



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

Informe: LM-PI-UMP-087-R1

DISEÑO DE MATERIALES GRANULARES ESTABILIZADOS CON ASFALTO ESPUMADO

Preparado por:

Unidad de Materiales y Pavimentos

San José, Costa Rica

Diciembre, 2018

Documento generado con base en el Art. 6, inciso g) de la Ley 8114 y lo señalado en el Cap. IV, Art. 66 Reglamento al Art. 6 de la precitada ley, publicado mediante decreto DE-37016-MOPT.

Preparado por: Unidad de Materiales y Pavimentos del PITRA-
LanammeUCR jose.aguiar@ucr.ac.cr



1. Informe LM-PI-UMP-087-R1		2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: DISEÑO DE MATERIALES GRANULARES ESTABILIAZADOS CON ASFALTO ESPUMADO		4. Fecha del Informe Diciembre, 2018
7. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
8. Notas complementarias		
9. Resumen Una condición necesaria para garantizar un buen desempeño y eficiencia de los materiales componentes de estructuras de pavimento, es contar con procedimientos de laboratorio para el diseño y evaluación del desempeño que logren ser representativos de las condiciones reales a las que será sometido el material. Así mismo, el mejoramiento de materiales de baja calidad o subproducto de procesos de intervenciones en carreteras para ser reutilizados y reciclados, toma cada vez más auge por razones ambientales y económicas al escasear las fuentes de materiales. Recientemente en Costa Rica se ha valorado el uso de asfalto espumado para la estabilización de materiales granulares y capas asfálticas recicladas como alternativa para la rehabilitación en rutas de alto volumen de tránsito. Uno de los retos para la correcta implementación de esta técnica es el desarrollar una metodología de diseño y de especificaciones para el aseguramiento de la calidad que discrimine acertadamente los materiales que tendrán un comportamiento adecuado de los que no, tomando en cuenta las condiciones climáticas propias del país, caracterizados por humedad y precipitaciones altas en muchas de las regiones. La siguiente investigación busca proponer elementos para desarrollar una guía y especificaciones técnicas de diseño en laboratorio para materiales granulares estabilizados con asfalto espumado.		
10. Palabras clave Materiales granulares, asfalto espumado, estabilización, diseño	11. Nivel de seguridad: Ninguno	12. Núm. de páginas 84
13. Preparado por:		
Ing. Andrea Ulloa Calderón Investigador Unidad de Materiales y Pavimentos	Bach. Juan Carlos Múnera Miranda Investigador Unidad de Materiales y Pavimentos 	Walter Ramírez Villalobos Investigador Unidad de Materiales y Pavimentos 
Fecha: 06 / 12 / 18	Fecha: 06 / 12 / 18	Fecha: 06 / 12 / 18
14. Revisado por:		
Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph.D Coordinador Unidad de Materiales y Pavimentos	15. Revisado por: Ing. Fabián Elizondo Arrieta Subcoordinador PITRA	16. Aprobado por: Ing. Guillermo Loría Salazar, Ph.D Coordinador General PITRA
Fecha: 06 / 12 / 18	Fecha: 06 / 12 / 18	Fecha: 06 / 12 / 18



TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
RESUMEN EJECUTIVO	9
1. INTRODUCCIÓN.....	10
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	11
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
1.3 ANTECEDENTES	11
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	13
2. MARCO TEORICO.....	16
2.1. BASES ESTABILIZADAS CON ASFALTO (BEA).....	16
2.2. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS.....	17
2.3. MECANISMOS DE FALLA	17
2.4. CLASIFICACIÓN	18
2.5. REQUERIMIENTOS DE LOS COMPONENTES DE MEZCLA	19
2.5.1. <i>MATERIALES GRANULARES</i>	19
2.5.2. <i>ASFALTO ESPUMADO</i>	22
2.5.3. <i>RELLENO MINERAL (FILLER)</i>	24
2.5.4. <i>AGUA PARA MEZCLADO Y COMPACTACIÓN</i>	24
2.6. SELECCIÓN DEL TIPO DE AGENTE ESTABILIZADOR	25
2.7. DISEÑO DE MEZCLA	25
2.7.1. <i>ENSAYOS PRELIMINARES Y NIVELES DE DISEÑO</i>	25
2.7.2. <i>PREPARACIÓN DE ESPECÍMENES DE ENSAYO</i>	29
2.7.3. <i>CALIBRACIÓN DEL ASFALTO ESPUMADO</i>	29
2.7.4. <i>MEZCLADO Y COMPACTACIÓN DE ESPECÍMENES DE ENSAYO</i>	32
2.7.5. <i>CURADO</i>	34
2.7.6. <i>CONDICIONES DE HUMEDAD A CONSIDERAR EN EL DISEÑO: HUMEDAD DE EQUILIBRIO</i>	35
2.8. ENSAYOS MECÁNICOS	39
2.8.1. <i>RESISTENCIA A LA TENSIÓN INDIRECTA (ITS)</i>	39
2.8.2. <i>ENSAYO DE MÓDULO DE RESILIENTE DE MATERIALES GRANULARES</i>	40



2.8.3. ENSAYO DE TRIAXIAL ESTÁTICO 41

2.8.4. DEFORMACIÓN PERMANENTE (N , ϵ_p) 42

 2.8.4.1 Determinación de los parámetros y coeficientes del modelo 43

3. RESULTADOS DE DISEÑO 47

 3.1 RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO..... 47

 3.2 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES 47

 3.2.1 MATERIAL GRANULAR 47

 3.2.2 ASFALTO 48

 3.2.1 DETERMINACIÓN DE LA EXPANSIÓN Y VIDA MEDIA DE ASFALTO ESPUMADO..... 49

 3.4 RELACIÓN DENSIDAD-HUMEDAD 50

 3.5 REQUERIMIENTO DE RELLENO MINERAL ACTIVO 51

 3.6 DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD MÍNIMA DEL RELLENO MINERAL ACTIVO..... 52

 3.7 CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO RESIDUAL NIVEL DE DISEÑO 1 53

 3.8 CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO RESIDUAL NIVEL DE DISEÑO 2 55

 3.9 NIVEL DE DISEÑO 3..... 57

4. RESULTADOS DE DESEMPEÑO 66

5. CONCLUSIONES..... 71

5. RECOMENDACIONES 73

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 74

ANEXO A 77



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. LIGADURA ENTRE EL ASFALTO Y EL AGREGADO (ASPHALT ACADEMY, 2009)	16
FIGURA 2. REQUERIMIENTOS GRANULOMÉTRICOS (WIRTGEN GMBH, 2012).....	22
FIGURA 3. PRODUCCIÓN DE ASFALTO ESPUMADO (WIRTGEN GMBH, 2012).....	23
FIGURA 4. SELECCIÓN DEL TIPO DE ESTABILIZACIÓN SEGÚN INFORME (ÁVILA & ULLOA, 2017).....	25
FIGURA 5. DIAGRAMA DE FLUJO DISEÑO EN LABORATORIO DE BEA (COLLINGS, Y OTROS, 2009).....	28
FIGURA 6. PREPARACIÓN DE MATERIALES.	29
FIGURA 7. CÁMARA DE EXPANSIÓN PARA ESPUMAR EL ASFALTO (EQUIPO WLB 10S).....	30
FIGURA 8. PUNTOS DE SOLDADURA (EQUIPO WLB 10S).....	30
FIGURA 9. CALIBRACIÓN DEL ASFALTO ESPUMADO (WIRTGEN GMBH, 2012).....	31
FIGURA 10. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE AGUA PARA ESPUMAR (WIRTGEN GMBH, 2012).....	32
FIGURA 11. MEZCLADOR DE PALETAS (EQUIPO WLM 30).....	33
FIGURA 12. CURADO DE ESPECÍMENES.	35
FIGURA 13. VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL CON EL CURADO EN EL TIEMPO (EBELS & JENKINS, 2007).....	36
FIGURA 14. VALORES PROMEDIO DE TMI PARA COSTA RICA (PERERA, 2015).....	37
FIGURA 15. VALORES PROMEDIO DE TMI PARA SUDÁFRICA (PERERA, 2015).....	38
FIGURA 16. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO RESIDUAL (WIRTGEN GMBH, 2012).....	39
FIGURA 17. TRIAXIAL DINÁMICA	41
FIGURA 18. EQUIPO TRIAXIAL PARA RESISTENCIA AL CORTE.....	42



FIGURA 19. DIFERENTES TIPOS DE COMPORTAMIENTO DE DEFORMACIÓN PERMANENTE, DEPENDIENDO DEL NIVEL DE ESFUERZO. (DAWSON, WERKMEISTER, & WELLNER, 2005)..... 46

FIGURA 20. CURVA GRANULOMÉTRICA 48

FIGURA 21. DETERMINACIÓN DE LA EXPANSIÓN Y VIDA MEDIA A 160°C 50

FIGURA 22. DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN DENSIDAD-HUMEDAD DEL MATERIAL SIN ESTABILIZAR 51

FIGURA 19. VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE DISEÑO CON RESPECTO AL CONTENIDO DE RELLENO MINERAL ACTIVO EN LA MEZCLA..... 53

FIGURA 24. VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE DISEÑO CON RESPECTO AL CONTENIDO DE ASFALTO RESIDUAL EN LA MEZCLA NIVEL DE DISEÑO 1..... 54

FIGURA 25. VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE DISEÑO CON RESPECTO AL CONTENIDO DE ASFALTO RESIDUAL EN LA MEZCLA NIVEL DE DISEÑO 2..... 57

FIGURA 26. RESULTADOS DEL ENSAYO DE RESISTENCIA AL CORTE..... 58

FIGURA 27. ENVOLVENTE DE FALLA..... 58

FIGURA 28. MR ACTUAL VS MR PREDICHO (MATERIAL ESTABILIZADO)..... 62

FIGURA 29. VARIACIÓN DEL MR VS ESFUERZO BRUTO (MATERIAL ESTABILIZADO). 62

FIGURA 30. MR ACTUAL VS MR PREDICHO (MATERIAL SIN ESTABILIZAR)..... 65

FIGURA 31. VARIACIÓN DEL MR VS ESFUERZO BRUTO (MATERIAL SIN ESTABILIZAR)..... 65

FIGURA 32. DEFORMACIÓN PERMANENTE A 729, 850 Y 972 KPA DE ESFUERZO DESVIADOR 66

FIGURA 33. E_p ACTUAL VS E_p PREDICHO (MATERIAL ESTABILIZADO) 69

FIGURA 34. DESEMPEÑO DEL MATERIAL EN FUNCIÓN DE LA DEFORMACIÓN PERMANENTE, LA RELACIÓN DE ESFUERZOS DESVIADORES Y EL NÚMERO DE CICLOS DE CARGA..... 70



ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. INDICADORES PARA CLASIFICACIÓN DE BEA PARA MATERIAL SIN ESTABILIZAR (WIRTGEN GMBH, 2012)	19
TABLA 2. GRADUACIÓN RECOMENDADA PARA MATERIAL GRANULAR SIN ESTABILIZAR (WIRTGEN GMBH, 2012)	20
TABLA 3. ESPECIFICACIONES PARA ASFALTO ESPUMADO (WIRTGEN GMBH, 2012)	23
TABLA 4. ESTIMACIÓN DE PORCENTAJE TEÓRICO DE ASFALTO RESIDUAL ÓPTIMO (WIRTGEN GMBH, 2012)	33
TABLA 5. VALORES DE ITS RECOMENDADOS (WIRTGEN GMBH, 2012)	40
TABLA 6. RANGO DE MÓDULO RESILIENTE PARA BEA (WIRTGEN GMBH, 2012) ...	40
TABLA 7. VALORES RECOMENDADOS PARA COHESIÓN Y ÁNGULOS DE FRICCIÓN (WIRTGEN GMBH, 2012)	41
TABLA 8. RELACIONES DE ESFUERZO DESVIADOR PARA UNA DEFORMACIÓN MÁXIMA DE 10 MM EN CAPAS DE BEA	46
TABLA 9. GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL ENSAYADO	47
TABLA 10. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE BASE	49
TABLA 11. RESULTADOS DEL ENSAYO DE PENETRACIÓN AL ASFALTO ORIGINAL M-2022-14	49
TABLA 11. REQUERIMIENTO DE RELLENO MINERAL ACTIVO	52
TABLA 12. CONTENIDO DE RELLENO MINERAL ACTIVO	52
TABLA 13. CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO RESIDUAL NIVEL DE DISEÑO 1	54
TABLA 15. RESUMEN DE PARÁMETROS Y RESULTADOS DEL CÁLCULO DE LAS ECUACIONES EMC	55
TABLA 16. CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO RESIDUAL NIVEL DE DISEÑO 2	56
TABLA 16. RESUMEN DE RESULTADOS ENSAYOS DE TRIAXIAL	59
TABLA 17. RESUMEN DE MR (ESTABILIZADO).....	60

Informe LM-PI-UMP-054-R3	Fecha de emisión: 06 de December de 2018	Página 7 de 84
--------------------------	--	----------------



TABLA 18. RESULTADOS DE LA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE, PARA EL MÓDULO RESILIENTE DEL MATERIAL ESTABILIZADO, OBTENIDOS DESDE LA HOJA DE CÁLCULO (EXCEL)..... 61

TABLA 19. RESUMEN DE RESULTADOS DE CONSTANTES, PARA MR DEL MATERIAL SIN ESTABILIZAR..... 61

TABLA 20. RESUMEN DE MR (SIN ESTABILIZAR)..... 63

TABLA 21. RESULTADOS DE LA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE, PARA EL MATERIAL SIN ESTABILIZAR OBTENIDOS DESDE LA HOJA DE CÁLCULO (EXCEL)..... 64

TABLA 22. RESUMEN DE RESULTADOS DE CONSTANTES, PARA MR DEL MATERIAL SIN ESTABILIZAR..... 64

TABLA 24. RANGOS DE DEFORMACIÓN PARA CADA ESFUERZO DESVIADOR APLICADO (VALORES OBSERVADOS)..... 67

TABLA 25. RANGOS DE DEFORMACIÓN PARA CADA ESFUERZO DESVIADOR APLICADO (VALORES PREDICHOS) 67

TABLA 26. RESULTADOS DE LA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE, PARA EL MATERIAL ESTABILIZADO 68

TABLA 27. RESUMEN DE RESULTADOS DE CONSTANTES, PARA E_p DEL MATERIAL ESTABILIZADO 68



RESUMEN EJECUTIVO

En este informe como parte de las técnicas de rehabilitación o construcción nueva, se estudia el uso del asfalto espumado (un material innovador en el país), para el mejoramiento de pavimentos que presentan un deterioro considerable en capas de ruedo asfálticas, o en la conformación de capas de base granular estabilizadas que deban proveer una mayor resistencia en la estructura del pavimento.

Se proponen elementos necesarios para elaborar una guía de diseño que permita la obtención de un material que cumpla con un adecuado desempeño ante las cargas del tránsito proyectadas, mediante valores de especificación para la aceptación del diseño a nivel de laboratorio.

Por razones ambientales y económicas los recursos disponibles para la construcción de carreteras son cada vez más escasos, por lo que la reutilización de los materiales existentes toma cada vez más importancia.

Siguiendo esta línea en Costa Rica el uso de la técnica de estabilización con asfalto espumado en materiales granulares y capas asfálticas recicladas como alternativa para la rehabilitación en rutas de alto volumen de tránsito, ha empezado a considerarse dentro de las opciones por parte de la Administración y las empresas constructoras. Por ello, es necesario una correcta implementación de esta técnica a través de una metodología de diseño y de especificaciones que aseguren la calidad, y que permitan discriminar acertadamente los materiales que tendrán un comportamiento adecuado de los que no, tomando en cuenta las condiciones climáticas propias del país.

Teniendo como insumo contenidos de asfalto espumado, filler activo y humedades óptimas se buscó finalmente proveer un modelo de desempeño que determinara la susceptibilidad al daño por deformación permanente, siendo este su principal forma de falla.



1. INTRODUCCIÓN

Recientemente en Costa Rica se ha valorado el uso de emulsiones asfálticas o asfaltos espumados para la estabilización de materiales granulares y capas asfálticas recicladas como alternativa de mejoramiento y rehabilitación en rutas desde bajo, medio e incluso alto volumen de tránsito.

Para el buen desempeño y durabilidad de los materiales componentes dentro de una estructura de pavimento es necesario contar con procedimientos de laboratorio para el diseño, que además sean representativos de las condiciones reales a las que será sometido el material. Así mismo el mejoramiento de materiales o subproducto de procesos de intervenciones en carreteras para ser reutilizados y reciclados toma cada vez más vigencia por razones ambientales y económicas al escasear las fuentes de materiales.

Es por ello que esta investigación busca proponer los elementos necesarios para elaborar una guía de diseño y especificaciones donde los materiales desarrollen su mayor potencial al ser colocados como capa de base y sean tomadas en cuenta las condiciones climáticas propias del país; las cuales se caracterizan por alta precipitación y humedad en muchas zonas durante periodos largos del año.

En las fases iniciales se llevaron a cabo los diseños del material estabilizado para la obtención del contenido óptimo de filler activo y asfalto residual, mediante dos métodos de compactación: usando compactador Marshall y mediante el compactador giratorio. Posterior a esto, la siguiente fase consistió en realizar los ensayos de resistencia retenida a la tensión indirecta y módulo resiliente. En la penúltima etapa del estudio se realizaron ensayos de verificación del ensayo triaxial a los esfuerzos propuestos en la bibliografía investigada en las fases previas, y con lo cual discriminar mejor el desempeño que se tendrá en campo. Como parte de los ensayos innovadores en la última fase se buscó medir la susceptibilidad del material ante la deformación permanente, dado que se entiende que éste sea el principal modo de falla para este tipo de materiales.



1.1 Objetivo general

Establecer una metodología de diseño en laboratorio para estabilización de materiales granulares con asfalto espumado.

1.2 Objetivos específicos

- Realizar un estudio bibliográfico con el fin de conocer los procedimientos de ensayo, parámetros de diseño y desempeño.
- Muestrear y caracterizar una fuente de material granular y de asfalto para llevar a cabo los ensayos de diseño y desempeño.
- Proponer especificaciones técnicas que conlleven a un adecuado desempeño de los materiales granulares estabilizados con asfalto espumado.
- Implementar la metrología de diseño mediante la realización de ensayos de laboratorios con el material muestreado y definir los contenidos óptimos de dosificación.
- Evaluar el principal modo de falla en este tipo de materiales mediante la aplicación de ensayos de desempeño (deformación permanente).
- Observar si es posible, la respuesta del material estabilizado ante condiciones normales de servicio en campo a través de un tramo de prueba.
- Proponer una guía de diseño en laboratorio para estabilización de materiales granulares con asfalto espumado.

1.3 Antecedentes

El reciclaje en frío de pavimentos in situ utilizando asfalto espumado es una técnica de construcción que recupera el pavimento flexible envejecido, añadiendo simultáneamente agentes estabilizadores para mejorar las propiedades del material recuperado (Gonzalez, Cubrinovski, Pidwerbesky, & Alabaster, 2012), y fue implementado desde hace más de 30 años en países como Sudáfrica y Estados Unidos. Y desde entonces, se han propuesto diferentes metodologías de diseño para este tipo de material, las cuales tienen como común denominador, el ensayo de los materiales para evaluar su comportamiento con respecto a la resistencia, durabilidad, fatiga, deformación permanente y trabajabilidad.

El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers, 1984) utiliza una guía de diseño para estabilización de suelos para pavimentos, en la cual



incluye la estabilización con asfalto ya sea en forma de cemento asfáltico, asfalto rebajado o asfalto emulsificado. Esta guía recomienda una serie de granulometrías para base y sub-base aptas para estabilización con asfalto (Asphalt Academy, 2009).

La Academia del Asfalto (Asphalt Academy, 2009) presenta una guía de diseño y construcción para materiales estabilizados con emulsión asfáltica y asfalto espumado. Esta guía da una serie de pautas a la hora de seleccionar los materiales adecuados para la estabilización con asfalto, como lo es la granulometría y el índice de plasticidad. También se considera la adición de cemento o cal en cantidades inferiores al 1,0 % para mejorar el desempeño de la mezcla. Para el diseño en laboratorio, se establecen tres niveles de diseño, según las cargas de tránsito a las que va a estar expuesto el pavimento. En laboratorio se realizan ensayos de densidad-humedad para determinar el contenido óptimo de humedad. Para el nivel 1, se elaboran especímenes por medio de compactación Marshall a diferentes porcentajes de residuo asfáltico. Los mismos se curan y se realiza la volumetría y se mide la resistencia a la tensión indirecta, para evaluar la adherencia entre el asfalto y el agregado en condiciones de humedad, y determinar un contenido óptimo de asfalto. Para el nivel 2, se cambia el tipo de compactación Marshall a compactación vibratoria o giratoria y se varían las condiciones de curado para los especímenes previo al ensayo de resistencia a la tensión indirecta. En el nivel 3, se hace el ensayo triaxial con las condiciones de compactación y curado del nivel 2 para evaluar la resistencia al cortante y al daño por humedad.

El Departamento de Transportes de Pensilvania (Pennsylvania Department of Transportation, 2012) elaboró una guía de diseño y construcción para bases estabilizadas con emulsión o asfalto espumado utilizando materiales reciclados en frío (Full Depth Reclamation). Esta categoría de reciclado es típicamente aplicada como una medida para tratar estructuras de pavimentos deterioradas (rehabilitación) compuestas por bases granulares y superficies asfálticas delgadas, cuyo deterioro implica agrietamiento severo de las capas asfálticas, capas granulares deformadas, caminos con gran cantidad de bacheos, y alto desprendimiento de agregados. En lo que respecta al diseño en laboratorio, se establece un contenido de finos e índice de plasticidad máximo. Adicionalmente, se especifica una granulometría y equivalente de arena adecuado para el material reciclado. Se define el contenido óptimo de humedad según el ensayo de relación densidad-humedad (Próctor modificado) y el contenido de finos. Con base en lo anterior, se elaboran

Informe LM-PI-UMP-054-R3	Fecha de emisión: 06 de December de 2018	Página 12 de 84
--------------------------	--	-----------------



especímenes por medio de compactación giratoria y se procede a realizar volumetría sobre especímenes compactados, así como ensayos de resistencia a la tensión indirecta sobre especímenes acondicionados y sin acondicionar, módulo resiliente, cohesión (short term strength), desprendimiento (raveling), y agrietamiento térmico (IDT) a diferentes contenidos de asfalto. Se establece un contenido óptimo de asfalto espumado según el cumplimiento de especificaciones mínimas de los ensayos antes mencionados.

1.4 Justificación

El desempeño a largo plazo de las estructuras de pavimento depende frecuentemente de la estabilidad de las capas de suelo subyacentes. El diseño de pavimentos asume que cada capa tiene una calidad estructural específica mínima para soportar y distribuir las cargas impuestas. Estas capas deben resistir deformación permanente excesiva y cortante, en aras de reducir las probabilidades de deformación y agrietamiento en las capas superiores.

No obstante, los materiales de calidad necesarios para cumplir estos requerimientos no se encuentran siempre disponibles, por lo que es necesario mejorar alguna de sus propiedades físicas, químicas o mecánicas. Este objetivo se puede alcanzar en la mayoría de los casos con la estabilización física o química de estos suelos. Los costos para trasladar el material adecuado en muchas ocasiones son elevados, lo cual ha promovido el desarrollo de técnicas de estabilización que permitan utilizar los recursos localmente disponibles. Algunas veces, las resistencias y otras propiedades solicitadas pueden obtenerse de un material local “marginal”, a través de la adición de pequeñas cantidades de agentes estabilizadores a un costo relativamente bajo. Estas técnicas son aplicables tanto al reciclado como a nuevas construcciones.

La estabilización implica incrementar o mantener la estabilidad y otras propiedades de ingeniería. El asfalto espumado es empleado como un tipo de estabilización física, que puede ser utilizada como un medio para proveer más cohesión a materiales granulares no plásticos, además de reducir la pérdida de estabilidad de daño por humedad. El proceso es más exitoso para materiales granulares que para suelos cohesivos, sin embargo, la estabilización con asfalto espumado es usada principalmente en bases granulares y su uso es menos extendido en materiales de sub-base. El asfalto espumado es más un agente estabilizador físico puesto que no reacciona químicamente con el suelo para alterar la química superficial o unir las partículas, sino más bien, impermeabiliza las partículas de



agregado o suelo recubriéndolas y desarrollando una unión adhesiva entre las partículas y el asfalto.

La implementación de materiales granulares estabilizados con asfalto espumado con la combinación de cantidades pequeñas de cemento o cal (máximo a 1%), cuando es requerido, tiene la ventaja de incrementar la cohesión y reducir la susceptibilidad al daño por humedad. Utilizando este tipo de agente estabilizador, inclusive con materiales de calidad deficiente para la construcción de pavimentos, se mejora el desempeño de forma significativa.

Entre las principales ventajas de estabilizar materiales granulares con asfalto espumado se tiene:

- Proveer de una superficie temporal o permanente para caminos de bajo volumen.
- Proveer de una plataforma estable para actividades de construcción.
- Mejorar condiciones pobres en la sub-base.
- Mejoramiento de materiales marginales para base.
- Control de polvo.
- Impermeabilización de la capa estabilizada.
- Rescatar caminos viejos con materiales marginales.
- Construir bases de desempeño superior.
- Mejorar la resistencia, reducción de espesores requeridos.
- Mejorar la durabilidad.
- Mejorar la trabajabilidad.
- Conservación y manejo más eficiente de las fuentes de agregado.
- Reducción de costos de acarreo.
- Conservación de la energía de manera más eficiente y amigable con el ambiente.

En Costa Rica aún no se tiene experiencia en el uso de este tipo de agente estabilizadores, dado que el cemento ha tenido mucho auge, a pesar de que, sin un adecuado diseño, cantidades excesivas de cemento pueden provocar contracción, lo cual se manifiesta como agrietamiento en bloque de la capa cuando se somete a cargas repetidas. Por otra parte, los materiales ligados con asfalto tienden a ser más flexibles, con mejores propiedades elásticas, cuya falla se presenta como deformación bajo carga máxima.



Actualmente en el país se carece de una guía de diseño para bases estabilizadas con asfalto espumado y de especificaciones para aseguramiento de su calidad. Por otro lado, se tiene poca experiencia en la utilización de este tipo de estabilizadores. La trabajabilidad del asfalto espumado en campo dependerá de la calibración de la temperatura y flujo de agua en la espumación del asfalto, con ello también la durabilidad y la resistencia del suelo granular estabilizado. Es de suma importancia, por lo tanto, realizar la respectiva calibración del asfalto espumado en laboratorio y su verificación antes de ser aplicado en el proyecto.

La construcción de una base estabilizada con asfalto espumado junto con la colocación de un sello impermeabilizante sobre esta, es una alternativa de bajo costo para mantener en buenas condiciones los caminos de bajo; en rutas de medio a alto volumen se puede colocar como capa de ruedo una carpeta asfáltica de mejor calidad.

2. MARCO TEORICO

2.1. Bases estabilizadas con asfalto (BEA)

Los materiales estabilizados con asfalto son materiales sometidos a un tratamiento con emulsión asfáltica, asfalto espumado o asfalto en caliente, para aumentar su resistencia al corte y reducir la susceptibilidad al daño por humedad. Los materiales sometidos a este tratamiento son generalmente materiales granulares, materiales tratados previamente con cemento, mezclas asfálticas recuperadas (RAP) e inclusive pavimento recuperado que incluya capas subyacentes y/o materiales tratados para formar una nueva base o sub-base.

La técnica de estabilización de materiales granulares consiste en el mejoramiento de las propiedades mecánicas del material por medio de la dispersión del asfalto entre las partículas más finas de agregado. Cuando se aplica asfalto espumado, éste se dispersa preferentemente entre las partículas más finas, pero no exclusivamente, ya que algunas partículas más gruesas son parcialmente recubiertas. Con las emulsiones asfálticas, se da una unión química entre el agregado y el asfalto promovido por el emulsificante. Sin embargo, cuando se emplea asfalto espumado, éste se dispersa exclusivamente entre las partículas más finas, produciendo "puntos de soldadura" entre el mastic de las gotas de asfalto y las partículas finas de agregado, tal como se observa en la Figura 1.

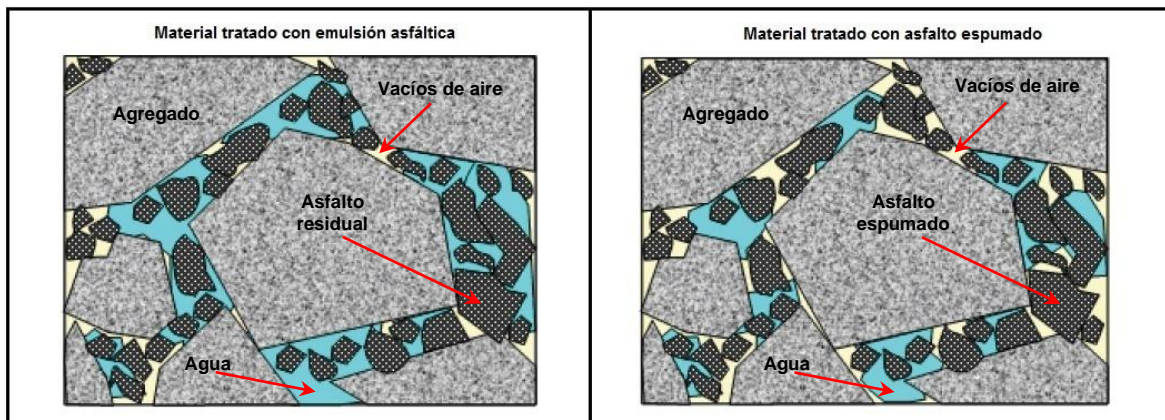


Figura 1. Ligadura entre el asfalto y el agregado (Asphalt Academy, 2009)



2.2. Principales características

- El comportamiento de los materiales granulares estabilizados con asfalto es muy similar al de los materiales granulares sin estabilizar, pero con un aumento significativo en la cohesión y reducción en la susceptibilidad al daño por humedad.
- Las partículas gruesas de agregado no están del todo recubiertas con asfalto. El asfalto se dispersa casi exclusivamente entre las partículas finas, resultando en un mastic rico en asfalto entre las partículas más gruesas.
- No tienen apariencia negra o adherente como las mezclas asfálticas en caliente. Existe un oscurecimiento leve del material después de estabilizar.
- El contenido de vacíos de una capa compactada es similar a la de la capa de material granular, y no de una carpeta asfáltica.
- Los métodos con emulsión asfáltica y asfalto espumado reducen la viscosidad del asfalto, permitiendo que se mezcle con material granular a temperatura ambiente.
- En este tipo de mezclas las cantidades de asfalto residual aplicado normalmente no exceden el 3% sobre la masa de agregado seco. En muchas situaciones se adiciona relleno mineral activo como cemento o cal hidratada. Aparte de aumentar la resistencia retenida en condiciones saturadas, el relleno mineral activo ayuda a dispersar el asfalto. El contenido de relleno mineral no se recomienda que exceda el 1% tanto para cemento como para cal hidratada. Si se coloca más de este porcentaje recomendado, la estabilización con asfalto pierde las propiedades que se buscan inicialmente, y se convierte en otro tipo de estabilización.

2.3. Mecanismos de falla

Según las condiciones propias del proyecto, aspectos como los materiales disponibles, agentes estabilizadores, técnicas constructivas, condiciones climáticas, entre otros, afectan el desempeño del material estabilizado y la forma en que éstos se deterioran. Existen dos mecanismos fundamentales de falla en los materiales estabilizados con asfalto: deformación permanente y daño por humedad.

La resistencia a la deformación permanente se puede mejorar por medio de (Wirtgen GmbH, 2012):

- Materiales granulares con buena resistencia, angularidad, forma, rugosidad y dureza de los agregados.



- Incremento del tamaño máximo del agregado.
- Mejoramiento de la densidad en campo.
- Utilizar el contenido mínimo necesario de humedad y no permitir el tránsito vehicular durante el curado inicial.
- Adición de una cantidad limitada de asfalto, usualmente menos de 3 %.
- Adición de relleno mineral activo hasta un máximo de 1%.

La susceptibilidad al daño por humedad se puede mejorar por medio de:

- Aumento del contenido de asfalto limitado a aspectos como la estabilidad y costos.
- Aumento de relleno mineral activo hasta 1%.
- Densidades en sitio mayores, mejorando la compactación.
- Uso de granulometrías continuas.

2.4. Clasificación

Las Bases Estabilizadas con Asfalto (BEA) se clasifican en tres categorías, dependiendo de la calidad del material original y el tráfico de diseño esperado (Asphalt Academy, 2009):

- **BEA1:** Este material tiene alta resistencia al corte, y es típicamente utilizado como capa de base para un tráfico de diseño de más de 6 millones de ESALs. Para esta clase de material sin tratar, la fuente es típicamente roca triturada bien graduada, pavimento asfáltico reciclado (RAP) o una mezcla de ambos.
- **BEA2:** Este material tiene resistencia moderada al corte, y es típicamente utilizado como capa de base para un tráfico de diseño entre 3 y 6 millones de ESALS. Para esta clase de material la fuente de material sin tratar es generalmente grava natural graduada, o una mezcla de varios materiales, entre ellos RAP.
- **BEA3:** Este material consiste típicamente en suelo-grava y/o arena, estabilizados con altos contenidos de asfalto. Como capa de base es adecuado solamente para aplicaciones de tráfico de diseño menores a 3 millones de ESALS.

La siguiente tabla resume los requerimientos para clasificar los BEA en una de las tres clases anteriores.

Informe LM-PI-UMP-054-R3	Fecha de emisión: 06 de December de 2018	Página 18 de 84
--------------------------	--	-----------------

Tabla 1. Indicadores para clasificación de BEA para material sin estabilizar (Wirtgen GmbH, 2012)

Ensayo	Unidades	BEA1	BEA2	BEA3	No apto
		>6 MESALS	3-6 MESALS	<3 MESALS	
		Roca triturada bien graduada, RAP y/o mezclas de ambos	Gravas naturales graduadas, mezclas de varios materiales, RAP	Suelo-grava y/o arena	Gravas pobres, suelos y materiales plásticos
MATERIAL SIN ESTABILIZAR					
Índice de Soporte California (CBR)	%	>80%	25-80	10-25	<10
Índice de plasticidad (IP)		<6	6-10	10-15	>15
Pasando malla N°200	%	2-15	2-20	2-25	>25
MATERIAL ESTABILIZADO					
Resistencia a la tensión indirecta (ITS) sin acondicionar (secas)	kPa	>225	175-225	125-175	<125
Resistencia a la tensión indirecta (ITS) acondicionadas (secas y humedad de equilibrio)	kPa	>100	75-100	50-75	<50
Resistencia a la tensión indirecta (ITS) sin acondicionar (humedad de equilibrio)	kPa	>175	135-175	95-135	<95
Módulo resiliente	MPa	>2000	600-2000	300-600	>300
Cohesión	kPa	>250	100-250	50-100	<50
Cohesión retenida (MIST)	%	>75	60-75	50-60	<50
Ángulo de fricción interna	°	>40	30-40	30-25	<25

2.5. Requerimientos de los componentes de mezcla

2.5.1. Materiales granulares

Los tratamientos con asfalto, usando emulsión asfáltica o asfalto espumado, son adecuados para la estabilización de un rango amplio de agregados, desde las gravas naturales hasta piedras trituradas bien graduadas y/o materiales reciclados. Los materiales granulares

Informe LM-PI-UMP-054-R3	Fecha de emisión: 06 de December de 2018	Página 19 de 84
--------------------------	--	-----------------



clasificados como marginales, ya sea vírgenes o reciclados, han sido usados satisfactoriamente en este tipo de estabilización. Sin embargo, es importante establecer las tolerancias mínimas de aceptación para el material granular, como también identificar la composición óptima del agregado para el tratamiento con asfalto.

La calidad y la composición de los materiales reciclados de un pavimento existente pueden variar considerablemente (tipos de materiales, espesores de capas, bacheos, sellos asfálticos, etc.). Los porcentajes de RAP presentes en la mezcla pueden llegar hasta el 100%. Sin embargo, es necesario considerar sus efectos sobre el material estabilizado, en especial cuando se utilice en sitios donde se superen los 6 millones de ESALs. Estos efectos son: la reducción de la resistencia al corte debido a climas cálidos y la deformación acelerada debido a altos esfuerzos por sobre carga. Para lo cual, sería necesario incorporar entre un 15% y 25% de polvo de piedra al material para mejorar el desempeño del material ante estas características (Asphalt Academy, 2009).

La caracterización del material sin estabilizar comprende inicialmente, la determinación de la curva granulométrica y el índice de plasticidad (IP). Esto para evaluar si el material es apto para este tratamiento. Las granulometrías recomendadas para este tipo de estabilización se muestran en la Tabla 2. Para tratamientos con emulsión asfáltica no se recomienda un IP mayor a 10. No obstante, en estos casos es posible pre-tratar con cal hidratada para reducir el IP, antes de la estabilización con emulsión asfáltica. Se recomienda que la cantidad de material pasando el tamiz N° 200 exceda el 20% (Pennsylvania Department of Transportation, 2012).

Otras características que se recomienda evaluar en los materiales sin estabilizar son el índice de durabilidad y el equivalente de arena. La durabilidad evalúa el desgaste y la generación excesiva de finos plásticos y no plásticos, mientras que el equivalente de arena la relación relativa de la cantidad de arcillas y finos presentes en el material. Se recomienda que el equivalente de arena no sea menor a 30% (Pennsylvania Department of Transportation, 2012) y para el índice de durabilidad se establece un valor mínimo de 35% para finos y gruesos (Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2010).

Tabla 2. Graduación recomendada para material granular sin estabilizar (Wirtgen GmbH, 2012)

Tamiz		Porcentaje pasando cada tamiz (%)
Informe LM-PI-UMP-054-R3	Fecha de emisión: 06 de December de 2018	Página 20 de 84



Nº	mm	Granulometría recomendada		Material Típico RAP	Grava natural
		Límite grueso	Límite fino		
2"	50	100	100	100	100
1,5"	37,5	87	100	85	100
1"	25	76	100	72	100
3/4"	19	65	100	60	100
1/2"	12,5	55	90	50	100
3/8"	9,5	48	80	42	100
1/4"	6,7	41	70	35	100
Nº 4	4,75	35	62	28	88
Nº 8	2,36	47	68	18	68
Nº 16	1,18	18	36	11	53
Nº 30	0,600	13	28	7	42
Nº 40	0,425	11	25	5	38
Nº 50	0,300	9	22	4	34
Nº 100	0,150	6	17	2	27
Nº 200	0,075	4	12	1	20

La zona por debajo de la curva de grava (menos adecuada) se puede utilizar cuando las alternativas de materiales son muy limitadas, sin embargo, estos materiales pueden ser mezclados con otros materiales que complementen las fracciones faltantes para mejorar la graduación. Los materiales con graduaciones gruesas requieren menos asfalto que las granulometrías más finas (Asphalt Academy, 2009).

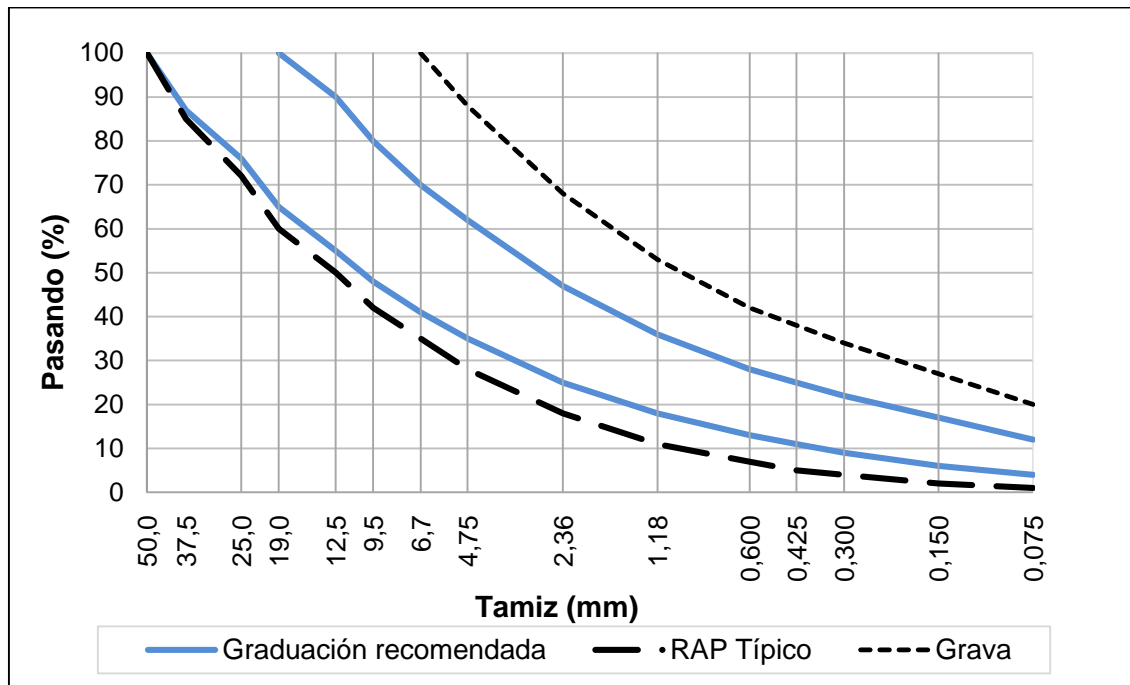


Figura 2. Requerimientos granulométricos (Wirtgen GmbH, 2012).

2.5.2. Asfalto espumado

El asfalto espumado consiste en calentar asfalto a una temperatura entre 155 °C y 175 °C, donde se mezcla con una pequeña cantidad de agua atomizada en una cámara de expansión y aire a una presión aproximada de 5 bares (100 kPa), tal como se muestra en la Figura 3. Cuando las partículas de agua entran en contacto con el asfalto caliente, la energía calórica del asfalto se transfiere al agua. Tan pronto como el agua alcanza su punto de ebullición ésta cambia de estado, y al hacerlo, crea una burbuja con una delgada película de asfalto llena con vapor de agua (Wirtgen GmbH, 2004). El estado espumado del asfalto es temporal, durante este periodo baja su viscosidad, lo que permite la mezcla con el agregado a una temperatura ambiente y con contenidos de humedad in-situ.

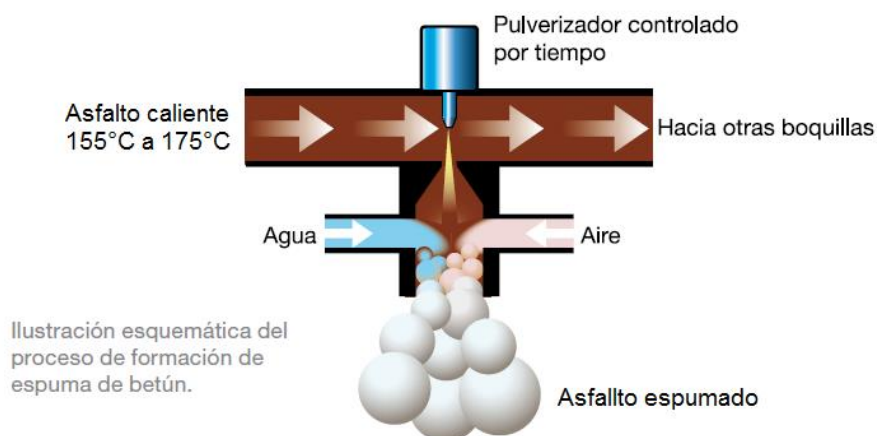


Figura 3. Producción de asfalto espumado (Wirtgen GmbH, 2012).

Las propiedades principales del asfalto espumado son:

- **Razón de expansión:** es una medida de la viscosidad de la espuma y define cuánto se llega a dispersar el asfalto en la mezcla. Se calcula como la razón entre el máximo volumen de la espuma relativo a su volumen original.
- **Vida media:** es una medida de estabilidad de la espuma y provee una indicación de la tasa de colapso de la espuma. Se calcula como el tiempo, en segundos, que transcurre para que la espuma colapse a la mitad de su volumen máximo.

Se debe añadir la cantidad de agua adecuada para obtener la vida media y razón de expansión óptimos, de acuerdo con los parámetros de calidad requeridos del asfalto original y espumado presentados en la Tabla 3. El asfalto apto para espumar es aquel que permita obtener las mejores características anteriores.

Tabla 3. Especificaciones para asfalto espumado (Wirtgen GmbH, 2012)

Penetración de asfalto original (1/10 mm) (ASTM D5, 2013)	60 a 200	
Características de asfalto espumado (límites mínimos)		
Temperatura del agregado	10 °C a 15 °C	Mayores a 15 °C
Tasa de expansión (veces)	10	8
Vida media, $\tau_{1/2}$ (segundos)	8	6



2.5.3. Relleno Mineral (Filler)

Los tipos de relleno mineral utilizados en los BEA son: cemento (varios tipos, pero no de fraguado rápido), cal hidratada, polvo de piedra, cenizas volantes y escorias de alto horno.

El término de relleno mineral activo se usa para definir el relleno mineral que altera químicamente las propiedades de la mezcla. En este tipo de relleno mineral se le conoce como relleno mineral activo, e incluye el cemento, la cal hidratada y las cenizas volantes. El resto se considera relleno mineral de tipo natural (Asphalt Academy, 2009). El propósito de incorporar relleno mineral activo en los BEA es:

- Mejorar la adhesión del asfalto con el agregado
- Mejorar la dispersión del asfalto en la mezcla
- Modificar la plasticidad de materiales naturales (reducir IP)
- Aumentar la rigidez de la mezcla y ganar resistencia
- Acelerar el curado de la mezcla compactada

Mientras que, el objetivo de agregar relleno mineral natural es mejorar la deficiencia en el contenido de finos que beneficia la dispersión del asfalto.

Se pueden utilizar varios tipos de relleno mineral en una mezcla. La selección del tipo de relleno mineral adecuado depende de la disponibilidad, el costo y su desempeño con los componentes de la mezcla. En el diseño de mezcla de materiales estabilizados con asfalto, se determina la necesidad del relleno mineral activo y cuál de ellos es el que proporciona mejores resultados en los ensayos de resistencia retenida a la tensión indirecta y triaxial (cohesión).

Los materiales con altos índices de plasticidad deberán ser pre-tratados con cal hidratada para disminuir su IP, siempre y cuando el IP sean menor a 12.

El pre-tratamiento requiere que se adicione al material el agua y la cal hidratada necesarios, al menos dos horas previas al mezclado con el asfalto espumado, el material mezclado deberá colocarse en un contenedor hermético para evitar la pérdida de humedad. El contenido de humedad se puede chequear y hacer ajustes si es requerido.

2.5.4. Agua para mezclado y compactación

Se deben seguir para este tipo de materiales las mismas especificaciones de calidad del agua que tiene el concreto y otros materiales para caminos (Wirtgen GmbH, 2012).

Informe LM-PI-UMP-054-R3	Fecha de emisión: 06 de December de 2018	Página 24 de 84
--------------------------	--	-----------------

2.6. Selección del tipo de agente estabilizador

Previo al inicio del proceso de diseño en laboratorio y con los resultados de la caracterización del material, se debe tomar en cuenta si el material es apto para ser estabilizado con asfalto, con esto lograr un adecuado desempeño y durabilidad. En la figura 3 se ilustra qué criterios y cómo debe comprobarse que la estabilización con asfalto es la adecuada.

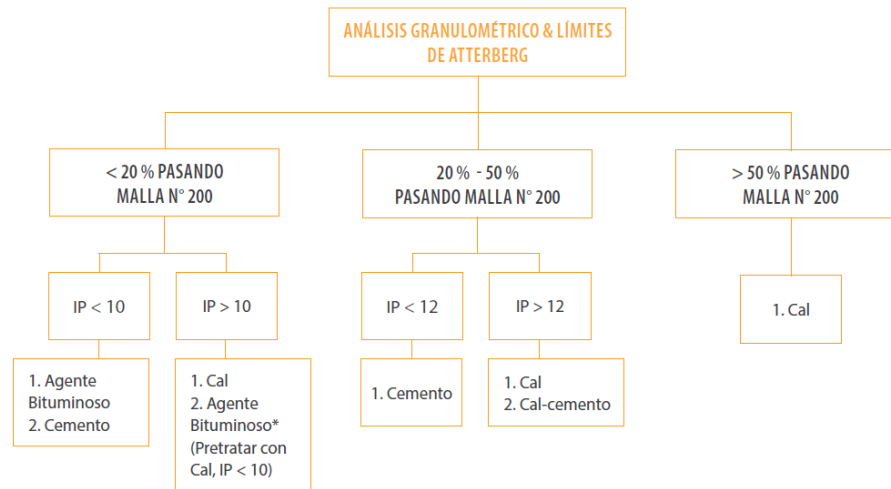


Figura 4. Selección del tipo de estabilización según informe (Ávila & Ulloa, 2017).

Como se puede ver en la Figura 4, la estabilización con asfalto es posible principalmente en materiales gruesos, si el índice de plasticidad (IP) es menor a 10. Cuando el IP es mayor a 10, es necesario pre-tratar el material con cal para disminuir su plasticidad.

2.7. Diseño de mezcla

2.7.1. Ensayos preliminares y niveles de diseño

El procedimiento de diseño (Asphalt Academy, 2009) envuelve una serie pasos y ensayos (niveles) que van a depender de la magnitud del tráfico esperado. El material debe ser inicialmente caracterizado (ensayos preliminares), para establecer si éste puede o no ser estabilizado con asfalto y si éste debería ser pre-tratado con cal o mezclado con otro material de aporte. Posteriormente, se determina la necesidad de incorporar un relleno mineral activo, como cal o cemento, para disminuir la susceptibilidad al daño por humedad de la mezcla; también evaluar la preferencia entre un relleno mineral activo u otro y la cantidad mínima necesaria que garantice una adecuada adherencia. Seguidamente, se



escoge el contenido inicial de asfalto residual requerido (nivel de diseño 1), y así clasificar el material en una determinada categoría de BEA. Dependiendo del tráfico proyectado, se llevan a cabo ensayos adicionales para optimizar el contenido de asfalto (niveles de diseño 2 y 3), para un mayor grado de confianza en el desempeño del material estabilizado.

Ensayos preliminares: incluye determinar la curva granulométrica, relación densidad-humedad y límites de Atterberg. Los resultados pueden indicar la necesidad de pre-tratamiento del material, si el índice de plasticidad es mayor a 10.

Pre-tratamiento del material: El material se pre-trata con diferentes contenidos de cal hidratada, para determinar el contenido mínimo de cal con el cual la mezcla alcance un pH igual o superior de 12,4 (valor de consumo inicial de cal), según la norma ASTM D 6276. Cuando el material se pre-trata, se requiere que la cal y el agua sean adicionados a la mezcla 2 horas antes de que se mezcle con el asfalto espumado. La mezcla pre-tratada se mantiene en un recipiente cerrado, para evitar la pérdida de humedad. Si el material requirió pre-tratamiento con cal hidratada, no es necesario la determinación del contenido y tipo de relleno mineral activo que se describe en el siguiente apartado.

Requerimiento de relleno mineral activo: para determinar si es necesario la incorporación de relleno mineral activo, se elaboran 3 mezclas: una con 0%, una con 1% de cal y otra con 1% de cemento. Se utiliza un mismo porcentaje de asfalto residual para las 3 mezclas, utilizando como referencia el recomendado en la Tabla 4. Para las 3 mezclas se elabora un grupo de seis especímenes para fallarlas a tensión diametral, dividido en dos subgrupos, con y sin acondicionamiento, y se calcula el porcentaje de resistencia retenida (TSR), el cual es un indicador de requerimiento de relleno mineral activo. Si la resistencia retenida de la mezcla sin relleno mineral activo es superior a 65% y cumple con las resistencias individuales (ITS) de la Tabla 1, no es necesario adicionarlo.

Cuando la resistencia retenida de la mezcla sin relleno mineral activo es menor a 65%, se escogerá la mezcla con el tipo de relleno mineral activo (cal o cemento) que resulte con un TSR significativamente mayor al otro ($> 5\%$). Si los valores de TSR con ambos rellenos minerales activos están dentro del mismo orden, (diferencia $< 5\%$) cualquiera de los dos tipos de relleno mineral activo es adecuado, y se escogerá mediante un criterio económico.

Determinación del contenido de relleno mineral: Para determinar la cantidad de relleno mineral activo en la mezcla, se pueden realizar ensayos adicionales en especímenes de

Informe LM-PI-UMP-054-R3	Fecha de emisión: 06 de December de 2018	Página 26 de 84
--------------------------	--	-----------------



100 mm de diámetro con el relleno mineral activo seleccionado a una tasa de aplicación menor, por ejemplo 0,5 % o 0,75 %. Sin embargo, se debe evitar comprometer la flexibilidad de la mezcla, utilizando un máximo de relleno mineral activo de 1%.

Nivel de diseño 1: se compactan 6 especímenes de 100 mm de diámetro y 63 mm de altura mediante el método Marshall a 75 golpes por cara y se curan a 40°C durante 72 horas. Las pastillas se fallan a tensión indirecta (ITS) con y sin acondicionamiento a 25 °C en un baño de agua por 24 horas. Los resultados de este nivel de diseño son para:

- ✓ Identificar la preferencia entre agentes estabilizadores con asfalto (emulsión asfáltica o asfalto espumado si se tienen ambas opciones).
- ✓ Determinar el contenido óptimo de asfalto residual.

El nivel de diseño 1 es suficiente para pavimentos de bajo a medio volumen de tránsito, con menos de 3 millones de ESALs.

Nivel de diseño 2: Implica la elaboración de 6 pastillas de 150 mm de diámetro por 95 mm de altura, las cuales son curadas para un contenido de humedad de equilibrio (curado en un horno por 24 horas a 30°C y posteriormente, en bolsas plásticas por 48 horas a 40°C) y ensayadas a tensión indirecta (ITS) con y sin acondicionamiento a 25 °C en un baño de agua por 24 horas. Se pueden utilizar otros procedimientos de compactación (mazo vibratorio, compactación giratoria, mesa vibratoria, etc.) para obtener un 100% de la compactación del Próctor modificado (AASHTO T 180). Los resultados de este nivel de diseño son para:

- ✓ Ajustar el contenido óptimo de asfalto residual.

El nivel de diseño 2 es recomendado para caminos de 3 a 6 millones de ESALs.

Nivel de diseño 3: En este nivel se efectúa el ensayo de triaxial estática en al menos 8 especímenes de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura para un nivel de confianza alto. Se evalúan la resistencia al corte y a la humedad a 0 kPa, 50 kPa, 100 kPa y 200 kPa de esfuerzo de confinamiento (especímenes por esfuerzo). Los especímenes son curados en las mismas condiciones que el nivel de diseño 2.

El nivel de diseño 3 se recomienda para tráficos de diseño que exceden los 6 millones de ESALs (Asphalt Academy, 2009).

En la Figura 5 se resume el procedimiento de diseño a nivel de laboratorio.

Informe LM-PI-UMP-054-R3	Fecha de emisión: 06 de December de 2018	Página 27 de 84
--------------------------	--	-----------------

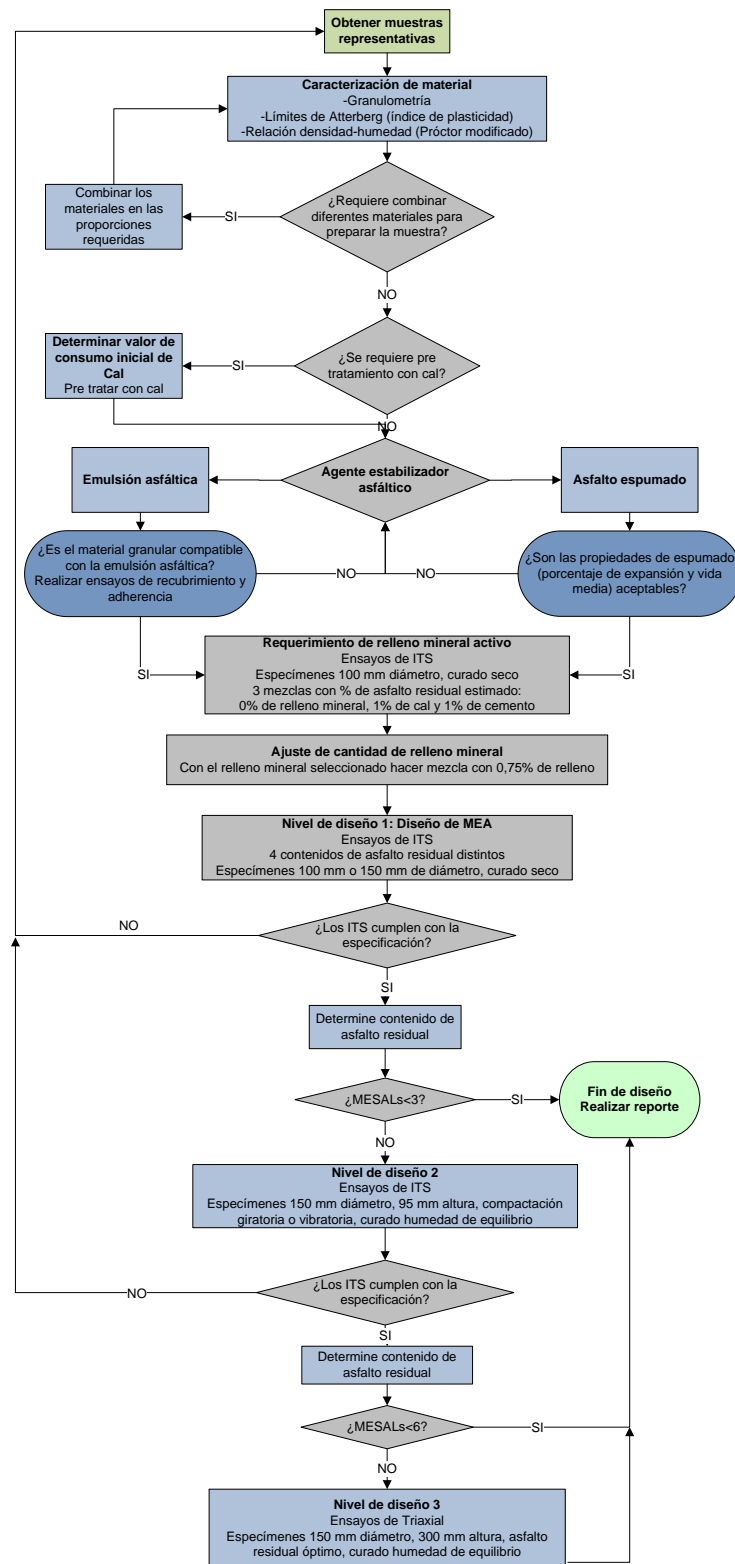


Figura 5. Diagrama de flujo diseño en laboratorio de BEA (Collings, y otros, 2009)

2.7.2. Preparación de especímenes de ensayo

Para todos los ensayos del diseño en laboratorio se requiere eliminar los sobre tamaños que se retienen en la malla 19 mm (3/4"). Sin embargo, debe sustituirse ese porcentaje con material pasando 19 mm (3/4") y retenido en la malla 12,5 mm (1/2"), para compensar el tamaño eliminado. Asimismo, se divide el material en las siguientes fracciones (Wirtgen GmbH, 2012):

- ✓ Pasando la malla 19 mm (3/4") y retenido en la malla 12,5 mm (1/2").
- ✓ Pasando la malla 12,5 mm (1/2") y retenido en la malla 4,75 mm (No.4).
- ✓ Pasando la malla 4,75 mm (No.4).

En la Figura 6 se muestra el proceso de tamizado para obtener las fracciones deseadas para los ensayos de diseño.



Figura 6. Preparación de materiales.

2.7.3. Calibración del asfalto espumado

El asfalto se debe precalentar previamente a 110 °C para que se encuentre fluido antes de calibrarlo en la cámara de espumación, similar al equipo de la Figura 7.

Es indispensable que el asfalto alcance una temperatura superior a 155 °C para disminuir su viscosidad, donde, al entrar en contacto con el agua inyectada a presión, se obtenga el espumado requerido.



Figura 7. Cámara de expansión para espumar el asfalto (equipo WLB 10S).

El objetivo de la calibración es obtener una máxima expansión en el mayor tiempo posible, de manera que pueda recubrir la mayor cantidad de finos del agregado, formando un mastic que rodea el agregado más grueso en forma de puntos de soldadura entre las partículas, tal como se aprecia en un espécimen compactado de material estabilizado con asfalto espumado (Figura 8).



Puntos de soldadura

Figura 8. Puntos de soldadura (equipo WLB 10S).

La escogencia de la temperatura y el flujo de agua para alcanzar el máximo volumen en el asfalto se lleva a cabo en un proceso en que se realiza la espumación para al menos 3

temperaturas (155 °C, 160 °C y 165 °C) y 4 o 5 flujos de agua diferentes (1, 1.5, 2.0, 2.5 y 3.0), como se ejemplifica en la Figura 9.

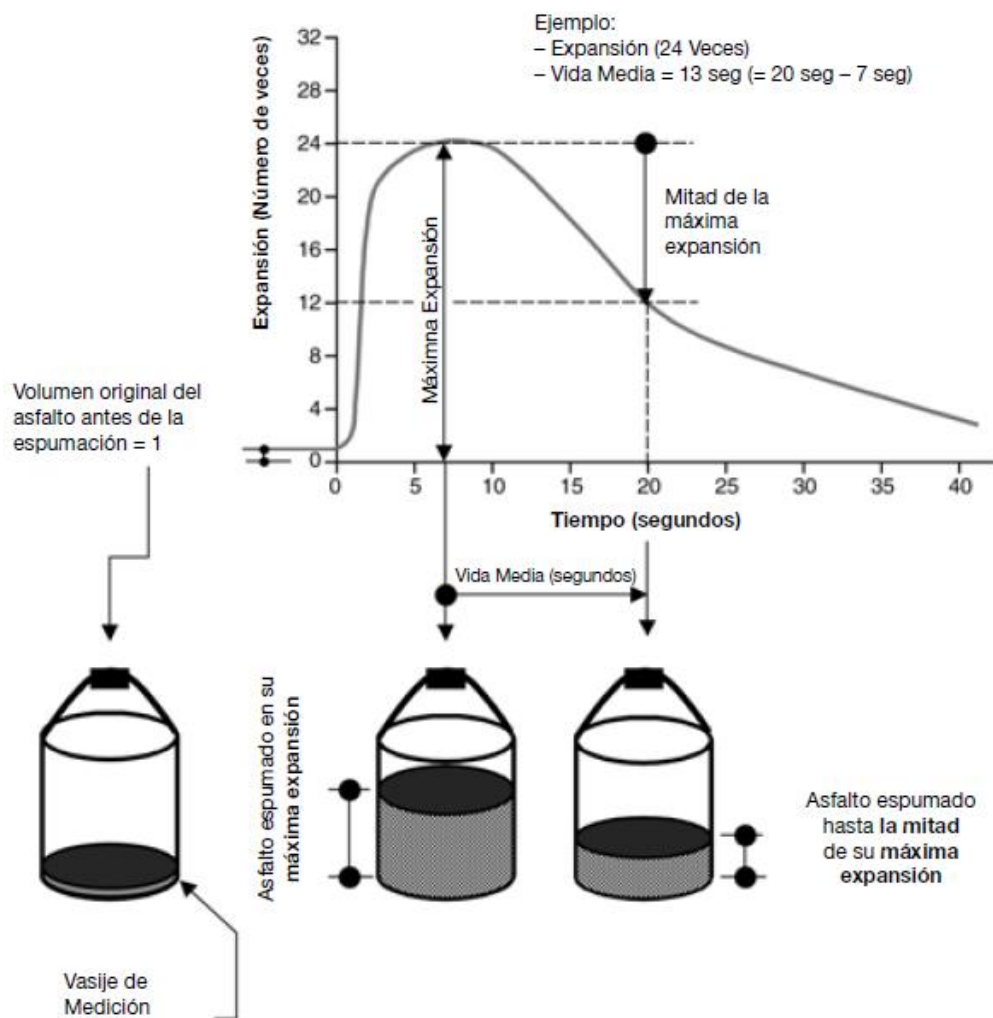


Figura 9. Calibración del asfalto espumado (Wirtgen GmbH, 2012).

Una de los factores dominantes que influyen las caracterizan de la espuma es la cantidad de agua que se inyecta en la cámara de expansión para crear la espuma. Al aumentar la tasa de aplicación de agua de espumación, crea una mayor expansión en el volumen del asfalto, sin embargo, esto hace que decaiga más rápido la espuma, es decir, una menor vida media, tal como se ilustra en la Figura 10.

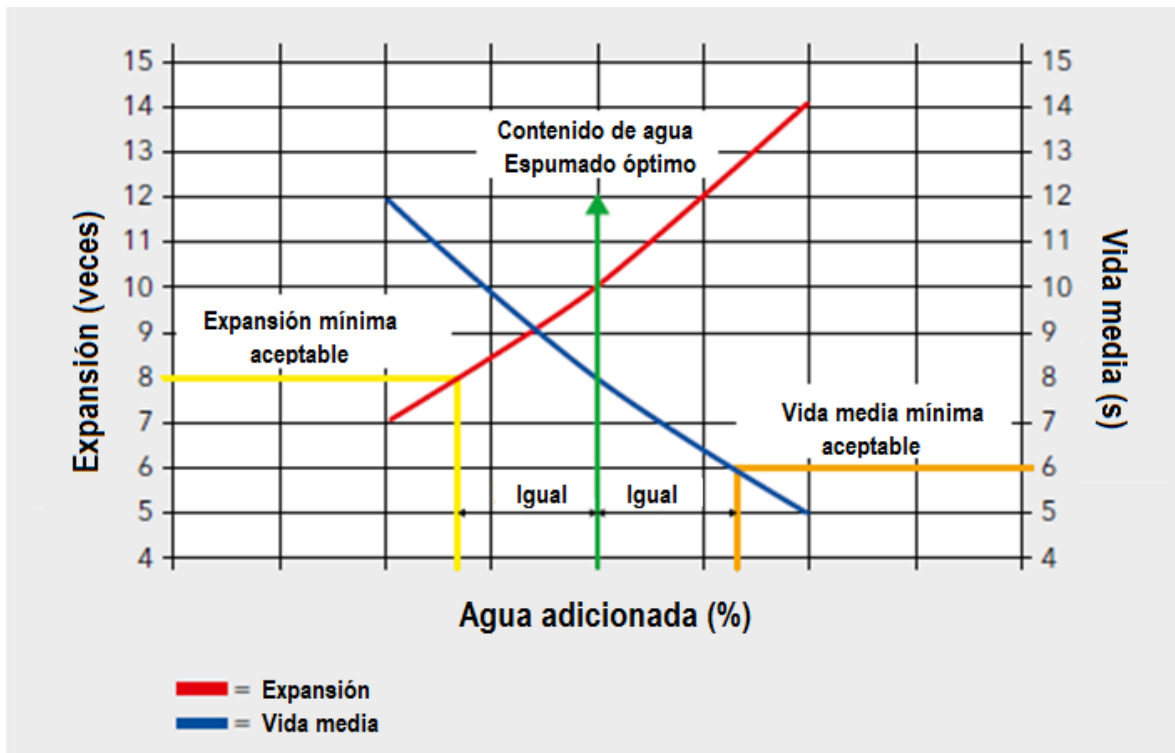


Figura 10. Determinación del contenido óptimo de agua para espumar (Wirtgen GmbH, 2012).

Los parámetros determinados en laboratorio serán utilizados in-situ a escala real, por ello la importancia de analizar los niveles de espumado para cada asfalto que se vaya a utilizar. Por lo que es importante controlar la variabilidad en las características de la espuma en lotes distintos de asfalto, por lo que la repetibilidad y reproducibilidad en laboratorio son significativos.

Lo recomendable es utilizar asfaltos menos rígidos, debido a que conforme aumenta la rigidez de los mismos, disminuyen la calidad de la espuma y generan una menor dispersión.

Así como en mezclas asfálticas, se deben implementar límites de temperatura por periodos extensos para prevenir el daño en el asfalto.

2.7.4. Mezclado y compactación de especímenes de ensayo

El diseño de mezcla implica utilizar diferentes contenidos de asfalto y relleno mineral activo, para evaluar sus propiedades físicas y mecánicas. El porcentaje teórico de asfalto óptimo para iniciar en el diseño según el porcentaje pasando el tamiz N° 200 y N° 4, se indica a continuación:

Informe LM-PI-UMP-054-R3	Fecha de emisión: 06 de December de 2018	Página 32 de 84
--------------------------	--	-----------------

Tabla 4. Estimación de porcentaje teórico de asfalto residual óptimo (Wirtgen GmbH, 2012)

Fracción pasando el tamiz N° 200 (%)	Adición de asfalto espumado % sobre peso seco de agregado		Material típico
	Fracción pasando el tamiz N°4		
	<50%	>50%	
<4	2,0	2,0	RAP
4-7	2,2	2,4	RAP/Piedra triturada graduada, gravas naturales, mezclas de las anteriores
7-10	2,4	2,8	
>10	2,6	3,2	Gravas/arenas

El material estabilizado con asfalto espumado se prepara preferiblemente en mezcladoras tipo "pugmill", o batidoras de laboratorio. El uso de estos equipos va orientado al tipo de mezclado que pueda tener el material en el campo, similar al equipo mostrado en la Figura 11.



Figura 11. Mezclador de paletas (equipo WLM 30).

En la compactación es de suma importancia obtener las densidades esperadas para un adecuado desempeño de la mezcla. El método de compactación que se emplee en el laboratorio debe reproducir la densidad requerida en el campo, así como la orientación de



las partículas después de la compactación. En ciertos países como Sudáfrica se ha venido utilizando compactación con martillo vibratorio, ya que éste representa de mejor forma las características anteriores. En Estados Unidos, generalmente se utiliza compactación giratoria Superpave, donde se compactan especímenes de 150 mm de diámetro a 30 giros, con una presión de 600 kPa y un ángulo de inclinación $1,25^\circ$ (Pennsylvania Department of Transportation, 2012). Por otro lado, la compactación Marshall es la más común en los laboratorios y es más fácil su implementación, dónde se compactan especímenes de 100 mm de diámetro con 75 golpes por cara. No obstante, la compactación Marshall es la que es menos representativa del proceso de compactación en sitio.

En otras investigaciones se sugiere compactar al 100% de la densidad máxima obtenida con el Próctor modificado (Wirtgen GmbH, 2012).

2.7.5. Curado

El curado de materiales estabilizados con asfalto espumado, es el proceso mediante el cual, la capa mezclada y compactada pierde humedad a través de la evaporación, repulsión del agua por parte del asfalto y la expulsión del agua por efecto de la disipación de presión de poro inducida por la compactación (Wirtgen GmbH, 2012).

El agua comienza a evaporarse durante las primeras fases del curado, cuando la superficie de la mezcla compactada está expuesta e interactúa con el medio ambiente (Moloto, 2010).

La alta presión de poro del material compactado conlleva a que el agua se infiltre por los vacíos al interactuar con el medio ambiente. A través de esta interacción el agua se ve obligada a desplazarse a la superficie por las diferencias entre la presión atmosférica y la presión interna de poro, lo cual promueve el curado.

El curado se ve influenciado por diversos factores, entre los cuales están: las condiciones climáticas, la graduación del material, la energía de compactación y los vacíos del material compactado, y la inclusión de rellenos minerales activos en la mezcla (Wirtgen GmbH, 2012).

Es importante que durante la construcción con materiales estabilizados con asfalto se reduzca al máximo el contenido de humedad del material compactado, ya que, es durante las edades tempranas después de su colocación, que se da el mayor índice de deformación permanente (Asphalt Academy, 2009).

La reducción del contenido de agua durante el curado va aumentando la resistencia y la rigidez de la mezcla, por lo que este factor se debe reproducir lo mejor posible en el diseño de laboratorio.

La Academia de Asfalto (Asphalt Academy, 2009) propone dos tipos de curado en la laboratorio, según el nivel de diseño:

- **Para el nivel de diseño 1.** Los especímenes se desmoldan a las 24 horas después de la compactación y se curan a 40°C durante 72 horas, finalmente se comprueba que su peso llegue a masa constante (Figura 12, lado izquierdo).
- **Para el nivel de diseño 2 y 3.** Los especímenes se desmoldan a las 24 horas después de la compactación, seguidamente se colocan en un horno por 24 horas a 30°C y posteriormente, los especímenes son colocados en bolsas herméticas y se curan por 48 horas a 40°C (Figura 12, lado derecho). Con este tipo de curado se somete a los especímenes a una condición de humedad de equilibrio (EMC) de 50 % de la humedad óptima, que representa condiciones de humedad en el material después de 12 a 24 meses de haber sido colocado, es decir, a largo plazo (Asphalt Academy, 2009).



Figura 12. Curado de especímenes.

2.7.6. Condiciones de humedad a considerar en el diseño: humedad de equilibrio

El Contenido de Humedad de Equilibrio (EMC) es la humedad en las capas granulares y de subrasante del pavimento, donde su valor tiende a mantenerse estable a largo plazo con pequeñas fluctuaciones durante los cambios estacionales. En la Figura 13 se explica conceptualmente la variación de la humedad en una capa de material estabilizado con



asfalto. El proceso de curado inicia con un contenido de humedad después de ser mezclado y compactado el material, cuyo valor es muy cercano al contenido óptimo de humedad (OMC), conforme se pierde humedad aumenta la rigidez (aumento del módulo resiliente), hasta que la humedad llega a un punto de equilibrio con pequeñas fluctuaciones estacionales, donde la rigidez se estabiliza. Lo anterior está sujeto a la existencia de sistemas de drenaje adecuados (Perera, 2015).

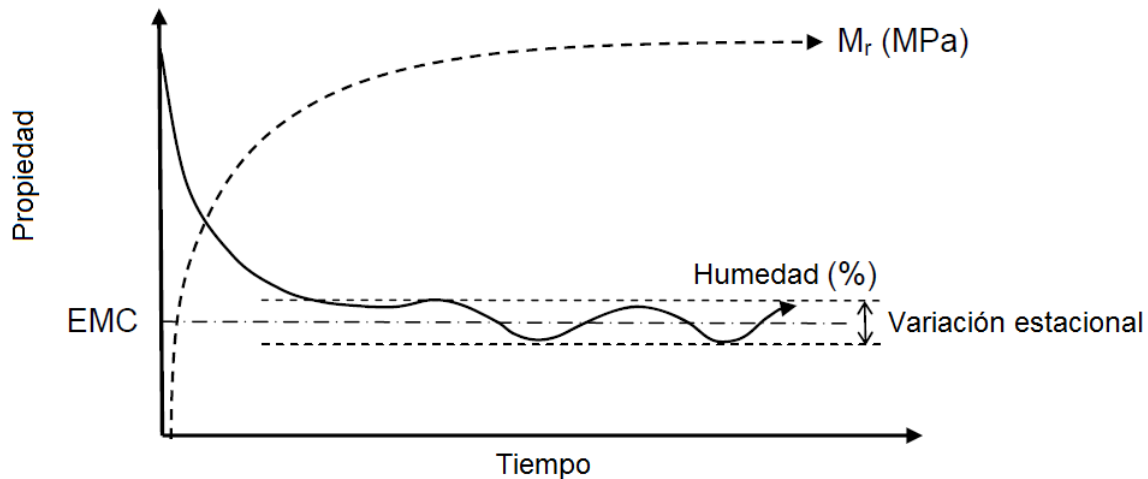


Figura 13. Variación de las propiedades del material con el curado en el tiempo (Ebels & Jenkins, 2007).

El EMC en materiales granulares estabilizados con asfalto in situ, se ha determinado desde hace muchos años utilizando propiedades de los materiales y parámetros climáticos (Moloto, 2010). Dado que normalmente no se cuenta con el EMC en campo de manera directa, se han establecido métodos para determinarlo mediante ecuaciones de regresión. Estos modelos utilizan el valor de TMI (Índice de Humedad de Thornthwaite), el OMC (Contenido Óptimo de Humedad) y las propiedades de los materiales (Perera, 2015).

El TMI es un índice de clasificación climática en función de la evapotranspiración, que determina el déficit de humedad, y depende de la vegetación y las precipitaciones de cada región (Zapata & Salim, 2012).

Según las características conocidas del material el EMC esperado para materiales sin estabilizar puede calcularse como:

$$EMC = 0,59(OMC) + 0,033(LS)(P425)^{0,7} + 3,72(\log(100 + TMI)) - 1,2(k) - 16 \quad [1]$$

Informe LM-PI-UMP-054-R3	Fecha de emisión: 06 de December de 2018	Página 36 de 84
--------------------------	--	-----------------

Donde,

$k = 1$ para bases y 0 para subbase y subrasante.

OMC = contenido de humedad óptimo determinado en el ensayo de Próctor modificado.

P_{425} = porcentaje pasando el tamiz de 0,425 mm.

LS = contracción lineal.

Perera promedió los valores TMI para Costa Rica (Perera, 2015), tal como se observa en el mapa mostrado en la Figura 14.

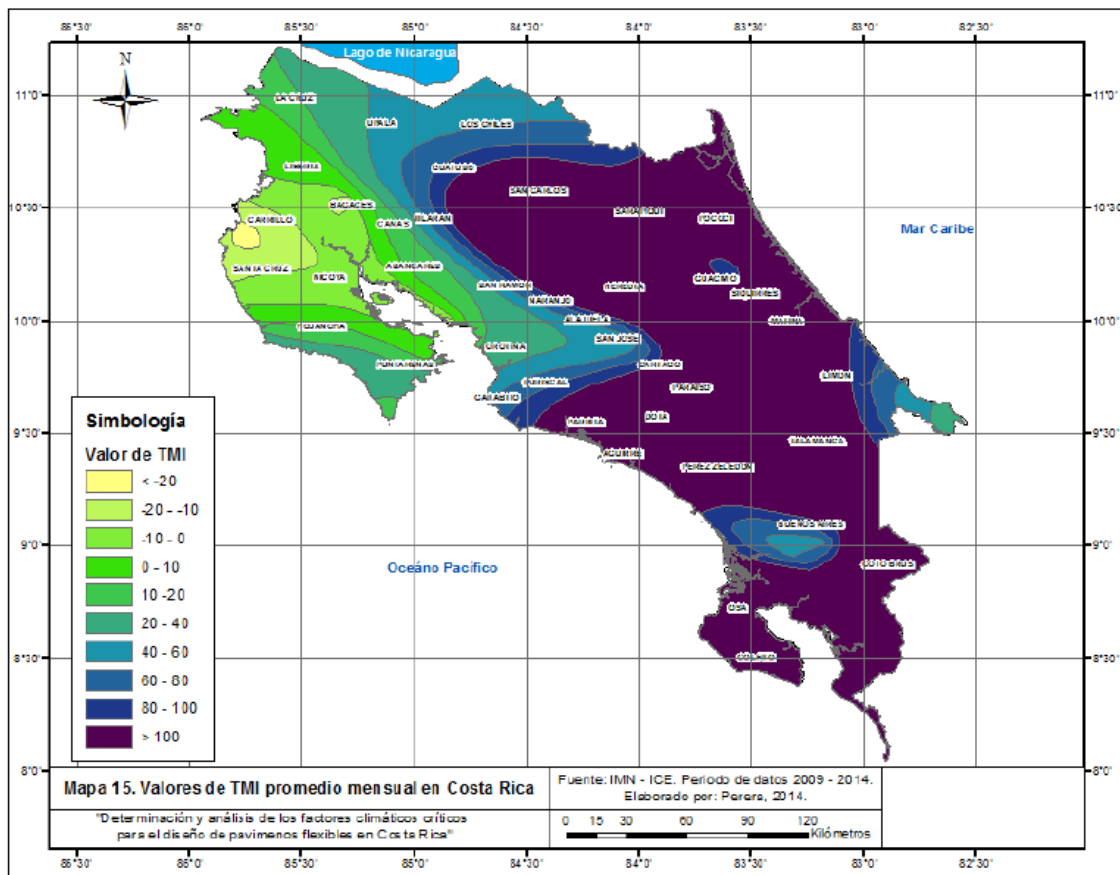


Figura 14. Valores promedio de TMI para Costa Rica (Perera, 2015).

En Costa Rica, factores como la temperatura y la precipitación causan el deterioro acelerado de la estructura del pavimento. La temperatura afecta directamente las capas de

rodamiento y la humedad afecta las capas inferiores de material granular y suelo. No obstante, un daño en capas inferiores repercute sobre la superficie de rodadura.

Esta situación obliga a poner especial atención a las propiedades y requerimientos que deben especificarse en relación a la resistencia al daño por humedad de las BEA.

Los materiales estabilizados con asfalto suelen ser menos hidrofílicos que los materiales granulares sin estabilizar, por lo que la ecuación 1 no contempla este factor adicional. Jenkins estableció, que es posible predecir el EMC para materiales estabilizados con asfalto (emulsiones asfálticas y asfalto espumado), por lo que obtuvieron una ecuación para este tipo de casos (ecuación 2), considerando el contenido óptimo de humedad del material sin estabilizar (OMC), el contenido de asfalto en el material estabilizado (BC) y las condiciones del clima (E/OMC) (Jenkins, 2000).

$$EMC = (OMC - BC) \left(\frac{E}{OMC} \right) \quad [2]$$

En Sudáfrica, la Academia de Asfalto (Asphalt Academy, 2009) propone para el curado de especímenes, en los niveles de diseño 2 y 3, una humedad del 50 % del OMC. Sin embargo, como se puede ver en la Figura 15, en Sudáfrica el TMI máximo es mayor a 20. En Costa Rica el TMI máximo es mayor a 100, por lo tanto, el curado de los especímenes en los niveles de diseño 2 y 3 se debería considerar condiciones de humedad más altas al 50 % de la humedad óptima, y así simular las condiciones más cercanas a la realidad.

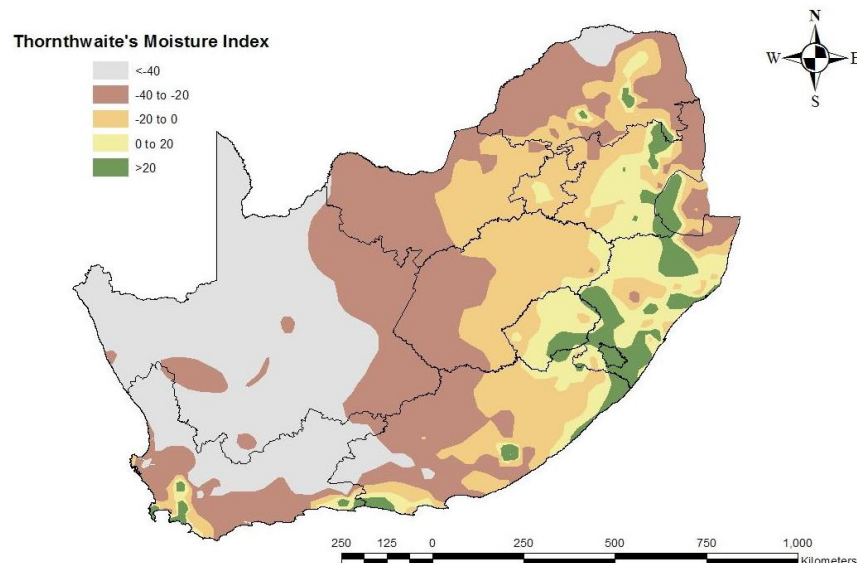


Figura 15. Valores promedio de TMI para Sudáfrica (Perera, 2015).

Informe LM-PI-UMP-054-R3	Fecha de emisión: 06 de December de 2018	Página 38 de 84
--------------------------	--	-----------------

2.8. Ensayos mecánicos

2.8.1. Resistencia a la tensión indirecta (ITS)

El ensayo de resistencia al daño por humedad a la tensión indirecta (AASHTO T 283, 2014), es utilizado como una medida de la resistencia y la flexibilidad de los BEA. De este ensayo se determina el contenido óptimo de asfalto residual en la mezcla, y también, se puede concluir si es necesaria la incorporación de relleno mineral activo, Figura 16.

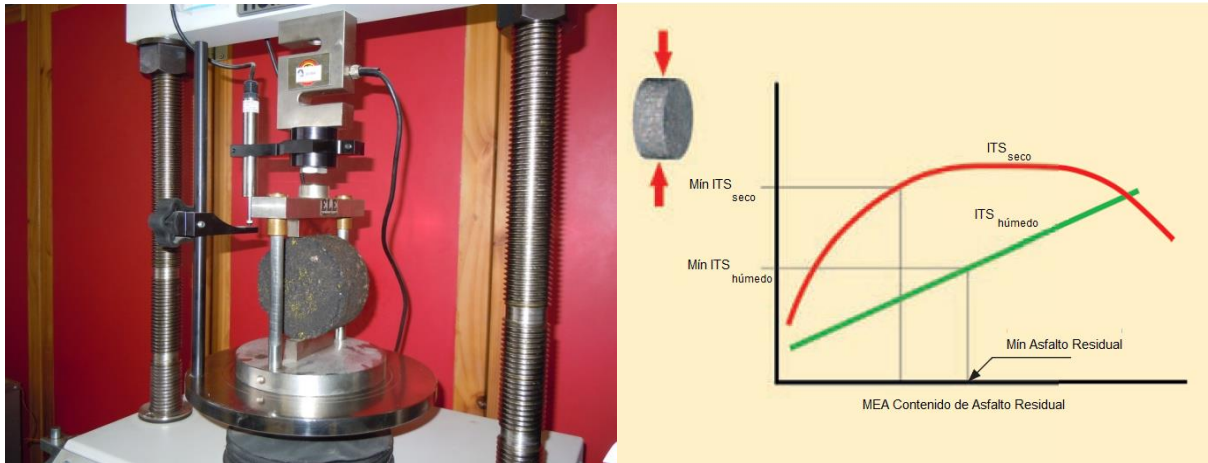


Figura 16. Determinación del contenido óptimo de asfalto residual (Wirtgen GmbH, 2012)

Con cada punto de asfalto residual se elaboran de 6 a 8 especímenes que se compactan y curan como se discutió anteriormente. Estos especímenes se dividen en dos grupos, uno seco y el otro acondicionado. El acondicionamiento consiste en sumergir las pastillas en agua a 25°C por 24 horas (variación a los establecido en la norma AASHTO T 283). Después de este periodo de tiempo se fallan a tensión indirecta. Valores de resistencia retenida menores a 65% indican la necesidad de relleno mineral activo. Si la resistencia retenida (TSR) es menor a 50% y adicionalmente el ITS seco es mayor a 400 kPa, podría indicar la presencia de arcillas que hacen inefectivo el asfalto, y el material requeriría un pretratamiento con cal hidratada (Wirtgen GmbH, 2012). En la Tabla 5 se muestran los valores mínimos recomendados de ITS.

Tabla 5. Valores de ITS recomendados (Wirtgen GmbH, 2012)

Ensayo	Unidades	BEA1	BEA2	BEA3	No apto
ITS sin acondicionamiento (secas)	kPa	>225	175-225	125-175	<125
ITS con acondicionamiento (secas y con humedad de equilibrio)	kPa	>100	75-100	50-75	<50
ITS sin acondicionamiento (humedad de equilibrio)	kPa	>175	135-175	95-135	<95

2.8.2. Ensayo de módulo de resiliente de materiales granulares

El módulo resiliente también se determina mediante el método triaxial de carga repetida (Figura 17). El ensayo para la determinación del módulo resiliente en materiales granulares y suelos se establece en los procedimientos (NCHRP, 2004) y (AASHTO T 307, 2012), los cuales se usan para simular las condiciones reales del pavimento. Estos sirven para medir la rigidez y la habilidad que tiene el material de soportar la deformación permanente acumulada por las cargas, absorción y la expansión del material, así como también los parámetros tradicionales obtenidos en cualquier ensayo triaxial de suelos. En este ensayo el material se somete a una serie de cargas axiales por un periodo muy corto de tiempo y entre cargas se da un periodo de reposo, esto con el fin de simular el paso del tránsito por el pavimento. Al mismo tiempo se aplica una presión de confinamiento constante, que simula los esfuerzos laterales causados por el peso del material que está por encima más las cargas de tránsito. En el laboratorio esta presión de confinamiento se representa a través de aire comprimido dentro de la cámara triaxial.

En la Tabla 6 se indican valores típicos de módulo resiliente para cada tipo de BEA (Wirtgen GmbH, 2012).

Tabla 6. Rango de módulo resiliente para BEA (Wirtgen GmbH, 2012)

Ensayo	Unidades	BEA1	BEA2	BEA3	No apto
Módulo resiliente	MPa	>2000	600-2000	300-600	<300



Figura 17. Triaxial dinámica

2.8.3. Ensayo de triaxial estático

La cohesión y el ángulo de fricción de un suelo son propiedades intrínsecas de los materiales, los cuales dan criterios para evaluar la calidad del mismo. Estas variables se determinan mediante el ensayo de triaxial estático. La guía técnica sudafricana para estabilización de materiales con asfalto establece los valores mínimos que se deben cumplir e introducen el concepto de cohesión retenida, el cual es una forma de evaluar el daño por humedad (Asphalt Academy, 2009).

Los valores recomendados para el ensayo de resistencia al corte se presentan en la Tabla 7, según la clasificación de cada material. Y en la Figura 18 se observa el equipo utilizado para llevar a cabo el ensayo.

Tabla 7. Valores recomendados para cohesión y ángulos de fricción (Wirtgen GmbH, 2012)

Ensayo	Unidades	BEA1	BEA2	BEA3	No apto
Cohesión	kPa	>250	100-250	50-100	<50
Cohesión retenida	%	>75	60-75	50-60	<50
Ángulo de fricción interna	°	>40	30-40	30-25	<25



Figura 18. Equipo triaxial para resistencia al corte.

2.8.4. Deformación permanente (N , ϵ_p)

El principal modo de falla de los materiales granulares estabilizados con asfalto es la **deformación permanente**, por lo tanto, es importante modelar su comportamiento. Con este fin se realizan ensayos triaxiales dinámicos en varios especímenes a diferentes estados de esfuerzo desviador y esfuerzos de confinamiento. La deformación permanente experimentada por el espécimen se monitorea por un periodo de tiempo largo, en algunas ocasiones, por más de un millón de repeticiones.

A esfuerzos desviadores bajos, la deformación permanente o plástica ϵ_p , se estabiliza conforme se aplican las repeticiones de carga. Esto sucede porque el material se densifica durante la carga, convirtiéndose en un material más resiliente. Sin embargo, cuando una razón de esfuerzo desviador crítica se excede, el estado estable de deformación plástica ϵ_p se vuelve inestable y se da una deformación acelerada.

Se ha demostrado que cuando un material granular en una estructura de pavimento se somete a carga, la razón de esfuerzos desviadores máximos (ecuación 3) debe ser limitado a aproximadamente 0,4. Esto porque el comportamiento de deformación permanente para materiales estabilizados con asfalto consiste en tres fases: la primera es el asentamiento por acomodo del material, la segunda es la fase estable y la tercera es la fase de flujo acelerado hasta la falla, esta última depende de la aplicación de la razón de esfuerzos desviadores (Ebels L.-J. , 2008).

$$\text{Relación de esfuerzo desviador} = \frac{\sigma_d}{\sigma_{d,f}} \quad [3]$$

Informe LM-PI-UMP-054-R3	Fecha de emisión: 06 de December de 2018	Página 42 de 84
--------------------------	--	-----------------



Donde,

σ_d = esfuerzo desviador aplicado en ensayo de deformación permanente.

$\sigma_{d,f}$ = Esfuerzo desviador de falla.

En el ensayo de deformación permanente se lleva a cabo a 25 °C, al igual que el ensayo de módulo resiliente, utilizando una carga haversiana aplicada a una frecuencia de 1 Hz. La presión de confinamiento para todo el ensayo permanece constante a 50 kPa.

El modelo general para deformación permanente se establece según la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_p = A \cdot \left(\frac{N}{1000}\right)^B + C \cdot \left(e^{D \cdot \frac{N}{1000}} - 1\right) \quad [4]$$

$$A = a_1 \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_{d,f}}\right)^{a_2}$$

$$B = b_1 \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_{d,f}}\right)^{b_2}$$

$$C = c_1 \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_{d,f}}\right)^{c_2}$$

$$D = d_1 \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_{d,f}}\right)^{d_2}$$

Donde,

ε_p = deformación permanente unitaria (mm/mm)

σ_d = esfuerzo desviador aplicado en ensayo de deformación permanente (kPa)

$\sigma_{d,f}$ = Esfuerzo desviador de falla (kPa)

a_1, a_2, d_2 = coeficientes del modelo

2.8.4.1 Determinación de los parámetros y coeficientes del modelo

Se utiliza una combinación de regresión lineal y no lineal para calcular los parámetros del modelo A, B, C y D. A continuación, se describe el procedimiento (Ebels L.-J. , 2008).

Informe LM-PI-UMP-054-R3	Fecha de emisión: 06 de December de 2018	Página 43 de 84
--------------------------	--	-----------------



1. Graficar la curva de deformación permanente en escala log-log.
2. Cancelar los primeros efectos por acomodo del material, para ello se evaluarán los datos a partir de los 1000 ciclos en adelante.
3. Determinar el punto de inflexión ($N = N_{\text{punto inflexión}}$). Esto es donde la curva de deformación permanente se hace mínima. El punto de inflexión marca la transición entre el comportamiento lineal y no lineal de la curva de deformación, lo cual ocurre para un número de repeticiones de carga donde la tasa de deformación acumulada es mínima.
4. Realizar la regresión lineal para los datos entre $N=1000$ y $N = N_{\text{punto de inflexión}}$ para obtener los parámetros A y B del modelo.
5. Determinar el residuo $C \cdot \left(e^{D \cdot \frac{N}{1000}} - 1 \right) = \varepsilon_p - A \cdot \left(\frac{N}{1000} \right)^B$.
6. Realizar la regresión no lineal con el residuo anterior, utilizando todo el rango de datos desde $N=1000$ hasta N_{falla} .

En el desarrollo de la deformación permanente (ε_p) en materiales granulares, para cada nivel de esfuerzo aplicado se pueden presentar tres rangos de comportamiento, correspondientes a una cantidad de ciclos de carga específica. Estos rangos de comportamientos se clasifican según (Dawson, Werkmeister, & Wellner, 2005) como sigue.

- Rango A - rango "shakedown" plástico: para niveles de esfuerzo relativamente bajos, la deformación permanente se acumula hasta un número finito de aplicaciones de carga, debido a la post-compactación, después de esto la respuesta a la deformación es completamente resiliente y no se presenta más deformación permanente y el material se estabiliza.
- Rango B - respuesta intermedia (flujo plástico): para niveles de esfuerzo más altos que los del rango A, y hasta cierto nivel, la acumulación de deformación permanente continúa con las aplicaciones de carga. En este caso, la tasa de deformación permanente (por ciclo) disminuye desde un nivel alto a uno bajo y casi constante durante los primeros ciclos de carga.
- Rango C - Colapso incremental: Cuando los niveles de esfuerzo son más altos que los del rango B, la deformación permanente se acumula a una velocidad mucho más rápida



en comparación con el rango A o B. En este caso, la tasa de deformación permanente decrece muy lentamente o no se reduce. Esto eventualmente puede llevar a la falla.

El término "shakedown" establece que un pavimento es capaz de presentar una acumulación progresiva de deformación permanente bajo cargas repetidas si las magnitudes de las cargas aplicadas exceden un valor límite, conocido en ocasiones como límite shakedown, llegando a alcanzar la falla del material. Si las cargas de tráfico aplicadas son menores a este límite, luego de que se dé la estabilización debida a la post-compactación del material, este dejara de acumular deformación permanente y el pavimento entrará en un estado de shakedown, en el cual el material presentará sólo deformaciones resilientes bajo las cargas de tráfico. (Porrás, 2015).

En la Figura 19 se grafican los comportamientos según cada uno de los rangos mencionados. En una estructura de pavimento, se permite que ocurra un comportamiento de Rango A. El comportamiento del rango B puede permitirse para un número limitado de ciclos de carga y el comportamiento del rango C no debe aparecer en absoluto (Shafiqur, 2015). Para las pruebas RLT, estos límites de "shakedown" se pueden definir utilizando los criterios de la ecuación 5.

$$\text{Rango A: } (\varepsilon_p^{5000} - \varepsilon_p^{3000}) < 0,045 \times 10^{-3} \quad [5]$$

$$\text{Rango B: } 0,045 \times 10^{-3} < (\varepsilon_p^{5000} - \varepsilon_p^{3000}) < 0,4 \times 10^{-3}$$

$$\text{Rango C: } (\varepsilon_p^{5000} - \varepsilon_p^{3000}) > 0,4 \times 10^{-3}$$

donde, ε_p^{3000} y ε_p^{5000} corresponde a la deformación permanente acumulada a los 3000 y 5000 ciclos de carga respectivamente en el ensayo de deformación permanente.

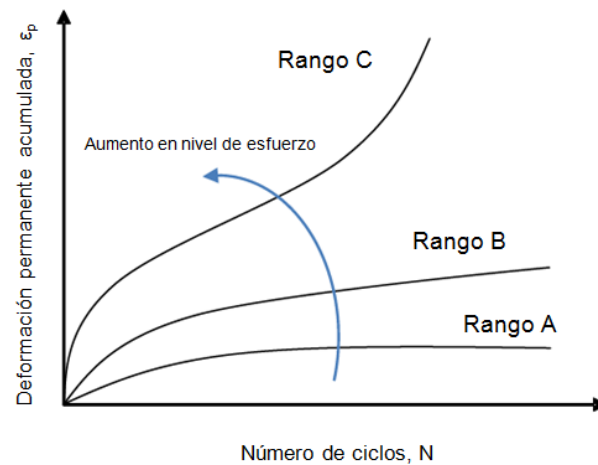


Figura 19. Diferentes tipos de comportamiento de deformación permanente, dependiendo del nivel de esfuerzo. (Dawson, Werkmeister, & Wellner, 2005)

El desempeño del material finalmente se establece cuando la deformación permanente resulta como máximo 10 mm para una capa de base estabilizada con asfalto según como se establece en la Tabla 8 (Wirtgen GmbH, 2012).

Tabla 8. Relaciones de esfuerzo desviador para una deformación máxima de 10 mm en capas de BEA

Confiabilidad de diseño (95 %) (Autopistas con alto volumen de tránsito)	Confiabilidad de diseño (80 % - 90 %) (Secundarias de moderado volumen de tránsito)
0,35	0,40

Para especímenes de 200 mm de altura los 10 mm de deformación establecidos equivalen a un 5% de la deformación axial.



3. RESULTADOS DE DISEÑO

3.1 Resumen del procedimiento

Se realizó es esquema de diseño según el procedimiento mostrado en la Figura 5.

3.2 Caracterización de materiales

3.2.1 Material Granular

Para realizar el diseño de la base estabilizada con asfalto espumado, se caracterizó una base granular y asfalto AC-30. La base proviene del Tajo Santa Ana de la Empresa MECO, que se localiza en Santa Ana. A su vez el asfalto AC-30 que se utilizó fue suministrado por la empresa Hernán Solís, muestreado en los plantes de la misma.

En la Tabla 9 y en la Figura 20, se observan los resultados obtenidos para el ensayo de análisis granulométrico según la norma AASHTO T 27 y T 11.

Tabla 9. Granulometría del material ensayado

Tamiz (pulg)	Tamiz (mm)	Pasando (%)	Especificación recomendada por Wirtgen, 2012	
			Min	Max
2"	50	100,0	100,0	100,0
1 1/2"	37,5	100,0	87,0	100,0
1"	25	92,3	76,0	100,0
3/4"	19,5	81,7	65,0	100,0
1/2"	12,50	70,6	55,0	90,0
3/8"	9,50	64,1	48,0	80,0
1/4"	6,30	55,3	41,0	70,0
Nº 4	4,75	50,1	35,0	62,0
Nº 8	2,36	37,6	25,0	47,0
Nº 10	2,10	35,1	----	----
Nº 16	1,18	28,7	18,0	36,0
Nº 30	0,60	22,4	13,0	28,0
Nº 40	0,43	19,9	11,0	25,0
Nº 50	0,30	17,5	9,0	22,0
Nº 100	0,15	13,8	6,0	17,0
Nº 200	0,075	10,9	4,0	12,0

La granulometría del material seleccionado cumple con los criterios granulométricos recomendados por el manual (Wirtgen GmbH, 2012). El material según la granulometría es apto para ser estabilizado con asfalto espumado.

Informe LM-PI-UMP-054-R3	Fecha de emisión: 06 de December de 2018	Página 47 de 84
--------------------------	--	-----------------

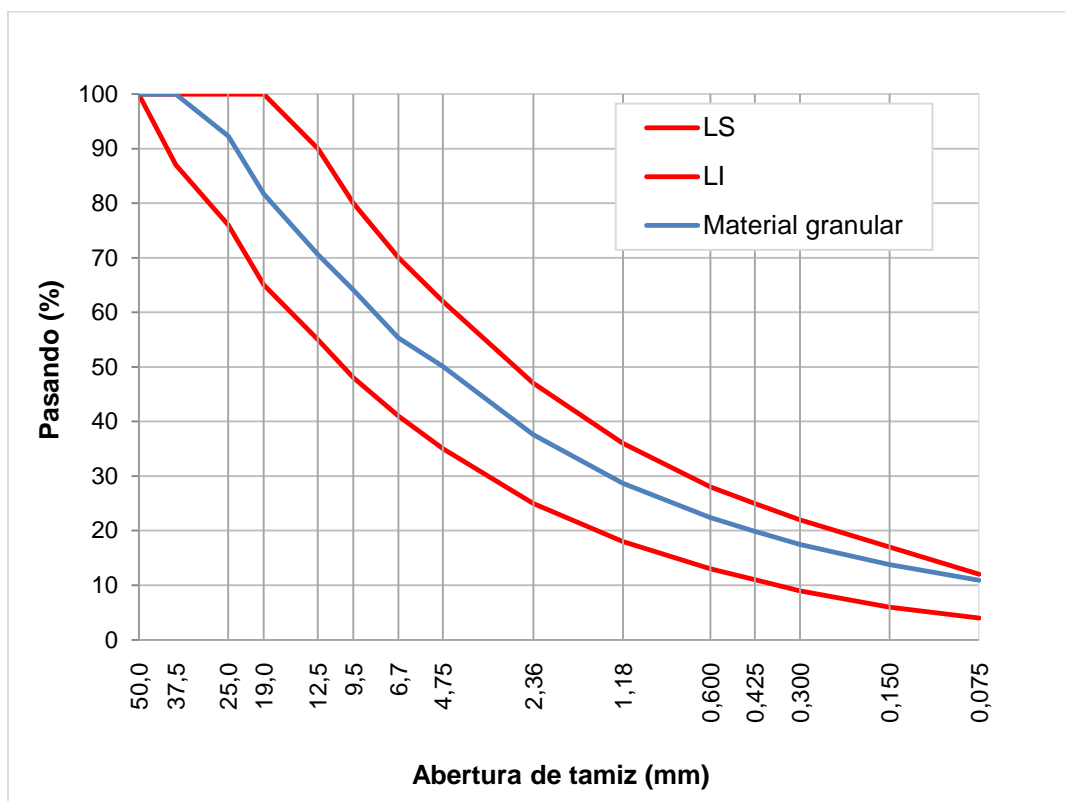


Figura 20. Curva granulométrica

En la Tabla 10 se muestran las características del material granular y su cumplimiento según las referencias de las especificaciones requeridas en el manual de Wirtgen y el CR-2010.

El material cumple con los criterios mínimos de calidad. Es importante ver que el material es no plástico, ya que si este tuviera una plasticidad mayor a 10 este no sería apto para ser estabilizado con asfalto espumado del todo, o requeriría un pretratamiento con cal hidratada para disminuir su plasticidad.

3.2.2 Asfalto

El asfalto empleado para espumar es el asfalto típico que comercializa Recope para utilizarse en mezclas asfálticas. Se llevó a cabo el ensayo de penetración al asfalto sin espumar tal como lo solicita el manual de Wirtgen, con el fin de conocer la calidad de la espumación. En la Tabla 11 se muestra el resultado de penetración, el cual no alcanza el valor mínimo recomendado por Wirtgen, sin embargo, esto no limitó su espumación ya que es posible su calibración.



Tabla 10. Caracterización del material de base

Ensayo	Norma	Unidades	Resultado	Especificación	Manual
Límite líquido	ASTM D4318	%	NP	35 max	Wirtgen
Límite plástico	ASTM D4318	%	NP	-----	Wirtgen
Índice de plasticidad	ASTM D4318	%	NP	10 max	Wirtgen
Densidad máxima seca	AASHTO T180	kg/m ³	1973,6	-----	-----
Contenido óptimo de humedad	AASHTO T180	%	10,1	-----	-----
CBR a 95%	AASHTO T193	%	130	80 min	Wirtgen
Índice de durabilidad gruesos	ASTM D3744	%	39	35 min	CR 2010
Índice de durabilidad finos	ASTM D3744	%	62	35 min	CR 2010
Abrasión de los Ángeles	ASTM C535	%	40	50 max	CR 2010
Caras fracturadas	ASTM D5821	%	100,0	50 min	CR 2010
Partículas friables	ASTM C142	%	0,6	-----	CR2010
Equivalente de arena	ASTM D2419	%	40	-----	CR2010
Presencia materia orgánica	ASTM C140	-----	no	Sin orgánicos	CR2010
GBS gruesos	ASTM C127	-----	2,260	-----	-----
Absorción gruesos	ASTM C127	%	5,4	-----	-----
GBS finos	ASTM C128	-----	2,176	-----	-----
Absorción finos	ASTM C128	%	8,4	-----	-----

Tabla 11. Resultados del ensayo de penetración al asfalto original M-2022-14

Resultado de penetración (1/10) mm	Especificación recomendada (1/10) mm
55,2	60-100

3.2.1 Determinación de la expansión y vida media de asfalto espumado

Para el asfalto espumado se midió la Expansión y la Vida Media. En la Figura 21 se observa el gráfico donde se determina el contenido de agua donde se cumplen con la vida media

mínima y la expansión mínima. Para una temperatura de 160°C el contenido de humedad que cumple con los criterios antes señalados es 1,3%.

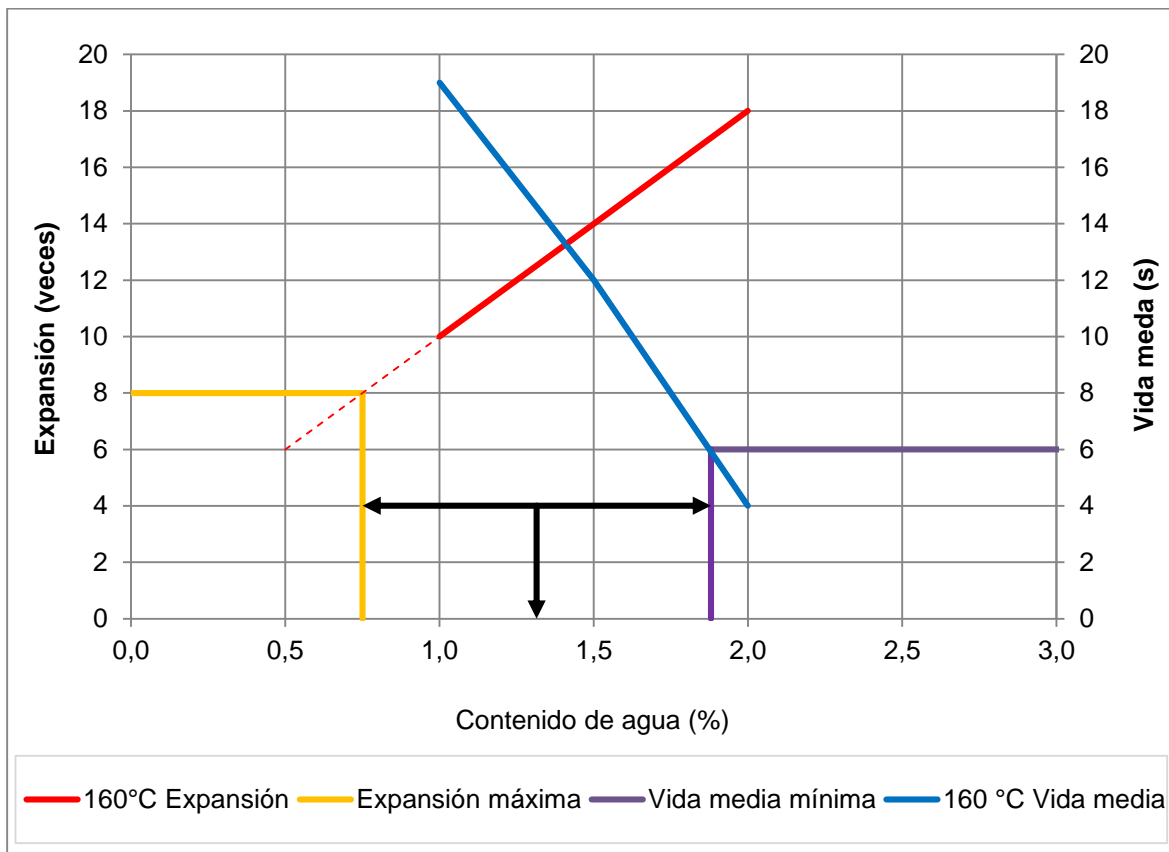


Figura 21. Determinación de la expansión y vida media a 160°C

3.4 Relación densidad-humedad

Se realizó el ensayo de relación densidad- humedad del material sin estabilizar mediante el método Próctor modificado, método C según la norma de ensayo AASHTO T180 (Figura 22). El material de ensayo se preparó según lo indicado en la sección 2.7.2.

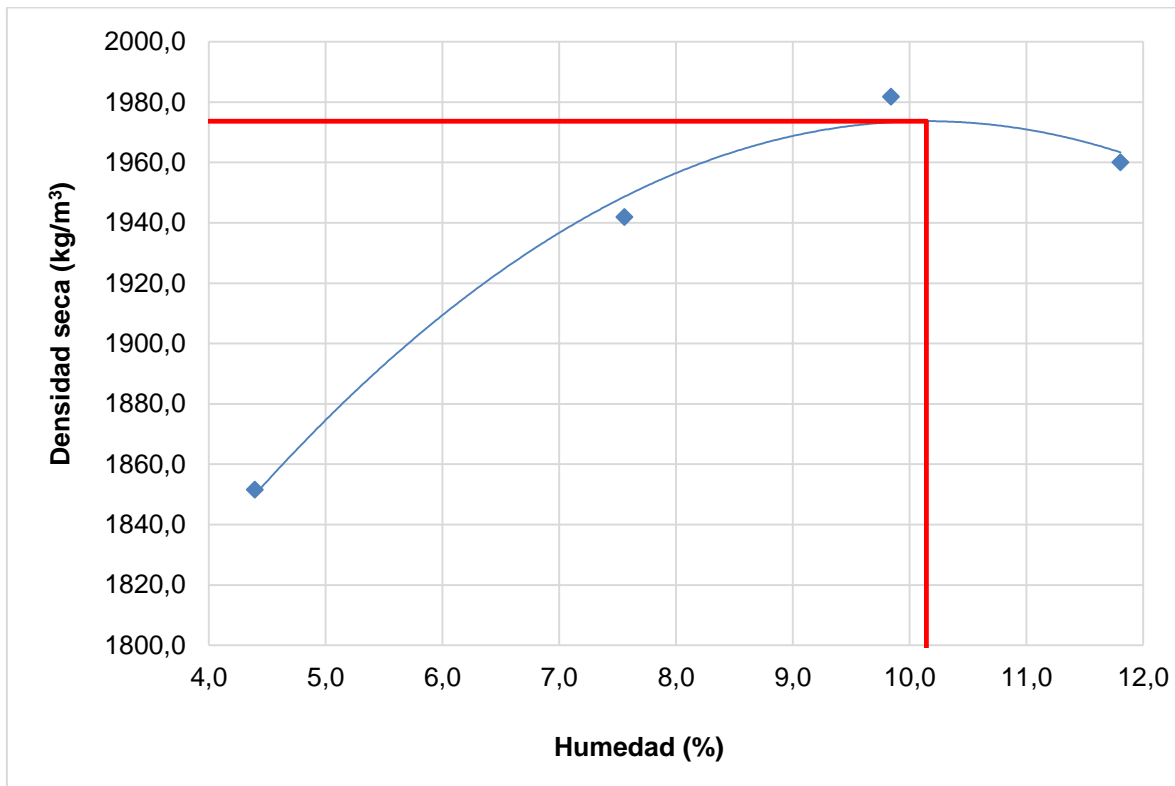


Figura 22. Determinación de la relación densidad-humedad del material sin estabilizar

La densidad máxima seca es de $1973,6 \text{ kg/m}^3$ y su respectivo contenido óptimo de humedad el 10,1%. Estos valores son de referencia para el mezclado y compactación de especímenes para el diseño de mezcla.

3.5 Requerimiento de relleno mineral activo

Para determinar si es necesario la incorporación de relleno mineral activo, se elaboraron 3 mezclas: una con 0% de relleno mineral activo, 1% de cal y 1% de cemento. Se utilizó un mismo porcentaje de asfalto residual para las 3 mezclas, utilizando como referencia el recomendado en la Tabla 5. Para las tres mezclas se compactaron especímenes de 100 mm de diámetro y 63 mm de altura mediante el método Marshall a 75 golpes por cara y se curaron a 40°C durante 72 horas. Las pastillas se fallaron a tensión indirecta (ITS) con y sin acondicionamiento, y se calculó el porcentaje de resistencia retenida (TSR), el cual es un indicador de requerimiento de relleno mineral activo. Si la resistencia retenida de la mezcla sin relleno mineral activo es superior a 65%, no es necesario adicionarlo.



Cuando la resistencia retenida de la mezcla sin relleno mineral activo es menor a 65%, se escogerá la mezcla con el tipo de relleno mineral activo (cal o cemento) que resulte con un TSR significativamente mayor al otro ($> 5\%$). Si los valores de TSR con ambos rellenos minerales activos están dentro del mismo orden, (diferencia $< 5\%$) cualquiera de los dos tipos de relleno mineral activo es adecuado, y se escogerá mediante un criterio económico. En el caso del material ensayado se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 15.

Tabla 12. Requerimiento de relleno mineral activo

Relleno mineral activo	Asfalto residual	Densidad bruta	Compact.	ITS sin acond	ITS acond	TSR
	%	kg/m ³	%	kPa	kPa	%
Sin relleno	3,2	1994	103,2	361	69	19,1
Cal	3,2	1972	102,1	357	321	89,8
Cemento	3,2	1966	101,8	239	219	91,6

De lo anterior, se determinó que el material granular sí requiere un relleno mineral activo debido a que la resistencia retenida sin la adición de relleno fue menor a 65 %. Siendo la cal el relleno mineral activo que con mejor resultado de resistencia retenida y más de 5% por encima de la del cemento; por lo tanto, se selecciona la **cal** como relleno mineral activo para la etapa de diseño.

3.6 Determinación de la cantidad mínima del relleno mineral activo

Para determinar la sensibilidad del contenido de relleno mineral activo en la mezcla, se realizaron ensayos adicionales en especímenes de 100 mm de diámetro con el relleno mineral activo seleccionado a una tasa de aplicación menor: 0,50% y 0,75%, manteniendo el mismo curado anterior. Los resultados se muestran en la Tabla 16 y en la Figura 14.

Tabla 13. Contenido de relleno mineral activo

Relleno mineral activo	Asfalto residual	Densidad	Compact.	ITS sin acond	ITS acond	TSR
%	%	kg/m ³	%	kPa	kPa	%
1,00	3,2	1972	102,1	357,0	320,5	89,8
0,75	3,2	1962	102,2	292,4	236,4	80,9
0,50	3,2	1961	102,0	240,4	150,6	62,6

Informe LM-PI-UMP-054-R3	Fecha de emisión: 06 de December de 2018	Página 52 de 84
--------------------------	--	-----------------

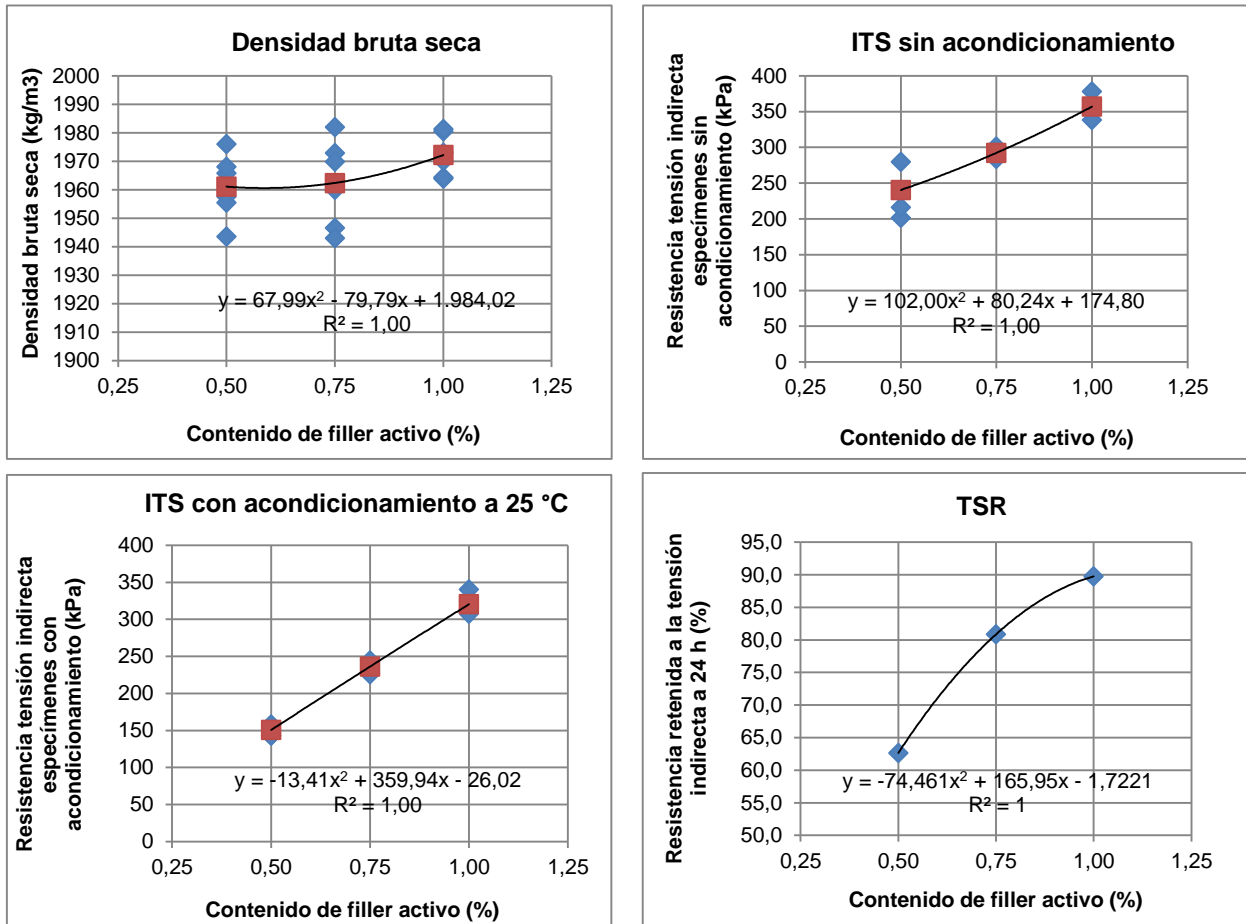


Figura 23. Variación de parámetros de diseño con respecto al contenido de relleno mineral activo en la mezcla

Se fija el contenido de cal en 1%, a pesar de que con 0,75% cumple. Sin embargo, ese proyecto se estaba realizando en paralelo con el proyecto de investigación de bases estabilizadas con emulsión donde se fijó en 1% el contenido de filler, por tanto, se decidió para la estabilización con asfalto espumado utilizar el mismo porcentaje, para poder comparar los efectos en el desempeño con ambos materiales.

3.7 Contenido óptimo de asfalto residual Nivel de diseño 1

Se compactaron especímenes de 100 mm de diámetro y 63 mm de altura mediante el método Marshall a 75 golpes por cara y se curaron a 40°C durante 72 horas. Las pastillas se fallaron a tensión indirecta (ITS) con y sin acondicionamiento. Los resultados se muestran en la Tabla 13 y Figura 24.

Tabla 14. Contenido óptimo de asfalto residual nivel de diseño 1

Asfalto residual	Densidad	Compact.	ITS sin acond	ITS acond	TSR
%	kg/m ³	%	kPa	kPa	%
2,45	1978	102,4	385,5	343,8	89,2
2,95	1984	102,5	351,7	316,2	89,9
3,45	1965	102,6	330,0	305,0	92,4
3,95	1960	102,5	379,9	318,6	83,9

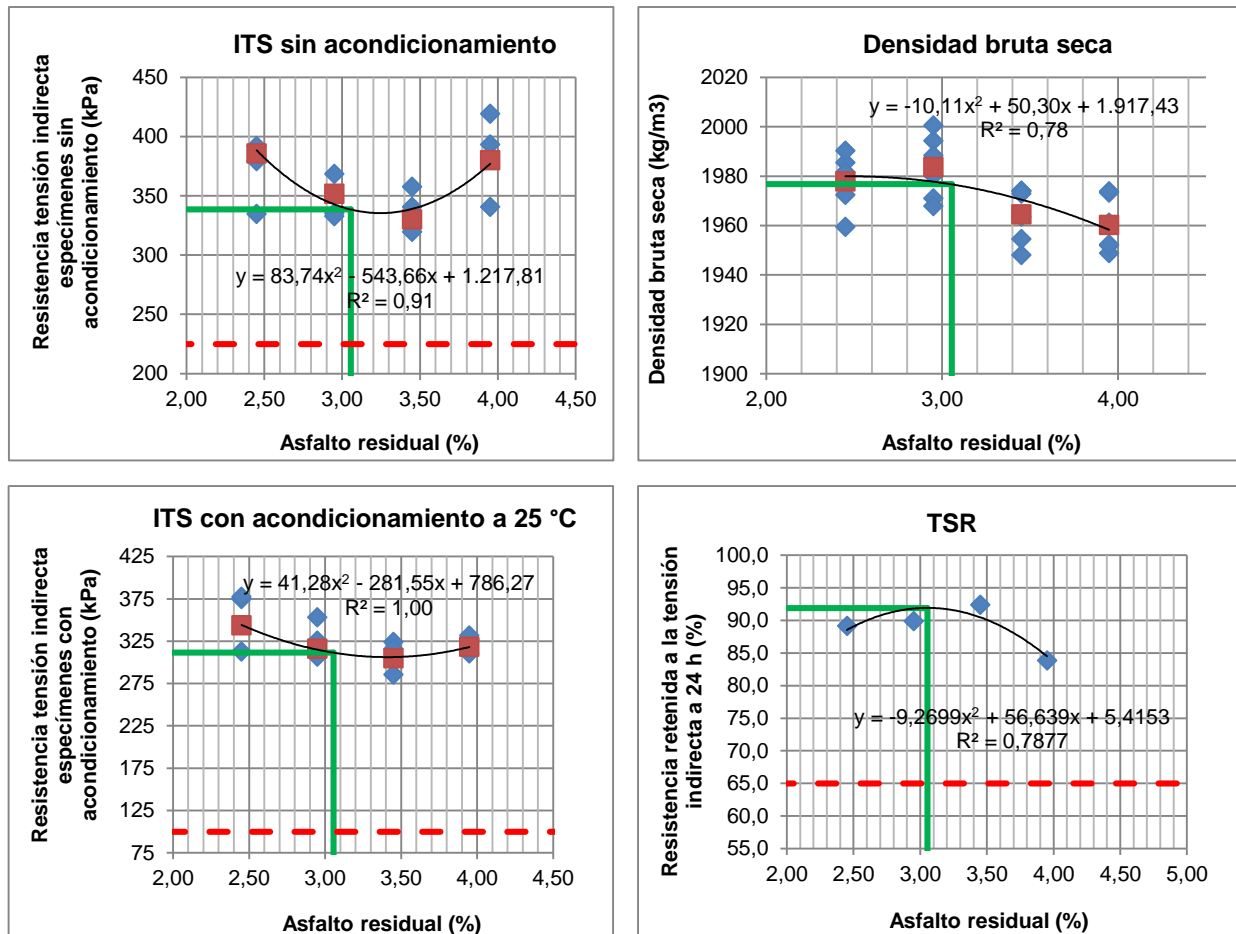


Figura 24. Variación de parámetros de diseño con respecto al contenido de asfalto residual en la mezcla nivel de diseño 1.

Se determinó que el contenido óptimo de asfalto residual es **3,05%**, tomando como referencia la mayor resistencia retenida y que cumpla con las tensiones indirectas mínimas sin y con acondicionamiento, sin embargo, se observa que para contenidos más bajos de asfalto se cumplen con las resistencias mínimas, y podría tomarse en cuenta bajar el



contenido de relleno mineral activo, para reducir los costos sin perjuicio de las resistencias requeridas. El material según estos resultados se clasifica preliminarmente como **BEA1** según Tabla 1.

Si las cargas de tránsito esperadas son menores a 3 millones de ejes equivalentes, el diseño terminaría aquí. En el caso particular del material estudiado se continuó con el siguiente nivel de diseño, que implica cargas de tránsito entre 3 y 6 millones de ejes equivalentes para obtener un contenido de asfalto residual más confiable.

3.8 Contenido óptimo de asfalto residual Nivel de diseño 2

Para este nivel de diseño se prepararon especímenes de 150 mm de diámetro y 95 mm de altura, para lo cual se utilizó el compactador giratorio a una altura constante de 95 mm y variando la cantidad de material para que se obtuviera la densidad máxima seca del Próctor modificado. A partir de la densidad máxima seca se calcula su correspondiente densidad húmeda, y con ello se determina la masa de material en cada espécimen.

De acuerdo a la metodología investigada, el contenido de humedad de equilibrio para las condiciones propias del país se utilizó un índice TMI > 100 y para el cálculo de las ecuaciones 1 y 2 se tienen los parámetros de entrada y sus respectivos resultados resumidos en la Tabla 15.

Tabla 15. Resumen de parámetros y resultados del cálculo de las ecuaciones EMC

Parámetro	Valor	Unidades
TMI	100	-
k	1	-
OMC	10,1	%
P_{425}	19,9	%
LS^1	0	-
EMC_1 (ecuación 1)	8,47	%
EMC_1/OMC	83,8	%
EMC_2 (ecuación 2)	6,0	%
EMC_2/OMC	58,9	%

¹ Dado que no hay presencia de arcillas no hay contracción lineal.



De lo anterior, las pastillas compactadas se debieron curar entre 55 % y 65 %, sin embargo, suponiendo un escenario de humedad más crítico se curaron hasta alcanzar un contenido de humedad de equilibrio (EMC) entre 65 % - 75 %. Para lo cual se observó que el curado inicial por 24 horas a 30 °C como lo establece el protocolo de ensayo, provoca una pérdida acelerada de humedad en los especímenes, por lo que se decidió, que solamente se dejarían a temperatura ambiente durante un periodo de 18 horas y posteriormente se llevarían a un horno a 30 °C para alcanzar de manera controlada entre 65 % y 75 % del contenido óptimo de humedad. Luego se sigue el procedimiento de la misma forma que lo propuesto y el material pueda alcanzar la máxima cohesión bajo esas condiciones. Finalmente, se ensayó a tensión indirecta (ITS) para ese contenido de humedad de equilibrio, cuyos resultados se muestran en la Tabla 16 y la Figura 25.

Tabla 16. Contenido óptimo de asfalto residual nivel de diseño 2

Asfalto residual	Densidad	Compact.	ITS sin acond	ITS acond	TSR
%	kg/m ³	%	kPa	kPa	%
2,65	1956,0	101,3	482,4	402,4	83,4
3,15	1948,7	100,9	420,1	386,7	92,1
3,65	1948,9	100,9	335,9	310,3	92,4

Se determina que el contenido óptimo de asfalto residual **3,15%**, tomando como referencia la mayor resistencia retenida, y que cumpla con las tensiones indirectas mínimas sin y con acondicionamiento.

Para este nivel de diseño el material se clasifica como **BEA1** según Tabla 6, tal como se esperaba en el nivel de diseño anterior.

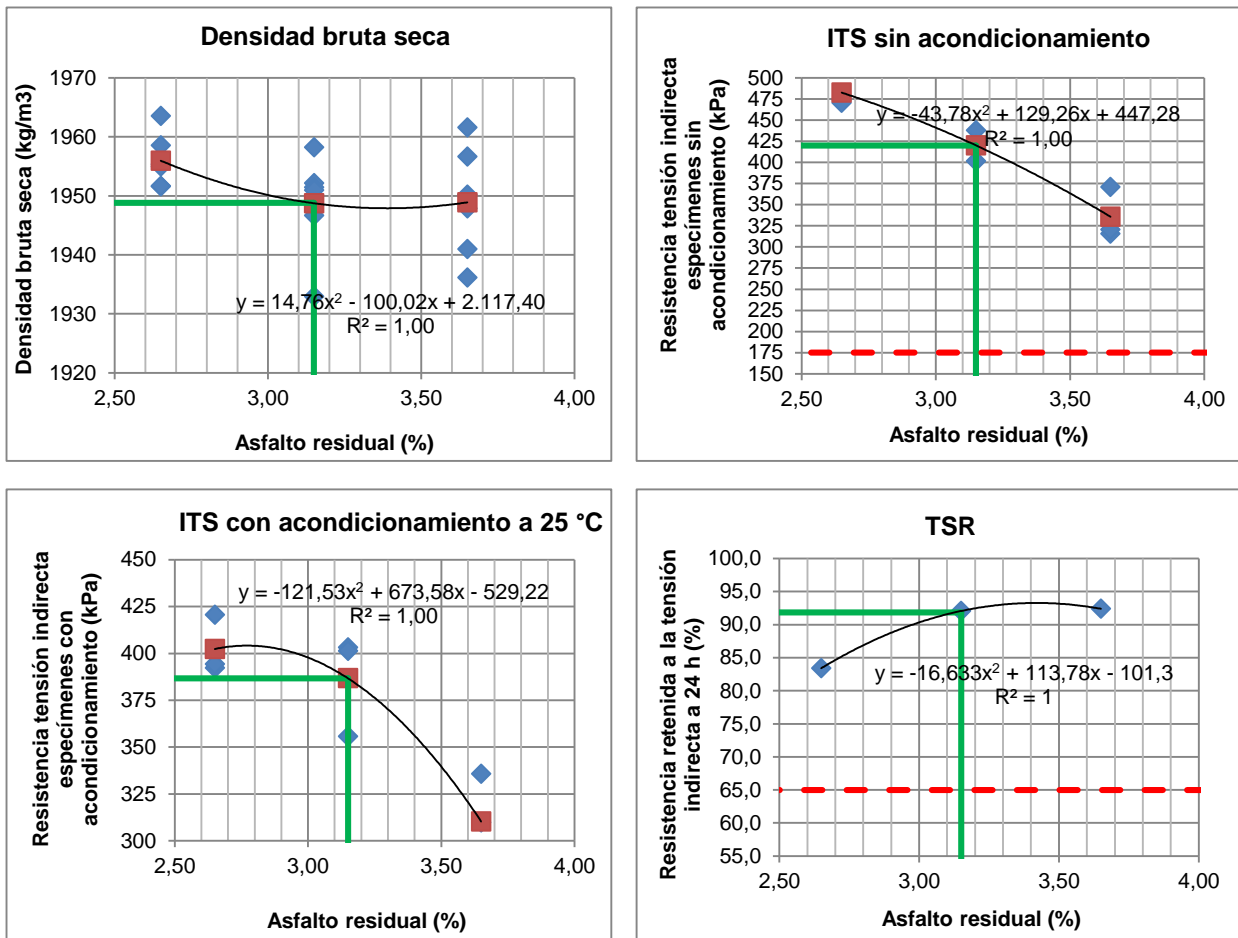


Figura 25. Variación de parámetros de diseño con respecto al contenido de asfalto residual en la mezcla nivel de diseño 2.

3.9 Nivel de diseño 3

A partir del contenido óptimo de asfalto residual en la mezcla obtenido en el nivel de diseño 2, se realizan ensayos de resistencia al corte en la cámara triaxial. Primeramente, se realizó el ensayo de triaxial estático con especímenes en condición de humedad de equilibrio, tal como se llevó a cabo en el nivel de diseño 2, a diferentes esfuerzos de confinamiento: 0 kPa, 50 kPa, 100 kPa y 200 kPa. Se determinó los parámetros de cohesión C y ángulo de fricción interna ϕ . Esto con el objetivo de clasificar el material de manera más confiable según la Tabla 8, y poder generar las razones de esfuerzos desviadores necesarios para el ensayo de deformación permanente. Además, se efectuó el ensayo de triaxial estático a 100 kPa de confinamiento para especímenes acondicionados en agua a 25°C por 24 horas para determinar un porcentaje de cohesión retenida, los resultados de dichos ensayos se observan en la Tabla 16 y Figuras 26 y 27.

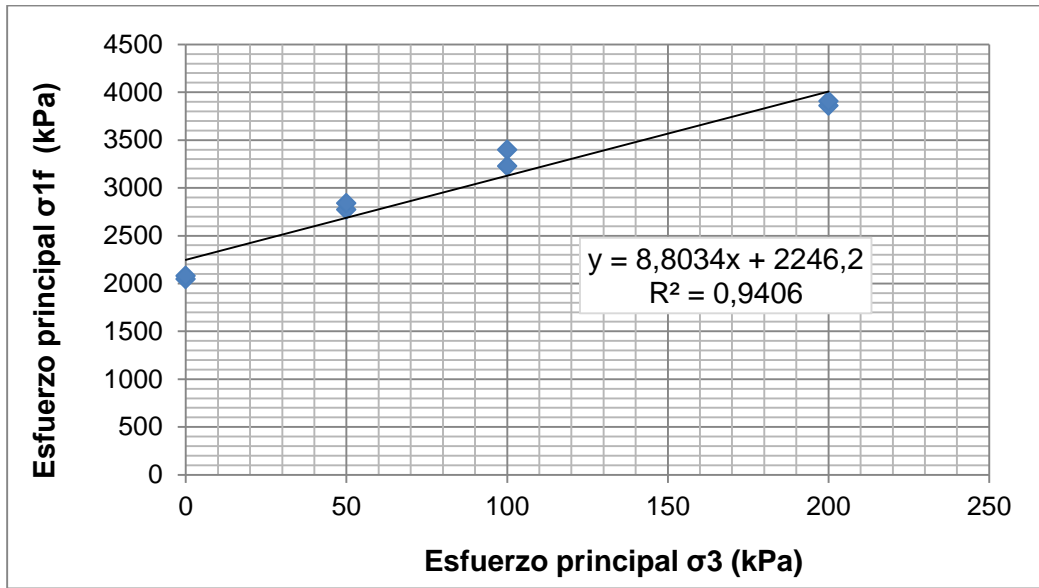


Figura 26. Resultados del ensayo de resistencia al corte

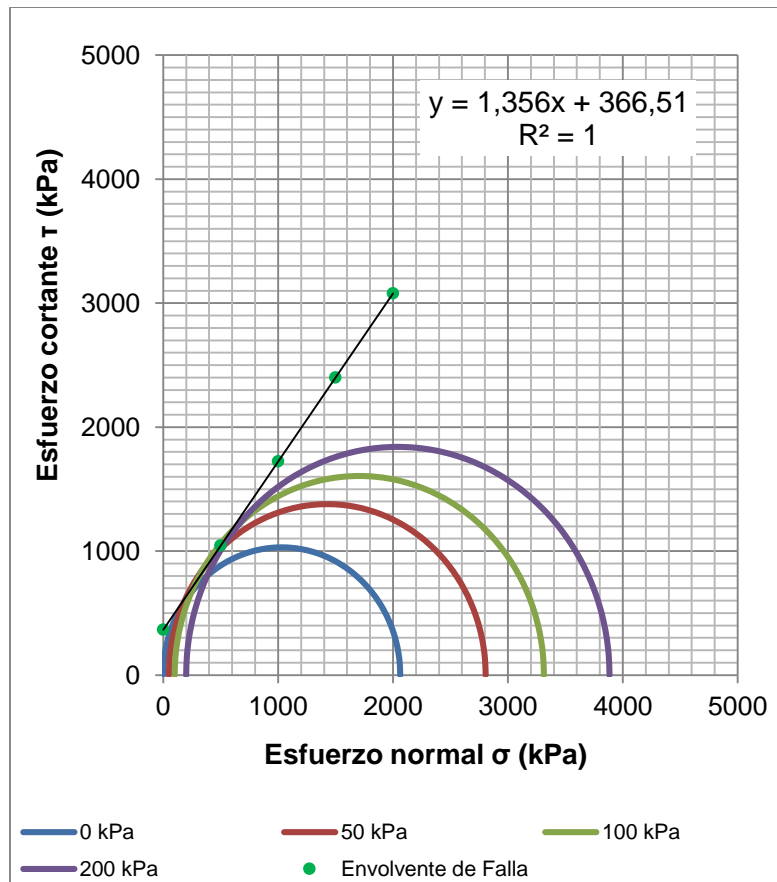


Figura 27. Envoltente de Falla



Tabla 17. Resumen de resultados ensayos de triaxial

Asfalto residual	Densidad	Compact.	Angulo friccion interna ϕ	Cohesion C	Cohesion retenida	Clasificación del material según C y ϕ (Wirtgen, 2012)
%	kg/m ³	%	°	kPa	%	
3,15	1950,2	101,0	2229,0	9,2	87,7	BEA1

Paralelamente, se realizó el ensayo de módulo resiliente para materiales granulares y obtener un modelo para diferentes estados de esfuerzos, lo cual se realizó tanto en el material estabilizado como sin estabilizar, y así verificar si había un incremento en la resistencia.

Estos resultados son un insumo para diseñar la estructura del pavimento, mediante el método mecanicista, por lo que en la Tabla 17 se muestran los datos para la obtención del modelo de regresión lineal múltiple, y en las Tablas 18 y 19 los resultados de los parámetros de la ecuación final del modelo (ecuación 8)

En las Figuras 28 y 29 se observa gráficamente los resultados de los datos obtenidos en el ensayo y los calculados a partir del modelo.



Tabla 18. Resumen de MR (estabilizado)

Secuencia	σ_1	σ_2	σ_3	σ_d	θ	τ_{oct}	Pa	Mr actual	Y1	X1	X2	Mr predicho
	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	$\log(Mr/Pa)$	$\log(\theta/Pa)$	$\log((\tau_{oct}/Pa)+1)$	kPa
1	31	21	21	10	73	5	101	165700	3,2	-0,1	0,0	145465
2	62	41	41	21	145	10	101	241700	3,4	0,2	0,0	259409
3	103	69	69	34	241	16	101	345525	3,5	0,4	0,1	395604
4	155	104	104	52	362	24	101	484850	3,7	0,6	0,1	550938
5	207	138	138	69	483	33	101	653100	3,8	0,7	0,1	694462
6	41	21	21	21	83	10	101	175025	3,2	-0,1	0,0	161385
7	83	41	41	41	166	20	101	281675	3,4	0,2	0,1	285772
8	138	69	69	69	276	33	101	426050	3,6	0,4	0,1	431964
9	207	104	104	104	414	49	101	638075	3,8	0,6	0,2	595727
10	276	138	138	138	552	65	101	851250	3,9	0,7	0,2	745244
11	62	21	21	41	104	20	101	204775	3,3	0,0	0,1	191801
12	124	41	41	83	207	39	101	348650	3,5	0,3	0,1	335217
13	207	69	69	138	345	65	101	564825	3,7	0,5	0,2	500085
14	311	104	104	207	518	98	101	833150	3,9	0,7	0,3	681009
15	414	138	138	276	690	130	101	994225	4,0	0,8	0,4	843701
16	83	21	21	62	124	29	101	230025	3,3	0,1	0,1	220444
17	166	41	41	124	248	59	101	397150	3,6	0,4	0,2	381432
18	276	69	69	207	414	98	101	635675	3,8	0,6	0,3	563482
19	414	104	104	311	621	146	101	898800	3,9	0,8	0,4	761243
20	552	138	138	414	828	195	101	1048900	4,0	0,9	0,5	937670
21	124	21	21	103	166	49	101	265325	3,4	0,2	0,2	273698
22	248	41	41	207	331	98	101	466100	3,7	0,5	0,3	466301
23	414	69	69	345	552	163	101	735700	3,9	0,7	0,4	680212
24	621	104	104	517	828	244	101	946275	4,0	0,9	0,5	909962
25	828	138	138	690	1104	325	101	1085350	4,0	1,0	0,6	1113984
26	166	21	21	145	207	68	101	291425	3,5	0,3	0,2	322994
27	331	41	41	290	414	137	101	505175	3,7	0,6	0,4	543982
28	552	69	69	483	690	228	101	747125	3,9	0,8	0,5	787032
29	828	104	104	724	1035	342	101	999000	4,0	1,0	0,6	1046896
30	1104	138	138	966	1380	455	101	1155250	4,0	1,1	0,7	1277195

Tabla 19. Resultados de la regresión lineal múltiple, para el módulo resiliente del material estabilizado, obtenidos desde la hoja de cálculo (Excel)

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,987
Coefficiente de determinación R ²	0,974
R ² ajustado	0,972
Error típico	0,043
Observaciones	30

ANÁLISIS DE
VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	1,88	0,942	503	4,34E-22
Residuos	27	0,05	0,002		
Total	29	1,93			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	3,28	0,015	220	1,75E-45	3,25	3,31	3,25	3,31
Variable X 1	0,85	0,048	17,6	2,41E-16	0,75	0,95	0,75	0,95
Variable X 2	-0,20	0,082	-2,39	2,38E-02	-0,37	-0,03	-0,37	-0,03

Tabla 20. Resumen de resultados de constantes, para MR del material sin estabilizar

β_1	3,284	K1	1924,6
β_2	0,848	K2	0,849
β_3	-0,197	K3	-0,197

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad [6]$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad [7]$$

$$M_r = k_1 \cdot P_a \cdot \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3} = 1924,6 \cdot P_a \cdot \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,849} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-0,197} \quad [8]$$

Para el cálculo del modelo de módulo resiliente, se utilizaron las ecuaciones 6, 7 y 8, según la referencia (Jimenez, 2009).

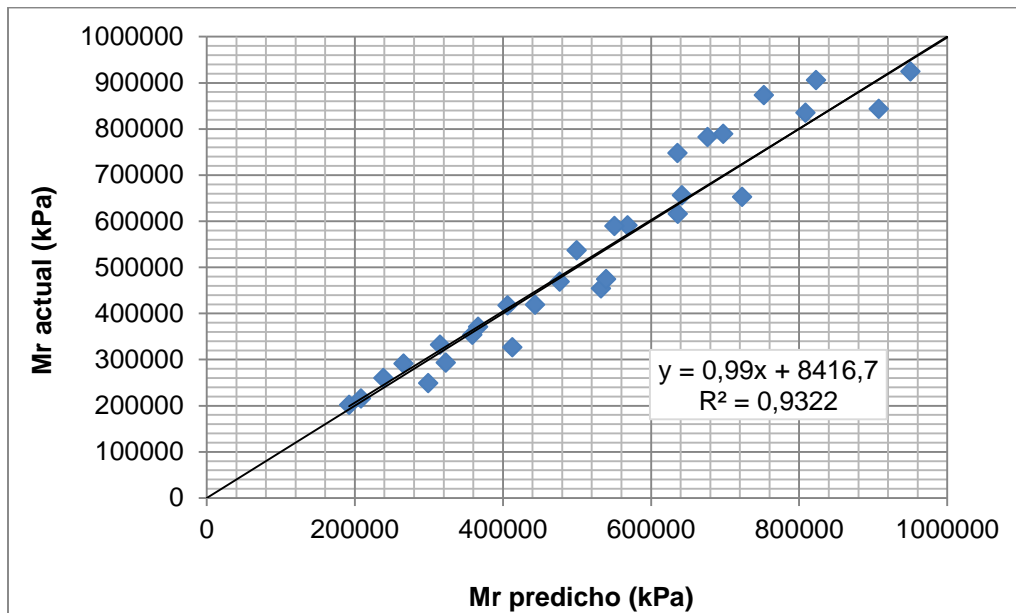


Figura 28. Mr actual vs Mr predicho (material estabilizado)

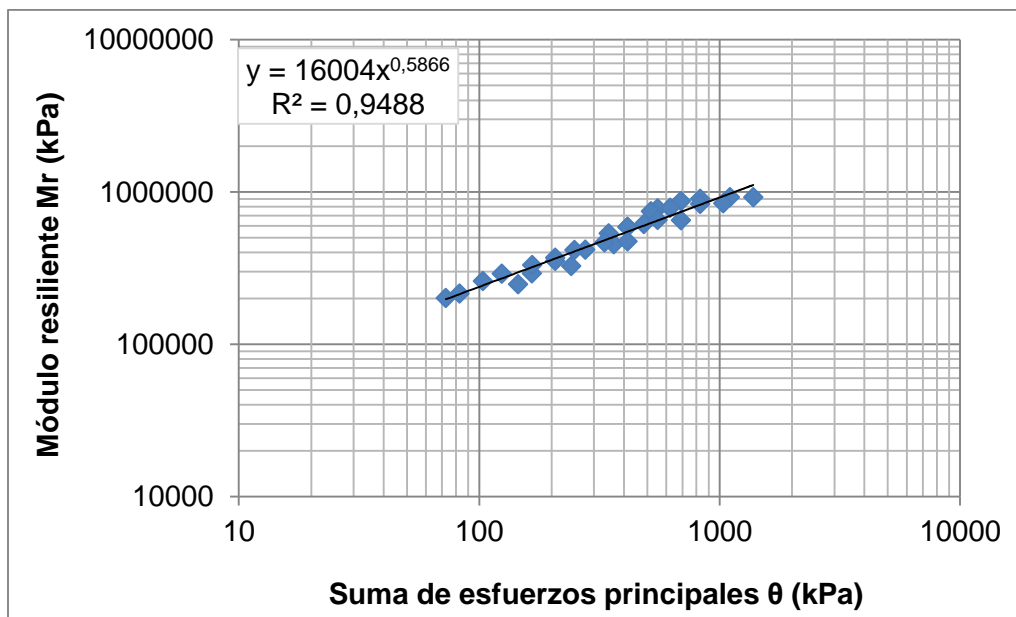


Figura 29. Variación del Mr vs esfuerzo bruto (material estabilizado).

El ejercicio se realizó también para analizar los resultados del módulo resiliente ensayado en el material sin estabilizar, cuyos datos y resultados se muestran en las Tablas 20, 21 y 22; y las Figuras 30 y 31.



Tabla 21. Resumen de MR (sin estabilizar)

Secuencia	σ_1	σ_2	σ_3	σ_d	θ	τ_{oct}	Pa	Mr actual	Y1	X1	X2	Mr predicho
	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	log(Mr/Pa)	log(θ /Pa)	log((τ_{oct} /Pa)+1)	kPa
1	31	21	21	10	73	5	101	45500	3	0	0	41157
2	62	41	41	21	145	10	101	67600	3	0	0	80137
3	103	69	69	34	241	16	101	109250	3	0	0	129786
4	155	104	104	52	362	24	101	176500	3	1	0	188923
5	207	138	138	69	483	33	101	248950	3	1	0	245161
6	41	21	21	21	83	10	101	48000	3	0	0	46169
7	83	41	41	41	166	19	101	77800	3	0	0	88568
8	138	69	69	69	276	33	101	131050	3	0	0	141183
9	207	104	104	104	414	49	101	207450	3	1	0	201841
10	276	138	138	138	552	65	101	282850	3	1	0	258056
11	62	21	21	41	104	20	101	58150	3	0	0	55735
12	124	41	41	83	207	39	101	102350	3	0	0	104483
13	207	69	69	138	345	65	101	170200	3	1	0	162340
14	311	104	104	207	518	98	101	252150	3	1	0	226706
15	414	138	138	276	690	130	101	317050	3	1	0	284683
16	83	21	21	62	124	29	101	68250	3	0	0	64801
17	166	41	41	124	248	59	101	123400	3	0	0	119163
18	276	69	69	207	414	98	101	197400	3	1	0	181907
19	414	104	104	311	621	146	101	271050	3	1	0	250234
20	552	138	138	414	828	195	101	324150	4	1	0	310972
21	124	21	21	104	166	49	101	84100	3	0	0	81759
22	248	41	41	207	331	98	101	150400	3	1	0	145973
23	414	69	69	345	552	163	101	222400	3	1	0	217585
24	621	104	104	518	828	244	101	288400	3	1	1	293928
25	828	138	138	690	1104	325	101	344350	4	1	1	361049
26	166	21	21	145	207	68	101	92150	3	0	0	97346
27	331	41	41	290	414	137	101	167250	3	1	0	170275
28	552	69	69	483	690	228	101	246750	3	1	1	249955
29	828	104	104	724	1035	341	101	315650	3	1	1	334098
30	1104	138	138	966	1380	455	101	368500	4	1	1	407807

Tabla 22. Resultados de la regresión lineal múltiple, para el material sin estabilizar obtenidos desde la hoja de cálculo (Excel)

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
<i>Coefficiente de correlación múltiple</i>	0,992
<i>Coefficiente de determinación R²</i>	0,985
<i>R² ajustado</i>	0,984
<i>Error típico</i>	0,035
<i>Observaciones</i>	30

**ANÁLISIS DE
VARIANZA**

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
<i>Regresión</i>	2	2,18	1,09	884	2,46E-25
<i>Residuos</i>	27	0,03	1,23E-03		
<i>Total</i>	29	2,21			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
<i>Intercepción</i>	2,759	0,012	228,397	6,58E-46	2,73	2,78	2,73	2,78
<i>Variable X 1</i>	0,987	0,039	25,329	2,37E-20	0,91	1,07	0,91	1,07
<i>Variable X 2</i>	-0,370	0,067	-5,538	7,20E-06	-0,51	-0,23	-0,51	-0,23

Tabla 23. Resumen de resultados de constantes, para MR del material sin estabilizar

β_1	2,759	K1	573,8
β_2	0,987	K2	0,987
β_3	-0,370	K3	-0,370

$$M_r = k_1 \cdot P_a \cdot \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3} = 573,8 \cdot P_a \cdot \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,987} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-0,370} \quad [9]$$

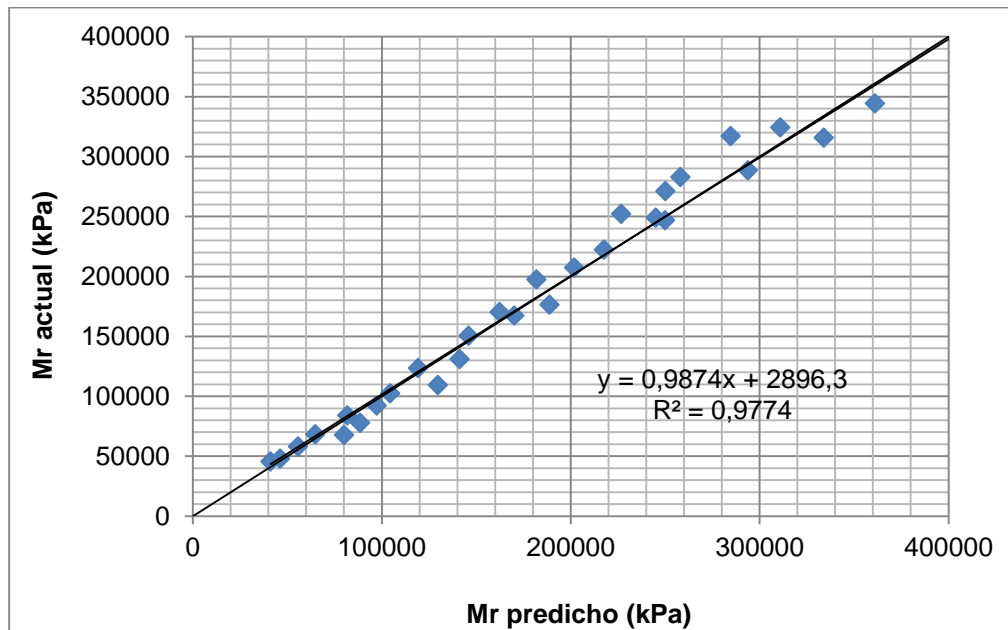


Figura 30. Mr actual vs Mr predicho (material sin estabilizar)

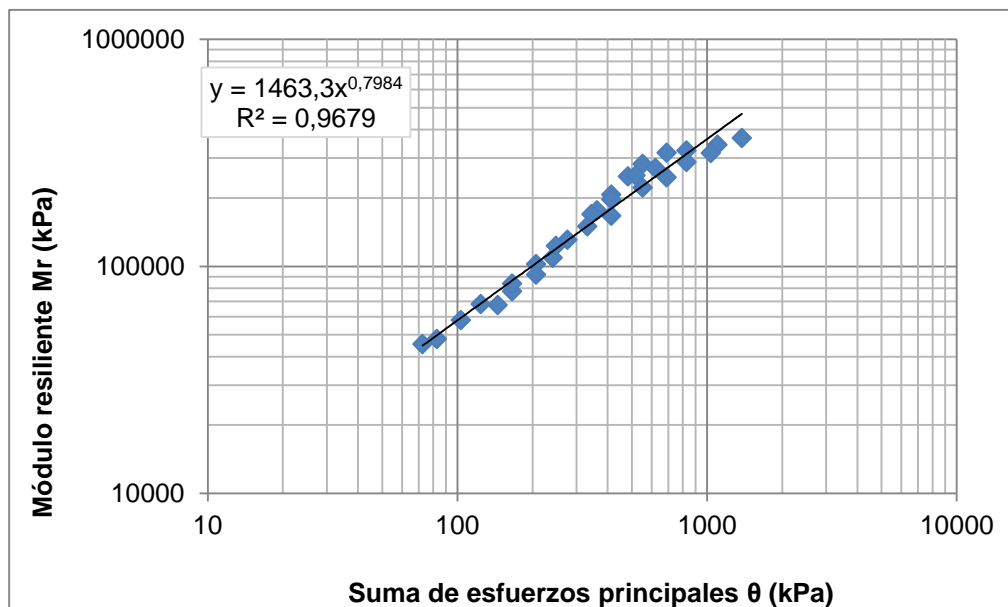


Figura 31. Variación del Mr vs esfuerzo bruto (material sin estabilizar).

Como se esperaba, hubo un aumento de 3 veces el valor de k_1 entre el material sin estabilizar y el material estabilizado con asfalto espumado, al comprar las ecuaciones 8 y 9. De igual forma, en la secuencia 30, donde el protocolo de ensayo arroja los valores de Mr más altos, se presentó un incremento de un poco más del triple en el material estabilizado con asfalto espumado.

4. RESULTADOS DE DESEMPEÑO

El ensayo de deformación permanente se realizó para relaciones de esfuerzo límite de 0,30, 0,35 y 0,40. El esfuerzo desviador de falla se calcula para un confinamiento de 50 kPa. Se necesitan los parámetros de φ y c obtenidos del ensayo de resistencia al corte para diferentes confinamientos.

$$\sigma_{1,f} = A \cdot \sigma_3 + B \quad [10]$$

$$A = \frac{1 + \text{sen}(\varphi)}{1 - \text{sen}(\varphi)}$$

$$B = \frac{2 \cdot c \cdot \text{cos}(\varphi)}{1 - \text{sen}(\varphi)}$$

Y se utiliza la ecuación 10 para despejar el esfuerzo desviador en el ensayo de deformación permanente.

Los esfuerzos desviadores resultantes para las relaciones de esfuerzo requeridas son: 778 kPa, 907 kPa y 1037 kPa, para las mismas condiciones de confinamiento establecidas. Para lo cual se obtuvo los resultados graficados en la Figura 32.

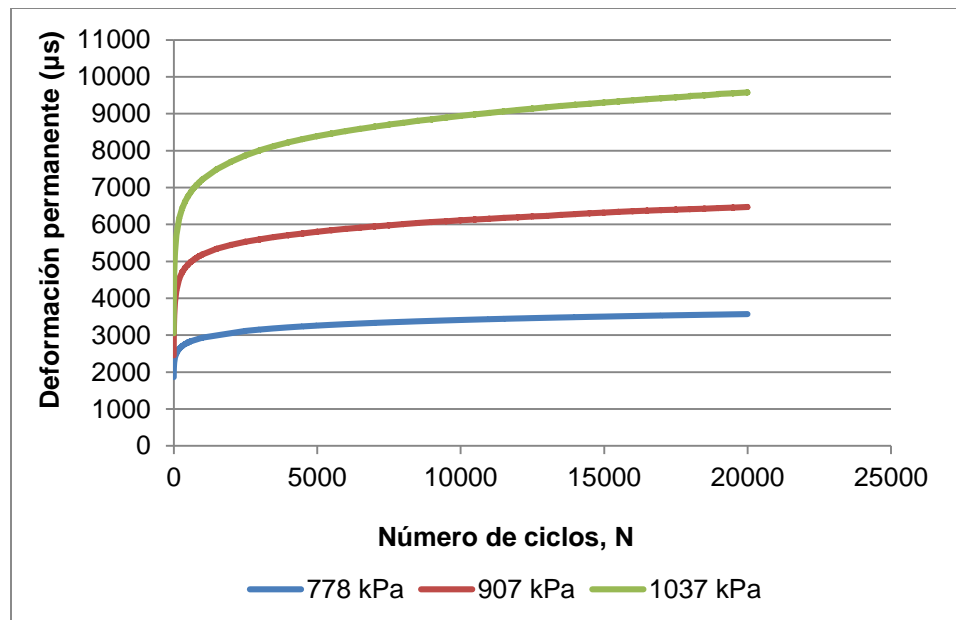


Figura 32. Deformación permanente a 729, 850 y 972 kPa de esfuerzo desviador

Se determinó además para los 3000 y 5000 ciclos respectivamente en qué rango de comportamiento se encuentra el resultado de deformación permanente unitaria del material estabilizado. En la Tabla 24 y 25 se definen los rangos de deformación para cada esfuerzo desviador, tanto para los datos observados como para los obtenidos a partir del modelo.

Tabla 24. Rangos de deformación para cada esfuerzo desviador aplicado (valores observados)

Relación de esfuerzos	Esfuerzo (kPa)	ϵ_p 3000 (mm/mm)	ϵ_p 5000 (mm/mm)	Diferencia (mm/mm)	Rango
0,30	778	3,16E+03	3,26E+03	1,08E+02	C
0,35	907	5,59E+03	5,80E+03	2,05E+02	C
0,40	1037	8,01E+03	8,39E+03	3,82E+02	C

Tabla 25. Rangos de deformación para cada esfuerzo desviador aplicado (valores predichos)

Relación de esfuerzos	Esfuerzo (kPa)	ϵ_p 3000 (mm/mm)	ϵ_p 5000 (mm/mm)	Diferencia (mm/mm)	Rango
0,30	778	3,19E+03	3,31E+03	1,20E+02	C
0,35	907	5,32E+03	5,54E+03	2,16E+02	C
0,40	1037	8,33E+03	8,68E+03	3,47E+02	C

De lo anterior, se tiene que el material se comporta de acuerdo con el rango C, por lo que al aumentar la cantidad de cargas aplicadas el material irá acumulando deformaciones plásticas. Sin embargo, para el material evaluado es necesario realizar el ensayo para un mayor número de repeticiones de carga y conocer cuando el material estabilizado con asfalto espumado pueda llegar al punto crítico de fluencia y posterior falla. Dado que el equipo de ensayo trabaja mediante presión hidráulica, limita su uso por tiempos prolongados para una mayor cantidad de ciclos, donde pueda analizarse mayores cambios en la deformación.

Debido a que la cantidad de ciclos con los cuales se pudo realizar el ensayo sólo fue posible analizar la parte lineal de los modelos estudiados, por lo que la respuesta del material a la

deformación resultó de acuerdo al rango C. En la Tabla 26 se muestran los resultados de regresión lineal múltiple y en la Tabla 28 se resumen los resultados de los parámetros de la ecuación final del modelo (ecuación 4). En la Figura 33 se aprecia un adecuado comportamiento entre los datos observados y los obtenidos a través del modelo de deformación permanente unitaria propuesto. Sin embargo, es importante recordar que el modelo se limita a la respuesta lineal plástica y deja por fuera el análisis de la respuesta no lineal y comprobar si efectivamente el material se comportará indefinidamente de esa forma.

Tabla 26. Resultados de la regresión lineal múltiple, para el material estabilizado

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
<i>Coefficiente de correlación múltiple</i>	0,996
<i>Coefficiente de determinación R²</i>	0,992
<i>R² ajustado</i>	0,992
<i>Error típico</i>	0,015
<i>Observaciones</i>	1123

ANÁLISIS DE
VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
<i>Regresión</i>	2	32,6	16,28	73937	0,00
<i>Residuos</i>	1120	0,247	2,20E-04		
<i>Total</i>	1122	32,8			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
<i>Intercepción</i>	-0,78	0,00	-185	0,00	-0,79	-0,77	-0,79	-0,77
<i>Variable X 1</i>	3,35	0,01	384	0,00	3,33	3,37	3,33	3,37
<i>Variable X 2</i>	0,08	0,00	49,9	0,00	0,07	0,08	0,07	0,08

Tabla 27. Resumen de resultados de constantes, para ϵ_p del material estabilizado

B1	-0,782	K1	0,165
β_2	3,352	K2	3,352
β_3	0,078	K3	0,078

$$\epsilon_p = k_1 \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_{d,f}}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{N}{1000}\right)^{k_3} = 0,165 \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_{d,f}}\right)^{3,352} \cdot \left(\frac{N}{1000}\right)^{0,078} \quad [11]$$

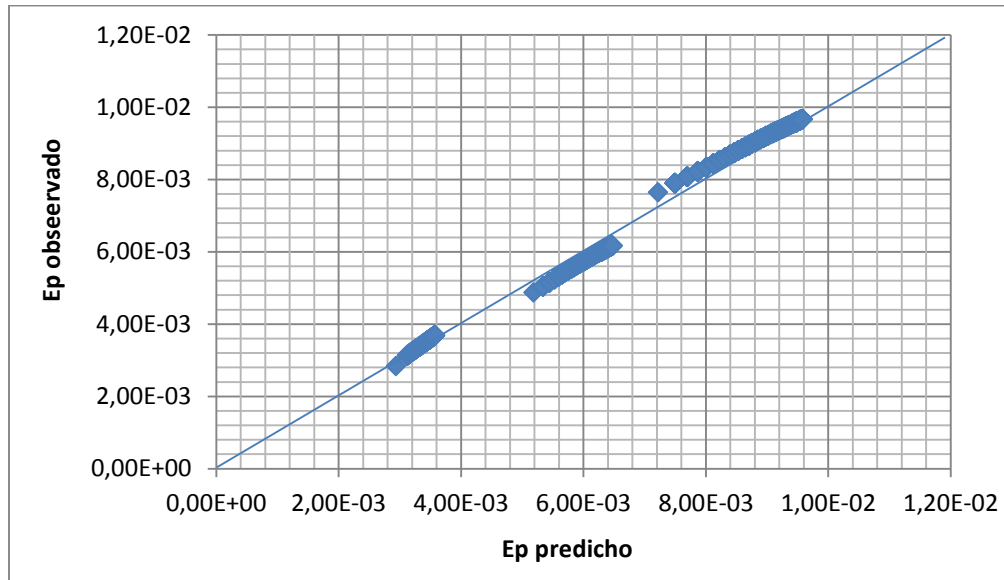


Figura 33. ϵ_p actual vs ϵ_p predicho (material estabilizado)

Adicionalmente se analizaron las deformaciones permanentes utilizando el modelo propuesto para diferentes relaciones de esfuerzo y proyectando un mayor número de ciclos, tal como se observa en la Figura 34. De esto se establece que incluso para más de un millón de repeticiones el porcentaje de deformaciones unitarias no superarán más de 1,5 %, esto no sobrepasa el 5,0 % o los 10 mm máximos permitidos según las referencias internacionales (Wirtgen GmbH, 2012).

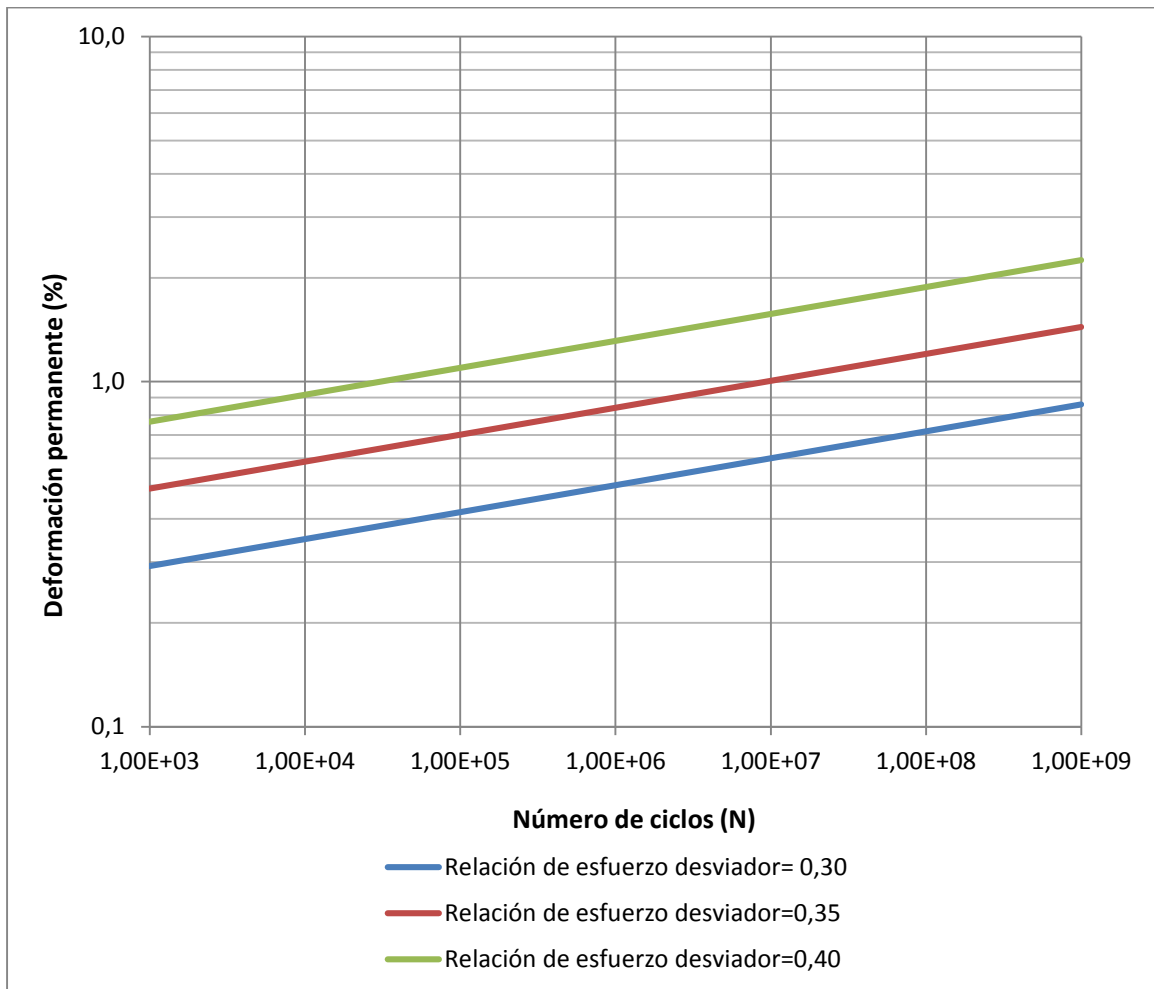


Figura 34. Desempeño del material en función de la deformación permanente, la relación de esfuerzos desviadores y el número de ciclos de carga



5. CONCLUSIONES

Basados en los resultados del presente estudio se puede concluir lo siguiente:

1. En el país es posible hallar materiales granulares aptos para su uso en la técnica de estabilización con asfalto.
2. El asfalto típico utilizado para mezcla asfáltica en el país, empleado para la investigación no cumple con las especificaciones recomendadas para el ensayo de penetración, sin embargo, su uso en la espumación es adecuada.
3. El contenido de asfalto determinado en los niveles de diseño 1 y 2 fueron similares a lo esperado en la dosificación inicial que recomienda la Tabla 5, según granulometría y características del material.
4. La incorporación de cal como relleno mineral activo mejoró significativamente la resistencia mecánica del material estabilizado, reflejo de ello su aumento en la resistencia al daño por humedad y por ende su adherencia. Sin embargo, sin el uso de relleno mineral activo el material estabilizado es considerablemente más susceptible al daño por humedad. Por ello en materiales estabilizados con asfalto necesariamente requieren la adición de un filler activo (cal o cemento) para obtener también con el desempeño y la durabilidad esperados.
5. Para este material es posible utilizar aún menores contenidos de asfalto residual y de relleno mineral activo que cumplan con las especificaciones, dado que los resultados obtenidos dieron muy por encima de las mismas.
6. Es importante especificar no solamente un valor de resistencia retenida mínima (TSR), sino también valores mínimos de resistencias a la tensión diametral (ITS) sin y con acondicionamiento para garantizar el correcto desempeño de la mezcla.
7. El curado definido para alcanzar una condición de humedad de equilibrio (entre 65 % y 75 % de la humedad óptima), es indispensable para simular las condiciones de humedad que pueden encontrarse en las capas de base con materiales granulares, cuando las condiciones de sistemas de drenaje son las adecuadas. Según los parámetros generales y los cálculos del EMC, es posible trabajar con valores entre 55 % y 65 % de la OMC, para la mayoría de los materiales granulares no plásticos.
8. Con el material estabilizado con asfalto espumado se obtuvieron resultados de módulos resilientes en más del triple a los obtenidos en el material sin estabilizar. Lo cual implica



posiblemente la reducción de espesores en la carpeta asfáltica en donde se coloque y un aumento en la resistencia, sin que se deforme plásticamente.

9. Mediante el ensayo de triaxial estática, se obtuvieron los parámetros de C y ϕ mayores a los mínimos esperados. Siendo estos parámetros esenciales para lograr caracterizar el comportamiento mecánico del material, lo cual es un insumo para el ensayo de deformación permanente, en cuanto a las relaciones críticas de esfuerzo desviador.

10. En general, la metodología de diseño y selección del contenido óptimo de asfalto residual se basa inicialmente en parámetros relacionados con la resistencia al daño por humedad, para un primer nivel de diseño y cargas bajas de tránsito. Posteriormente, para cargas mayores, y parámetros como la humedad de equilibrio, se realizan ensayos nuevamente de resistencia al daño por humedad con especímenes de mayor tamaño; y finalmente se realizan ensayos triaxiales para un tercer nivel de diseño y así clasificar con mayor confianza el tipo de material.

11. En la última fase del proyecto, se buscó medir el desempeño del material para el contenido de asfalto residual óptimo mediante el ensayo de deformación permanente, a través del ensayo triaxial de carga repetida, con esfuerzo desviador y confinamiento constantes durante todos los ciclos de carga. Debido a que el equipo de ensayo funciona con un sistema de presión hidráulica alta, por seguridad sólo se corrieron 20000 ciclos para tres relaciones de esfuerzos desviadores (0,30, 0,35 y 0,40) y un confinamiento de 50 kPa. Por lo que, los resultados de deformación obtenidos no abarcan todo el espectro de deformación que podría experimentar el material con una mayor cantidad de ciclos. Al aumentar la relación de esfuerzos desviadores, se presentó un incremento en la deformación permanente, lo cual se traduce en un mayor deterioro de la capa de base en el pavimento donde se esté colocado. A bajas repeticiones este tipo de materiales tienden a presentar una respuesta lineal, sin embargo, al llegar a un 1 millón de ciclos o más, las deformaciones permanentes pueden llegar a aumentar drásticamente y eventualmente el material falla debido a comportamientos de tipo no lineal.

12. Para las relaciones de esfuerzo utilizadas en el ensayo, tanto para los datos resultantes, como para los predichos a partir del modelo, se obtuvo una respuesta plástica de acuerdo al rango C , con lo cual se puede concluir que el material estabilizado con asfalto espumado podría desempeñarse adecuadamente sin alcanzar deformaciones severas durante su vida útil, sin embargo, no es posible asegurar la cantidad de ciclos en la cual alcanzará el flujo terciario, dado que no se pudo medir.

Informe LM-PI-UMP-054-R3	Fecha de emisión: 06 de December de 2018	Página 72 de 84
--------------------------	--	-----------------



13. Como parte de los objetivos de este proyecto se tenía la verificación del desempeño del material estabilizado al ser colocado en un tramo de prueba, sin embargo, debido a lo complejo en la logística que conlleva la coordinación con la empresa para el uso de la maquinaria requerida y la obtención de permisos para estudiar un tramo de carretera donde colocar el material, no se pudo realizar el mismo, por lo que esta última fase quedará fuera de los alcances de esta investigación.

5. RECOMENDACIONES

Se recomienda conformar los especímenes mediante el uso de martillo vibratorio, ya que la bibliografía internacional establece que la compactación simula mejor las condiciones de campo, en lo que respecta a densidad y reacomodo intraparticular.

Además, implementar ensayos donde los equipos permitan aplicar cargas repetidas durante periodos prolongados para observar la respuesta de materiales donde así se requiera, y obtener mayor información del desempeño del material estabilizado.

Finalmente, se insta a llevar a cabo la calibración del modelo de deformación permanente mediante el estudio de un tramo de prueba en el Heavy Vehicle Simulator (HVS), donde puedan ajustarse los parámetros del modelo propuesto.



6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO T 283. (2014). *Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage*. Washigton, D.C.: AASHTO.

AASHTO T 307. (2012). *Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials* . Washigton, D.C.: AASHTO.

Asphalt Academy. (2009). *Technical Guideline: Bitumen Stabilised Material* (Vol. 2). Pretoria, Sudáfrica: Asphalt Academy.

ASTM D5. (2013). American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. ASTM International.

Ávila, T., & Ulloa, A. (2017). *Guía para la selección de agentes estabilizadores para suelos y materiales granulares. LM-PI-UMP-055-R1*. Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR. Universidad de Costa Rica.

Collings, D., Grobler, J., Hughes, M., Jenkins, K., Jooste, F., Long, F., & Thompson, H. (2009). *Technical Guideline: Bitumen Stabilised Material* (Vol. 2). Pretoria, Sudáfrica: Asphalt Academy.

Dawson, A., Werkmeister, S., & Wellner, F. (2005). *Permanent Deformation Behaviour of Granular Materials and the Shakedown Concept*.

Ebels, L., & Jenkins, K. (Setiembre de 2007). Mix design of bitumen stabilised materials: Best practice and considerations for classification. *Proceedings of the 9th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA'07)*, Vol. 2, p.5.

Ebels, L.-J. (2008). *Characterisation of material properties and behavior of cold bituminous mixtures for road pavements*. South Africa: Stellenbosch University.

Gonzalez, A., Cubrinovski, M., Pidwerbesky, B., & Alabaster, D. (2012). Desempeño de pavimentos estabilizado con asfalto espumado en una prueba de pavimentos a escala real y carga acelerada. *Revista ingeniería de construcción*(27(2)), Páginas 05-17.



- Jenkins, K. (2000). *Mix Design Considerations for Cold and Half-warm Bituminous Mixes with Emphasis on Foamed Bitumen*. South Africa: PhD Dissertation, University of Stellenbosch.
- Jimenez, M. (2009). *Implementación del Ensayo de Módulo Resiliente en Bases Granulares para Pavimentos*. Universidad de Costa Rica, LANAMME, San José, Costa Rica.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2010). *Manual de especificación generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR 2010)*. San José: LanammeUCR-MOPT.
- Moloto, P. K. (2010). *Accelerated curing protocol for bitumen stabilized materials*. Stellenbosch, South Africa: Stellenbosch University.
- NCHRP. (2004). *APPENDIX 2. RECOMMENDED STANDARD METHOD FOR ROUTINE RESILIENT MODULUS TESTING OF UNBOUND GRANULAR BASE/SUBBASE MATERIALS AND SUBGRADE SOILS*. National Cooperative Highway Research Program.
- Pennsylvania Department of Transportation. (2012). *Developing Standards and Specification for Full Depth Pavement Reclamation*. Pennsylvania: Pennsylvania Department of Transportation.
- Perera, A. (Mayo de 2015). *Determinación y Análisis de los Factores Climáticos Críticos para el Diseño de Pavimentos Flexibles en Costa Rica*. San José, Costa Rica: Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica.
- Porras, C. A. (2015). *Desarrollo de modelos de deformación permanente para materiales granulares y suelos*. San José: Proyecto de graduación. Universidad de Costa Rica.
- Shafiqur, M. (2015). *Characterising the Deformation Behaviour of Unbound Granular Materials in Pavement Structures*. Suecia: Division of Highway and Railway Engineering, Department of Civil and Architectural Engineering, KTH Royal Institute of Technology, SE-100 44 Stockholm.
- U.S. Army Corps of Engineers. (1984). *Soil Stabilization for Pavements*. Washington, D.C.: Department of the Army.
- Wirtgen GmbH. (2004). *Manual de Reciclado en Frío (2 ed.)*. Windhagen, Alemania: Wirtgen GmbH.



Wirtgen GmbH. (2012). *Wirtgen Cold Recycling Technology*. Windhagen, Germany: Wirtgen GmbH.

Zapata, C., & Salim, R. (2012). Impact of Environmental Site Location and Groundwater Table Depth on Thickness of Flexible Airfield Pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, p. 22-33. doi:DOI: 10.3141/2282-03



ANEXO A

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN
Unidad de Gestión de Proyectos
INFORME FINAL

1. Información básica:

Código:	
Nombre del proyecto, actividad o programa:	Metodología de diseño para materiales granulares estabilizados con asfalto espumado
Programa de adscripción:	Ley 8114 Impuesto a combustibles
Unidad base	LanammeUCR
	Escuela de Ingeniería Civil
Período vigencia:	2017-2019
Fecha de presentación:	Noviembre 2018

2. Descripción general:

En este informe como parte de las técnicas de rehabilitación o construcción nueva, se estudia el uso del asfalto espumado (un material innovador en el país), para el mejoramiento de pavimentos que presentan un deterioro considerable en capas de ruedo asfálticas, o en la conformación de capas de base granular estabilizadas que deban proveer una mayor resistencia en la estructura del pavimento.

Se proponen elementos necesarios para elaborar una guía de diseño que permita la obtención de un material que cumpla con un adecuado desempeño ante las cargas del tránsito proyectadas, mediante valores de especificación para la aceptación del diseño a nivel de laboratorio.

Por razones ambientales y económicas los recursos disponibles para la construcción de carreteras son cada vez más escasos, por lo que la reutilización de los materiales existentes toma cada vez más importancia.

Siguiendo esta línea en Costa Rica el uso de la técnica de estabilización con asfalto espumado en materiales granulares y capas asfálticas recicladas como alternativa para la rehabilitación en rutas de alto volumen de tránsito, ha empezado a considerarse dentro de las opciones por parte de la Administración y las empresas constructoras. Po ello, es necesario una correcta implementación de esta técnica a través de una metodología de diseño y de especificaciones que aseguren la calidad, y que permitan discriminar acertadamente los materiales que tendrán un comportamiento adecuado de los que no, tomando en cuenta las condiciones climáticas propias del país.



Teniendo como insumo contenidos de asfalto espumado, filler activo y humedades óptimas se buscó finalmente proveer un modelo de desempeño que determinara la susceptibilidad al daño por deformación permanente, siendo este su principal forma de falla

3. Desarrollo y ejecución (qué se hizo y cómo):

Objetivos específicos y metas	% de logro	Actividades desarrolladas	Dificultades y formas de resolverlas
<p>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</p> <p>1) Realizar un estudio bibliográfico con el fin de conocer los procedimientos de ensayo, parámetros de diseño y desempeño.</p> <p>METAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> Identificar las metodologías actuales en técnicas de estabilización, principalmente en las que se utilice asfalto. 	100%	<ul style="list-style-type: none"> Recolectar, revisar y resumir la literatura existente. 	Ninguna
<p>2) Muestrear y caracterizar una fuente de material granular y de asfalto para llevar a cabo los ensayos de diseño y desempeño.</p> <p>META:</p> <ul style="list-style-type: none"> Determinar si los materiales muestreados son aptos para la técnica de estabilización con asfalto espumado. 	100%	<ul style="list-style-type: none"> Caracterización de materiales granulares: <ul style="list-style-type: none"> Granulometría de agregados Contenido de humedad óptima y densidad máxima seca Ensayo de penetración del asfalto original y la calibración del asfalto espumado. 	Ninguna



Objetivos específicos y metas	% de logro	Actividades desarrolladas	Dificultades y formas de resolverlas
<p>3) Proponer especificaciones técnicas que conlleven a un adecuado desempeño de los materiales granulares estabilizados con asfalto espumado.</p> <p>META:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Determinar cuáles especificaciones se utilizarán para el diseño y desempeño de la mezcla. • Evaluar modificaciones a estas especificaciones para que se ajusten a los materiales y condiciones propias del país. 	<p>100%</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Llevar a cabo pruebas dosificación de asfalto, de acuerdo a las características granulométrías del material granular, según lo establecido en la normativa revisada. 	<p>Ninguna</p>
<p>4) Implementar la metodología de diseño mediante la realización de ensayos de laboratorios con el material muestreado y definir los contenidos óptimos de dosificación.</p> <p>META:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Determinar contenido óptimo de relleno mineral, asfalto espumado y agua. • Definir parámetros recomendados de cumplimiento al analizar los resultados del diseño. 	<p>100%</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar un diseño utilizando compactación Marshall (Nivel de diseño 1). • Realizar un diseño utilizando compactación giratoria (Nivel de diseño 1) • Optimización del contenido de asfalto espumado (Nivel de diseño 2). 	<p>Adaptar las especificaciones internacionales a las condiciones del país, tales como tipos de agregado, asfalto espumado y políticas locales.</p>



Objetivos específicos y metas	% de logro	Actividades desarrolladas	Dificultades y formas de resolverlas
<p>5) Evaluar el principal modo de falla en este tipo de materiales mediante la aplicación de ensayos de desempeño con el fin de verificar el comportamiento del material.</p> <p>META:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Implementar un ensayo de deformación permanente en materiales estabilizados con asfalto espumado. • Comparar los resultados con los indicadores internacionales para la verificación de la capacidad del material estabilizado con las dosificaciones de cal y asfalto obtenidas en el diseño. • Establecer si desempeño del material se encuentra dentro de los límites recomendados internacionalmente. 	100%	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar el ensayo de deformación permanente a tres diferentes relaciones de esfuerzo desviador. • Análisis estadístico de los resultados para la propuesta de un modelo de regresión lineal múltiple de la deformación permanente. • Calcular en qué rango de respuesta a la deformación permanente del material estabilizado, para las condiciones del ensayo. • Calcular la deformación permanente máxima obtenida en los ensayos y compararla con los parámetros de aceptación. 	<p>El equipo funciona de manera hidráulica y no puede someterse a largos periodos de trabajo. Lo que dificulta medir la cantidad de ciclos requeridos para abarcar todo el espectro de deformación en este tipo de materiales.</p>
<p>6) Observar la respuesta del material estabilizado ante condiciones normales de servicio</p>	0%	<ul style="list-style-type: none"> • Asfalto donado por la empresa que 	<p>Al tratar de coordinar con alguna de las empresas que</p>



Objetivos específicos y metas	% de logro	Actividades desarrolladas	Dificultades y formas de resolverlas
<p>en campo a través de un tramo de prueba.</p> <p>META:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Estudiar las características del material granular y determinar si este cumple con los requerimientos de la técnica. • Caracterizar el asfalto disponible para determinar si cumple con los requisitos establecidos para la técnica. • Obtener las dosificaciones de agua, relleno mineral y asfalto espumado de acuerdo al nivel de diseño requerido. • Verificar las condiciones del sitio que deban ser ajustadas a las condiciones del diseño: drenajes, espesores, humedad, temperatura ambiental, equipo de colocación, compactación y tiempo de apertura al tránsito disponible. • Obtención de la densidad, humedad, temperatura, módulo resiliente y cargas vehiculares mediante monitoreo periódico. 		<p>dosifica el asfalto espumado al material a estabilizar.</p>	<p>cuentan con el equipo especializado (recicladora) para la colocación de asfalto espumado y la combinación con material del sitio no es factible, dado que se encuentran en proyectos específicos por largos periodos del año en otras técnicas. Por lo tanto, no es posible colocarse en algún tramo de prueba para llevar a cabo el estudio en campo. Al menos, no para este año.</p>
<p>7) Proponer una guía de diseño en laboratorio para estabilización de materiales granulares con emulsión asfáltica.</p> <p>META:</p>	<p>80%</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Redacción de una guía de diseño base: <ul style="list-style-type: none"> • Procedimiento para la escogencia 	<p>Ninguna</p>



Objetivos específicos y metas	% de logro	Actividades desarrolladas	Dificultades y formas de resolverlas
<ul style="list-style-type: none"> Publicar un documento en donde los actores involucrados en la construcción de caminos, tengan acceso a los procedimientos y especificaciones de diseño y análisis de desempeño en materiales estabilizados con asfalto espumado. 		del relleno mineral y contenidos iniciales de asfalto y agua. <ul style="list-style-type: none"> Determinación del nivel de diseño de acuerdo a las condiciones del proyecto. Procedimiento para los ensayos de diseño. 	

4. Resultados globales:

<p>Resultados principales: El principal resultado de la investigación consiste en desarrollar una metodología de diseño en laboratorio para estabilización de materiales granulares con asfalto espumado en la que considere condiciones propias de Costa Rica.</p>
<p>Impacto del proyecto en los ámbitos que corresponda: El desarrollo de una metodología de diseño de materiales granulares estabilizados con asfalto espumado podrá mejorar el desempeño de rutas pavimentadas y no pavimentadas, y a su vez este tipo de técnicas permiten reutilizar materiales colocados en sitio, reduciendo así el impacto en el ambiente y disminuyendo costos en la rehabilitación, conservación u obra nueva en las que se invierte periódicamente.</p>
<p>Beneficios para la unidad académica y la Universidad de Costa Rica: Los beneficios se dirigen al sector investigación a través de la generación de conocimiento y técnicas novedosas que puedan ser aplicadas en proyectos nacionales en el ámbito de Acción social. A su vez, la generación de especificaciones corresponde un elemento fundamental en las labores de transferencia de tecnología encomendadas al LanammeUCR.</p>
<p>Interrogantes y nuevas investigaciones: La investigación del desempeño en este tipo de materiales mediante la utilización de un equipo que permita llevar a cabo mayor cantidad de ciclos y medir su deformación. Estudio de costos de la aplicación de la técnica en campo y logísticas de construcción. Posibilidad de obtener diferentes tipos de asfaltos para la técnica en estudio y muchas otras que podrían aplicarse o mejorar con el uso de asfalto más blandos.</p>
<p>Actividades pendientes: Conclusión de la guía de diseño y su posterior publicación. La colocación del tramo de prueba quedará sin realizarse para esta investigación, debido a que está fuera del alcance del proyecto determinar cuándo se dispondrá de la maquinaria para el reciclado en frío, así como la coordinación con alguna empresa constructora y alguna municipalidad que permitan la colocación de una base estabilizada para el estudio.</p>



5. Producción académica:

<p>Referencias de los artículos u otros productos que se proyectan:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Guía de diseño para consultores, constructores, técnicos laboratoristas, etc. • Generación de especificaciones dentro del Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes de Costa Rica, CR-2010.
<p>Títulos de las ponencias y participación en eventos, lugar y fechas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Asphalt School, Mayo 2019, San José, Costa Rica.
<p>Impacto en procesos de enseñanza aprendizaje: Talleres de capacitación, cursos, participación en foros y congresos nacionales.</p>
<p>Otros productos: NA</p>

6. Trabajos de graduación y participación estudiantil:

Asistentes	Labores ejecutadas

Título de las tesis involucradas en el proyecto	Nombre de los/las estudiantes	Grado

7. Comentarios generales:

Ninguno

8. Informe financiero (adjuntar informe respectivo):

<p>Comentarios: Ley 8114 de Simplificación y Eficiencia Tributaria</p>
--

9. Aspectos éticos (adjuntar la “Aplicación para revisión continua o para cerrar el estudio” del CEC):

Comentarios:

Informe LM-PI-UMP-054-R3	Fecha de emisión: 06 de December de 2018	Página 83 de 84
--------------------------	--	-----------------



--

10. Autorización para incorporar el informe final ejecutivo en los repositorios de la UCR.

(x) SI () NO Autorizo a la Vicerrectoría de Investigación para incluir en los repositorios institucionales el anterior informe.

(x) SI () NO Autorizo a la Vicerrectoría de Investigación para incluir en los repositorios institucionales los productos académicos adjuntos al informe.

Ing. Andrea Ulloa Calderón

Fecha

Firma

Investigador(a) principal

06 de diciembre de 2018

Versión 20-11-2017.