procedimiento de caída masa de impacto.

Debido a que los tres componentes que conforman el sistema son móviles, la configuración espacial de los mismo es sencilla. Así, el impacto se aplica en el centro entre los dos puntos de aplicación de carga cerca a la junta.

Para mayor facilidad en el manejo posterior de los datos obtenidos del ensayo, se enumeraron los tres acelerómetros como: A1, A2 y A3. El acelerómetro A2 corresponde al más cercano a la zona de impacto o golpe, el acelerómetro A3 corresponde al de la esquina y el acelerómetro A1 corresponde al vecino (i.e., ubicado en la placa vecina a la placa donde ocurre el impacto, al frente de acelerómetro A2). Lo anterior se representa de manera gráfica en la Figura 151.





Figura 151. Esquema de ubicación de los acelerómetros.

Con el fin de realizar el proceso ya descrito, cada cierto tiempo de ejecución de los ensayos mecánicos que se realizaron como parte del proyecto (i.e., cada cierta cantidad de número de ciclos), se detuvo el sistema de aplicación de carga para realizar las mediciones del sistema de auscultación. Este procedimiento requirió un tiempo total de aproximadamente 30 minutos por cada placa (es decir, dos horas en un procedimiento de medición de 4 placas). Lo que se espera que ocurra, como se mencionó con anterioridad, es que las señales de respuesta mecánica de la placa en un mismo punto de medición cambien a través del tiempo en función del avance del ensayo si existe daño causado por erosión; es decir, que se observe una diferencia en la respuesta de la estructura debido al cambio que los ciclos de carga han generado en las condiciones de soporte de la losa de concreto (i.e., aparición de cavidad por erosión).

De esta manera, estas diferencias se estudiaron de forma individual (i.e., análisis del cambio de las mediciones de los sensores para diferentes estructuras con semejanzas específicas) y de forma conjunta con los resultados obtenidos de los ensayos mecánicos, para constatar si la metodología era capaz de predecir la existencia y evolución de daño por erosión.

En términos de la implementación y operación de la metodología de auscultación no destructiva propuesta, se diseñó un programa en LabView para capturar la información de respuesta de los acelerómetros ante la aplicación de la masa de impacto. Este software permite obtener el espectro de frecuencias de la respuesta de la placa ante la aplicación de la carga estandarizada. La Figura 152 presentada a continuación muestra un pantallazo del programa de control, el cual corresponde a una de las pruebas preliminares que se efectuaron sobre una de las estructuras iniciales como parte de la puesta a punto del sistema.





Figura 152. Pantalla del programa diseñado para el control del sistema de auscultación.

Después de realizar algunos ensayos y procesar su información, se tomó la decisión de realizar un cambió menor. Este cambió, que se realizó para optimizar el tiempo del ensayo y para evitar imprecisiones en las lecturas de los sensores, consistió en cambiar las bases en donde se colocaban los acelerómetros (mostradas en la parte inferior de la Figura 149), por los soportes que se muestran en la Figura 153. Este cambio se llevó a cabo a partir del mes de Junio del año 2014. La Figura 153 muestra además todos los componentes del montaje previamente descritos.



Figura 153. Montaje definitivo de la metodología auscultación.

7.2.4. Metodología de análisis de resultados para ensayos de auscultación

Una vez generado el impacto, cada acelerómetro recibe una señal, la cual se puede postprocesar para obtener la aceleración y, mediante una doble integración, la señal de desplazamiento. De esta información se obtuvieron las aceleraciones y los desplazamientos máximos de cada señal, los cuales fueron seleccionados como los parámetros para realizar el análisis y la discusión de los resultados. Estos valores fueron analizados a través del tiempo (i.e., número de ciclos) para comprender el comportamiento del sistema y la diferencia entre diferentes estructuras.

Es importante mencionar que sería posible realizar otro tipo de análisis con base en técnicas más avanzadas de post-procesamiento de análisis de señales, con el objetivo de caracterizar la curva completa y no sólo los valores máximos. No obstante, este análisis se consideró fuera del alcance del proyecto debido a la falta de practicidad en su ejecución. En la Figura 154 se evidencia una gráfica típica de los datos de aceleración obtenidos en uno de los ensayos de auscultación. De esta gráfica se obtiene la aceleración máxima del ensayo (i.e., pico máximo de la onda) y, si se desea, se puede calcular también el periodo de la señal en su pico máximo.



Figura 154. Ejemplo datos crudos de aceleración vs tiempo ensayo auscultación.

La Figura 155 muestra además el proceso de obtención de la señal de velocidad y desplazamiento (i.e., primera y segunda integral de la señal de aceleración) a partir de la señal de aceleración mostrada con anterioridad. De esta última gráfica se obtiene el desplazamiento máximo de la estructura (i.e., segundo parámetro de análisis).



Universidad de

los Andes

Figura 155. a) Velocidad vs tiempo (primera integral de la señal de aceleración), y b) desplazamiento vs tiempo (segunda integral de la señal de aceleración).

Una vez la información de la aceleración y desplazamientos máximos estaba disponible, se procedió a comparar cómo cambiaba esta información entre ensayos. Una vez culminada dicha etapa, se procedió a comparar los resultados entre las diferentes las estructuras y el potencial de daño por erosión presente en cada una de ellas. Estos resultados se encuentran descritos en el siguiente capítulo de este informe.

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS (Etapa 7)

El presente capítulo resume los resultados y el análisis de resultados encontrados como parte de las etapas 4 (ensayos de erosión a escala real) y 6 (auscultación dinámica y medición de deformación permanente) del proyecto. En todos los casos, el análisis consistió en realizar un cuidadoso post-procesamiento de los datos experimentales obtenidos, empleando el software y los algoritmos descritos en los capítulos anteriores. Con dichos resultados, se procedió a comparar el impacto individual que tienen las siguientes variables en la respuesta del pavimento:

- 1. Espesor de la losa de concreto,
- 2. Frecuencia de aplicación de carga,
- 3. Resistencia de las capas de base granular estabilizadas con cemento, y
- 4. Tipo de material empleado en la capa de base del pavimento.

Para esto, se seleccionaron estructuras que tuvieran en común todas las condiciones menos la variable a evaluar y se procedió a realizar una discusión cuantitativa de la respuesta comparativa de dichas estructuras.

Este capítulo cuenta con cuatro subsecciones principales. Las primeras tres están dedicadas a analizar los resultados consolidados de, en su orden, los ensayos mecánicos de erosión realizados a escala real, las mediciones manuales de deformación permanente y las mediciones de auscultación dinámica. La última sección, por su parte, compara los resultados obtenidos de los ensayos de carga-erosión a escala real con los de auscultación, con el fin de obtener conclusiones que permitan concluir sobre la validez de la metodología de evaluación no-destructiva propuesta para evaluar erosión en pavimentos en servicio.

8.1. Resultados y análisis de los ensayos mecánicos de erosión a escala real

8.1.1. Consideraciones iniciales sobre la información a analizar

Siguiendo la metodología de análisis descrita con anterioridad, se tomaron en cuenta los datos de deformación medidos a nivel de base por medio del sensor DC3 para las trece (13) estructuras analizadas y, para las estructuras con losa de concreto de espesor de15 cm, se tuvieron en cuenta también los datos de rigidez determinados a partir de las mediciones de carga y desplazamiento registradas por los sensores CP y S2, ubicados a nivel de superficie en la losa de concreto. Esta decisión derivó de un análisis preliminar de la información, que permitió concluir que en aquellas estructuras que tienen un espesor de losa de concreto superior a 15 cm, las mediciones del sensor S2 ubicado en superficie presentan altos niveles de ruido, de forma que los datos de rigidez calculados perdían validez y no se consideraban apropiados para un análisis riguroso. Tomadas en cuenta estas consideraciones, las estructuras para las cuales se consideran válidos los datos del sensor S2 son las siguientes:

1. Estructura 7 (15 cm de base estabilizada con cemento de resistencia media, placa de concreto de 15 cm de espesor y frecuencia de aplicación de carga media).

Universidad de

los Andes

- 2. Estructura 8 (15 cm de base estabilizada con cemento de resistencia alta, placa de concreto de 15 cm de espesor y frecuencia de aplicación de carga media).
- 3. Estructura 9 (5 cm de base granular estabilizada con emulsión asfáltica, placa de concreto de 15 cm de espesor y frecuencia de aplicación de carga media).
- 4. Estructura 10 (5 cm de base con mezcla asfáltica en caliente, placa de concreto de 15 cm de espesor y frecuencia de aplicación de carga media).

Con relación a los datos de deformación a nivel de base (sensor DC3), se observó que éstos presentaron un alta consistencia en la calidad de los datos en la mayoría de las estructuras ensayadas. Sin embargo, en algunos casos se detectaron inconvenientes que conllevaron a que dentro del análisis de las estructuras en conjunto, que se presentará a continuación, no fueran tenidas en cuenta. Las razones que explican que los valores reportados por los sensores DC3 en algunos de los ensayos no se consideraran válidos incluyen las siguientes:

 Los ciclos de histéresis construidos a partir de los datos de carga y deformación medidos por el sensor no presentan un comportamiento regular (i.e., ciclos cerrados en forma similar a un óvalo con bajo nivel de ruido o irregularidades). En estos casos, la incertidumbre asociada con relación a los valores de deformación instantánea obtenidos es muy alta, por lo que se considera que los datos no son válidos para el análisis que se pretende efectuar. En la Figura 156 se presenta un ejemplo de ciclos de histéresis considerados adecuados con base en los datos registrados en el sensor ubicado en la base de una estructura ensayada, mientras en la Figura 157 se presenta un conjunto de ciclos irregulares y con altos niveles de ruido, los cuales no se consideran válidos para ser empleados en los análisis posteriores.





Figura 156. Ejemplo ciclos de histéresis a través de los ciclos de carga aplicados al sistema que se consideran válidos para el sensor DC3– Estructura 2 (losa original).



Figura 157. Ejemplo ciclos de histéresis a través de los ciclos de carga aplicados al sistema que se consideran "no válidos" para el sensor DC3– Estructura 3 (losa original).



2. Los valores de desplazamiento instantáneo obtenidos para los ciclos son extremadamente pequeños en relación con los de estructuras semejantes o comparables, por lo cual se considera que pudo haber existido alguna deficiencia en la lectura del sensor durante el ensayo, de forma que los datos obtenidos pierden validez. En la Tabla 23 se puede observar un ejemplo de los valores de desplazamiento en función de los ciclos de carga, para las estructuras original y réplica de un mismo pavimento. En este caso es posible observar cómo los valores para la estructura original se encuentran considerablemente por debajo de los calculados para la estructura de réplica (más de dos órdenes de magnitud inferiores), al igual que por debajo de datos calculados para una estructura similar, cuyos valores de deformación se pueden observar en la Tabla 24.

Original		Réplica		
Ciclo	Intervalo de desplazamiento (mm)	Ciclo	Intervalo de desplazamiento (mm)	
10,000	0.003	10,000	0.745	
80,000	0.005	20,000	0.815	
120,000	0.005	40,000	0.789	
140,000	0.005	60,000	0.791	
260,000	0.004	100,000	1.109	
290,000	0.007	120,000	0.964	
320,000	0.010			
350,000	0.010			

Tabla 23	. Ejemplo	de intervalos	de despla	zamiento por	ciclo -	Estructura 10.	,
----------	-----------	---------------	-----------	--------------	---------	----------------	---

Tabla 24. Ejemplo de intervalos de desplazamiento por ciclo – Estructura 9.

Original		Réplica			
Ciclo	Intervalo de desplazamiento (mm)	Ciclo	Intervalo de desplazamiento (mm)		
60,000	0.334	10,000	1.227		
80,000	0.450	20,000	1.400		
100,000	0.516	40,000	1.581		
140,000	0.438	60,000	1.642		
170,000	0.533	100,000	1.800		
200,000	0.404	120,000	1.947		
290,000	0.217	170,000	2.247		
320,000	0.167				
350,000	0.232				

3. En algunas de las estructuras ensayadas se presentaron fallas al poco tiempo de iniciados los ensayos. Esta situación generó que se contara con una baja cantidad de datos, lo que dificultó la realización de un análisis comparativo válido entre pavimentos. Este hecho es particularmente notorio en el caso de la Estructura 11, cuyos datos se deformación en función de los ciclos se presentan en la Figura 158. En este caso se puede observar como la estructura denominada 'original', a tan sólo 15,000 ciclos de transcurrido el ensayo, presenta un valor elevado del intervalo de desplazamiento por ciclo de carga, el cual se explica debido a la falla que se presentó en la losa de concreto.



Figura 158. Ejemplo de intervalo de desplazamiento en función del número de ciclos – Estructura 11.

Con base en las consideraciones descritas, se realizó un filtro sobre la validez de los datos obtenidos para el sensor de desplazamiento a nivel de base (DC3) de todas las estructuras. Este análisis permitió identificar que las siguientes estructuras no presentaban datos válidos para realizar comparaciones o cualquier tipo de análisis posterior y, por lo tanto, fueron excluidas del análisis:

- 1. Estructura 3: losa original y losa de réplica
- 2. Estructura 5: losa de réplica

Universidad de

los Andes

- 3. Estructura 7: losa original
- 4. Estructura 9: losa original
- 5. Estructura 10: losa original
- 6. Estructura 11: losa original
- 7. Estructura 12: losa de réplica
- 8. Estructura 13: losa de réplica

8.1.2. Análisis iniciales por agrupaciones generales de estructuras

Teniendo en cuenta lo dicho anteriormente, se procedió a la realización de un primer análisis general para todas las estructuras en conjunto, con el objetivo de identificar tendencias generales en el comportamiento de las mismas.

Así, los resultados correspondientes al desplazamiento instantáneo en función de los ciclos de carga se presentan en la Figura 159. En esta gráfica, cada serie representa una estructura y se emplea el siguiente código para su identificación "EX *Material FY ZZ*" en donde *X* representa el número de la estructura (e.g., E11 se refiere a la Estructura 11), *Material* es el código de los materiales de base (BGA base granular sin estabilizar, GEC base granular estabilizada con cemento de resistencia baja (RB), media (RM) o alta (RA), GEE base granular estabilizada con emulsión asfáltica y MD mezcla densa en caliente), *FY* se refiere a la frecuencia de aplicación de carga donde *Y* puede ser baja (B), media (M) o alta (A) y, finalmente, el número final se refiere al espesor de la losa de concreto en centímetros. Así, por ejemplo, el código "E6 GEC RM FM 25" se refiere a la estructura 6, la cual tiene como capa de base material granular estabilizado con cemento de resistencia de anterial granular estabilizado con cemento de resistencia de anterial granular estabilizado con cemento de resistencia de anterial granular estabilizado con cemento de resistencia media, una losa de concreto de 25 cm de espesor y durante el ensayo fue sometida a una frecuencia de aplicación de carga media.

Con base en los resultados presentados en esta figura se puede concluir que las estructuras con mayores valores de intervalo de desplazamiento instantáneo (i.e., el máximo desplazamiento menos el mínimo desplazamiento reportados durante cada ciclo de carga) o mayor rango de desplazamientos al comparar los datos iniciales y los finales de cada ciclo de carga, corresponden a aquellas cuyo material de base corresponde a granular sin estabilizar (BGA) y al caso con el material estabilizado con emulsión asfáltica (GEE), el cual, pese a no ser susceptible a la erosión, presentó algunos problemas constructivos, los cuales se mencionaron en capítulo previos. Adicionalmente, estructuras con bases granulares estabilizadas con cemento de baja resistencia y la capa de mezcla asfáltica en caliente-que al igual que la de emulsión asfáltica presentó dificultades constructivas y estructurales-se localizan en una zona media de intervalos de desplazamiento. Finalmente, una observación muy importante de esta gráfica es que muchas de las estructuras se encuentran agrupadas en la zona baja del eje Y, en dónde es algo difícil distinguir diferencias entre ellas. Indiscutiblemente, la conclusión principal de esta gráfica es que las estructuras con base granular sin estabilizar, las cuales se conoce por evidencia visual que presentaron altos niveles de erosión, cuentan valores de intervalos de desplazamiento que son de tres (3) a seis (6) veces superiores a los valores reportados para los grupos de estructuras localizados en la parte baja del eje Y mencionados con anterioridad.



Universidad de

los Andes

Figura 159. Intervalo de desplazamiento instantánea en función de los ciclos de carga – análisis general y en conjunto de todas las estructuras en conjunto.

A partir de los datos que se observan en la Figura 159, es posible realizar un análisis para evaluar el impacto de las diferentes variables de control como frecuencia de aplicación de carga, material de base y espesor de losa, de una manera que rápidamente permita identificar el impacto general de estos parámetros en el comportamiento de las estructura ensayadas.

Partiendo de esta idea, la Figura 160, se presentan las agrupaciones de las estructuras clasificadas con respecto a la variable de espesor de la placa de concreto, empleando una gama de color verde (entre más oscuro es el color verde, mayor es el espesor de la losa de concreto). Es importante notar que esta gráfica no toma en consideración las diferencias que existen en el material de base y en la frecuencia de aplicación de carga. En las siguientes secciones de este informe se realizará un análisis más cuidadoso donde se aísla y analiza por separado el impacto de cada variable en estructuras cuyas otras propiedades o características se mantuvieron constantes (e.g., impacto de la frecuencia de aplicación de carga cuando el tipo de material y espesores de las capas se mantuvieron contantes).





Figura 160. Intervalo de desplazamiento instantáneo en función de los ciclos de carga – análisis conjunto por espesor de placa o losa de concreto.

De esta figura se observa que, sin tomar en consideración las diferencias existentes en las estructuras en cuanto a la frecuencia de aplicación de carga y al material empleado en la base, las estructuras que presentaban un espesor de losa de concreto igual a 15 cm tendieron a presentar la mayor variabilidad en su comportamiento y, típicamente, mayores evidencias de procesos de erosión. No obstante, para espesores superiores a 20 cm las diferencias no son tan notorias y, más aun, se observan estructuras con placas de 15 cm que tienden a presentar bajos valores de intervalos de desplazamiento muy similares a las de estructuras con placas de gran espesor, lo que hace suponer que aunque esta variable es relevante, la influencia combinada con otras variables como el tipo de material es igualmente importante. Este es el caso de las curvas correspondientes a las estructuras 7 y 8, que cuentan con espesor de losa de 15 cm pero cuyos valores de intervalos de desplazamiento las ubican cerca a las estructuras 2 y 6, que tienen placas de 25 cm, con las cuales comparten el tipo de material que es empleado en la base de la estructura (granular estabilizado con cemento). De igual manera, se observa que todas las curvas de las



estructuras que presentan material de base correspondiente a granular estabilizado con cemento, con espesores de losa entre los 22 y 28 cm, se localizan en el rango de intervalo de desplazamiento instantáneo por ciclo de carga entre 0.25 y 0.70 mm. Esto puede sugerir que para estructuras con espesores superiores a 22 cm, las cuales representan condiciones estructurales muy favorables, el efecto de la carga aplicada durante el ensayo en la generación de procesos de erosión es casi despreciable o que, en ciertas condiciones de carga, el material empleado en la base es igual o más relevante que el espesor de la losa de concreto.

La Figura 161 presenta las agrupaciones de las estructuras clasificadas con base en la variable de frecuencia de aplicación de carga, empleando una gama de colores azules (frecuencia baja azul claro, frecuencia media azul intermedio y frecuencia alta azul oscuro).



Figura 161. Intervalo de desplazamiento instantáneo en función de los ciclos de carga– análisis conjunto por frecuencia de aplicación de carga.



De estos resultados generales se puede observar que, en la mayoría de los casos, las estructuras sometidas a una frecuencia media de aplicación de carga suelen agruparse en el rango de intervalo de desplazamiento por ciclo de carga entre 0.25 y 0.70 mm. Tan sólo las Estructuras 11, 9 y 10, cuyos materiales de base corresponden a BGA, GEE y MD, respectivamente, presentan un comportamiento considerablemente distinto, el cual es más debido a otras variables que a la frecuencia de aplicación de carga. Así mismo, se observa que la estructura ensayada a un nivel de frecuencia alta (estructura 1, original y réplica) tiende a presentar niveles de intervalo de desplazamiento superiores a los observados para el grupo de estructuras localizados en la zona baja de la gráfica, las cuales corresponden a casos de frecuencia de aplicación de carga sea un factor muy sensible a los procesos de erosión en comparación con las otras variables analizadas, con la posible excepción del caso de frecuencia de aplicación de carga alta que sugiere condiciones más desfavorable para la durabilidad de la estructura.

En la Figura 162, se presentan las agrupaciones generales de las estructuras considerando la variable del tipo de material empleado en la base. Para esto, se emplea una gama de color naranja, donde cada color corresponde a una "familia" de materiales (granular sin estabilizar, granular estabilizado con cemento con cada nivel de resistencia y bases con materiales asfálticos). Nuevamente, vale destacar que este análisis considera los materiales de base para estructuras cuyas otras variables no son comparables, con el objetivo exclusivo de determinar si esta variable tiene una influencia determinante en los procesos de erosión por encima de las otras variables analizadas.

En esta figura se observa que, sin tomar en consideración las diferencias en la frecuencia de aplicación de carga y en el espesor de la losa de concreto, las estructuras cuyo material de base corresponde a material estabilizado con cemento de todas las resistencias suelen agruparse en el rango de intervalos de desplazamiento por ciclo de carga entre 0.25 y 0.70 mm. Tan sólo la Estructura 1, cuya frecuencia de aplicación de carga es alta, presenta un comportamiento distinto, con valores de deformación instantánea entre 0.80 y 1.00 mm, hacia el ciclo 200,000. Por otro lado, y como era de esperarse, los mayores valores del intervalo de desplazamiento instantáneo se presentan para las estructuras cuyo material de base corresponde a material granular sin estabilizar, como es el caso de la Estructura 11 y Estructura 12. De igual forma, las estructuras 9 y 10, cuyos materiales de base corresponden a material granular estabilizado con emulsión asfáltica y a mezcla densa en caliente respectivamente, presentan altos valores de intervalos desplazamiento instantáneo, lo cual se explica por las dificultades constructivas y estructurales discutidas en informes previos.

Finalmente, es posible observar que para una estructura típica con material de base correspondiente a material granular estabilizado con cemento, como la Estructura 2, se tiene un rango de intervalos de desplazamientos de 0.44 mm, el cual contrasta con un rango de 1.12 m observado para una estructura típica con una base de material granular sin estabilizar, como es el caso de la Estructura 11. Esta diferencia, que es de más del 100%



entre los valores de los rangos, da muestra del mayor nivel de deterioro por efecto de la erosión. En otras palabras, es posible concluir que cuando el material de base es altamente erosionable, las diferencias en el comportamiento de las estructuras son notorias. No obstante, cuando el espesor de la capa de base se mantiene constante pero el material es reemplazado por material de mejor resistencia, como el granular estabilizado con cemento en diferentes proporciones, las diferencias en el comportamiento entre éstos pavimentos con respecto al caso de las estructuras con material sin estabilizar son evidentes, pero las diferencias en el comportamiento de los pavimentos cuando el material es cementado y se realizan variaciones en su resistencia o en la frecuencia de aplicación de carga son menos evidentes y significativas entre sí.



Figura 162. Intervalo de desplazamiento instantáneo en función de los ciclos de carga- análisis conjunto por material de base.

Luego de este primer análisis, en el cual se observaron tendencias generales en el comportamiento de las estructuras al tomar en cuenta una única variable de estudio (i.e., espesor de la losa de concreto, frecuencia de aplicación de carga, tipo de material empleado en la capa de base del pavimento) pero se ignoraron las diferencias en las demás



características de las estructuras, el siguiente paso consistió en estudiar el comportamiento de estructuras con características similares que presentan diferencias únicamente en la que es considerada la variable de análisis. A continuación se presentan dichos resultados.

8.1.3. Análisis específico por variable

Variable de análisis: espesor de la placa de concreto

Para estudiar la influencia del espesor de la losa de concreto (i.e., influencia del aporte estructural del pavimento) sobre los valores de intervalos de desplazamiento por ciclos de carga registrados en la parte superior de la capa de base, en función del paso del número de ciclos, se seleccionaron las estructuras que compartían todas las variables de entrada y se diferenciaban en el espesor de su placa de concreto, tal como se resume a continuación:

Tabla 25. Estructuras seleccionadas para el análisis de la influencia del espesor de la losa de concreto en la deformación instantánea de la base de los pavimentos.

Material	Frecuencia	Espesor placa de concreto (cm)	Estructura
Granular ein astabilizer		15	E11
Granulai sin estabilizai	Media	20	E13
Granular estabilizado con		22	E4
cemento de resistencia baja	Baja	28	E5
Granular estabilizado con		25	E6
cemento de resistencia media	Media	15	E7

Las siguientes subsecciones, describen los resultados obtenidos en cada uno de los tres subgrupos listados.

• Base de material granular sin estabilizar con frecuencia de aplicación de carga media

Las estructuras de pavimento 11 y 13 del primer subgrupo de análisis corresponden a pavimentos con material de base granular sin estabilizar. Tal como se observó en el análisis previo, estas estructuras presentaron altos valores de intervalos de desplazamiento por ciclo de carga en relación a las demás estructuras ensayadas. Debe anotarse que al realizar la depuración de datos para el análisis conjunto, algunos datos de estas dos estructuras no fueron considerados. En el caso de la estructura 11, la losa original presentó una falla a los cerca de 25,000 ciclos por lo cual no fue incluida en el análisis, y la estructura de réplica número 13 presentó formas irregulares en sus ciclos de histéresis, por lo que ésta tampoco fue considerada en el análisis. La Figura 163, presenta la evolución de la deformación instantánea en función de los ciclos, así como las curvas lineales que presentaron el mejor ajuste de estos datos.





Figura 163. Intervalo de desplazamiento instantáneo para las estructuras E11 y E13.

Los resultados obtenidos sugieren que las estructuras con mayor espesor de losa presentaron menores valores de intervalos de desplazamiento por ciclo de carga y que la tasa de deformación a través de los ciclos es un poco menor en estos casos, tal como era de esperarse. En el caso de la estructura más robusta, que tenía una losa de 20 cm de espesor, la deformación instantánea en el ciclo 140,000 fue de cerca 0.80 mm, comparada con un valor cercano a 0.35 en el ciclo 20,000, lo que significa una diferencia de más del 130%. En el caso de la estructura menos robusta, de 15 cm de espesor, la diferencia o intervalo de desplazamiento en el ciclo 140,000 fue de cerca de 1.30 mm, comparada con un valor de cerca de 0.40 mm en el ciclo 20,000; es decir, un cambio en dicho valor de casi 225%. Estas grandes diferencias se relacionan de forma indiscutible con el deterioro progresivo por erosión que sufrió la estructura a medida que transcurrió el ensayo mecánico, el cual era evidente durante la ejecución del ensayo (i.e., gran cantidad de material granular expulsado en las juntas durante los procesos de carga y descarga del pavimento y el cual se localizaba en la superficie del pavimento).

Por otro lado, al comparar las pendientes de las líneas de tendencia de ambas estructuras, las cuales pueden ser interpretadas como la tasa de aumento del intervalo de desplazamiento en función de los ciclos de carga, se observa que ésta es mayor para la estructura con el menor espesor de losa de concreto (15 cm), ya que la velocidad de deformación de esta estructura es aproximadamente 75% mayor que la de la estructura que tenía una losa de 20 cm de espesor. Finalmente, estos resultados sugieren que el intervalo de desplazamiento instantáneo reportado en cada ciclo de carga en el nivel de la capa de base, así como la velocidad de este parámetro, es mayor en estructuras de pavimento que cuentan con un menor espesor en la placa de concreto.



• Base estabilizada con cemento de baja resistencia y frecuencia baja

Las estructuras 4 y 5 a considerar en este subgrupo de análisis corresponden a pavimentos con material de base granular estabilizado con cemento de baja resistencia, sometidos a una frecuencia de aplicación de carga baja. Tal como se observó en los análisis previo, estas estructuras presentaron valores de intervalos de desplazamiento por ciclo de carga entre 0.25 y 0.0 mm; es decir, dentro de la agrupación de estructuras cuyo material de base corresponde a granular estabilizado con cemento de diversas resistencias. Se debe anotar que al realizar la depuración de datos para el análisis conjunto, los datos de la losa de réplica de la estructura 5 no fueron considerados debido a que los valores de desplazamiento eran extremadamente pequeños, los cuales, al compararse con valores típicos de estructuras similares, perdían toda validez y sugerían deficiencias en las lecturas del sensor. La Figura 164 muestra la evolución del intervalo de desplazamiento instantáneo en función de los ciclos de carga.



Figura 164. Intervalo de desplazamiento instantáneo para las estructuras E4 y E5.

Los resultados a simple vista sugieren que es inadecuado realizar conclusiones sobre la diferencia o similitud en el comportamiento que presentan ambas estructuras. Esto se debe a que para la estructura original de la estructura 5 no se cuenta con una cantidad representativa de datos que permita evaluar el comportamiento de la misma durante el transcurso de los ciclos. Sin embargo, al observar las losas de la estructura 4, se evidencia la estructura original y de réplica presentan un comportamiento similar entre los ciclos 220,00 y 350,000, en cuanto a la velocidad de deformación. El cambio de deformación entre estos ciclos es de 87% y 130% para la losa original y de réplica respectivamente. No



obstante, no es posible concluir sobre el impacto del espesor de la placa de concreto en los procesos de deterioro de las dos estructuras.

• Base estabilizada con cemento de resistencia media y frecuencia media

Las estructuras 6 y 7 a considerar en este subgrupo de análisis corresponden a pavimentos con material de base granular estabilizado con cemento de resistencia media, que fueron sometidos a una frecuencia de aplicación de carga media. En el análisis general realizado previamente se observó que estas estructuras presentaron valores de intervalos de desplazamiento por ciclo de carga entre 0.25 y 0.50 mm, lo que ubica su comportamiento dentro de la agrupación general de estructuras cuyo material de base corresponde a material granular ligando con cemento. Se debe aclarar que los datos de la losa original de la estructura 7 no fueron tomados en cuenta debido a la forma irregular de los ciclos de histéresis observados durante el ensayo. La Figura 165 muestra la evolución del intervalo



Figura 165. Intervalo de desplazamiento instantáneo para las estructuras E6 y E7

Los resultados a simple vista sugieren que el comportamiento entre ambas estructuras es bastante similar pese a las diferencias de espesor, que en este caso es de 10 cm. Si bien el primer dato de deformación reportado para todas las estructuras es diferente, es posible observar como hacia los 350,000 ciclos, los intervalos de desplazamiento por ciclo de las estructuras convergen a un valor cercano a 0.50 mm.

Estos resultados muestran que el impacto de emplear material estabilizado en las capas de base podría tener una mayor incidencia sobre el comportamiento de las estructuras de pavimento frente a los cambios que pueda presentar el espesor de la losa de concreto. Así,



se observa que la resistencia del material de base parece ser un parámetro relevante en la respuesta y potencial degradación de la estructura del pavimento rígido, pese al protagonismo estructural que recae sobre la losa de concreto.

Variable de análisis: frecuencia de aplicación de carga

A continuación se presenta el análisis de las estructuras ensayadas que compartían el mismo material de la capa de base y el mismo espesor de la losa de concreto, las cuales se agrupan de la siguiente manera:

Tabla 26.	Estructuras seleccionadas para el análisis de la influencia de la frecuencia de aplicación de
	carga en la deformación permanente de los pavimentos.

Material	Espesor placa de concreto (cm)	Frecuencia	Estructura
Granular sin	15	Baja	E12
estabilizar	15	Media	E11
Granular estabilizado con	25	Baja	E3
cemento de resistencia baja	25	Media	E2

Las siguientes subsecciones presentan los resultados obtenidos en cada uno de estos dos grupos.

• Base de material granular sin estabilizar con espesor de placa de 15 cm

Para el caso de las estructuras 11 y 12, las cuales constan de material de base granular sin estabilizar y fueron sometidas a una frecuencia de aplicación de carga media y baja, se cuenta con datos de la losa de réplica y original, respectivamente. Esto se debe a que durante el proceso de depuración de los datos, se detectó que la losa original de la estructura 11 presentó una falla temprana cerca a los 25,000 ciclos, mientras que los datos de la estructura de réplica de la estructura 12 no fueron considerados debido a que la baja confiabilidad de los datos obtenidos por el comportamiento irregular de los ciclos de histéresis reportados por el sensor de desplazamiento. La Figura 166 presenta la evolución del intervalo de desplazamiento por ciclo de carga a través de la ejecución del ensayo de erosión.



Universidad de

los Andes

Figura 166. Intervalo de desplazamiento instantáneo para las estructuras E11 y E12.

Los resultados observados sugieren diferencias notorias en los valores puntuales de intervalos de desplazamiento en función del número de ciclos, encontrando que dicho intervalo de desplazamiento al comenzar el ensayo era de 0.50 mm para la estructura de frecuencia media y de 1.50 mm para la estructura cuya frecuencia de aplicación de carga es baja, es decir, un valor 3 veces mayor. Esto, sin embargo, es un reflejo de las diferencias de la aplicación de carga en la estructura y no se relaciona con la erosión misma de los materiales. Para el ciclo 170,000 se observa que la diferencia entre los intervalos de desplazamiento para las dos estructuras ha disminuido, puesto que los valores de la estructura 12 son tan sólo 50% mayor en relación a los de la estructura 11.

Por otro lado, al comparar las pendientes de las líneas de tendencia de ambas estructuras, las cuales pueden ser interpretadas como la velocidad de aumento en el intervalo de desplazamiento por ciclo de carga y, por lo tanto, con el deterioro de la estructura, se observa que ésta es similar entre ambas estructuras. Dicho comportamiento sugiere que pese a las diferencias en la frecuencia de aplicación de carga, los procesos de degradación que se presentan al interior de las dos (2) estructuras son bastante similares.

En conclusión, se observa que aunque los valores de los intervalos de desplazamiento por ciclo de carga de la estructura sometida a frecuencia de aplicación de carga baja son mayores que en el caso de mayor frecuencia de aplicación de carga, las dos estructuras evolucionan de forma bastante similar durante el transcurso de los ensayos de carga. En otras palabras, no se puede afirmar que la frecuencia de aplicación de carga es un parámetro diferenciador en la susceptibilidad de las estructuras a deteriorarse por efectos erosivos en este tipo de pavimentos. En este caso, parecería que el tipo de material de la capa de base

(granular si estabilizar) es el factor determinante en la degradación de las estructuras, pues las dos (2) se deterioran a la misma velocidad, sin importar que se duplicara la frecuencia empleada para la aplicación de carga.

• Base estabilizada con cemento de baja resistencia y espesor de placa 25 cm

La realización de un análisis comparativo para el caso de este subgrupo de análisis, el cual encierra las estructuras 2 y 3, no es viable, debido a que los datos tanto de la losa original como de la losa de réplica para la estructura 3 fueron excluidos del análisis por su baja calidad.

Variable de análisis: resistencia de las capas de base granular estabilizadas con cemento

Continuando con el análisis de cada una de las variables consideradas, se procedió a determinar la influencia de la resistencia del material granular estabilizado con cemento empleado en capas de base en la evolución de los intervalos de desplazamiento por ciclo de carga reportados en la parte superior de dicha capa. Para esto se seleccionaron los siguientes grupos de estructuras:

Frecuencia	Espesor placa de concreto (cm)	Resistencia	Estructura
Madia		Baja	E2
Media	25	Media	E6
Madia		Media	E7
Ivieula	15	Alta	E8

Tabla 27. Estructuras seleccionadas para el análisis de la influencia de la resistencia de los materiales de base granular estabilizados con cemento en la deformación permanente de los pavimentos.

Las siguientes subsecciones presentan los resultados obtenidos en estos dos grupos.

• Base granular estabilizada con cemento con espesor de placa de 25 cm y frecuencia de aplicación de carga media

Para el caso de las estructuras 2 y 6, sometidas a frecuencia de aplicación de carga media y con espesor de losa de concreto de 25 cm, se cuenta con datos tanto de la losa original como de la losa de réplica. En la Figura 167 se muestra la evolución de los intervalos de desplazamiento instantáneo en función de los ciclos de carga para las cuatro (4) estructuras.





Figura 167. Intervalo de desplazamiento instantáneo para las estructuras E2 y E6.

Los resultados obtenidos sugieren la existencia de diferencias en los valores puntuales de los intervalos de desplazamiento por ciclo de carga entre las estructuras, siendo éstos mayores para la estructura de resistencia baja, tal como era de esperarse (i.e., a mayor resistencia de la capa de base, mayor resistencia general de la estructura de pavimento). De igual forma, se observa que el comportamiento tanto de la losa original como la losa de réplica es bastante similar para una estructura en particular.

Por otra parte, se puede concluir que aunque los datos cerca del final de los ciclos para las losas de réplica presentan una diferencia de 0.20 mm entre sí, los valores de intervalos de desplazamiento para las losas originales tienden a converger, en ambos casos, hacia un valor de aproximadamente 0.45 mm. Esto parece sugerir que no se puede afirmar con certeza sobre el impacto que la resistencia del material sobre el comportamiento de la estructura, ya que no se observan diferencias significativas entre las estructuras. Adicionalmente, en las estructuras de réplica se observa una tendencia similar y casi paralela en la evolución de la respuesta de las estructuras, lo que nuevamente podría indicar un impacto poco significativo de las diferencias en la resistencia de la capa de base estabilizada con cemento en la susceptibilidad de la estructura a procesos erosivos.

• Base granular estabilizada con cemento con espesor de placa de 15 cm y frecuencia de aplicación de carga media

Para el caso de las estructuras 7 y 8, la cuales fueron sometidas a frecuencia de aplicación de carga media y cuentan con un espesor de losa de 15 cm, se cuenta con datos válidos para las estructuras de réplica y original para la estructura 8, mientras que para la estructura 7



fueron descartados los datos de la estructura original debido a la baja confiabilidad de sus datos. En la Figura 168 se observa la evolución de los intervalos de desplazamiento instantáneo en función de los ciclos para las tres (3) estructuras a analizar.



Figura 168. Intervalo de desplazamiento instantáneo para las estructuras E7 y E8.

Al observar los datos, se identifica que los intervalos de desplazamiento instantáneo que sufre la estructura cuyo material de base es de resistencia alta, es mayor en relación a la deformación que presenta la estructura de resistencia media para un ciclo escogido al azar, lo cual parece ser contrario al comportamiento esperado. Sin embargo, también se observa que los datos muestran una especie de convergencia hacia valores de deformación entre 0.40 y 0.50 mm luego del ciclo 250,000 aproximadamente, cuando se comparan los datos de la estructura original número 8 con los de la estructura de réplica número 7. Adicionalmente, al igual que en el caso anterior, las dos estructuras de réplicas presentan una evolución en su respuesta mecánica en función de los ciclos de carga muy similar, lo cual sugiere que la resistencia del material estabilizado con cemento no fue un factor determinante en la evolución de potenciales procesos de daño al interior de las estructuras.

El cambio relativo entre el intervalo de desplazamiento instantáneo al comenzar el ensayo (ciclo 10,000) y el ciclo 250,000 es de aproximadamente 85% para la estructura 7 (estructura de réplica) frente a 35% para la estructura 8 (estructura de réplica). Esta información indica que pese a los valores más altos de la deformación registrada para la estructura 8, los cambios que se generan en ésta a medida que transcurre el ensayo son menores en relación a la estructura 7. Aunque este hecho puede sugerir que el deterioro que ocurre una estructura de menor resistencia durante su vida útil es mayor que aquel sufrido por una estructura cuyo material de base es de mayor resistencia, la evolución general de



estas dos estructuras (i.e., cambio en los valores de intervalo de desplazamiento con el paso del tiempo) es bastante similar entre sí, por lo que no se pueden dar conclusiones definitivas sobre el impacto de esta variable en este subgrupo de estructuras.

Variable de análisis: tipo de material empleado en la capa de base del pavimento

Finalmente, se estudió la influencia que tiene el tipo de material empleado en la conformación de la capa de base en la evolución del intervalo de desplazamiento por ciclo de esta base. Dicha influencia fue analizada con los resultados obtenidos de las estructuras 9 y 10, las cuales comparten el mismo espesor de la losa de concreto (15 cm), la misma frecuencia de aplicación de carga (media) y el mismo espesor de base (5cm) y sólo se diferencian en el material de base empleado. De igual manera, dicho análisis conjunto fue realizado contemplando las estructuras 7, 8 y 11, que comparten las mismas condiciones que el caso anterior, pero que cuentan con un espesor de la capa de base de 15 cm. La Tabla 28 resume los dos subgrupos de estructuras a analizar.

Tabla 28. Estructuras seleccionadas para el análisis de la influencia del tipo de material empleado en	la
base en la deformación permanente de los pavimentos.	

Frecuencia	Espesor placa de concreto (cm)	Material	Estructura
Madia	15	Granular estabilizado con emulsión asfáltica	E9
Media	15	Mezcla asfáltica en caliente	E10
		Granular estabilizado con cemento (resistencia media)	E7
Media	15	Granular estabilizado con cemento (resistencia alta)	E8
		Granular sin estabilizar	E11

Se debe anotar que para el análisis de la influencia del material sobre el comportamiento de las estructuras 7, 8, 9, 10 y 11, también se cuenta con información del sensor S2 (desplazamiento en la superficie de la estructura), por lo cual el cambio en la rigidez general de la estructura también será incluido dentro del análisis. Dichos resultados serán presentados en la última sección de este aparte.

• Estructuras con materiales asfálticos, frecuencia media y placa de concreto de 25 cm

Para el caso de las estructuras 9 y 10, sometidas a una frecuencia de aplicación de carga media, con una losa de concreto de 15 cm y con un espesor de las capas de base de 5 cm, se cuenta con datos de la estructura de réplica para ambos casos. No se cuenta con información de las estructuras originales ya que éstos fueron descartados durante el proceso de depuración de información. En la Figura 169 se muestra la evolución de la deformación instantánea en función de los ciclos para las losas escogidas.





Figura 169. Intervalo de desplazamiento instantáneo para las estructuras E9 y E10.

Los datos muestran que el intervalo de desplazamiento por ciclo que sufre la estructura cuyo material de base corresponde a granular estabilizado con emulsión asfáltica es mayor en relación a los valores que presenta la estructura cuyo material de base corresponde a una mezcla asfáltica en caliente. Esta observación es una consecuencia directa de la capacidad estructural de cada material, puesto que la mezcla en caliente posee una mayor rigidez en comparación con el material estabilizado con emulsión asfáltica. Por otra parte, se observa que hacia el ciclo 10,000 el valor del intervalo de desplazamiento para la estructura 9 corresponde a 1.23 mm y hacia el ciclo 100,000 éste valor es de 1.80 mm, lo que significa un aumento de cerca de 47%. Por otro lado para la estructura 10 en el ciclo 10,000 se tiene un valor de intervalo de desplazamiento deformación de 0.75 mm, contra un valor de cerca de 1.11 mm hacia el ciclo 100,000, lo cual indica una variación de cerca del 49%.

Teniendo esto en mente, es posible afirmar que el cambio que sufren los valores de intervalos de desplazamiento a medida que transcurren los ciclos de carga y descarga es bastante similar entre ambas estructuras, lo que impide hacer una distinción de las diferencias en el empleo de estos dos (2) materiales de capa de base. Sin embargo, los valores puntuales de deformación instantánea para un ciclo dado, son siempre mayores cuando la capa de base corresponde a la de granular estabilizada con emulsión asfáltica. Es de destacar, nuevamente, que el significativo crecimiento en los valores de deformación registrados a nivel de base se consideran consecuencia de factores de compactación y/o



deformación permanente ocurriendo en la capa de base o en la capa de subbase granular, respectivamente, y no a procesos de erosión significativos del material de base. La información obtenida mediante la metodología de auscultación no-destructiva, las dificultades registradas en el proceso constructivo de estas estructuras, la baja resistencia estructural general de estas estructuras (cuya capa de base era de sólo 5 cm) en comparación con las que incluían material granular estabilizado con cemento en la capa de base que tenían 15 cm de espesor, y los análisis que se presentan al final de esta sección correspondientes al sensor S2, justifican plenamente esta afirmación.

• *Estructuras con materiales granulares y estabilizados con cemento, frecuencia media y placa de concreto de 15 cm*

La Figura 170 presenta la evolución de los intervalos de desplazamiento correspondientes a las estructuras 7, 8 y 11, así como las líneas de tendencia que estiman de manera aproximada la tasa de cambio de este valor a través de los ciclos de carga. En este caso sólo se cuenta con datos de la estructuras de réplica para las estructuras 7 y 11, mientras que para la estructura 8 se tienen datos para las dos estructuras (original y réplica) ensayadas.

Los datos de esta figura muestran que la estructura 11, cuyo material de base corresponde a granular sin estabilizar, presenta mayores valores de intervalo de desplazamiento por ciclo de carga y una mayor tasa de cambio en este parámetro a lo largo del tiempo. Por otro lado, al observar los datos de las estructuras 7 y 8, las cuales cuentan con material de base granular estabilizado con cemento de resistencia media y alta, respectivamente, se concluye que las diferencias no son tan significativas entre sí. Estos resultados reafirman la idea de que un material estabilizado adecuadamente presentará siempre un mejor comportamiento que un material sin estabilizar.

Adicionalmente, mientras que el intervalo de desplazamiento hacia el ciclo 10,000 las estructuras no presentan diferencias significativas, hacia el ciclo 170,000 en la estructura 11 se tiene un intervalo de desplazamiento por ciclo de carga de 1.63 mm mientras que para las estructuras 7 y 8 este valor es de 0.34 y 0.47 mm, respectivamente; es decir, cerca de 4 veces mayor.




Figura 170. Intervalo de desplazamiento instantáneo para las estructuras E7, E8 y E11.

En conclusión, los resultados indican que el empleo de capas de base estabilizadas en los casos en los que se espera que la estructura de pavimento se encuentre sometida a condiciones más críticas de carga y frecuencia es un factor determinante en la durabilidad de la misma en relación con el inicio y desarrollo de procesos de erosión.

• Análisis Sensor S2 (desplazamiento a nivel superficial)

Como se mencionó anteriormente, los datos del sensor S2, ubicado en la superficie de la losa de concreto, sólo se consideraron para las estructuras cuyo espesor de placa corresponde a 15 cm. Esto se debe a que se observó que cuando el espesor de la losa era mayor, las mediciones eran de baja confiabilidad debido a la baja magnitud de los datos y, por lo tanto, los valores de rigidez calculados a partir de estos perdían su validez. En la Figura 171 se presentan los valores de rigidez de la estructura en función de los ciclos de carga para las estructuras 7, 8, 9 y 10, las cuales contaban con una losa de concreto de 15 cm y fueron sometidas a una frecuencia media de aplicación de carga.



Universidad de

los Andes

Figura 171. Intervalo de desplazamiento instantáneo para las estructuras E7, E8, E9 y E10.

Al observar los datos en esta figura se corrobora que las estructuras cuyo material de base corresponde a material granular estabilizado con cemento, tienden a presentar mayores valores de rigidez en relación a las estructuras cuyo material de base corresponde a emulsión o base asfáltica; lo cual se debe a las diferencias en los espesores de estas capas (15 cm vs. 5 cm para las capas estabilizadas con cemento y las asfálticas, respectivamente) y a las diferencias que existen entre las rigidices de estos materiales.

De igual forma se observa que, pese a las diferencias de rigidez entre las estructuras durante los primeros 200,000 ciclos de ensayo, hacia el ciclo 250,000—indiferentemente del tipo de material—la rigidez de todas las estructuras converge a valores en el rango de 20 - 40 kN/mm.

Por otro lado, es posible observar que pese a las diferencias de resistencia de los materiales de base estabilizados con cemento de las estructuras 7 y 8, la tasa de caída de la rigidez, tomada como la pendiente de la línea de tendencia de dichas curvas, es bastante similar. Este aspecto significa, nuevamente, que no parece haber diferencias significativas en la evolución causada en el proceso de deterioro de las estructuras por causa de la diferencia del contenido de cemento empleado en la estabilización. De hecho, esto también significa



que no hubo cambios significativos en ninguna de las dos estructuras, por lo que parecería que los fenómenos de erosión se encuentran controlados. Además, y tal vez más importante, es la observación de que la tasa de decrecimiento de la rigidez para estas estructuras es mucho mayor que para las estructuras con material de base correspondiente a granular estabilizado con emulsión asfáltica y base asfáltica en caliente, lo cual sugiere una mayor evolución de procesos de deterioro interno en las estructuras que emplearon material de base estabilizado con cemento en comparación de las estructuras que emplearon material asfáltico. Esta observación sirve de soporte para afirmar que las estructuras construidas con capas de base de materiales asfálticos no desarrollaron procesos erosivos significativos.

8.2. Resultados y análisis de las mediciones de deformación permanente a través de la aplicación de ciclos de carga

Siguiendo la metodología descrita en la sección anterior, se presenta a continuación el análisis de resultados obtenidos con respecto a la deformación permanente acumulada reportada en las diferentes estructuras de pavimento que fueron sometidas al ensayo de erosión bajo la aplicación de carga cíclica. Los valores reportados en esta sección corresponden al *promedio aritmético* de los valores registrados en los seis puntos de medición descritos en el capítulo anterior.

En el análisis que se presenta a continuación, tal como se explicó en la sección mencionada, las mediciones se "ceraron" con respecto al valor inicial medido al comenzar los ensayos; es decir, a todos los datos les fue restado el valor inicial (i.e., la deformación permanente al inicio de cada ensayo para cada estructura fue de cero). De esta manera, el análisis permite tener en cuenta que las alturas iniciales entre las diferentes estructuras no fueron las mismas y permite concentrarse en observar el aumento y la velocidad de aumento de las deformaciones permanentes, durante el estudio de la influencia que tuvieron las diferentes variables (e.g., espesor de la losa de concreto, tipo de material empleado, etc.) en este proceso. Al igual que en el caso anterior, el análisis consistió en determinar las diferencias observadas en estructuras con características similares pero con diferencias en la que es considerada la variable de análisis (e.g., espesor de la losa de concreto, frecuencia de aplicación de carga, resistencia de las capas de base granular estabilizadas con cemento, tipo de material empleado en la capa de base del pavimento).

8.2.1. Variable de análisis: espesor de la placa de concreto

Para estudiar la influencia del espesor de la losa de concreto (i.e., influencia del aporte estructural del pavimento) en la deformación permanente registrada en la parte superior de las estructuras a través del paso del número de ciclos, se seleccionaron estructuras que compartían todas las variables de entrada en común y se diferenciaban en el espesor de su placa de concreto, tal como se resume a continuación:



Material	Frecuencia	Espesor placa de concreto (cm)	Estructura
Granular ein astabilizar	Madia	15	E11
Granulai sin estabilizai	Meura	20	E13
Granular estabilizado con		22	E4
cemento de resistencia baja	Baja	28	E5
Granular estabilizado con		25	E6
cemento de resistencia media	Media	15	E7

 Tabla 29. Estructuras seleccionadas para el análisis de la influencia de la frecuencia de aplicación de carga en la deformación permanente de los pavimentos.

Las siguientes subsecciones, describen los resultados obtenidos en cada uno de los tres subgrupos listados.

Base de material granular sin estabilizar con frecuencia de aplicación de carga media

Debido a que estas fueron las primeras estructuras que se ensayaron, para las losas originales no se cuenta con información de la altura inicial ni de la evolución de la deformación permanente antes de los 164,160 ciclos. Como se explicó en secciones previas de este informe, esto se debió a que el análisis de los resultados de los sensores de deformación instalados en el sistema mostró que éstos no ofrecían información confiable que permitiera extraer dicha información. Por ello, en esta ocasión las estructuras originales solamente se analizaron desde el momento en que se empezaron a realizar las mediciones (momento que se considera el 'inicial'). Naturalmente, para este momento es de esperarse que ya hubiera ocurrido algo de deformación permanente, pero desafortunadamente no hay forma de acceder dicha información. La Figura 172 presenta la evolución de la deformación permanente registrada en las estructuras originales y réplicas 11 y 13 a través de la aplicación de ciclos de carga.

Los resultados sugieren que las estructuras con mayor espesor de losa presentaron menores deformaciones permanentes finales, tal como era de esperarse. En el caso de la estructura más robusta, que tenía una losa de 20 cm de espesor, la deformación final fue 60% y casi 100% inferior al final de la aplicación de ciclos de carga en las estructuras original y réplica, respectivamente, en comparación con la estructura que tenía una losa de sólo 15 cm de espesor. Adicionalmente, se observa que la velocidad a la cual se presentó la deformación permanente fue mayor en las estructuras con losas de menor espesor. Esta observación se verifica al observar las pendientes de las curvas en la Figura 172, en donde se aprecia que en las estructuras con losas de 15 cm, dicha pendiente es 3 veces superior al



caso de las estructuras con losas de 20 cm. Estos resultados indican que la deformación permanente acumulada en superficie que resulta de la acción combinada de la aplicación de carga mecánica y de potenciales procesos de erosión del pavimento es, efectivamente, función de la capacidad estructural del pavimento.



Figura 172. Deformación permanente en estructuras E11 y E13.

Base estabilizada con cemento de baja resistencia y con frecuencia baja

Para las estructuras que hacen parte de este grupo de análisis se cuenta con datos completos (i.e., desde 0 hasta los 350,000 ciclos). La Figura 173 presenta las deformaciones correspondientes a las estructuras E4 y E5 con sus respectivas réplicas, así como las líneas de tendencia que estiman de manera aproximada la tasa de cambio a través de los ciclos de carga.

La primera observación relevante en este caso es la alta dispersión de los datos. Además, esta dispersión genera que las líneas de tendencias sean decrecientes (i.e., sugiriendo que la deformación permanente es menor con el paso del tiempo), lo que podría ser un indicativo de ligeros levantamientos de la losa producidos durante los ensayos. Esta situación se podría deber a la falta de confinamiento en el otro extremo de la placa, lo cual podría generar un fenómeno de escalonamiento, también conocido como asentamiento diferencial. Así mismo, esta situación puede derivar de sutiles movimientos de la altura de la viga de carga durante la ejecución de los ensayos (i.e., cambios muy pequeños en el *datum* del sistema, lo que genera cambios en las mediciones de la distancia libre entre la viga y la superficie de pavimento).





Figura 173. Deformación permanente en estructuras E4 y E5.

No obstante, y a pesar de la tendencia negativa, de esta gráfica se puede concluir lo siguiente: 1) los datos individuales de cada estructura y entre estructuras presentan una alta dispersión, lo que dificulta el análisis de la información, 2) dicha dispersión, en combinación con el bajo rango de la magnitud de los valores reportados, hace difícil concluir que el comportamiento entre las dos placas es realmente diferente (la diferencia no parece ser estadísticamente significativa), y 3) de forma similar, la semejanza en la pendiente de las tendencias obtenidas sugiere que los procesos de cambio al interior de las dos estructuras. Estos resultados se pueden deber al hecho de que, en este caso, aun cuando la base se encuentra constituida por material granular estabilizado con cemento de baja resistencia, los espesores de la losa de concreto son muy altos (i.e., 22 y 28 cm), lo que genera una alta resistencia estructural, más aun en este caso en el que la carga cíclica fue aplicada a bajas frecuencias.

Base estabilizada con cemento de baja resistencia y frecuencia media

En el caso de las estructuras 6 y 7 existen datos representativos sólo para las estructuras originales, contando con datos hasta los 350,000 ciclos, y no se presentan datos confiables para las estructuras de réplica. Por esta razón, la Figura 174 se limita a presentar los datos correspondientes a las losas originales:





Figura 174. Deformación permanente en estructuras E6 y E7.

En este caso, la estructura 7 presenta un decrecimiento en los valores de deformación más evidente que en el caso anterior. Estos valores negativos, como se explicó, están relacionados con lo que debe ser un ligero levantamiento de la placa durante los ensayos, el cual a su vez está asociado a un asentamiento diferencial, o con movimientos indeseados e incontrolables del *datum* del sistema desde el cual se tomaron las mediciones. No obstante esta situación, el hecho de que se presente dicho levantamiento de forma tan evidente es muestra misma de que están ocurriendo procesos de degradación en la estructura. En valor absoluto, la deformación final para la estructura de menor espesor es 103,18% mayor que en estructura con una placa de 25 cm. De forma parecida, la losa con menor espesor tiene una tasa de deformación 2,2 veces mayor al caso de la estructura más robusta.

8.2.2. Variable de análisis: frecuencia de aplicación de carga

A continuación se presenta el análisis de estructuras que comparten el mismo material de base y el mismo espesor de la losa de concreto, obteniendo los siguientes grupos:

Tabla 30. Estructuras seleccionadas para el análisis de la influencia de la frecuencia de aplicación de
carga en la deformación permanente de los pavimentos.

Material	Espesor placa de concreto (cm)	Frecuencia	Estructura
Granular sin	15	Baja	E12
estabilizar	15	Media	E11
Granular		Baja	E3



Material	Espesor placa de concreto (cm)	Frecuencia	Estructura
estabilizado con cemento de	25	Media	E2
resistencia baja		moulu	22

Base de material granular sin estabilizar con espesor de placa de 15 cm

Para el caso de las estructuras 11 y 12, sometidas a frecuencia de aplicación de carga media y baja, respectivamente, se cuenta con datos en las losas originales a partir del ciclo 174,420. Por el contrario, los datos de las losas de réplica fueron interrumpidos en el ciclo 18410, en el caso de la estructura 11, y en el 82,670 para la 12. Por lo tanto, para las estructuras originales el análisis se realiza a partir del ciclo en el que se encuentran datos, reconociendo que para dicho momento la estructura debía presentar algún nivel de deformación permanente.



Figura 175. Deformación permanente en estructuras E11 y E12.

Los resultados sugieren que cuando se cuenta con estructuras compuestas con bases de material granular sin estabilizar, se presentan mayores deformaciones permanentes acumuladas en aquella estructura que es sometida a una mayor frecuencia de aplicación de carga. A su vez, la estructura que fue sometida a mayor frecuencia de carga presenta una mayor tasa de deformación por ciclo, la cual es de hasta dos órdenes de magnitud superior al de la estructura sometida a menor frecuencia. Vale la pena destacar que en esta oportunidad hubo diferencias radicales entre las estructuras de réplica y las originales, lo cual se debe a la forma en que cada una de ellas evolucionó durante los ensayos de carga mecánica.



Base estabilizada con cemento de baja resistencia y espesor de placa 25 cm

Las estructuras que comparten bases granulares estabilizadas con cemento en la misma proporción o resistencia y el mismo espesor de la losa de concreto, pero que fueron sometidas a diferentes frecuencias de aplicación de carga son la 2 y la 3. Sin embargo, en el caso de la estructura 3 sólo se cuenta con datos de la estructura de réplica a partir de ciclo 164,160, por lo que la Figura 176 sólo presenta a curva de deformación de las curvas originales:



Figura 176. Deformación permanente en estructuras E2 y E3.

A diferencia del caso anterior, en esta ocasión la estructura que es sometida a una frecuencia más baja presentó una tasa de deformación 3 veces mayor a la de frecuencia media. Este resultado sugiere que el efecto que tiene la frecuencia de aplicación de carga en la acumulación de deformación permanente depende no sólo de la capacidad estructural del pavimento sino también del tipo de material empleado. Por esta razón, el análisis de deterioro por deformación permanente en campo no parece ser suficiente para entender la evolución de los procesos ocurridos en cada una de las estructuras ensayadas. Para el propósito de este proyecto, esto significa emplear de forma simultánea a estas mediciones el análisis de los resultados obtenidos de los ensayos de carga cíclica reportados en la parte inicial de este capítulo.

8.2.3. Variable de análisis: resistencia de las capas de base granular estabilizadas

con cemento

Continuando con el análisis de cada una de las variables involucradas, se procedió a determinar la influencia de la resistencia del material granular estabilizado con cemento



empleado en capas de base, en las deformaciones permanentes de los pavimentos. Para esto se seleccionaron los siguientes grupos de estructuras:

Frecuencia	Espesor placa de concreto (cm)	Resistencia	Estructura
		Baja	E2
Media	25	Media	E6
		Media	E7
Media	15	Alta	E8

 Tabla 31. Estructuras seleccionadas para el análisis de la influencia de la resistencia de los materiales de base granular estabilizados con cemento en la deformación permanente de los pavimentos.

Base granular estabilizada con cemento con espesor de placa de 25 cm y frecuencia de aplicación de carga media

En esta oportunidad sólo se cuenta con datos completos (desde 0 hasta los 350,000 ciclos) para las losas originales y no para las réplicas, por lo cual sólo se considera confiable los datos de estas dos estructuras. De esta manera, la Figura 177 presenta la deformación sufrida por las estructuras 2 y 6, las cuales fueron sometidas a una frecuencia de aplicación de carga media, tenían una losa de concreto de 25 cm de espesor y contaban con una resistencia a la compresión baja y media, respectivamente:



Figura 177. Deformación permanente en estructuras E2 y E6.

Los resultados obtenidos sugieren que aquellas estructuras con base estabilizada con menor proporción de material cementante presentan no sólo mayores deformaciones permanentes,



sino también una mayor tasa de acumulación de las mismas. La estructura con un bajo porcentaje de cemento presentó al final de los ciclos una deformación 56,1% mayor a la sufrida por la estructura con mayor cantidad de estabilizante. También es posible determinar una tasa de deformación 1.1 veces mayor en la base de menor resistencia con respecto a su similar de mayor resistencia. Al igual que los otros casos evaluados donde las estructuras cuentan con material estabilizado con cemento, los valores de deformación permanentes son bajos (alcanzando valores de deformación permanente máximos de 0.6 mm), lo cual podría sugerir una baja afectación del pavimento en términos de la deformación permanente de la placa de concreto por efectos de erosión, aun cuando en este caso la tendencia de crecimiento de este parámetro es más clara que en el caso de las estructuras 4 y 5 analizadas previamente.

Base granular estabilizada con cemento con espesor de placa de 15 cm y frecuencia de aplicación de carga media

La Figura 178 presenta a continuación la deformación permanente acumulada registrada para las estructuras 7 y 8, aclarando que para estas dos estructuras no se cuentan con datos confiables de sus respectivas réplicas y, por lo tanto, éstas no se presentan ni analizan.



Figura 178. Deformación permanente en estructuras E7 y E8.

Al igual que lo discutido anteriormente para la estructura 7, los resultados muestran que la estructura 8 también presenta valores negativos de deformación permanente, los cuales son además muy cercanos a los de la estructura 7. Una vez más, se especula que esto podría ser resultado de procesos de escalonamiento o de efectos similares en las estructuras o en posibles y sutiles movimientos de la viga considerada el *datum* del sistema durante la ejecución de los ensayos. En esta oportunidad, sin embargo, es difícil identificar con



certeza la diferencia que genera el uso de material de base granular estabilizado con cemento de diferente resistencia, pues tanto la magnitud como la tasa a la que ocurren los cambios en la altura de la superficie de la placa de concreto de estas dos estructuras son bastante similares. En otras palabras, aun cuando se reportan cambios en el valor de deformación permanente, estos cambios son muy similares entre las dos estructuras por lo que la variable de análisis (resistencia de la capa granular estabilizada con cemento), parecería no ser relevante o decisoria en la promoción o prevención de las capas de base de este tipo de pavimentos ante la procesos de erosión.

8.2.4. Variable de análisis: tipo de material empleado en la capa de base del pavimento

Finalmente, se estudió la deformación permanente de la estructura en función del material con el que es construida la base. Esta influencia fue analizada con los resultados obtenidos de las estructuras 9 y 10, las cuales comparten el mismo espesor de la losa de concreto (15 cm), la misma frecuencia de aplicación de carga (media), el mismo espesor de base (5cm) y sólo se diferencian en el material de base empleado; así como con las estructuras 7, 8 y 11, que comparten las mismas condiciones que el caso anterior, pero que cuentan con un espesor de la capa de base de 15 cm.

Tabla 32. Estructuras seleccionadas para el análisis de la influencia del tipo de material empleado en la
base en la deformación permanente de los pavimentos.

Frecuencia	Espesor placa de concreto (cm)	Material	Estructura
Media	15	Granular estabilizado con emulsión asfáltica	E9
		Mezcla asfáltica en caliente	E10
		Granular estabilizado con cemento (resistencia media)	E7
Media	15	Granular estabilizado con cemento (resistencia alta)	E8
		Granular sin estabilizar	E11

Estructuras con materiales asfálticos, frecuencia media y placa de concreto de 25 cm

A continuación se presentan los datos obtenidos para 350,000 ciclos de carga en el caso de la estructura con base de material granular cementado con emulsión asfáltica y en la estructura con base asfáltica en caliente:





Figura 179. Deformación permanente en estructuras E9, E10 y E11.

La primera observación relevante en este caso es que las dos estructuras presentaron mayores deformaciones permanentes en comparación con algunos de los pavimentos ya evaluados. Se cree que esta condición tiene dos causas principales: 1) la resistencia estructural es significativamente inferior a todas las demás estructuras construidas debido a la diferencia de espesor de la base (15 cm para las bases de material granular sin estabilizar y granular estabilizado en los tres porcentajes de cemento vs. 5 cm para las capas de base asfáltica y de material granular estabilizado con emulsión asfáltica), y 2) se piensa que pudieron existir algunas deficiencias constructivas en la conformación de las capas de base de estas dos estructuras, principalmente debido al control de la temperatura, en el caso de la mezcla en caliente, y a la dificultad del proceso de fabricación de la mezcla fría in-situ y al control de la temperatura de mezclado y compactación, para la mezcla en frío y en caliente, respectivamente. En cualquier caso, se tiene certeza de que los valores de deformación permanente encontrados para estas estructuras son de *origen mecánico y estructural* principalmente y no causados por fenómenos significativos de degradación de las capas de base.

Lo resultados sugieren que la deformación permanente final de la estructura con capa de base de material granular con emulsión asfáltica es inferior a la estructura con mezcla asfáltica en caliente, aun cuando las dos son muy similares. Esta condición refuerza la hipótesis de la existencia de deficiencias durante los procesos constructivos de las capas de mezcla en caliente.



Estructuras con materiales granulares y estabilizados con cemento, frecuencia media y placa de concreto de 15 cm

La Figura 180 presenta las deformaciones correspondientes a las estructuras 7, 8 y 11, así como las líneas de tendencia que estiman de manera aproximada la tasa de cambio de la deformación permanente a través de los ciclos de carga. En este caso se recuerda que se cuenta con datos para la estructura con base de material granular sin estabilizar sólo a partir del ciclo 174,420.



Figura 180. Deformación permanente en estructuras E7, E8 y E11.

Los resultados obtenidos indican una mayor susceptibilidad a la deformación permanente en la estructura cuya base no se encuentra cementada o estabilizada, el cual es un resultado predecible. Al comparar la deformación sufrida por la estructura con base de material granular con aquella obtenida por las estructura con base estabilizada con cemento portland de resistencia media y alta, se encuentra una diferencia de 832 y 1169%, respectivamente.

Tal como se había analizado con anterioridad, la diferencia entre las dos estructuras con base granular estabilizada con cemento es mínima en comparación con las presentadas anteriormente, existiendo en la estructura 7 una deformación 36,1% mayor a la presentada en la estructura 8.

Por su parte, la diferencia entre las tasas de crecimiento de la deformación permanente es igualmente considerable, existiendo una tasa de aproximadamente un orden de magnitud mayor en la base sin granular sin estabilizar $(3*10^{-5} \text{ mm/ciclo en la base sin estabilizar vs.} 2*10^{-6} \text{ mm/ciclo en las bases cementadas}).$

8.3. Resultados y análisis de la metodología propuesta para la auscultación nodestructiva de erosión en pavimentos rígidos en servicio

A continuación se presenta la información procesada y consolidada de las pruebas realizadas con la metodología de auscultación dinámica no-destructiva propuesta como parte de este proyecto. La metodología del ensayo y del procesamiento de los datos obtenidos del mismo fueron descrita en el capítulo anterior del presente informe.

Al igual que en los casos del análisis realizados para los resultados de las mediciones de deformación permanente, en este caso también se estudió la variación en las distintas variables que definen las características de las estructuras evaluadas: 1) espesor de la losa de concreto, 2) frecuencia de aplicación de carga, y 3) tipo de material empleado en la capa de base.

El análisis de datos se basa en los resultados de la aceleración y el desplazamiento máximos obtenidos de la señal de respuesta de los sensores ubicados en la zona central de cada losa, junto a la zona de impacto. Como se explicará a continuación, el sensor ubicado en cercanías a la junta de separación frente a la losa del ensayo (denominada placa o losa vecina) proporcionó datos muy bajos de aceleración y desplazamiento, los cuales reflejan la falta de transferencia de carga entre losas y no permiten el análisis del impacto individual de las diferentes variables. Así mismo, los análisis preliminares realizados sobre las señales capturadas por el sensor A3, ubicado en la placa cargada pero alejado de la zona de impacto, no demostraron dar señales fuertes que permitieran un análisis confiable de la información. Los datos obtenidos mediante este sensor fueron de utilidad para verificar que la distancia de ubicación del sensor A2 era apropiada (puesto que el A3 estaba muy alejado del golpe para registrar señales precisas), pero no fueron empleados en el análisis posterior de la información.

8.3.1. Variable de análisis: espesor de la placa de concreto

De forma similar a las secciones anteriores, en este caso se compararon los siguientes grupos de estructuras:

Tabla 33. Estructuras seleccionadas para el análisis de la influencia del espesor de la placa de concreto
en la respuesta de las estructuras ante una carga de impacto.

Material	Frecuencia	Espesor placa de concreto (cm)	Estructura
Granular sin astabilizar	Media	15	E11
Granular sin establizar		20	E13
Granular estabilizada con	Daia	22	E4
cemento de resistencia baja	Баја	28	E5



Material	Frecuencia	Espesor placa de concreto (cm)	Estructura
Granular estabilizada con	Madia	25	E6
cemento de resistencia media	wieula	15	E7

A continuación se presentan los resultados obtenidos para estos tres grupos.

Base de material granular sin estabilizar con frecuencia de aplicación de carga media

Para estas estructuras no se cuenta con información confiable de las réplicas, por lo que sólo se presenta información de las originales. La Figura 181 presenta los valores máximos de aceleración de los sensores A1 (en la placa vecina cerca de la zona de impacto) y A2 (en la placa cargada cerca de la zona de impacto) como respuesta a la carga de impacto aplicada en las estructuras 11 y 13 en función de los ciclos de carga:



Figura 181. Aceleración máxima en estructuras E11 y E13.

Los datos obtenidos del sensor A2, el cual se encuentra ubicado cerca de la zona de impacto en la placa cargada, no presentan ningún patrón de comportamiento evidente, lo que impide obtener conclusiones claras sobre la influencia que tiene el espesor de la losa de concreto sobre éstas. No obstante, es claro que las variaciones en las mediciones tienen mayor magnitud en el caso de la estructura 11, la cual posee un menor espesor de placa de concreto, que en la estructura 12, que tiene una placa de concreto 5 cm más gruesa. En particular, a los 250,000 ciclos la aceleración máxima reportada por el sensor en la estructura menos robusta duplicó el valor alcanzado por la estructura más rígida. Este resultados parecería coincidir con los resultados de los ensayos de erosión y con los análisis de deformación permanente.



En cuando a los datos del sensor A1, ubicado en la losa adyacente a la estructura cargada y zona del golpe, se observa que los primeros 120,000 ciclos la estructura con placa de 15 cm presenta una aceleración 182% mayor que la observada en la estructura con placa de 20 cm. No obstante, a medida que avanza el número de ciclos aplicados, los valores de aceleración máxima en los dos tipos de estructuras se hacen cada vez más cercanas, llegando a una diferencia por debajo del 50% tras finalizar los ciclos de carga, exactamente del 46%.

Por su parte, en la Figura 182 se muestran los desplazamientos máximos para estas mismas estructuras (11 y 13), valores que se encuentran a partir de la doble integral de las señales de aceleración:



Figura 182. Desplazamiento máximo en estructuras E11 y E13.

El comportamiento cuantitativo es, naturalmente, similar al presentado anteriormente para la aceleración máxima. Los desplazamientos máximos en las dos estructuras analizadas alcanzan valores de hasta 1.9*10⁻⁴ m, para los sensores cercanos al golpe en la placa cargada (A2) y de hasta 6*10⁻⁵ m, para los sensores en la placa vecina.

En general, de estos análisis se concluyó que los resultados de los sensores en la placa cargada cerca al golpe (A2) son más valiosos para comparar las diferencias entre el comportamiento de las estructuras ante el impacto de carga que los resultados que provee el sensor A1, el cual podría ser útil para medir otro tipo de fenómenos (e.g., eficiencia de transferencia de carga en pavimentos rígidos). Por esta razón, a partir del siguiente grupo de estructuras, el análisis se enfocará en analizar los resultados del sensor A2.

Base estabilizada con cemento de baja resistencia y frecuencia baja

Universidad de

los Andes

La Figura 183 resenta los resultados obtenidos para las Estructuras 4 y 5, las cuales cuentan con base granular estabilizada con cemento de baja resistencia y estuvieron sometidas a una frecuencia de carga baja:



Figura 183. Aceleración máxima en estructuras E4 y E5 para el Sensor A2.

En este caso, los valores correspondientes a la estructura 4 y 5 sugieren un incremento inicial en la aceleración máxima registrada por acelerómetro en los primeros ciclos de carga (más notoria en la estructura más robusta o E5), seguida de una disminución sustancial de este parámetro en los subsecuentes ciclos de carga (i.e., a partir de los ciclos 180,000 y 110,000, para las estructuras 4 y 5 respectivamente). Sin embargo, los datos de la réplica de la estructura 4, con 22 cm de placa de concreto, sí presenta un aumento moderado en la aceleración máxima. La réplica de la estructura 5, con 28 cm de espesor, muestra también un aumento progresivo de la aceleración hasta el ciclo 240,000, en donde inicia su descenso. En general, los datos son bastante irregulares y no se observa con claridad ni consistencia entre los casos originales y de réplica para una misma estructura ni diferencias evidentes entre las dos estructuras.

De acuerdo con estas observaciones, se puede afirmar que estos valores no ofrecen la posibilidad de determinar un comportamiento o una influencia clara del espesor de la placa en la respuesta de las estructuras conformadas con este material de base.

Los datos de desplazamiento, por su parte, se presentan en la Figura 184. Con excepción de un punto anómalo cerca del ciclo 170,000 para la estructura original 4, se puede observar que todos los datos son muy similares entre sí. Con excepción del valor mencionado, los datos de desplazamiento máximo entre las dos estructuras originales son muy cercanos, con



diferencias inferiores al 30%. De forma similar, los datos de las dos estructuras de réplica son igualmente similares y presentan diferencias típicamente inferiores al 20%. Al igual que en el caso del análisis de las aceleraciones, no se observan cambios importantes en los desplazamientos máximos reportados por el sensor que permitan concluir sobre el impacto que tiene la diferencia de espesor de la placa de concreto entre las dos estructuras (22 cm vs. 28 cm) en el presunto desarrollo de procesos de erosión.



Figura 184. Desplazamiento máximo en estructuras E4 y E5 para el Sensor A2.

Base estabilizada con cemento de media resistencia y frecuencia media

Las siguientes figuras resumen los resultados encontrados para la aceleración y el desplazamiento máximos de las señales de respuesta del sensor A2 reportadas en las estructuras 6 y 7, las cuales cuentan con una base granular estabilizada con cemento de resistencia media de 15 cm, fueron sometidas a una frecuencia media de carga y se diferencian por el espesor de su placa de concreto (25 cm vs. 15 cm, respectivamente).





Figura 185. Aceleración máxima en estructuras E6 y E7 para el Sensor A2.



Figura 186. Desplazamiento máximo en estructuras E6 y E7 para el Sensor A2.

Los resultados permiten concluir que cuando la diferencia entre el espesor de las placas de concreto es significativo (una reducción del 40% en el espesor en el presente análisis vs. una reducción del 12% en el caso anterior), es más evidente la tendencia que tímidamente se ha venido presentando a lo largo del análisis, en el cual existen mayores aceleraciones y

desplazamientos máximos en las señales de respuesta generadas por la aplicación de una carga de impacto en aquellas estructuras con losas de menor espesor.

Específicamente, comparando las dos (2) estructuras originales, se observa que aquella que cuenta con una placa de concreto de sólo 15 cm de espesor alcanza una aceleración máxima 42% superior a los 250,000 ciclos de carga, con respecto a la aceleración máxima registrada en la estructura con una placa de 25 cm. Además, la estructura con placa de 15 cm presenta una tendencia creciente clara, lo que puede estar reflejando cambios relevantes al interior de la estructura. En las réplicas, la diferencia final en las aceleraciones máximas es menos significativa, pero durante la ejecución del ensayo mecánico la réplica con placa de 15 cm presentó consistentemente mayores aceleraciones máximas ante la carga de impacto.

En términos de los desplazamientos máximos de la onda registrada por el sensor A2, la tendencia se mantiene similar a la de las aceleraciones y se observa que existe una diferencia de 216% al inicio de los ciclos de carga entre las dos estructuras, y que esta tendencia aumenta a medida que los ensayos de carga progresan. Después de 250,000 ciclos de carga, la deformación máxima de la estructura con placa de 15 cm es el 44% de la registrada para la estructura con placa de 25 cm de espesor. Este comportamiento persiste en las respectivas réplicas.

8.3.2. Variable de análisis: frecuencia de aplicación de carga

En términos de la influencia de la frecuencia de aplicación de carga, el análisis consistió en comparar los siguientes grupos de estructuras:

Material	Espesor placa de concreto (cm)	Frecuencia	Estructura
Granular sin astabilizar	15	Baja	E12
Granular sin estabilizar	15	Media	E11
Granular estabilizado con		Baja	E3
cemento de resistencia baja	25	Media	E2

Tabla 34. Estructuras seleccionadas para el análisis de la influencia de la frecuencia de aplicación decarga en la respuesta de las estructuras ante una carga de impacto.

Base de material granular sin estabilizar con espesor de placa de 15 cm

La Figura 187 y la Figura 188 muestran los resultados obtenidos las aceleraciones y desplazamientos máximos reportados durante la respuesta al impacto del sensor A2 para las estructuras 11 y 12; las cuales comparten el material de base (granular sin estabilizar) y el espesor de la placa de concreto, pero se diferencian en la frecuencia empleada para la aplicación de los ciclos de carga. En este caso se incluyeron nuevamente los resultados del





sensor A1 para ilustrar que su comportamiento es similar entre las dos estructuras y que, por lo tanto, no permite obtener conclusiones sobre el impacto de la variable a estudiar.

Figura 187. Aceleración máxima en estructuras E11 y E12 para los sensores A1 y A2.



Figura 188. Desplazamiento máximo en estructuras E11 y E12 para los sensores A1 y A2.

Observando los resultados del sensor A2, éstos sugieren mayores valores de aceleración en la estructura que ha sido sometida a una menor frecuencia de aplicación de carga. La



estructura 12, sometida a una frecuencia menor, presenta una aceleración 30% mayor al inicio de los ciclos con respecto a la estructura 11, la cual estuvo sometida a una frecuencia un poco más alta. En el caso de los datos del sensor A1 esta diferencia es de 0.63% y se hace menor con el paso del número de ciclos, lo que sugiere que en los dos casos hay una pobre transferencia de carga entre la placa cargada y la placa vecina. Aunque la diferencia se mantiene e incluso crece a medida que se desarrolla el ensayo de carga para los valores del sensor A2, después de 250,000 ciclos la aceleración máxima de la señal de respuesta es casi la misma para las dos estructuras en los dos sensores, lo que impide concluir sobre posibles diferencias en las condiciones al interior de los pavimentos en ese momento del ensayo.

La tendencia descrita anteriormente también se presenta en los valores de desplazamiento máximo reportado por los sensores, con una única excepción reportada al inicio del experimento. Nuevamente, después de 250,000 ciclos de carga, las diferencias entre las dos estructuras es imperceptible, lo que restringe la posibilidad de obtener conclusiones claras sobre la influencia de la frecuencia de aplicación de carga en el interior de la estructura.

Base estabilizada con cemento de baja resistencia y espesor de placa de 25 cm

Las Figura 189Figura 190 presentan los resultados obtenidos para la aceleración y deformación máximas de las señales de respuesta al impacto de las estructuras 3 y 2, las cuales cuentan con una base granular estabilizada con cemento de baja resistencia y placas de concreto de 25 cm de espesor:



Figura 189. Aceleración máxima en estructuras E2 y E3 para el Sensor A2.





Figura 190. Desplazamiento máximo en estructuras E2 y E3 para el Sensor A2.

De estas figuras se observa que al utilizar una base estabilizada con cemento de baja resistencia el comportamiento ante el impacto de la frecuencia es menos claro que en el caso de las estructuras construidas con bases granulares sin estabilizar. Por ejemplo, en el caso de las losas originales, la tendencia tanto de la aceleración máxima como del desplazamiento máximo se invierte o iguala con el transcurso del número de ciclos. No obstante, una observación importante es que en este caso los valores de desplazamiento no superan los 40 μ m, mientras que en el caso de las estructuras con base granular sin estabilizar (caso anterior) estos valores alcanzan rangos superiores a los 100 μ m. Este resultado podría sugerir la existencia de un rango de valores a partir de los cuáles los resultados de las mediciones son significativos y podrían reflejar no sólo baja resistencia estructural sino que además, dependiendo de la velocidad o tasa de crecimiento, la presencia de fenómenos de erosión.

Sin embargo, a diferencia del caso anterior, este comportamiento sólo se presenta al inicio de los ciclos de carga. Posteriormente las aceleraciones son mayores en la estructura sometida a una frecuencia un poco más alta, llegando a una diferencia de cerca del 41%.

Por su parte, los datos de desplazamiento, tal y como se aprecia en la figura, también indican valores de mayor magnitud para aquella estructura sometida a menor frecuencia de carga. Aunque a medida que avanzan los ciclos la diferencia de desplazamientos se hace menor, los datos para la estructura 3 son siempre mayores, por lo menos hasta el ciclo 248,000. La diferencia inicial es del 127% y ésta disminuye hasta el 0.48%.



Finalmente, vale la pena destacar que de las tres estructuras mostradas, la réplica de la estructura 2 (base granular estabilizada con baja resistencia) presenta un comportamiento creciente bien diferenciado en el cual se detectan dos zonas diferentes: 1) una zona inicial de crecimiento del desplazamiento máximo rápidos, y 2) una zona de crecimiento continuo pero a una tasa menor.

8.3.3. Variable de análisis: resistencia de las capas de base granular estabilizadas con cemento

En esta oportunidad se compararon los siguientes grupos de estructuras, los cuales se diferencian por la resistencia de la capa de base granular estabilizada con cemento:

Tabla 35. Estructuras seleccionadas para el análisis de la influencia de la resistencia de los materiales de base granular estabilizados con cemento en la respuesta de las estructuras ante una carga de impacto.

Frecuencia	Espesor placa de concreto (cm)	Resistencia	Estructura	
Madia	25	Baja	Baja	E2
Media	23	Media	E6	
Madia	Madia 15		E7	
	Alta	E8		

Base granular estabilizada con cemento con espesor de la placa de concreto de 25 cm y frecuencia de aplicación de carga media

A continuación se presentan los resultados de las aceleraciones y los desplazamientos máximos del sensor A2 para las estructuras E2 y E6, las cuales cuentan con una placa de concreto de 25 cm y fueron sometidas a una frecuencia de aplicación de carga media.





Figura 191. Aceleración máxima en estructuras E2 y E6 para el sensor A2.



Figura 192. Desplazamiento máximo en estructuras E2 y E6 para el Sensor A2.

A pesar de la presencia de algo de ruido en los datos de la estructura 6 y algunos 'saltos' en los resultados, se observa que aunque la diferencia entre las aceleraciones máximas no es tan notoria, la diferencia en los desplazamientos máximos sí lo es, tanto para las estructuras originales como para sus réplicas. Dicha diferencia muestra mayores valores de desplazamiento máximo en las estructuras con bases granulares estabilizadas con cemento



de menor resistencia. No obstante, para cada estructura, los cambios en los desplazamientos no son tan claros y presentan una zona de 'máximos locales' entre los 80,000 y 160,000 ciclos para las estructuras originales, momento a partir del cual los datos tienden a estabilizarse. Es decir, la respuesta de los dos sistemas tiene un cambio interesante en los primeros 150,000 ciclos, puesto que posterior a este momento no se reportan nuevos cambios significativos en las estructuras.

Base granular estabilizada con cemento con espesor de placa de concreto de 15 cm y frecuencia de aplicación de carga media

La Figura 193 y Figura 194 presentan los valores máximos de aceleración y desplazamiento reportados por la señal del sensor A2 por las estructuras 7 y 8 durante la aplicación de la carga de impacto:



Figura 193. Aceleración máxima sensor A2 en estructuras E7 y E8.





Figura 194. Desplazamiento máximo en estructuras E7 y E8 para el Sensor A2.

En este caso el comportamiento es mucho más claro en términos del desplazamiento máximo reportado por las señales de respuesta. No obstante, este comportamiento sugiere que las estructuras construidas con material granular estabilizado con cemento de alta resistencia presentan mayores desplazamientos de forma consistente, en comparación con la estructura en donde la cantidad de cemento empleada para estabilizar en la base fue menor (i.e., resistencia media), lo cual es contrario al comportamiento esperado. Sin embargo, a diferencia de los casos anteriores en donde las diferencias entre las estructuras fueron superiores al 30%, en esta serie de resultados, en esta oportunidad la máxima diferencia alcanzada entre las curvas de las dos estructuras estuvo por debajo del 15% (14.5% tras 165.000 ciclos). Además, las pendientes de las curvas para las dos estructuras son similares y la pendiente es de tipo creciente. Con estos resultados es posible observar el comportamiento de cada estructura en particular (desplazamientos crecientes en estructuras originales y tendiendo a ser constantes en estructuras de réplica), pero no es posible concluir sobre las causas de las diferencias observadas entre los dos tipos de estructuras.

8.3.4. Variable de análisis: tipo de material empleado en la capa de base del pavimento

Finalmente, la influencia del tipo de material utilizado en la construcción de la base fue analizada comparando los resultados de aquellas estructuras que comparten la frecuencia de aplicación de carga a la que fueron sometidas, así como el espesor de la losa de concreto:



Tabla 36. Estructuras seleccionadas para el análisis de la influencia del tipo de material empleado en la
base en la respuesta de las estructuras ante carga de impacto.

Frecuencia	Espesor placa de concreto (cm)	Material	Estructura
Media	15	Granular estabilizado con emulsión asfáltica	E9
		Mezcla asfáltica en caliente	E10
Media	15	Granular estabilizado con cemento (resistencia media)	E7
		Granular estabilizado con cemento (resistencia alta)	E8
		Granular sin estabilizar	E11

Estructuras con materiales asfálticos, frecuencia media y placa de concreto de 25 cm

La siguientes figuras presentan los valores máximos de aceleración y desplazamiento reportados por las estructuras 9 y 10 durante el proceso experimental a través del avance de los ciclos de carga. Estas estructuras se caracterizan por tener placas de concreto de 15 cm, por estar sometidas a frecuencia media y por contar con capas de base de 5 cm con material granular estabilizado con emulsión asfáltica (E9) y con mezcla asfáltica en caliente (E10):



Figura 195. Aceleración máxima en estructuras E9 y E10 para el Sensor A2.





Figura 196. Desplazamiento máximo en estructuras E9 y E10 para Sensor A2.

Como se evidencia en la Figura 195, al inicio del proceso de carga se evidencia cierta diferencia entre los resultados de ambas estructuras, siendo la aceleración máxima de aquella con una base de mezcla asfáltica en caliente 27% mayor a la que cuenta con una base granular estabilizada con emulsión. Dicha diferencia se atenúa hasta volverse casi indiferente a medida que avanzan los ciclos.

Los datos de desplazamiento, por su parte, presentan una tendencia opuesta a la observada en cuanto a la aceleración, puesto que en este caso es claro que la estructura 9, con base granular estabilizada con emulsión asfáltica, presenta mayores desplazamientos que su similar de base asfáltica en caliente, siendo un 42% mayor al inicio de los ciclos, y llegando a una diferencia del 40% al finalizar los mismos; resultado que es más acorde con lo esperado desde el punto de vista teórico. Las estructuras de réplica por su parte, expresan el mismo comportamiento con una diferencia máxima de casi 50% tras la aplicación de 172,000 ciclos de carga.

Es interesante notar que de todas las estructuras, estas dos (2) son las que presentan, individualmente, menores variaciones en los valores de desplazamiento máximo a lo largo del paso del ensayo mecánico. Esto podría suponer una ausencia de procesos o cambios significativos al interior de la estructura de pavimento y, posiblemente, una leve o inexistente cavidad por erosión en la zona de la junta. Estos resultados fueron mencionados brevemente cuando se explicaron los resultados obtenidos para estas mismas dos (2) estructuras de los ensayos de erosión y de las mediciones manuales de deformación permanente.

Estructuras con materiales granulares y estabilizados con cemento, frecuencia media y placa de concreto de 15 cm

A continuación se presentan los resultados consolidados para las máximas aceleraciones y desplazamientos correspondientes a las estructuras 7 (granular estabilizado con cemento de resistencia media), 8 (granular estabilizado con cemento de resistencia alta) y 11 (granular sin estabilizar), obtenidas a través de la respuesta del sensor A2:



Figura 197. Aceleración máxima en estructuras E7, E8 y E11 par el Sensor A2.

Con excepción de un valor sospechosamente bajo en los datos correspondientes a la estructura 11 cercano a los 116,000 ciclos, se evidencia una tendencia clara de mayor aceleración y desplazamiento máximos en la estructura que tiene una base granular sin estabilizar, en comparación con los valores registrados para las dos estructuras que se encuentran estabilizadas con cemento. Por ejemplo, al final de los 250,000 ciclos de carga, los desplazamientos máximos de las estructuras con base granular estabilizada con cemento son inferiores al 42% de los reportados en la estructura con base granular sin estabilizar. Además, la pendiente a la cual ocurren los cambios es más errática y más pronunciada en el caso de la estructura con base granular, lo que sugiere que los cambios al interior de esta estructura-posiblemente por fenómenos asociadas a erosión-son más significativos que en las otras dos estructuras. Estos resultados también permiten comprobar que el método de auscultación parece ser eficiente en distinguir de forma efectiva los procesos que ocurren en pavimentos rígidos que cuentan con materiales de base con rigideces significativamente diferentes (granular sin estabilizar vs. granular estabilizado con cemento), pero no así para estructuras con bases de materiales con rigideces similares (como las estructuras 7 y 8, mostradas con anterioridad).





Figura 198. Desplazamiento máximo en estructuras E7, E8 y E11 para el Sensor A2.

8.4. Comparación entre los resultados de los ensayos de erosión a escala real, los ensayos de auscultación no-destructiva y las mediciones de deformación permanente

Una vez concluidos los análisis individuales de cada uno de los tres grupos de ensayos realizados (i.e., ensayos mecánicos de erosión a escala real, ensayos de auscultación nodestructiva y mediciones manuales de deformación permanente), se procedió a determinar si existía algún tipo de consistencia o coherencia entre los mismos.

Para esto, se comparó la magnitud y la evolución a través del número de ciclos de carga de los resultados arrojados por cada uno de los ensayos los cuales, por claridad, se resumen a continuación:

- Resultado de los ensayos mecánicos de erosión a escala real: intervalo o diferencia de desplazamiento vertical por cada ciclo de carga registrado en un sensor ubicado en la parte superior de la capa de base (i.e., sensor DC3).
- Resultado de las mediciones de deformación permanente: aumento de la distancia entre la superficie de la placa de concreto y un *datum*, el cual en este caso consistió en la viga de soporte del sistema de aplicación de carga.
- Resultado de los ensayos de auscultación no-destructiva: aceleración y desplazamientos máximos de la señale de respuesta capturada por un acelerómetro ubicado en cercanías de la zona de aplicación de una carga de impacto.



Después de realizar un análisis preliminar, se pudo concluir que en algunas de las estructuras ensayadas se observó consistencia entre los valores de desplazamiento máximo de la señal de respuesta ante la carga (ensayo de auscultación) y los valores de intervalo de desplazamiento por cada ciclo de carga medido en la base (ensayo de erosión). Además, casi siempre, estos resultados fueron acordes con las mediciones de deformación permanente en la superficie de la estructura. En los casos en los que no se pudieron detectar diferencias en el impacto de una variable específica de análisis (e.g., influencia de la cantidad de cemento que se emplea en la estabilización de las capas de base), las tendencias observadas en los ensayos de auscultación y de erosión eran similares, puesto que en los dos casos se observaba que las curvas de las estructuras analizadas evolucionaban de forma parecida con el paso de los ciclos de carga, lo que impedía identificar diferencias en los procesos de degradación que podrían estar ocurriendo en dichos pavimentos.

A continuación se presentan algunas observaciones de los análisis comparativos realizados:

• En cuanto a la influencia de los espesores de las placas de concreto en el desarrollo de procesos de erosión, se observó que en las estructuras compuestas con bases granulares sin estabilizar (E11 de 15 cm y E13 de 20 cm), la de menor espesor presentó de forma consistente mayores valores de deformación permanente, mayores valores de aceleración y desplazamiento máximos en las señales de auscultación no-destructiva y mayores valores de intervalos de desplazamiento en cada ciclo de carga medido a nivel de la capa de base. Además, se pudo concluir que la velocidad a la que cada una de esas tres variables creció a través de la aplicación de los ciclos de carga (i.e., tasa de deterioro) fue superior en la estructura de menor espesor de losa de concreto (E11). Estos resultados tienen dos implicaciones importantes: 1) la reafirmación de que las dos estructuras presentaron procesos de erosión significativos, los cuales fueron capturados apropiadamente por las tres mediciones efectuadas, y 2) el hecho de que el espesor de la placa de concreto fue un factor suficientemente significativo para modificar la magnitud y la progresión del proceso erosivo.

No obstante, al reemplazar el material de la capa de base por material estabilizado con cemento (e.g., estructuras E4 y E5 o E6 y E7), se observa que tanto los datos de los ensayos mecánicos de erosión como de los de deformación permanente muestran tendencias similares entre los valores registrados, lo que sugiere que en dichas condiciones la influencia del espesor de la placa de concreto no es una variable determinante en el desarrollo de procesos de erosión. Es de destacar que en algunos de estos análisis los resultados de auscultación no-destructiva fueron algo inconsistentes, lo que impidió una comparación con los valores de los otros ensayos.

• En cuanto a la influencia de la frecuencia de aplicación de carga se observó que en las estructuras con material sin estabilizar caracterizadas por una placa de concreto 15 cm y sometidas a frecuencia media (E11) y baja (E12), la deformación permanente de la estructura sometida a frecuencia media (E11) presentó de forma



consistente mayores valores de magnitud y velocidad de crecimiento de la deformación permanente, en comparación con la estructura que sometida a frecuencia baja (E12). Sin embargo, estas diferencias no fueron notorias ni en los ensayos de erosión, en donde no se pudo distinguir diferencias significativas en la evolución del intervalo de desplazamiento por ciclo de carga, ni en las señales de respuesta de los sensores que hacen parte de la metodología de auscultación no-destructiva. Esto significa que, contrario a lo sugerido por las mediciones de deformación permanente, los dos ensayos mecánicos (erosión y auscultación) dan fe de la baja influencia que tiene esta variable en determinar la evolución del daño en el pavimento.

• En cuanto al impacto de la resistencia de las capas estabilizadas con cemento, para el caso de las estructuras con 25 cm de placas de concreto sometidas a una frecuencia media de carga y construidas con capas estabilizadas de resistencia baja (E2) y media (E6), se observó que ninguno de los tres ensayos permiten identificar diferencias significativas en los procesos de respuesta mecánica de las estructuras con el paso del número de ciclos.

Algo similar se observa en cuando se comparan los resultados de los tres ensayos para las estructuras E7 (resistencia media) y E8 (resistencia alta), las cuales cuentan con placas de concreto de 15 cm y fueron sometidas a una frecuencia de aplicación de carga media. En este segundo caso, los ensayos de erosión y de auscultación sugieren algunas diferencias en la magnitud del máximo desplazamiento de la señal de respuesta ante la aplicación de carga (ensayo de auscultación no-destructivo) y en el intervalo de desplazamiento por ciclo de carga a nivel de base (ensayo de erosión), lo que da muestras de las diferencias estructurales de los dos pavimentos por efecto del porcentaje de cemento empleado en la estabilización, pero no se observan diferencias en la variación de estos valores con el paso de los ciclos de carga. Adicionalmente, para estas dos (2) estructuras los resultados de deformación permanente no fueron concluyentes.

• De los análisis de la influencia que tiene el tipo de material empelado en la capa de base, se encontró que la estructura con base de material granular estabilizado con emulsión asfáltica (E9) presentó valores de deformación permanente y de intervalo de desplazamiento por ciclo de carga superiores a los de la estructura con base de mezcla asfáltica (E10). Además, el hecho de que estos dos parámetros aumentaron con el tiempo, sugieren que las dos estructuras presentan algún tipo de cambio en su interior. Como se ha explicado previamente, se cree que los aumentos en la magnitud y en la velocidad de crecimiento de estos dos (2) parámetros se deben a procesos mecánicos diferentes a los de erosión de las capas de base. Además, en los dos (2) ensayos los parámetros crecen o evolucionan de forma similar entre las dos (2) estructuras, lo que implica que no hay diferencias significativas causadas por el empleo de los materiales asfálticos mencionados.



Es de destacar, además, que en este caso los resultados de auscultación nodestructiva no fueron concluyentes en demostrar diferencias entre los dos materiales, pero si fueron claros en sugerir que uno hubo cambios estructurales significativos en ninguna de las dos estructuras con el paso del tiempo.

Finalmente, cuando se comparan los resultados de los tres (3) ensayos para la estructuras con placas de 15 cm de espesor sometidas a frecuencia media pero construidas con material granular sin estabilizar (E11) y material granular estabilizado con cemento de resistencia media (E7) y alta (E8), se observó que los procesos de erosión de la primera estructura se reflejan de forma evidente en las diferencias reportadas por los tres (3) ensayos (ensayos de erosión, deformación permanente, y auscultación no-destructiva), mientras que no se observan diferencias relevantes entre las otras dos estructuras (E7 y E8).

Como se puede observar, en los casos extremos en los que se cree que las estructuras desarrollaron procesos significativos de erosión o en aquellos en donde se cree que las estructuras presentaron resistencia a este fenómeno, los resultados entre los tres ensayos son bastante consistentes. Sin embargo, en las estructuras en donde las diferencias de la degradación que pueden haber sufrido las estructuras no son tan evidente, los tres (3) ensayos presentan resultados que pueden ser poco consistentes entre sí.

Es importante resaltar que uno de los objetivos del análisis realizado en esta sección era evaluar la posibilidad de determinar rangos de magnitud o tasa de crecimiento de la magnitud de la aceleración o desplazamiento máximos reportados por el acelerómetro en las pruebas de auscultación no-destructiva que pudieran ser indicadores confiables de la existencia de cavidades causadas por erosión en las juntas del pavimento. No obstante, esta tarea no se pudo realizar ya que, en general, se observó que los datos obtenidos de esta prueba son menos sensibles y más dispersos que los obtenidos a través de la medición registrada por sensores ubicados directamente al interior de la estructura. En este sentido, cambios en la aceleración o desplazamiento máximos de las señales de un acelerómetro ubicado en la superficie del pavimento a causa de la aplicación de una misma carga de impacto pueden implicar algún tipo de cambio al interior de la estructura, pero no es posible establecer con certeza cuándo dichos cambios están relacionados con procesos de erosión.



9. CONCLUSIONES

9.1. Conclusiones generales sobre el ensayo mecánico de erosión a escala real

El sistema experimental de erosión de pavimentos rígidos a escala real, que cuenta con subsistemas de aplicación de carga, de instrumentación y de adquisición y almacenamiento de datos, permitió llevar a cabo los ensayos sobre trece (13) estructuras de pavimento rígido y sobre sus respectivas réplicas. Al considerar que este ensayo es único en su tipo a nivel mundial, el hecho de haber logrado su apropiada implementación, puesta en funcionamiento y operación, es un logro significativo de este contrato de consultoría. En este sentido, este proyecto provee las bases técnicas para que en el futuro otros grupos de investigación, a nivel nacional o internacional, puedan reproducir este tipo de ensayos para realizar estudios de naturaleza similar.

Después de diseñar una metodología eficiente de procesamiento de la información obtenida de estos ensayos, se tomó la decisión de emplear dos (2) parámetros de evaluación de desempeño mecánico en cada una de las trece (13) estructuras analizadas: 1) la evolución de la diferencia o del intervalo de desplazamiento reportado en cada ciclo de carga por el sensor de desplazamiento ubicado a nivel de la capa de base (DC3), y 2) la evolución de la rigidez de la estructura, calculada a partir de los ciclos de histéresis de carga – con base en la carga aplicada en superficie (sensor CP) y en los desplazamientos medidos en la parte superior de la placa de concreto (sensor S2). Mientras que el primer parámetro se empleó para hacer un análisis comparativo entre todas las estructuras ensayadas, el segundo se empleó solamente para algunas estructuras seleccionadas. Una vez implementado el procedimiento de análisis, se procedió a evaluar la calidad y validez de la información obtenida en cada ensayo. Este análisis de depuración de información permitió identificar algunas estructuras que no proveían información confiable, debido a datos inusualmente bajos que fueron reportados por los sensores o a la alta presencia de ruido en los mismos. En dichos casos se tomó la decisión de excluir dichas estructuras de todo análisis posterior.

Una vez procesada y depurada la información, se procedió a realizar análisis comparativos entre todas las estructuras y, posteriormente, a evaluar el impacto individual de cada una de las variable de análisis en el desarrollo de procesos de degradación de las estructuras ensayadas (i.e., espesor de placa de concreto, frecuencia de aplicación de carga y tipo de material empleado en la capa de base). Las principales observaciones y conclusiones obtenidas a partir de estos análisis se presentan a continuación.

9.1.1. Influencia del tipo de material y del espesor de la losa de concreto

El impacto de emplear material granular sin estabilizar como capa de base en los pavimentos ensayados fue determinante en el desarrollo de procesos de erosión de las


estructuras de pavimento. Entre todas las variables evaluadas, la selección de este tipo de material demostró ser la condición más relevante para promover procesos de erosión, por encima del espesor de la placa de concreto o de la frecuencia de aplicación de carga.

No obstante, es de destacar que aun cuando todas las estructuras de pavimento que contaban con este material en su capa de base presentaron procesos de erosión significativos, las estructuras que tenían 5 cm menos en el espesor de la placa de concreto (i.e., estructuras con placas de 15 cm vs. estructuras con placas de 20 cm), mostraron un aumento de 75% en la velocidad de deterioro de la estructura y valores de intervalos de deformación de la capa de base por cada ciclo de carga 2 veces superiores a los registrados en el pavimento más robusto. En otras palabras, aunque la solución más eficiente para controlar los procesos de erosión en estos pavimentos consiste en modificar el tipo de material empleado para la capa de base, las diferencias señaladas previamente son una muestra del impacto evidente que tiene la resistencia estructural general del pavimento en la resistencia del mismo a desarrollar procesos de erosión.

Una vez se reemplaza el material granular sin estabilizar de la capa de base por un material granular estabilizado (con cemento o con materiales asfálticos), se observó una mejora inmediata no sólo en la resistencia estructural general del pavimento sino en su resistencia a los procesos de erosión. Sin embargo, bajo las condiciones de carga propias del ensayo mecánico realizado, en algunas oportunidades no fue posible establecer diferencias notorias entre el comportamiento de estructuras conformadas por capas de material granular estabilizado con diferentes resistencias o porcentajes de cemento. Los análisis específicos realizados para determinar la influencia de esta variable sugirieron que el empleo de material estabilizado con resistencias más altas tiende a proporcionar un leve aumento en la resistencia de la estructura misma a la erosión, aunque esta condición es sólo evidente para las estructuras de pavimento caracterizadas por placas de concreto de menor espesor y con material estabilizado de resistencias bajas o medias. Cuando la placa de concreto posee espesores importantes (superiores a 15 cm) o cuando la comparación se realiza entre capas de material granular estabilizado con cemento de resistencias medias y altas, tales diferencias son casi imperceptibles.

Los resultados obtenidos del sensor de desplazamiento ubicado a nivel de la capa de base para las estructuras conformadas con bases de material granular estabilizado con emulsión asfáltica o con mezcla asfáltica en caliente, indicaron un aumento general en el intervalo de los desplazamientos con el aumento del número de ciclos de carga. Aunque en otras estructuras aumentos en este parámetro se consideraron evidencia de procesos erosivos, en estas estructuras dicho aumento se cree que fue el resultado de cambios internos distintos a aquellos relacionados con procesos de erosión del pavimento.

Específicamente, se cree que la selección de una capa de base de 5 cm de espesor para estas estructuras generó que su resistencia estructural fuera significativamente menor a la de las estructuras que contaban con espesores de placa similares, pero con capas de base de material estabilizado con cemento de 15 cm de espesor. Esta condición puede explicar los



altos valores registrados para este sensor en comparación con los registrados para las estructuras con bases estabilizadas con cemento. Adicionalmente, durante el proceso constructivo de estas estructuras de pavimento se detectaron algunas deficiencias en los procesos de compactación, principalmente debido a las dificultades asociadas con la fabricación in-situ de la capa estabilizada con emulsión asfáltica y, con el control de la temperatura y homogeneidad del material en el caso de la mezcla en caliente. Dichas dificultades se deben a las condiciones y restricciones propias del espacio físico de la pista de prueba en donde se realizaron los ensayos.

Por estas razones, se cree que los aumentos registrados en los intervalos de desplazamiento por ciclo de carga en estas capas de base se deben a procesos de post-compactación y/o de deformación permanente en las capas de base y subbase de la estructura y no a procesos de erosión generados en el material de base. Esta afirmación se justifica, adicionalmente, mediante el hecho de que en la superficie del pavimento no se reportó la presencia de material asfáltico que hubiera sido expulsado del pavimento y a que los análisis realizados con el sensor de desplazamiento superficial S2 y con los ensayos de auscultación no-destructivos, muestran que no hubo variaciones significativas en la integridad estructural del pavimento durante la ejecución de los ensayos. En otras palabras, los análisis permiten confirmar que las estructuras compuestas por capas de material asfáltico no sufrieron procesos de erosión. Esta conclusión era la esperada, puesto que en la primera Fase de este proyecto se demostró que, entre todos los materiales evaluados, estos dos (2) materiales eran los que poseían menores índices de susceptibilidad a la erosión.

Con respecto al rol que tiene el espesor de la placa o losa de concreto en el potencial desarrollo de procesos de erosión, los resultados muestran que, típicamente, las estructuras que tenían menores espesores fueron más susceptibles a este tipo de deterioro. Sin embargo, esta condición se vio fuertemente afectada por el tipo de material empleado en la capa de base. Por ejemplo, y tal como se señaló en la primera conclusión, el impacto del espesor de la losa de concreto fue muy notorio en las estructuras en las que se empleó material granular sin estabilizar como capa de base. No obstante, para las estructuras con bases de material granular estabilizado con cemento, las diferencias fueron menos evidentes. Tal es el caso de las dos (2) estructuras sometidas a una frecuencia de aplicación de carga media, que estaban compuestas por capas de base de material granular estabilizado con cemento de resistencia media y losas de concreto de 15 y 20 cm de espesor, en donde no se pudieron determinar diferencias en la evolución de los procesos de degradación de las estructuras.

9.1.2. Influencia de la frecuencia de aplicación de carga

La aplicación de la carga en condiciones de frecuencia baja o media no demostró ser una variable relevante en la promoción de procesos de erosión. Incluso para el caso de las estructuras conformadas por capas de base de material granular sin estabilizar, las cuales fueron las más susceptibles a la erosión, no se observaron diferencias en el progreso de la erosión bajos estas dos condiciones de la frecuencia de aplicación de carga.



Es importante mencionar, sin embargo, que los resultados obtenidos de las estructuras ensayadas en condiciones de frecuencias de aplicación de carga alta sugirieron una condición algo más desfavorable, puesto que se detectó un aumento muy sutil en los procesos de degradación al interior del pavimento. Es de destacar que estos resultados son válidos únicamente para las condiciones específicas de frecuencia empleadas en el montaje experimental y que la influencia de esta variable podría ser más significativa bajo condiciones más agresivas de carga.

9.2. Conclusiones generales sobre la metodología propuesta para la auscultación nodestructiva de erosión en pavimentos en servicio y sobre las mediciones de deformación permanente de los pavimentos ensayados

En el caso de las deformaciones permanentes, éstas permitieron identificar, en su gran mayoría, el impacto individual de las distintas variables en la degradación de la estructura a través de los ensayos de carga dinámica. Específicamente, los ensayos permitieron cuantificar el aumento en la magnitud y tasa o velocidad de daño por acumulación de deformación permanente cuando el espesor de la losa de concreto disminuye o cuando el material empleado en la base no se estabiliza. Incluso, el método mostró resultados consistentes en algunos análisis en donde se evaluó el efecto de la resistencia de las capas de base granular estabilizada con diferentes porcentajes de cemento en su resistencia a la deformación permanente por causa de erosión. No obstante, los resultados no fueron igualmente consistentes en el caso del estudio de la influencia de la frecuencia de aplicación de carga, en particular para estructuras con altos espesores de placas de concreto o con material estabilizado con alto contenido de cemento. Este resultado es consistente con lo mencionado previamente de los resultados de los ensayos de erosión.

Así mismo, los resultados para las estructuras conformadas con mezclas asfálticas densas en frio y en caliente no fueron concluyentes, debido a que, como ya se describió, se reportaron altas deformaciones permanentes que se cree son consecuencias directas de deficiencias constructivas y estructurales del pavimento y no el resultado de procesos de erosión.

Por su parte, la metodología de auscultación no-destructiva propuesta, la cual se basa en el principio de identificar cambios en la señal de respuesta de un acelerómetro ubicado en cercanías a una zona donde se aplica una carga de impacto en diferentes momentos de la vida útil de la estructura, cuenta con varios elementos que la hacen atractiva para su empleo en campo. Estos elemento incluyen las siguientes condiciones: 1) emplea pocos componentes el principal de los cuales, la masa de impacto y la varilla guía, hacen parte de un ensayo estandarizado, 2) los componentes son relativamente livianos, lo que los hace fáciles de transportar, y 3) es versátil, pues su instalación es sencilla y el análisis de post-procesamiento no requiere conocimientos avanzados en técnicas de manejo de señales.



Los resultados obtenidos de estos ensayos permitieron concluir que el método es útil para identificar diferencias en la resistencia estructural o rigidez de pavimentos con diferentes características, como era de esperarse. No obstante, con excepción de algunos casos específicos, estos resultados no permitieron obtener conclusiones certeras sobre la capacidad de la técnica de diferenciar los cambios debidos a erosión sufridos durante los ensayos a escala real de estructuras con diferentes características. En general, y al igual que para el caso de las mediciones de deformación permanente, los resultados mostraron diferencias contundentes en estructuras con diferencias marcadas en algunas de sus propiedades (e.g., rigidez debido a cambios en el espesor de la losa de concreto o al tipo de material de base empleado), pero no mostraron ser versátiles en permitir la detección de procesos de erosión poco significativos.

Tal como se mencionó en la sección previa, se debe destacar que los resultados de estos ensayos fueron útiles para reforzar la hipótesis de que las altas magnitudes en las deformaciones permanentes y el aumento en los valores del intervalo de desplazamiento observado en los ensayos de erosión en las estructuras conformadas con bases de material asfálticos (emulsión o cemento asfáltico) son causadas por razones distintas a las de la erosión de la capa de base, pues para estas dos (2) estructuras se presentó la menor variación en los valores de aceleración y desplazamiento máximos de la señal capturada por el acelerómetro ante la aplicación de la carga de impacto.

Adicionalmente, la comparación de los resultados de estos ensayos con los resultados de los ensayos de erosión, no permitió establecer valores o límites confiables en los parámetros de análisis que permitieran afirmar con una mínima confiabilidad que el pavimento se encontraba desarrollando procesos erosivos. Además, se observó que los datos provistos por esta metodología son más dispersos y menos sensibles en comparación con los datos registrados por los sensores empleados en los ensayos mecánicos de erosión, localizados directamente sobre la capa de base de las estructuras. En conclusión, la metodología propuesta se presenta como una alternativa interesante para evaluar fenómenos de erosión en pavimentos en servicio, pero su implementación requiere de mayores estudios y potenciales ajustes que permitan un uso confiable de la misma.

9.3. Conclusiones generales sobre el modelo numérico de erosión de pavimentos rígidos

En cuanto al modelo numérico de erosión desarrollado como parte de este proyecto, los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas realizadas empleando la técnica de diferencias finitas e implementadas en Matlab permiten afirmar que las formulaciones realizados en cuanto al comportamiento mecánico e hidráulico de una estructura de pavimento rígido sometida a erosión son correctos, dado que son los esperados y/o observados en los ensayos a escala real. Es decir, el grupo de trabajo fue exitoso en realizar la Etapa 5 del proyecto, puesto que fue capaz de diseñar, implementar y aplicar un modelo numérico de erosión de pavimentos de concreto hidráulico. Si bien es difícil realizar una



comparación cuantitativa directa entre el modelo numérico y el comportamiento real de las estructuras, los resultados presentados anteriormente en este informe son interpretados como teóricamente apropiados.

Adicionalmente, de las simulaciones realizadas se pudo comprobar que:

- La respuesta mecánica e hidráulica de las placas de concreto obtenida a partir del modelo numérico es consistente con los ensayos a escala real, dadas las condiciones específicas del ensayo y los materiales empleados para la capa de base.
- La respuesta de la estructura cambia radicalmente con un aumento en el tamaño de las cavidades causadas por erosión. Específicamente, la deflexión de las placas cargada y vecina u opuesta aumenta a medida que el tamaño de la cavidad en la junta localizada entre las dos losas aumenta. Por lo tanto, el modelo desarrollado es eficiente para cuantificar la reducción estructural del pavimento causada por el progreso de procesos erosivos.
- La transferencia de carga entre la placa cargada y la capa de base se deteriora a medida que las cavidades crecen (i.e., a mayor erosión), dando lugar a mayores deflexiones de las placas de concreto.
- El modelo es consistente en cuanto a la simulación del impacto de distintos materiales de base, teniendo en cuenta diferentes magnitudes de carga y frecuencia de aplicación de carga. Los resultados arrojados en este sentido van de la mano con los arrojados tanto por el ensayo de mesa vibratoria (Fase I) como por los ensayos a escala real (Fase II).
- El modelo sugiere, al igual que lo observado para algunos de los ensayos a escala real, que un aumento en el espesor de la placa de concreto reduce la susceptibilidad de una estructura de pavimento rígido a la erosión. No obstante, dicha reducción es función del material específico empleado en la capa de base.
- La influencia de la frecuencia de aplicación de carga en la resistencia de la estructura a procesos erosión parece depender de las condiciones propias del pavimento. Esta afirmación podría explicar las diferencias que se observaron entre los resultados del ensayo a escala real y los resultados obtenidos en las simulaciones numéricas.

Indiscutiblemente, el modelo desarrollado demostró ser confiable para estudiar fenómenos de erosión y constituye una herramienta novedosa y versátil para predecir el impacto relativo de diferentes condiciones o escenarios en el potencial deterioro de una estructura de pavimento rígido por causa de este fenómeno.



10. RECOMENDACIONES

10.1. Recomendaciones generales

Con base en los resultados obtenidos a lo largo de este estudio, el equipo de trabajo sugiere las siguientes recomendaciones generales a tener en cuenta para prevenir los fenómenos de erosión en pavimento rígidos. Es de destacar que estas recomendaciones hacen referencia *exclusiva* a los materiales empleados en las dos fases de este proyecto. Para otro tipo de materiales, es necesario realizar nuevos estudios.

- En todos los proyectos de infraestructura vial en la ciudad que impliquen la • existencia o conformación de pavimentos de concreto hidráulico, es vital realizar una evaluación preliminar de las condiciones hídricas de la zona, así como de la cobertura, calidad y eficiencia de los sistemas de drenaje existentes. Tal como se explicó en este proyecto, los procesos de erosión se desarrollan principalmente cuando el agua libre tiene acceso a la estructura de pavimento. Aunque el desarrollo de fricción en la interface entre la placa de concreto y la capa base pueden también generar pérdida de material, ésta es una causa secundaria de este fenómeno de deterioro en comparación con la magnitud y velocidad de daño cuando existe agua involucrada en el proceso. Por esta razón, en aquellos casos en donde se observen condiciones hídricas muy desfavorables, se recomienda evaluar la construcción de obras de drenaje adicionales (e.g., de drenaje superficial y/o subdrenaje) o la adecuación y mejora de las obras existentes. Además, en todos los casos es crítico programar actividades de mantenimiento rutinario que incluyan el sellado de juntas, puesto que esta es la manera más eficiente de impedir el acceso del agua libre al interior del pavimento, y la limpieza de los sistemas de drenaje. Finalmente, la selección específica del material de base a emplear es una actividad crucial cuando las condiciones hídricas son desfavorables. Bajo estas condiciones, los diseñadores deben considerar no sólo la resistencia estructural debido a la carga mecánica a la que va estar sometido el pavimento, sino también la susceptibilidad a la erosión de los materiales seleccionados para la capa de base. Para ello, es importante tener en cuenta las recomendaciones descritas a continuación.
- Los resultados de los ensayos experimentales demuestran que, bajo condiciones hídricas desfavorables, pavimentos con placas de concreto de 15 cm sujetas a cargas intermedias con frecuencias de tráfico baja o media (tráfico circulando a velocidades bajas o intermedias) pueden desarrollar procesos de erosión severos. Esto hace suponer que pavimentos en vías sujetas a condiciones de tráfico bajo o medio (i.e. malla vial local o intermedia), que usualmente cuentan con espesores de placa de concreto en el rango de 10 a 15 cm, podrían estar expuestos a condiciones desfavorables para el desarrollo de estos procesos de deterioro. En estos casos, se recomienda evaluar el reemplazo del material convencional de base granular sin



estabilizar por un material estabilizado con cemento con resistencias aceptables (resistencia baja, media o incluso alta, según el nivel de tráfico y otras condiciones propias del proyecto). Alternativamente, se podría emplear una capa delgada de material granular estabilizado con emulsión asfáltica, si la viabilidad económica de usar este material demuestra ser favorable. En este caso, sin embargo, se sugiere el empleo de una capa granular de subbase adicional localizada bajo la capa de base estabilizada con emulsión asfáltica. En cualquier caso, no se recomienda su uso para niveles de tránsito intermedios o altos.

- En pavimentos sujetos a condiciones de carga exigentes (i.e., altas magnitudes y alta • frecuencia de aplicación de carga, típicamente en la red arterial o en las troncales del sistema de transporte masivo de la ciudad), se recomienda la conformación de capas de base con material ligado de muy alta resistencia a la erosión. Estos materiales incluyen capas de base granular estabilizada con altos porcentajes de cemento (8.8% o superior, para la granulometría y especificaciones del material granular empleados en este proyecto) o capas de mezcla asfáltica en caliente. Eventualmente, si el diseño de la estructura es muy robusto y las condiciones hídricas y de carga no son tan desfavorables (e.g., agresividad de los vehículos que circulan en el pavimento), se podría considerar el empleo de una mezcla asfáltica en frío (i.e., material granular con emulsión asfáltica). En el caso de materiales asfálticos, las capas podrían ser reducidas a espesores cercanos a los 5cm, pero se recomienda el empleo de, al menos, una capa adicional de subbase de muy buena calidad. En estos casos, las actividades de mantenimiento rutinario que incluyen limpieza de los sistemas de drenaje y sellado de juntas adquieren una relevancia particular puesto que permiten propender por la durabilidad de la estructura.
- Es de destacar que cuando se emplee material asfáltico para las capas de base, es necesario realizar un excelente control de calidad durante el extendido y construcción de las mismas. Aun cuando en estos pavimentos las capas de base no proveen un aporte significativo a la estructura, un buen proceso de compactación y que permita contar con un material homogéneo, apropiada densidad y de buena calidad general, evitará prevenir y controlar no sólo procesos erosivos sino también procesos de asentamientos diferenciales o de deformaciones permanente. Esta recomendación se sustenta en los resultados obtenidos de los ensayos de erosión en laboratorio realizados sobre los modelos físicos de pavimentos rígidos construidos con estos materiales, en donde se pudo evidenciar que si bien es muy poco probable que estas estructuras sufran procesos erosivos, su nivel de servicio se podría ver comprometido por otros factores relacionados, principalmente, con la calidad constructiva y con la resistencia estructural general de la estructura.
- Cuando las condiciones hídricas no sean desfavorables y se cuente con sistemas de drenaje apropiado, se puede reevaluar la selección del material a emplear para la capa de base. En pavimentos de la malla vial local, se puede considerar el empleo de material granular sin estabilizar de buena calidad y en la malla vial intermedia— dependiendo de la exigencia específica de carga de cada segmento vial—se podría considerar el empleo de capas de base granular estabilizadas con cemento de



resistencia media o alta, o capas estabilizadas con emulsión asfáltica. Aun cuando las condiciones hídricas no sean una preocupación, en los pavimentos pertenecientes a la malla vial arterial y la malla del sistema de transporte masivo, se considera una práctica saludable seleccionar siempre materiales que sean muy resistentes a la erosión.

Finalmente, es importante destacar que estas recomendaciones se realizan con base en los resultados obtenidos de las diversas actividades experimentales realizadas en las dos (2) fases de este proyecto. Sin embargo, los resultados de los ensayos de erosión a escala real presentados y analizados en este documento son sólo válidos para las condiciones específicas bajo las cuales se ensayaron los pavimentos.

Esto implica, por ejemplo, la presencia de condiciones hídricas desfavorables de forma permanente, una carga constante en la superficie de pavimento, niveles moderados de frecuencia de aplicación de carga (e.g., de 1 a 6 Hz) y la ausencia de pasadores, condición que afecta la magnitud de las deflexiones de las losas debido al aumento en la eficiencia de transmisión de carga entre placas. Este último aspecto es importante porque, tal como se demostró con el modelo numérico, una disminución en las deflexiones de la placa implica variaciones en las velocidades que adquiere el agua en la interface entre la parte inferior de la placa de concreto y la parte superior de la capa de base, lo que a su vez implica una variación en la magnitud de los esfuerzos cortante. Este conjunto de condiciones significa que, en tales casos, existe una menor probabilidad de que el agua pueda separar y arrastrar partículas del material de la capa de base. Por estas razones, es probable que al modificar algunas de las condiciones de los ensayos realizados en esta segunda fase del proyecto, cambien los resultados del impacto relativo a procesos de erosión de cada una de las variables analizadas. Aun así, se considera que las recomendaciones descritas con anterioridad son apropiadas para propender por estructuras de pavimento rígidos resistentes a procesos erosivos.

10.2. Comentarios a las especificaciones IDU vigentes

Con respecto a las especificaciones IDU vigentes que reglamentan el uso de materiales de capas de base de pavimentos rígidos, los resultados obtenidos en este proyecto permiten realizar las siguientes observaciones:

- Los ensayos realizados en las dos (2) fases de este proyecto demostraron de forma re-iterativa que los materiales granulares no ligados son muy susceptibles a la erosión. Dado que la especificación actual permite el uso de bases tipo BG_A hasta categorías de tránsito T3, se recomienda revisar esta clasificación para limitar su uso en proyectos con tránsitos no superiores a T1.
- La especificación actual permite el empleo de materiales de base estabilizados con cemento tipo GEC_ B o C sólo para tráficos T0 y T1. En este proyecto se empleó



material GEC_B Gr1 con tres tipos de resistencias a la compresión diferentes. Los resultados mostraron que los materiales bajo esta clasificación con alta resistencia (resistencia a la compresión a los 7 días de 3.8 Mpa, empleando 8.8% de cemento por peso de material) mostraron ser bastante resistentes a procesos erosivos, lo que podría sugerir su empleo para tránsitos intermedios. No obstante, hasta no determinar en detalle las condiciones y propiedades específicas del material que garanticen su desempeño adecuado ante procesos erosivos para proyectos relacionados con estos niveles de tránsito, no se considera apropiado sugerir cambios a la especificación actual.

- Con respecto al material de base granular estabilizado con emulsión asfáltica, la especificación actual permite el empleo de materiales tipo GEE_ A o B sólo para tránsitos T0 y T1. Basados en los resultados obtenidos en este estudio, se sugiere que, con estudios particulares que demuestren la no susceptibilidad del material a la erosión para los materiales disponibles y bajo las condiciones específicas de cada proyecto, se podría evaluar la posibilidad de permitir su empleo en tránsitos intermedios.
- Finalmente, en las dos fases de este proyecto se observó que las mezclas asfálticas en caliente tuvieron un excelente desempeño en relación con su resistencia a procesos de erosión. Por esta razón, se considera que las especificaciones actuales podrían permitir el uso de este material para todos los niveles de tránsito, de forma similar a lo que se permite para materiales granulares estabilizados con cemento asfáltico en caliente (MGEA_A o B). Es importante recalcar que se requiere un proceso constructivo cuidadoso de estas capas para garantizar un apropiado comportamiento del pavimento, tal como se mencionó en la primera sección de este capítulo.

Finalmente, el equipo de trabajo considera importante aclarar que esta recomendaciones se refieren exclusivamente con la protección de la capa de base a potenciales fenómenos de erosión. Sin embargo, adicional a esta condición, la estructura de pavimento debe incluir capas de base y subbase que satisfagan también los requerimientos mecánicos de cada proyecto.

11. ACTIVIDADES DE DIVULGACIÓN

Con el ánimo de divulgar el progreso y los resultados obtenidos de las actividades realizadas como parte de este proyecto a la comunidad académica y a la comunidad profesional (de la industria y el estado), se realizaron diversas presentaciones de carácter técnico, cuyas referencias bibliográficas se presentan a continuación:

- 1. Medina, E., Caro, S., Caicedo, B., Monroy, J. and Beltrán, D. (2013). "Análisis de la Información Obtenida de Sistemas de Instrumentación de Pavimentos en la Ciudad de Bogotá". XIX Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos. Bogotá, Colombia.
- Caro, S., (2014) "Avances en la caracterización del impacto que tienen las condiciones climáticas en el desempeño de estructuras de pavimento". XXIV Congreso Nacional y XII Congreso Internacional de Estudiantes y Profesionales de Ingeniería Civil. Bogotá, Colombia.
- 3. Caro, S., Caicedo, B., Monroy, J., Varela, D., Hernandez, M.A., Wills, J., Beltrán, D., Velásquez, O. (2015) "Trabajos recientes sobre el estado de la infraestructura en la ciudad de Bogotá: Estudio de la susceptibilidad a la erosión de bases empleadas en pavimentos rígidos". Encuentro sobre Avances en Mejoramiento de Materiales para Infraestructura Vial Universidad Militar Nueva Granada. Cajicá, Colombia.
- Caro, S., Caicedo, B., Varela, D., Monroy, J., Wills, J., Hernandez, María A., Velásquez, O., and Beltrán, D. (2015) "Experimental Evaluation of Erosion Processes in Rigid Pavements". ASCE-Airfield and Highway Pavement Conference 2015. Miami, FL.
- Caro, S., Caicedo, B., Varela, D., Hernández, M.A., Monroy, J., Wills, J. and Velásquez, O. (2015) "Evaluación del Fenómeno de Erosión en Pavimentos Rígidos Mediante Ensayos a Escala Real". XX Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos. Santa Marta, Colombia.

Es de destacar que las últimas dos conferencias estuvieron acompañadas de artículos, los cuales contaron con la evaluación técnica de pares y quedaron registrados en las memorias de dichos eventos. Estos artículos pueden ser consultados en el Anexo 2. De hecho, es de destacar que el último artículo fue seleccionado para publicación en la última edición de la revista técnica Asfaltos y Pavimentos, la cual es administrada por Corasfaltos.



Adicionalmente, la Universidad realizó una presentación a los funcionaros del IDU, la cual se puede observar en el Anexo 3 de este informe, a la cual asistieron los funcionarios de la entidad. El Anexo 4 presenta la hoja de asistencia al evento en mención.

En conclusión, el equipo de trabajo considera que las actividades de divulgación desarrolladas como parte del proyecto excedieron las inicialmente programadas y las requeridas contractualmente. Esperamos que estas actividades sean de utilidad para expandir el conocimiento sobre el tema y para crear conciencia en los profesionales del área sobre la importancia que tiene la prevención de los fenómenos de erosión para garantizar la durabilidad de las estructuras de pavimento que hacen parte de la red vial de la ciudad. Finalmente, para facilitar la divulgación futura del proyecto por parte del IDU, adjunto a este informe se entrega un archivo digital con la información aquí presentada (Anexo 5).



12. BIBLIOGRAFÍA

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.

Huang, Y. H. (1998). Pavement Analysis And Design

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.

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.

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.

Akky, M. R. (1974) Erodability of Soil-Cement. Department of Civil Engineering. Ph.D dissertation. Davis, California (USA) University of California at Davis.

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.

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.

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.

Sansalone, M. (Noviembre - Diciembre de 1997). Impact-Echo: The Complete Story. ACI Structural Journal, 94(6), 777-786

Sarria Molina, A. (2004). *Investigación no destructiva y cargas extremas en estructuras* (Primera ed.). Bogotá, Colombia: Ediciones Uniandes.



ANEXOS