



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

Informe: LM-PI-UMP-054-R3

METODOLOGÍA DE DISEÑO PARA MATERIALES GRANULARES ESTABILIZADOS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA

Preparado por:
Unidad de Materiales y Pavimentos

San José, Costa Rica
Enero, 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



Información técnica del documento

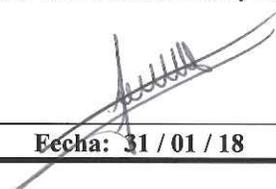
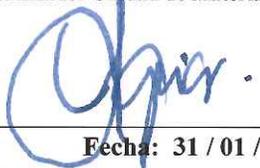
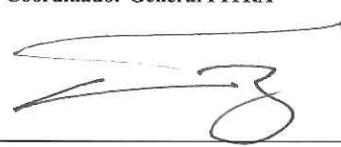
1. Informe LM-PI-UMP-054-R3		2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: METODOLOGÍA DE DISEÑO PARA MATERIALES GRANULARES ESTABILIZADOS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA		4. Fecha del Informe Enero, 2018
7. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, 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 El mejoramiento de materiales o subproductos 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. Recientemente en Costa Rica se ha valorado el uso de emulsiones asfálticas como agente para estabilizar materiales granulares y capas asfálticas recicladas como alternativa de mejoramiento y rehabilitación de rutas. 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, que típicamente presentan precipitaciones y humedades relativas altas.		
10. Palabras clave Materiales granulares, emulsión asfáltica, estabilización, diseño	11. Nivel de seguridad: Ninguno	12. Núm. de páginas 79
13. Preparado por:		
Ing. Andrea Ulloa Calderón, Investigador Unidad de Materiales y Pavimentos  Fecha: 31 / 01 / 18	Juan Carlos Múnera Miranda, Investigador Unidad de Materiales y Pavimentos  Fecha: 31 / 01 / 18	
14. Revisado por:		15. Aprobado por:
Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph.D. Coordinador Unidad de Materiales y Pavimentos  Fecha: 31 / 01 / 18		Ing. Guillermo Loría Salazar, Ph.D. Coordinador General PITRA  Fecha: 31 / 01 / 18



TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE TABLAS	6
RESUMEN EJECUTIVO	8
1. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	9
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
1.3 ANTECEDENTES	10
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	12
2. MARCO TEORICO.....	15
2.1. BASES ESTABILIZADAS CON ASFALTO (BEA).....	15
2.2. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS.....	16
2.3. MECANISMOS DE FALLA	16
2.4. CLASIFICACIÓN	17
2.5. REQUERIMIENTOS DE LOS COMPONENTES DE MEZCLA	19
2.5.1. <i>MATERIALES GRANULARES</i>	19
2.5.2. <i>EMULSIÓN ASFÁLTICA</i>	21
2.5.3. <i>RELLENO MINERAL (FILLER)</i>	23
2.5.4. <i>AGUA PARA MEZCLADO Y COMPACTACIÓN</i>	23
2.6. <i>SELECCIÓN DEL TIPO DE AGENTE ESTABILIZADOR</i>	24
2.7. DISEÑO DE MEZCLA	24
2.7.1. <i>ENSAYOS PRELIMINARES Y NIVELES DE DISEÑO</i>	24
2.7.2. <i>PREPARACIÓN DE ESPECÍMENES DE ENSAYO</i>	29
2.7.3. <i>CONTENIDO DE FLUIDOS TOTALES EN LA MEZCLA</i>	29
2.7.4. <i>COMPATIBILIDAD: RECUBRIMIENTO Y ADHERENCIA</i>	31
2.7.5. <i>MEZCLADO Y COMPACTACIÓN DE ESPECÍMENES DE ENSAYO</i>	33
2.7.6. <i>CURADO DE ESPECÍMENES DE ENSAYO</i>	34
2.7.6.1. <i>Evaporación del agua</i>	34
2.7.6.2. <i>Neutralización de la carga del asfalto en la emulsión</i>	34
2.7.6.3. <i>Disipación de presión de poro inducida por la compactación</i>	34
2.8. <i>CONDICIONES CLIMÁTICAS DE COSTA RICA A CONSIDERAR EN EL DISEÑO</i>	36
2.9. <i>ENSAYOS MECÁNICOS</i>	36
2.9.1. <i>RESISTENCIA A LA TENSIÓN INDIRECTA (ITS)</i>	36



2.9.2. ENSAYO DE MÓDULO DE RESILIENTE DE MATERIALES GRANULARES..... 38

2.9.3. ENSAYO DE TRIAXIAL ESTÁTICO 39

2.9.4. Deformación permanente (N , ϵ_p) 39

3. RESULTDOS DE DISEÑO.....44

3.1 RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO..... 44

3.2 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES 44

3.3 DETERMINACIÓN DE LA COMPATIBILIDAD DE MATERIAL CON LA EMULSIÓN..... 46

3.4 OBTENCIÓN DE LA RELACIÓN DENSIDAD-HUMEDAD PARA EL CÁLCULO DE FLUIDOS
TOTALES..... 47

3.5 REQUERIMIENTO DE RELLENO MINERAL ACTIVO 47

3.6 DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD MÍNIMA DEL RELLENO MINERAL ACTIVO..... 48

3.7 CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO RESIDUAL NIVEL DE DISEÑO 1 49

3.8 CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO RESIDUAL NIVEL DE DISEÑO 2 51

3.9 NIVEL DE DISEÑO 3..... 52

4. RESULTADOS DE DESEMPEÑO60

5. CONCLUSIONES.....65

5. RECOMENDACIONES67

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS68

ANEXO A.....71



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. LIGADURA ENTRE EL ASFALTO Y EL AGREGADO (ASPHALT ACADEMY, 2009)	15
FIGURA 2. REQUERIMIENTOS GRANULOMÉTRICOS (WIRTGEN GMBH, 2012).....	21
FIGURA 3. SELECCIÓN DEL TIPO DE ESTABILIZACIÓN SEGÚN INFORME LM-PI-UMP-055-R1.....	24
FIGURA 4. DIAGRAMA DE FLUJO DISEÑO EN LABORATORIO DE BEA (COLLINGS, Y OTROS, 2009).....	28
FIGURA 5. PREPARACIÓN DE MATERIALES	29
FIGURA 6. ESQUEMA DE FLUIDOS TOTALES (WIRTGEN GMBH, 2004).....	31
FIGURA 7. ENSAYO DE RECUBRIMIENTO Y ADHERENCIA	32
FIGURA 8. CURADO DE ESPECÍMENES	35
FIGURA 9. ENSAYO DE TENSIÓN INDIRECTA, ITS.	36
FIGURA 10. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO RESIDUAL (WIRTGEN GMBH, 2012).....	37
FIGURA 11. TRIAXIAL DINÁMICA	38
FIGURA 12. DIFERENTES TIPOS DE COMPORTAMIENTO DE DEFORMACIÓN PERMANENTE, DEPENDIENDO DEL NIVEL DE ESFUERZO. (DAWSON, WERKMEISTER, & WELLNER, 2005).....	43
FIGURA 13. CURVA GRANULOMÉTRICA	45
FIGURA 14. VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE DISEÑO CON RESPECTO AL CONTENIDO DE RELLENO MINERAL EN LA MEZCLA.....	49
FIGURA 15. VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE DISEÑO CON RESPECTO AL CONTENIDO DE ASFALTO RESIDUAL EN LA MEZCLA NIVEL DE DISEÑO 1.....	50
FIGURA 16. VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE DISEÑO CON RESPECTO AL CONTENIDO DE ASFALTO RESIDUAL EN LA MEZCLA NIVEL DE DISEÑO 2.....	52
FIGURA 17. RESULTADOS DEL ENSAYO DE RESISTENCIA AL CORTE.....	53
FIGURA 18. MR ACTUAL VS MR PREDICHO (MATERIAL ESTABILIZADO).....	56
FIGURA 19. VARIACIÓN DEL MR VS ESFUERZO BRUTO (MATERIAL ESTABILIZADO)	56
FIGURA 20. MR ACTUAL VS MR PREDICHO (MATERIAL SIN ESTABILIZAR).....	59



FIGURA 21. VARIACIÓN DEL MR VS ESFUERZO BRUTO (MATERIAL SIN ESTABILIZAR).....	59
FIGURA 22. DEFORMACIÓN PERMANENTE A 729, 850 Y 972 KPA DE ESFUERZO DESVIADOR	60
FIGURA 23. E_p ACTUAL VS E_p PREDICHO (MATERIAL ESTABILIZADO)	63
FIGURA 24. DESEMPEÑO DEL MATERIAL EN FUNCIÓN DE LA DEFORMACIÓN PERMANENTE, LA RELACIÓN DE ESFUERZOS DESVIADORES Y EL NÚMERO DE CICLOS DE CARGA.....	64



ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. INDICADORES PARA CLASIFICACIÓN DE BEA PARA MATERIAL SIN ESTABILIZAR (WIRTGEN GMBH, 2012)	18
TABLA 2. GRADUACIÓN RECOMENDADA PARA MATERIAL GRANULAR SIN ESTABILIZAR (WIRTGEN GMBH, 2012)	20
TABLA 3. ESPECIFICACIONES PARA EMULSIONES ASFÁLTICAS (REGLAMENTO TÉCNICO CENTROAMERICANO, 2005)	22
TABLA 4. FUNCIÓN DE LOS FLUIDOS DENTRO DE LA MEZCLA (ASPHALT ACADEMY, 2009).....	30
TABLA 5. ESTIMACIÓN DE PORCENTAJE TEÓRICO DE ASFALTO RESIDUAL ÓPTIMO (WIRTGEN GMBH, 2012)	33
TABLA 6. VALORES DE ITS RECOMENDADOS (WIRTGEN GMBH, 2012)	37
TABLA 7. RANGO DE MÓDULO RESILIENTE PARA BEA (WIRTGEN GMBH, 2012) ...	38
TABLA 8. VALORES RECOMENDADOS PARA COHESIÓN Y ÁNGULOS DE FRICCIÓN (WIRTGEN GMBH, 2012).....	39
TABLA 9. RELACIONES DE ESFUERZO DESVIADOR PARA UNA DEFORMACIÓN MÁXIMA DE 10 MM EN CAPAS DE BEA	43
TABLA 10. GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL ENSAYADO	44
TABLA 11. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE BASE.....	45
TABLA 12. CARACTERIZACIÓN DE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA.....	46
TABLA 13. DETERMINACIÓN DE LA COMPATIBILIDAD ENTRE EL MATERIAL GRANULAR Y LA EMULSIÓN ASFÁLTICA	46
TABLA 14. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE FLUIDOS TOTALES PARA DIFERENTES CONTENIDOS DE ASFALTO RESIDUAL EN LA MEZCLA.....	47
TABLA 15. REQUERIMIENTO DE RELLENO MINERAL ACTIVO	48
TABLA 16. CONTENIDO DE RELLENO MINERAL ACTIVO.....	48
TABLA 17. CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO RESIDUAL NIVEL DE DISEÑO 1	50
TABLA 18. CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO RESIDUAL NIVEL DE DISEÑO 2	51
TABLA 19. RESUMEN DE RESULTADOS ENSAYOS DE TRIAXIAL	53
TABLA 20. RESUMEN DE MR (ESTABILIZADO).....	54
TABLA 21. RESULTADOS DE LA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE, PARA EL MATERIAL ESTABILIZADO	55



TABLA 22. RESUMEN DE RESULTADOS DE CONSTANTES, PARA MR DEL MATERIAL SIN ESTABILIZAR 55

TABLA 23. RESUMEN DE MR (SIN ESTABILIZAR)..... 57

TABLA 24. RESULTADOS DE LA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE, PARA EL MATERIAL SIN ESTABILIZAR 58

TABLA 25. RESUMEN DE RESULTADOS DE CONSTANTES, PARA MR DEL MATERIAL SIN ESTABILIZAR 58

TABLA 26. RANGOS DE DEFORMACIÓN PARA CADA ESFUERZO DESVIADOR APLICADO (VALORES OBSERVADOS)..... 61

TABLA 27. RANGOS DE DEFORMACIÓN PARA CADA ESFUERZO DESVIADOR APLICADO (VALORES PREDICHOS) 61

TABLA 28. RESULTADOS DE LA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE, PARA EL MATERIAL ESTABILIZADO 62

TABLA 29. RESUMEN DE RESULTADOS DE CONSTANTES, PARA E_p DEL MATERIAL ESTABILIZADO 63



RESUMEN EJECUTIVO

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 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.

Recientemente en Costa Rica se ha valorado el uso de emulsiones asfálticas para la estabilización de materiales granulares y capas asfálticas recicladas como alternativa de mejoramiento y rehabilitación en rutas de bajo 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 fases previas se llevaron a cabo los diseños del material estabilizado para la obtención del contenido óptimo de filler activo y asfalto residual, al igual que los ensayos de resistencia retenida a la tensión indirecta y módulo resiliente. Para esta etapa del estudio se realizaron ensayos de verificación del ensayo triaxial a los esfuerzos propuestos en la bibliografía investigada en la fase anterior con lo cual discriminar mejor el desempeño que se tendrá en campo. Como parte de los ensayos innovadores en esta fase se buscó medir la susceptibilidad del material ante la deformación permanente, dado que se espera que este sea el principal modo de falla para este tipo de materiales.



1. INTRODUCCIÓN

Los costos en la explotación de materiales pétreos y su transporte han promovido el desarrollo de técnicas de reciclado y estabilización para poder utilizar los recursos localmente disponibles. En muchas ocasiones, las resistencias y otras propiedades requeridas pueden obtenerse de un material local “marginal”, a través de la adición de pequeñas cantidades de agentes estabilizadores a un costo relativamente bajo.

La implementación de materiales granulares estabilizados con emulsión asfáltica con la combinación de cantidades pequeñas de cemento o cal (menor a 1%) cuando es requerido, tiene la ventaja de incrementar la cohesión y reducir la susceptibilidad al daño por humedad, de manera significativa.

En la actualidad Costa Rica tiene una experiencia apenas incipiente en el uso de este tipo de agente estabilizador. Una de las principales causas del uso tan limitado de esta técnica es que se carece de una guía de diseño y de especificaciones para aseguramiento de su calidad. Para evaluar la resistencia al daño por humedad se realizaron ensayos de resistencia a la tensión indirecta, así como el ensayo de módulo resiliente para evaluar la rigidez de la mezcla, ensayo de resistencia al corte mediante cámara triaxial y la verificación del desempeño a través del ensayo de deformación permanente.

1.1 Objetivo general

Establecer una metodología de diseño en laboratorio para estabilización de materiales granulares con emulsión asfáltica.

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 emulsión asfáltica de rompimiento lento 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 emulsión asfáltica.
- 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 con el fin de verificar el comportamiento del material.
- Observar 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 emulsión asfáltica.

1.3 Antecedentes

La estabilización con asfalto emulsificado se viene implementando en países como los Estados Unidos desde 1920 aproximadamente. 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) mantiene 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. También determina un contenido de emulsión inicial basándose en los porcentajes granulométricos pasando en ciertos tamices. El contenido final de emulsión viene dado por las pruebas de estabilidad Marshall, en las cuales se propone una estabilidad mínima.

El Instituto del Asfalto (Asphalt Institute, 1998) propone una guía de diseño para mezclas de base con emulsión asfáltica. De igual manera, se calcula un porcentaje de emulsión asfáltica inicial según el porcentaje pasando en un tamiz, así como el residuo asfáltico en la emulsión. Con base en este resultado se hacen pruebas para evaluar el recubrimiento y la adherencia entre el agregado y la emulsión. Se elaboran especímenes por medio de compactación Marshall, definiendo el curado de los especímenes antes y después de ser compactados. Finalmente, se realizan ensayos de volumetría y estabilidad Marshall y Hveem, y también se define un curado previo a la falla. Como requisito se definen estabilidades mínimas.



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 1,5 % 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 emulsión asfáltica. 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 saturación y determinar un contenido óptimo de emulsión. Para el nivel 2, se cambia el tipo de compactación Marshall a compactación vibratoria 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 de 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 especímenes por medio de compactación giratoria. Se procede a realizar volumetría sobre especímenes compactados y sueltos, así como ensayos de resistencia a la tensión indirecta sobre especímenes acondicionados y sin acondicionar, módulo



resilente, cohesión (short term strenght), desprendimiento (raveling), y agrietamiento térmico (IDT) a diferentes contenidos de emulsión. Se establece un contenido óptimo de emulsión asfáltica 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, así como evitar deflexiones importantes. Lo anterior 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 son siempre disponibles y por tanto se requiere de un mejoramiento de sus propiedades ingenieriles de los materiales a utilizar. Este objetivo se puede alcanzar en la mayoría de los casos con la estabilización física o química de estos suelos. Los costos de transporte de importar material adecuado han promovido el desarrollo de técnicas de estabilización para poder utilizar los recursos localmente disponibles. En muchas ocasiones, las resistencias y otras propiedades requeridas 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 el tratamiento del suelo de manera física o química, para incrementar o mantener la estabilidad y otras propiedades de ingeniería. La estabilización con emulsión asfáltica es un tipo de estabilización física del suelo, que cumpliendo con ciertos criterios de aplicabilidad, puede ser utilizada como un medio para proveer de más cohesión a suelos no plásticos, o para hacer un material más cohesivo menos sensible a la pérdida de estabilidad por daño por humedad. El proceso es más exitoso para materiales granulares que para suelos cohesivos. La estabilización con emulsión asfáltica es usada principalmente en bases granulares y su uso es menos extendido en materiales de sub-base. El asfalto en la emulsión viene siendo más un agente estabilizador físico que químico en el sentido de 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 emulsión asfáltica con la combinación de cantidades pequeñas de cemento o cal (menor a 1% para cemento y menor a 1,5% para cal) 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.

A continuación, se enumeran ciertas ventajas de estabilizar materiales granulares con emulsión asfáltica:

- Proveer de una superficie temporal o permanente para caminos de bajo volumen.
- Proveer de una plataforma de 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 la actualidad Costa Rica tiene una experiencia a penas incipiente en el uso de este tipo de agente estabilizador, donde por otro lado, el cemento ha tenido mucho auge, con la limitante de que sin un adecuado diseño, cantidades excesivas de cemento pueden provocar contracción, que se manifiesta en un agrietamiento en bloque de la capa cuando



se somete a cargas repetidas. Por su parte, los materiales ligados con asfalto tienden a ser más blandos, con mejores propiedades elásticas, tendiendo a deformarse bajo carga.

Una de las causas del uso tan limitado de esta técnica es que se carece de una guía de diseño para bases estabilizadas con emulsión asfáltica y de especificaciones para aseguramiento de su calidad. Por otro lado, también se tiene poca experiencia en la elaboración de emulsiones de rompimiento lento, que son las que generalmente se usan para este tipo de estabilización. Del comportamiento de la emulsión asfáltica en campo va a depender la trabajabilidad, la durabilidad y la resistencia del suelo granular estabilizado. Por ello es de suma importancia el diseño de la emulsión en laboratorio para garantizar las propiedades deseadas en el proyecto.

La construcción de una base estabilizada con emulsión asfáltica junto con la colocación de un sello como lechada asfáltica o micro-capa es una alternativa de bajo costo para mantener es buenas condiciones caminos de bajo volumen hasta el momento en que se decida colocar una carpeta asfáltica de mejor calidad. Esto disminuiría el costo de reacondicionar la base existente en el caso de las bases expuestas que en la actualidad frecuentemente con intervenidas para recuperar sus condiciones de serviciabilidad.

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 utilizan las emulsiones asfálticas, éstas se dispersan 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 mástico de las gotas de asfalto y las partículas finas de agregado.

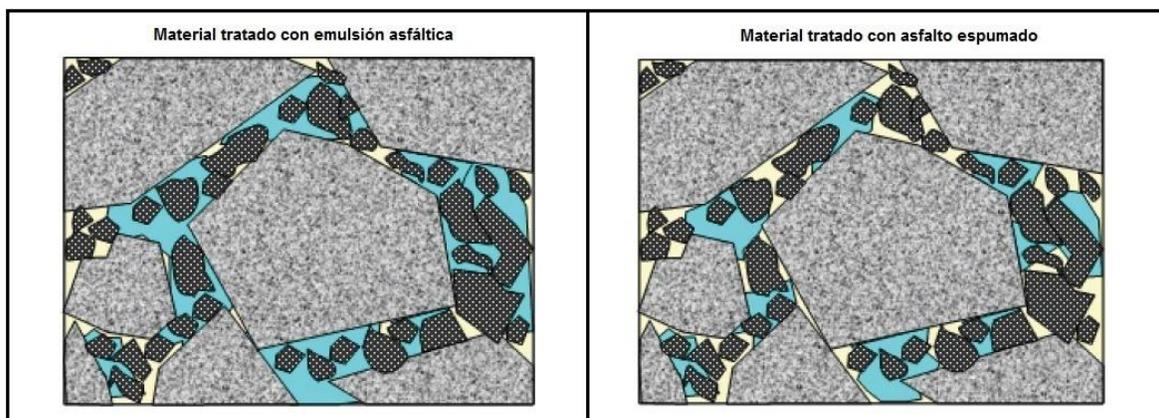


Figura 1. Ligadura entre el asfalto y el agregado (Asphalt Academy, 2009)



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 mastico 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% para cemento y 1,5% para cal hidratada. Si se coloca más de estos porcentajes recomendados, 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:

- Materiales granulares con buena resistencia, angularidad, forma, rugosidad y dureza de los agregados.
- Incremento del tamaño máximo del agregado.

Informe LM-PI-UMP-054-R3	Fecha de emisión: 05 de February de 2018	Página 16 de 79
--------------------------	--	-----------------



- 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. (Wirtgen GmbH, 2012)

2.4. Clasificación

Los BEA se clasifican en tres clases, dependiendo de la calidad de su material original y el tráfico de diseño (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: 05 de February de 2018	Página 17 de 79
--------------------------	--	-----------------



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 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

Informe LM-PI-UMP-054-R3	Fecha de emisión: 05 de February de 2018	Página 19 de 79
--------------------------	--	-----------------



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 (%)				
		Granulometría recomendada		Granulometría menos adecuada	
Nº	mm	Límite grueso	Límite fino	Limite grueso	Límite fino
2"	50	100	100	100	100
1,5"	37,5	87	100	100	100
1"	25	76	100	100	100
3/4"	19	65	100	100	100
1/2"	12,5	55	90	90	100
3/8"	9,5	48	80	80	100
1/4"	6,7	41	70	70	100
Nº 4	4,75	35	62	62	88
Nº 8	2,36	25	47	47	68
Nº 16	1,18	18	36	36	53
Nº 30	0,600	12	27	27	42
Nº 40	0,425	10	24	24	38
Nº 50	0,300	8	21	21	34
Nº 100	0,150	3	16	16	27
Nº 200	0,075	2	10	10	20

La zona menos adecuada se puede utilizar cuando las alternativas de materiales son muy limitadas. Donde sea necesario, los 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).

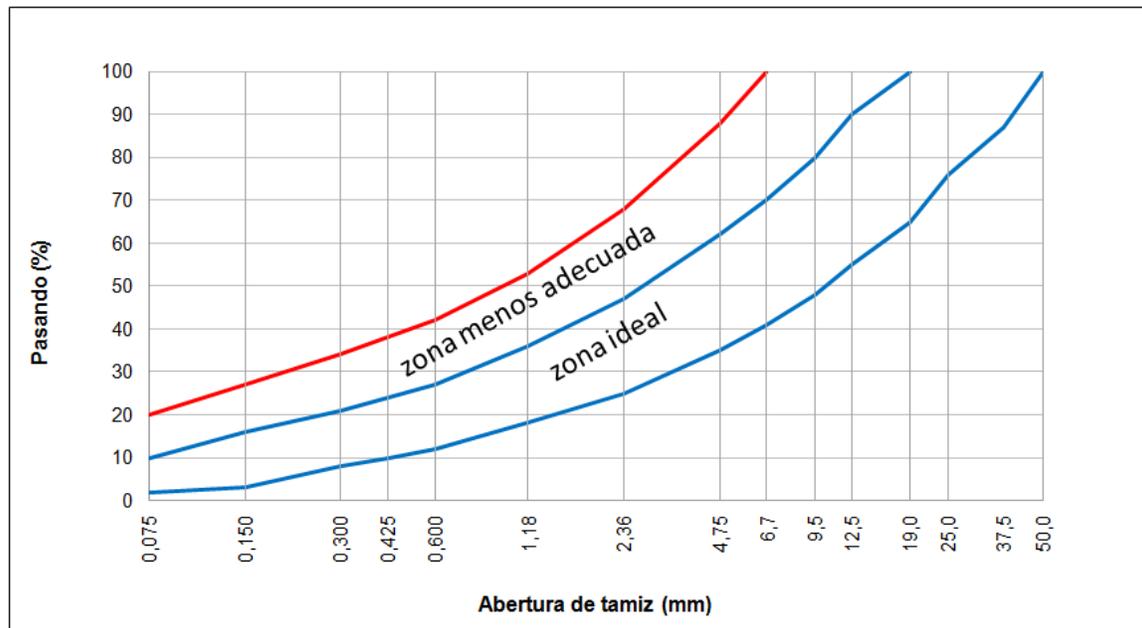


Figura 2. Requerimientos granulométricos (Wirtgen GmbH, 2012)

2.5.2. Emulsión asfáltica

Una emulsión es un sistema heterogéneo y termodinámicamente inestable que incluye al menos dos fases líquidas inmiscibles, en la cual una está dispersa en la otra en forma de gotas, cuyo diámetro es generalmente superior a 0,1 micrómetros. La estabilidad mínima inherente a este tipo de sistemas incrementa adicionando agentes apropiados, tales como, surfactantes o sólidos finamente divididos. Las gotas de asfalto dentro de la emulsión tienen una pequeña carga eléctrica. La fuente de esta carga eléctrica es el agente emulsificante, así como otros componentes ionizables dentro del asfalto mismo. Estas pequeñas cargas eléctricas normalmente proveen de una barrera electrostática que hace que las gotas de asfalto se repelen entre ellas mismas, y hace posible la dispersión del asfalto en el agua (Transportation Research Board, 2006).

La mayoría de las emulsiones utilizadas como agentes estabilizadores tienen una componente de “asfalto residual” de 60%, que significa que el 60% de volumen de la emulsión está compuesto de asfalto disperso en un 40% del volumen que es agua. El porcentaje de asfalto puede, sin embargo, variar entre 30% y 70%, pero los porcentajes de asfalto mayores a 60% no son recomendables para el reciclado debido a que la emulsión se torna viscosa, más difícil de bombear y por lo tanto es más difícil recubrir el agregado (Wirtgen GmbH, 2004).



Las emulsiones asfálticas más utilizadas en este tipo de aplicación son las de rompimiento lento. Estas emulsiones asfálticas facilitan su dispersión sobre el material granular, obteniéndose una buena trabajabilidad en un tiempo suficiente para que se dé todo su proceso constructivo. Las bases granulares tienen un contenido importante de finos, los cuales por su alta superficie específica, requieren de este tipo de emulsiones, para que se dé un rompimiento adecuado de la misma (Wirtgen GmbH, 2012)

Es importante a la hora de seleccionar el tipo de emulsión asfáltica, que se tome en cuenta su compatibilidad con el agregado. Las emulsiones catiónicas tienen mejor afinidad con los agregados silíceos, por otro lado, las emulsiones aniónicas tienen mejor afinidad con los agregados alcalinos (Wirtgen GmbH, 2012). De no tener la opción de cambiar el tipo de emulsión, es posible usar un promotor de adherencia.

Es importante realizar las pruebas de recubrimiento y adherencia en cada material al que se vaya aplicar, para garantizar una adecuada trabajabilidad y un buen desempeño en el campo.

En la siguiente tabla se detalla los parámetros de calidad de la emulsión asfáltica:

Tabla 3. Especificaciones para emulsiones asfálticas (Reglamento Técnico Centroamericano, 2005)

Ensayo	Unidades	Norma AASHTO	CSS-1	CSS-1h	SS
Viscosidad Saybolt Furol a 25 °C	SFS	T 72	20-100	20-100	20-100
Estabilidad a 24 h	%	T 59	1 máx.	1 máx.	1 máx.
Tamizado por malla N°20	%	T 59	0,10 máx.	0,10 máx.	0,10 máx.
Carga eléctrica	---	T 59	Positiva	Positiva	Negativa
Destilación, residuo	%	T 59	57 mín.	57 mín.	57 mín.
Penetración a 25 °C, 100 g, 5s	1/100 mm	T 49	100-250	40-90	40-90
Ductilidad, 25 °C, 5 cm/min	cm	T 51	40 mín.	40 mín.	40 mín.
Solubilidad en tricloroetileno	%	T 44	97,5 mín.	97,5 mín.	97,5 mín.
Media tamaño de partícula	µm	-	Entre 3 y 10		



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 incluyen 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

Por otro lado, 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 se determina la necesidad del relleno mineral activo y cuál de ellos es el más adecuado para el material. Los ensayos de resistencia retenida a la tensión indirecta y cohesión del ensayo de triaxial son buenos indicadores para el uso de relleno mineral activo.

Los materiales pre-tratados con cal hidratada para disminuir su IP requieren que el agua y la cal necesaria sean adicionados al material al menos dos horas previas al mezclado con la emulsión asfáltica, procurando que no pierda la humedad. El contenido de humedad se puede chequear y hacer ajustes si es requerido.

2.5.4. Agua para mezclado y compactación

La calidad del agua utilizada en la estabilización con emulsión asfáltica es importante para garantizar el correcto desempeño de la emulsión. Se debe verificar los niveles de pH del agua, y más aún la compatibilidad del agua con la emulsión. Se deben seguir para este

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

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 estabilización con asfalto, y con esto lograr un adecuado desempeño. En la figura 3 se ilustra qué criterios y cómo debe comprobarse que la estabilización con asfalto es la adecuada.

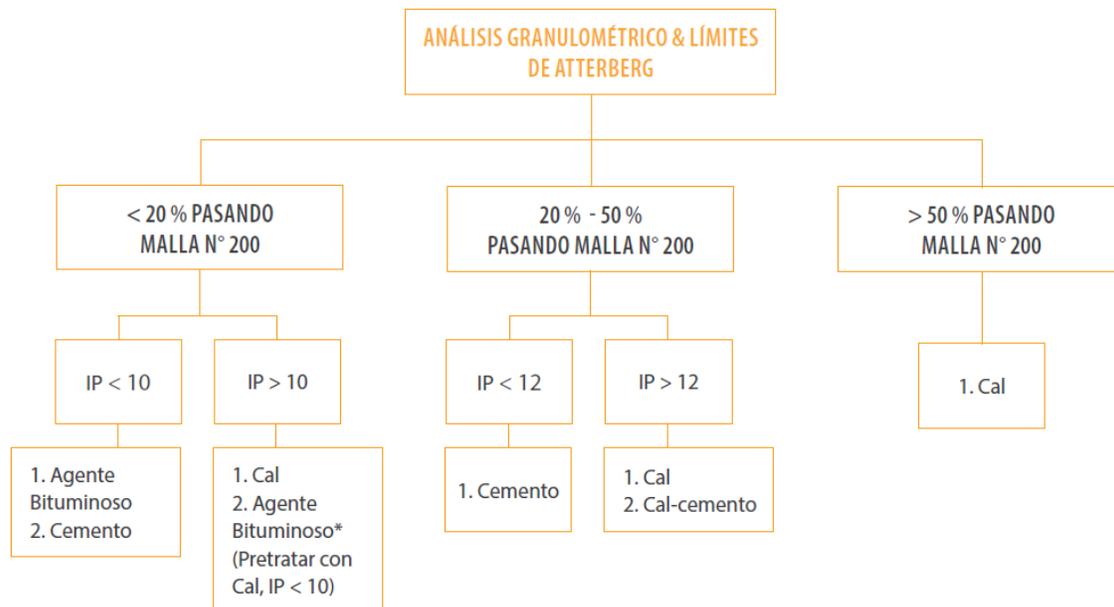


Figura 3. Selección del tipo de estabilización según informe (Ávila & Ulloa, 2017)

Como se puede ver en la Figura 3, la estabilización con asfalto es posible principalmente en materiales gruesos, si el índice de plasticidad (IP) es menor a 10, ó mayor a 10, pero para este segundo caso es necesario pretratar el material con cal para disminuir el IP.

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), y con base en dichos resultados se



determina si éste puede o no ser estabilizado con asfalto, y si este debería ser pre tratado o mezclado con otro material. Posteriormente se determina si existe la necesidad de incorporar un relleno mineral activo, como cal o cemento, para mejorar 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 para garantizar una buena adherencia. Seguidamente, se realizan ensayos (Nivel de diseño 1) que permiten aproximar la tasa de asfalto residual requerido, con lo cual es posible clasificar el material en una determinada clase de BEA. Dependiendo del tráfico de diseño, se llevan a cabo otros ensayos adicionales para optimizar la tasa de asfalto residual obtenida previamente, y aumentar el grado de confianza en el desempeño del material estabilizado; esto serían los niveles de diseño 2 y 3. En resumen el diseño de mezcla consiste en:

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 que haga que la mezcla alcance un pH igual o superior de 12,4 (valor de consumo inicial de cal). Cuando el material debe ser pre-tratado con la cal para realizar el diseño, se requiere que la cal y el agua sean adicionados a la mezcla 2 horas antes de que se incorpore la emulsión asfáltica. Cuando se realiza este procedimiento, la mezcla 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% de relleno mineral activo, 1% de cal y 1% de cemento. Se utiliza un mismo porcentaje de asfalto residual para las 3 mezclas, utilizando como referencia el recomendado en la Tabla 5. Para las tres mezclas se elabora un grupo de seis especímenes tal como se establece más adelante en el diseño 1; posteriormente se fallan a tensión diametral pastillas 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%, 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: Para determinar la sensibilidad de la cantidad de relleno mineral activo en la mezcla, se pueden realizar ensayos adicionales en especímenes de 100 mm de diámetro con el relleno mineral activo seleccionado a una tasa de aplicación menor, por ejemplo 0,75%. Sin embargo, se debe evitar comprometer la flexibilidad de la mezcla, utilizando un máximo de relleno mineral activo de 1%. Es importante indicar que este porcentaje no contabiliza algún contenido de cal hidratada previamente adicionado para pre-tratar el material.

Nivel de diseño 1: se compactan 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. 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 tránsito, con menos de 3 millones de ESALs.

Nivel de diseño 2: Implica la elaboración de pastillas de 150 mm de diámetro por 95 mm de altura, las cuales son curadas para un contenido de humedad de equilibrio (curado en horno por 24 horas a 30°C y posteriormente, en bolsas plásticas 48 horas a 40°C) y ensayadas a tensión indirecta (ITS). Se pueden utilizar otros procedimientos de compactación (mazo vibratorio, compactación giratoria, mesa vibratoria, etc.) para obtener



un 100% de la compactación del Próctor modificado. 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 efectúan ensayos de triaxial estática en 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. 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 4 se resumen el procedimiento de diseño a nivel de laboratorio.

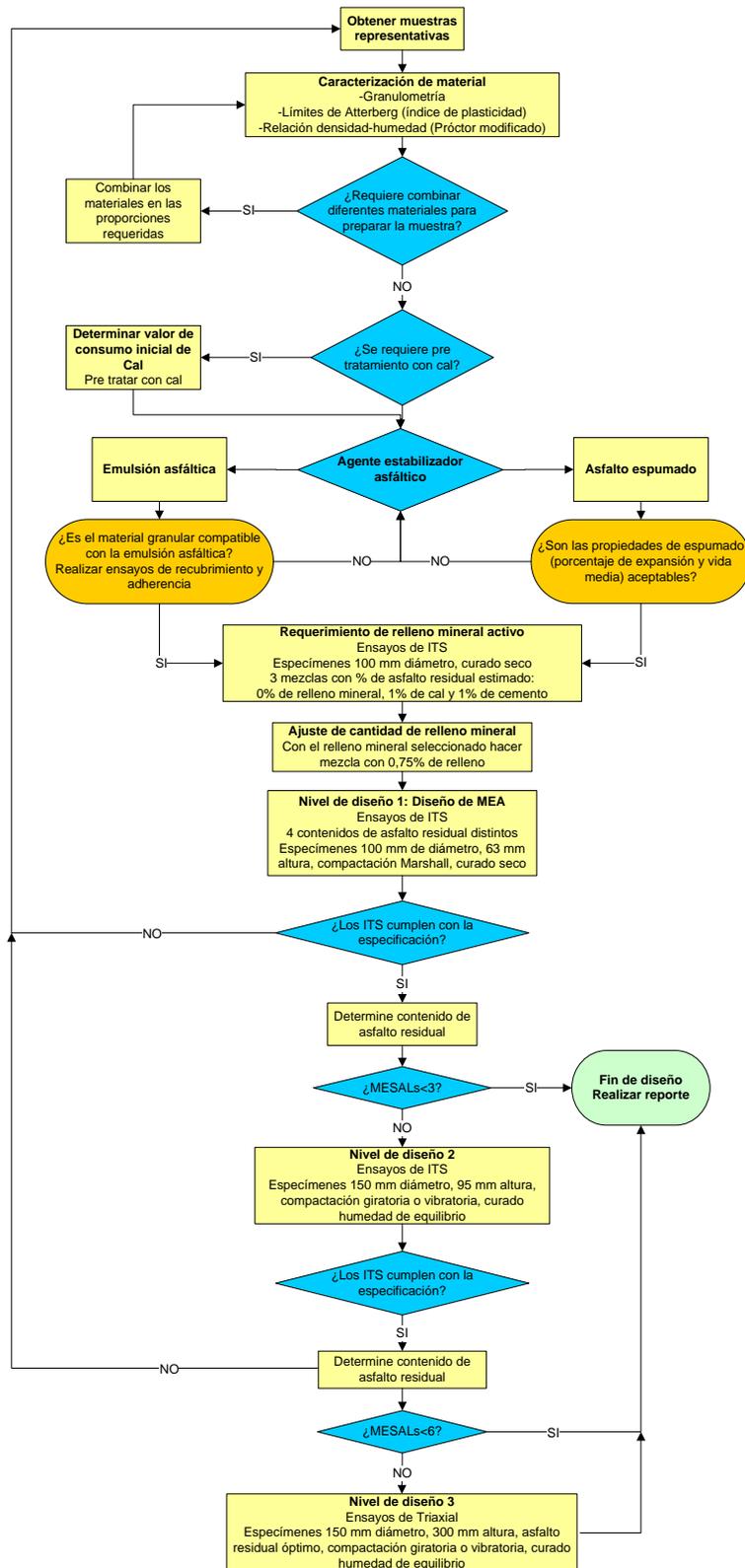


Figura 4. Diagrama de flujo diseño en laboratorio de BEA (Collings, y otros, 2009)

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 5 se muestra el proceso de tamizado para obtener las fracciones deseadas para los ensayos de diseño.



Figura 5. Preparación de materiales

2.7.3. Contenido de fluidos totales en la mezcla

El contenido de humedad en la mezcla proveniente tanto del agua en la emulsión como la humedad del agregado tiene varias funciones:



Tabla 4. Función de los fluidos dentro de la mezcla (Asphalt Academy, 2009)

Componente	Función
Emulsión	Contribuye a la compactación
Humedad en el agregado	Reduce en el agregado la absorción del agua en la emulsión
	Previene el rompimiento prematuro de la emulsión
	Extiende el tiempo de curado y reduce la ganancia temprana de resistencia
	Provee trabajabilidad a temperatura ambiente
	Reduce el ángulo de fricción interna y facilita la compactación
	Aumenta la vida útil de la mezcla durante su colocación

La mezcla durante su elaboración y colocación sufre cambios en el contenido de humedad por dos fenómenos (Asphalt Academy, 2009):

- **Rompimiento de la emulsión asfáltica**, que es la separación del asfalto de la fase acuosa por medio de la floculación y coalescencia de las gotas de asfalto que resulta en una película de asfalto sobre la superficie del agregado. El proceso de rompimiento de las emulsiones asfálticas aniónicas se da por la absorción y evaporación del agua en los agregados, en las emulsiones asfálticas catiónicas se da principalmente una reacción química entre el agregado y la emulsión. Entre más fina sea la granulometría de una mezcla, la superficie específica es mayor, y por lo tanto, se requerirá una emulsión asfáltica que rompa más lentamente, de manera que, se garantice un tiempo suficiente para el mezclado y colocación. Cuando la emulsión rompe, la mezcla pasa de un tono café a un tono negro, y esto se puede observar a simple vista.
- **Curado**, durante el curado se da el desplazamiento del agua que incrementa la rigidez y la resistencia a la tensión de la mezcla. Este factor determina el tiempo necesario para que la mezcla tenga suficiente cohesión entre partículas y la rigidez para soportar las cargas de tránsito.

Dentro de los factores que pueden afectar el tiempo de rompimiento y el curado de la mezcla están: porcentaje de absorción del agregado, contenido de humedad del agregado durante el mezclado, contenido de humedad para mezclado y compactación, granulometría, cantidad, tipo y grado de emulsión, energía compactación, composición

mineral del agregado, intensidad de la carga eléctrica del agregado, presencia de relleno mineral activo, y temperatura del agregado y el aire (Wirtgen GmbH, 2012)

Cuando se trabaja con emulsiones asfálticas, el “Contenido Total de Fluidos” es utilizado en lugar del Contenido de Humedad al momento de definir la relación densidad-humedad. La densidad máxima se alcanza con el Contenido Óptimo de Fluido Total (COFT), y es la combinación del agua de compactación y emulsión asfáltica en la mezcla (Figura 6). Antes del rompimiento, la emulsión asfáltica es un fluido con viscosidad ligeramente mayor a la del agua. El agua y el asfalto en la emulsión actúan como un lubricante que favorece la compactación, por lo que ambos deben ser considerados como un solo fluido (Wirtgen GmbH, 2004).

El contenido óptimo de fluidos totales se determina adicionando un porcentaje constante de emulsión asfáltica mientras varía la cantidad de agua y se realiza el ensayo de relación densidad-humedad (Próctor modificado). La cantidad de emulsión, que se agrega de manera constante, se determina según la Tabla 5.

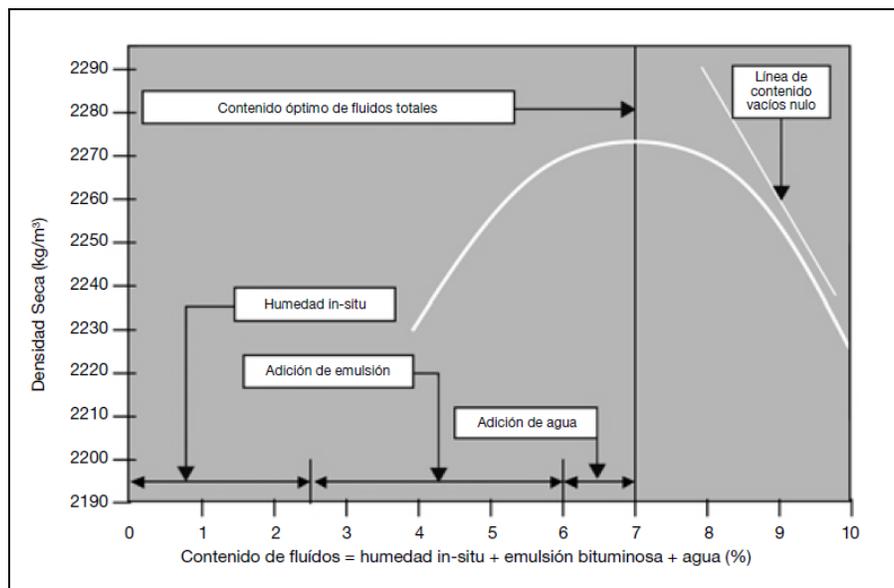


Figura 6. Esquema de fluidos totales (Wirtgen GmbH, 2004)

2.7.4. Compatibilidad: recubrimiento y adherencia

La evaluación preliminar de la emulsión asfáltica que se utilizará en el diseño implica la realización de los ensayos de recubrimiento y adherencia (Asphalt Institute, 1998). Con

estos ensayos se garantiza que la emulsión rompa de manera adecuada, permitiendo el recubrimiento del agregado, la dispersión en la mezcla y una buena trabajabilidad. Además, se puede determinar si la emulsión tiene compatibilidad química con el agregado. En estos ensayos se hace una mezcla de prueba con el material a estabilizar y una cantidad de emulsión asfáltica y agua. El porcentaje de asfalto residual que se emplea puede estar dentro de un rango de 2% a 3% sobre el peso total de agregado seco, utilizando la cantidad de agua se calculada según el apartado anterior. El ensayo de recubrimiento consiste en adicionar agua y emulsión asfáltica al agregado, mezclar y luego dejar curar la mezcla durante 24 horas a 60°C, posteriormente se evalúa el recubrimiento de manera visual, empleando una cuadrícula en la que se pueda contabilizar un porcentaje de recubrimiento con respecto a una masa de 500 g. Por otro lado, en el ensayo de adherencia (Figura 7) se toma una parte de esta mezcla ya curada, aproximadamente 100 g, y se coloca en agua hirviendo por un periodo de 3 minutos. Se seca y se evalúa nuevamente el recubrimiento. Tanto para el ensayo inicial de recubrimiento como para el de adherencia se espera un porcentaje mínimo de recubrimiento de 60% (Asphalt Institute, 1998).

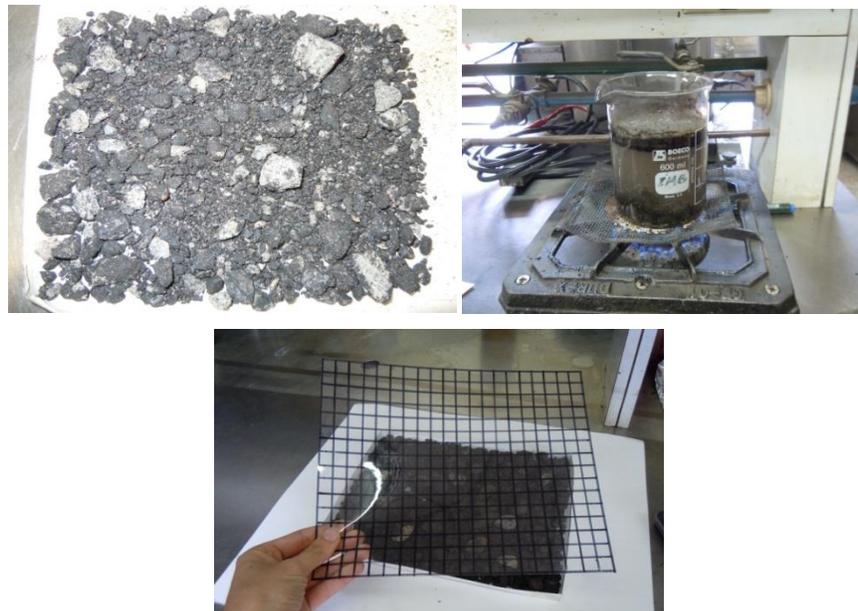


Figura 7. Ensayo de recubrimiento y adherencia



2.7.5. Mezclado y compactación de especímenes de ensayo

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

Tabla 5. Estimación de porcentaje teórico de asfalto residual óptimo (Wirtgen GmbH, 2012)

Fracción pasando el tamiz N° 200 (%)	Adición de emulsión asfáltica* (residuo asfáltico)		Material típico
	% sobre peso seco de agregado		
	Fracción pasando el tamiz N°4		
	<50%	>50%	
<4	3,3(2,0)	3,3(2,0)	RAP
4-7	3,7(2,2)	4,0(2,4)	RAP/Piedra triturada graduada, gravas naturales, mezclas de las anteriores
7-10	4,0(2,4)	4,7(2,8)	
>10	4,3(2,6)	5,3(3,2)	Gravas/arenas

* Porcentajes de emulsión asfáltica indicados son respecto a un residuo asfáltico de 60%.

El material mezclado con emulsión se prepara preferiblemente en mezcladoras tipo "pugmill", ó batidoras de laboratorio. El uso de estos equipos va orientado al tipo de mezclado que pueda tener el material en el campo.

La densidad que se logre con la compactación es de vital importancia para el desempeño final de la mezcla. El método de compactación que se emplee en el laboratorio debe reproducir la densidad que se obtendrá 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, una presión de 600 kPa y un ángulo de 1,25° (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).

2.7.6. Curado de especímenes de ensayo

El curado es el proceso donde las capas mezcladas y compactadas eliminan el agua por medio de evaporación, neutralización de la carga del asfalto en la emulsión, y la disipación de presión de poro inducida por la compactación (Moloto, 2010).

2.7.6.1. Evaporación del agua

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).

2.7.6.2. Neutralización de la carga del asfalto en la emulsión

La carga eléctrica que tiene el agregado neutraliza la carga eléctrica de las partículas de asfalto en la emulsión, permitiendo que se acerquen unas a otras para formar conglomerados de mayor tamaño; los cuales recubren el agregado formando una capa asfáltica. En el proceso de desestabilización, la emulsión invierte su fase en donde el asfalto forma el medio continuo y el agua el medio disperso, o sea que se forman pequeñas gotas de agua en el interior del asfalto, las cuales posteriormente son eliminadas por la coalescencia del asfalto.

2.7.6.3. Disipación de presión de poro inducida por la compactación

La alta presión de 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. Debido a que la presión de poro del agua en la mezcla es superior a la presión atmosférica del entorno, el agua migra hacia la superficie, lo cual promueve el curado.

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.

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

La Academia de Asfalto (Asphalt Academy, 2009) propone dos tipos de curado 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 y se lleva a masa constante (Figura 8, 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 sellados en bolsas plásticas y se curan por 48 horas a 40°C (Figura 8, lado derecho). Con este tipo de curado se somete a los especímenes a una condición de humedad de equilibrio de $\pm 50\%$ del óptimo de humedad, 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 8. Curado de especímenes

2.8. Condiciones climáticas de Costa Rica a considerar en el diseño

En Costa Rica factores como la temperatura y la precipitación (que finalmente se traduce como humedad del suelo) causan el deterioro de las estructuras de pavimento. El factor de temperatura afecta directamente a las capas de rodamiento, y la humedad afecta las capas inferiores conformadas de suelo como material de construcción. No obstante el daño en capas inferiores genera daño de la superficie de rodamiento.

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.

2.9. Ensayos mecánicos

2.9.1. Resistencia a la tensión indirecta (ITS)

El ensayo de resistencia al daño por humedad a la tensión indirecta (Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing, 2012), 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. El equipo utilizado para este ensayo se muestra en la Figura 9.



Figura 9. Ensayo de tensión indirecta, ITS.

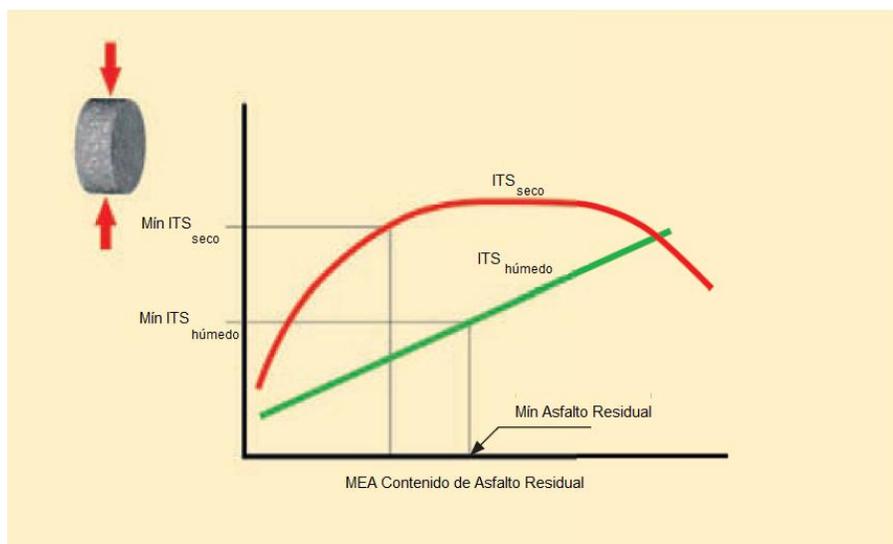


Figura 10. Determinación del contenido óptimo de asfalto residual (Wirtgen GmbH, 2012)

Con cada punto de asfalto residual se elaboran de 6 a 8 especímenes que se compactan y curan como se discutió anteriormente. Después del curado se realiza el ensayo de gravedad específica (Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing, 2012). Estos especímenes se dividen en dos grupos, uno seco y el otro saturado. La saturación consiste en sumergir las pastillas en agua a 25°C por 24 horas. Después de este periodo de tiempo se fallan a tensión indirecta. Valores de resistencia retenida menores a 60% 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 6 se muestran los valores mínimos recomendados de ITS. El porcentaje de asfalto residual es aquél que cumple con las tensiones indirectas mínimas (Figura 10).

Tabla 6. 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
Informe LM-PI-UMP-054-R3	Fecha de emisión: 05 de February de 2018			Página 37 de 79	

2.9.2. Ensayo de módulo de resiliente de materiales granulares

El módulo resiliente también se determina mediante el método triaxial de carga repetida (Figura 11). El ensayo de triaxial (Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing, 2012) se usa para simular las condiciones reales del pavimento. Este sirve 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.

Tabla 7. 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 11. Triaxial dinámica

En la Tabla 7 se indican valores típicos de módulo resiliente para cada tipo de BEA. (Wirtgen GmbH, 2012)

Informe LM-PI-UMP-054-R3	Fecha de emisión: 05 de February de 2018	Página 38 de 79
--------------------------	--	-----------------



2.9.3. Ensayo de triaxial estático

La cohesión y el ángulo de fricción de un suelo son propiedades intrínsecas de los materiales, los cuales pueden darnos criterios para evaluar la calidad del mismo (Asphalt Academy, 2009). 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. Los especímenes, previo al uso de la cámara triaxial, pueden acondicionarse mediante el ensayo MIST (Moisture Induced Sensitivity Test) (American Standard Testing and Materials, 2013), donde el equipo aplica el ingreso de humedad de manera cíclica a presiones de poro semejantes a las que puede experimentar el material en campo en condiciones de humedad y tránsito.

Tabla 8. 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

2.9.4. 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 [1]) 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, 2008).

$$\text{Relación de esfuerzo desviador} = \frac{\sigma_d}{\sigma_{d,f}} \quad [1]$$

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:

$$\varepsilon_p = A \cdot \left(\frac{N}{1000}\right)^B + C \cdot \left(e^{D \cdot \frac{N}{1000}} - 1\right) \quad [2]$$

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

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

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

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



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, \dots, d_2 = coeficientes del modelo

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, 2008).

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 12 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 [3].

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

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

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.

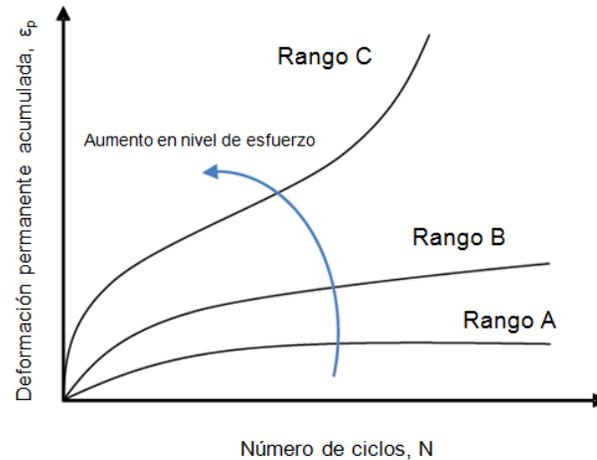


Figura 12. Diferentes tipos de comportamiento de deformación permanente, dependiendo del nivel de esfuerzo. (Dawson, Werkmeister, & Wellner, 2005)

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 9 (Wirtgen GmbH, 2012).

Tabla 9. 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. RESULTDOS DE DISEÑO

3.1 Resumen del procedimiento

Se realizó es esquema de diseño que se muestra en la Figura 4 para un material granular.

3.2 Caracterización de materiales

Se caracterizó la base granular y la emulsión asfáltica. La base proviene del Tajo Santa Ana que se localiza en la ciudad de Santa Ana en Escazú. A su vez la emulsión asfáltica CSS1-h que se utilizó para el proyecto fue suministrada por RECOPE en la planta que se localiza en el Alto de Ochomogo.

A continuación, se presentan los resultados:

Tabla 10. Granulometría del material ensayado

Tamiz (pulg)	Tamiz (mm)	Porcentaje Pasando (%)	Especificación 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	12,0	27,0
Nº 40	0,43	19,9	10,0	24,0
Nº 50	0,30	17,5	8,0	21,0
Nº 100	0,15	13,8	3,0	16,0
Nº 200	0,075	10,9	2,0	10,0

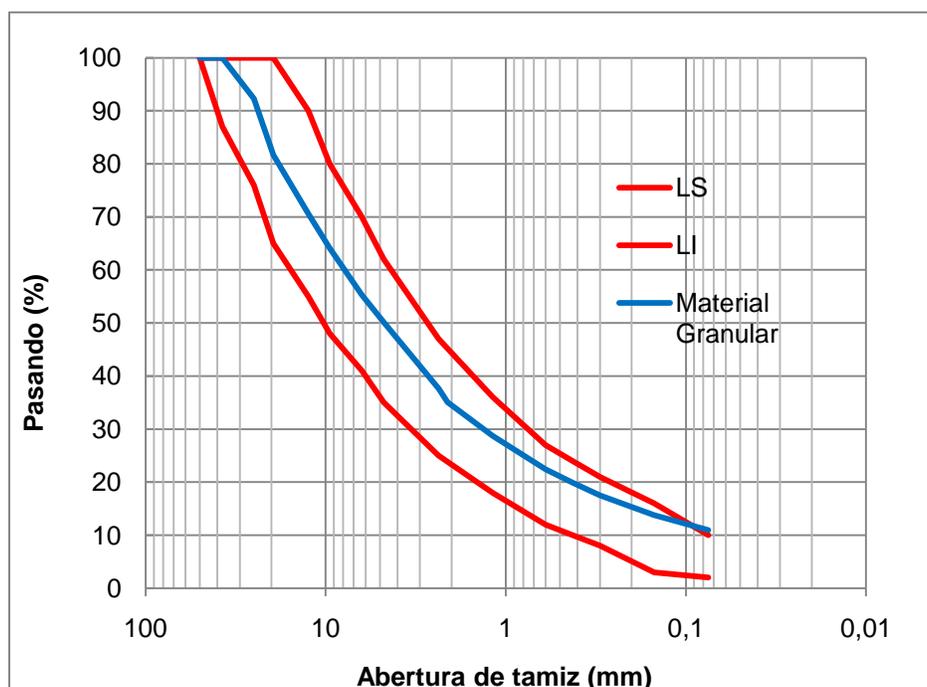


Figura 13. Curva granulométrica

Tabla 11. Caracterización del material de base

Ensayo	Norma	Unidades	Resultado	Especificación
Límite líquido	ASTM D 4318	%	NP	35 max
Límite plástico	ASTM D 4318	%	NP	-----
Índice de plasticidad	ASTM D 4318	%	NP	10 max
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
Índice de durabilidad gruesos	ASTM D 3744	%	39	35 min
Índice de durabilidad finos	ASTM D 3744	%	62	35 min
Abrasión de los Ángeles	ASTM C 535	%	40	50 max
Caras fracturadas	ASTM D 5821	%	100,0	50 min
Partículas friables	ASTM C 142	%	0,6	-----
Equivalente de arena	ASTM C 142	%	40	-----
Presencia materia orgánica	ASTM C 140	-----	no	Sin orgánicos
GBS gruesos	ASTM C 127	-----	2,260	-----
Absorción gruesos	ASTM C 127	%	5,4	-----
GBS finos	ASTM C 128	-----	2,176	-----
Absorción finos	ASTM C 128	%	8,4	-----



De acuerdo con lo anterior, el agregado utilizado para el estudio cumple con todas las características especificadas en la normativa, por lo que es apto para ser estabilizado con emulsión asfáltica.

Tabla 12. Caracterización de la emulsión asfáltica

Ensayo	Norma	Unidades	Resultado	Especificación
Densidad a 25°C	ASTM D 6937	kg/m ³	1017	-----
Viscosidad Saybolt Furol	ASTM D 88	sSF	30,4	20-100
Residuo asfáltico	ASTM D 6937	%	64,5	57 mín
Penetración	ASTM D 5	1/10 mm	68,0	40-90
Fracción retenida malla N°20	ASTM D 6933	%	0,02	0,1
Estabilidad a 24 h	ASTM D 6930	%	-0,1	1 máx

*Informe de ensayos AS-08-06-008 RECOPE

El lote de emulsión muestreada en Recope también cumple con todas las especificaciones requeridas para la estabilización del material granular en estudio.

3.3 Determinación de la compatibilidad de material con la emulsión

Con los datos de la granulometría y según la Tabla 5 se determinó un contenido inicial de asfalto residual para los ensayos de recubrimiento, para verificar la compatibilidad agregado-asfalto, se muestra en la Tabla 13 el requerimiento de relleno mineral activo, cantidad relleno mineral, y con respecto a este se calcularon los contenidos de asfalto residual para los niveles de diseño 1 y 2.

Tabla 13. Determinación de la compatibilidad entre el material granular y la emulsión asfáltica

Dosificación			Ensayo de recubrimiento			Ensayo de adherencia		
Porcentaje de asfalto residual	Porcentaje relleno mineral	Tipo de relleno mineral	Cantidad cuadros totales	Cantidad cuadros sin recubrir	Porcentaje recubrimiento	Cantidad cuadros totales	Cantidad cuadros sin recubrir	Porcentaje recubrimiento
%	%				%			%
3,2	0,0	Sin relleno	320	127	60,3	100	95	5
3,2	1,0	CAL	320	40	87,5	100	36	64
3,2	1,0	CEMENTO	320	65	79,7	100	51	49

La emulsión de Recope utilizada presenta un recubrimiento superior a 60% según lo solicitado en las especificaciones, siempre que se adicione cal, de manera que provea



una correcta trabajabilidad y cohesión. Esto de manera preliminar, pues es hasta el ensayo de resistencia a la tensión diametral al daño por humedad que determina si es necesario la incorporación de un relleno mineral activo.

3.4 Obtención de la relación densidad-humedad para el cálculo de fluidos totales

De la Tabla 14, se establece que las pequeñas variaciones de asfalto residual ($\pm 0,5$ %) no afectan significativamente el contenido de humedad ni la densidad máxima seca del material estabilizado con emulsión. Por lo cual podría reducirse a realizar únicamente el ensayo el Próctor con emulsión para el cálculo de fluidos totales recomendado por la Tabla 5.

Tabla 14. Determinación del contenido óptimo de fluidos totales para diferentes contenidos de asfalto residual en la mezcla

Asfalto residual	Contenido óptimo humedad	Contenido óptimo fluidos totales	Densidad máxima seca	Densidad húmeda
%	%	%	kg/m ³	kg/m ³
2,7	9,4	12,1	1958	2143
3,2	9,5	12,7	1938	2122
3,7	9,7	13,4	1924	2112

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

Informe LM-PI-UMP-054-R3	Fecha de emisión: 05 de February de 2018	Página 47 de 79
--------------------------	--	-----------------

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 15. 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	1974	101,9	438	170	38,8
Cal	3,2	1923	99,2	516	430	83,3
Cemento	3,2	1912	98,7	489	314	64,3

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 16. 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	1923	99,2	516,2	430,0	83,3
0,75	3,2	1958	99,2	388,2	280,7	72,3
0,50	3,2	1953	99,6	268,9	168,8	62,8

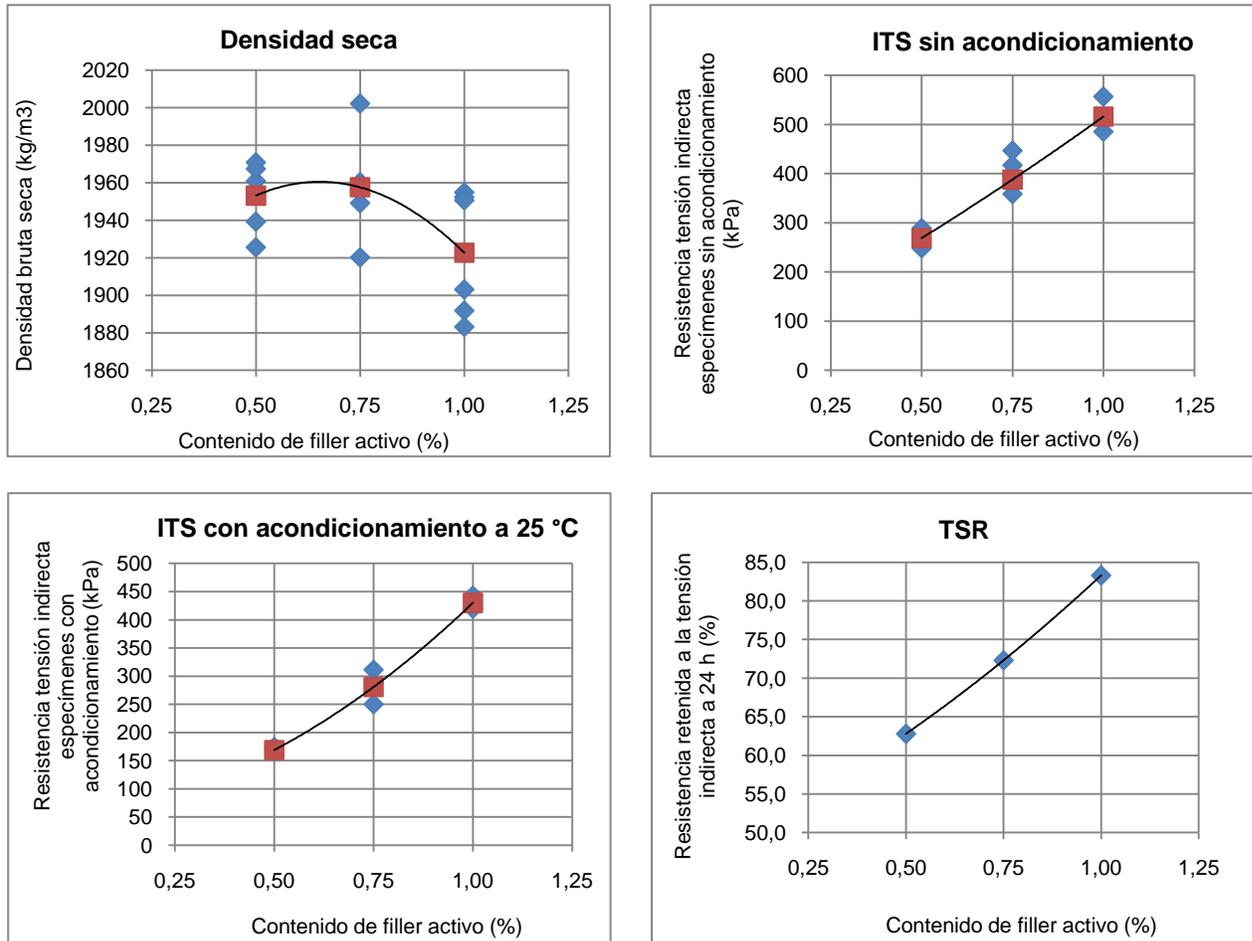


Figura 14. Variación de parámetros de diseño con respecto al contenido de relleno mineral en la mezcla

Se fija contenido de cal en 1%, ya que, por debajo de este porcentaje se cumple levemente con el 65% de resistencia retenida requerida.

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 17 y Figura 14.

Tabla 17. 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	1944	98,9	577,4	435,4	75,4
2,95	1931	98,9	550,8	454,2	82,5
3,45	1913	98,8	487,6	394,2	80,9
3,95	1915	98,9	462,1	367,0	79,4

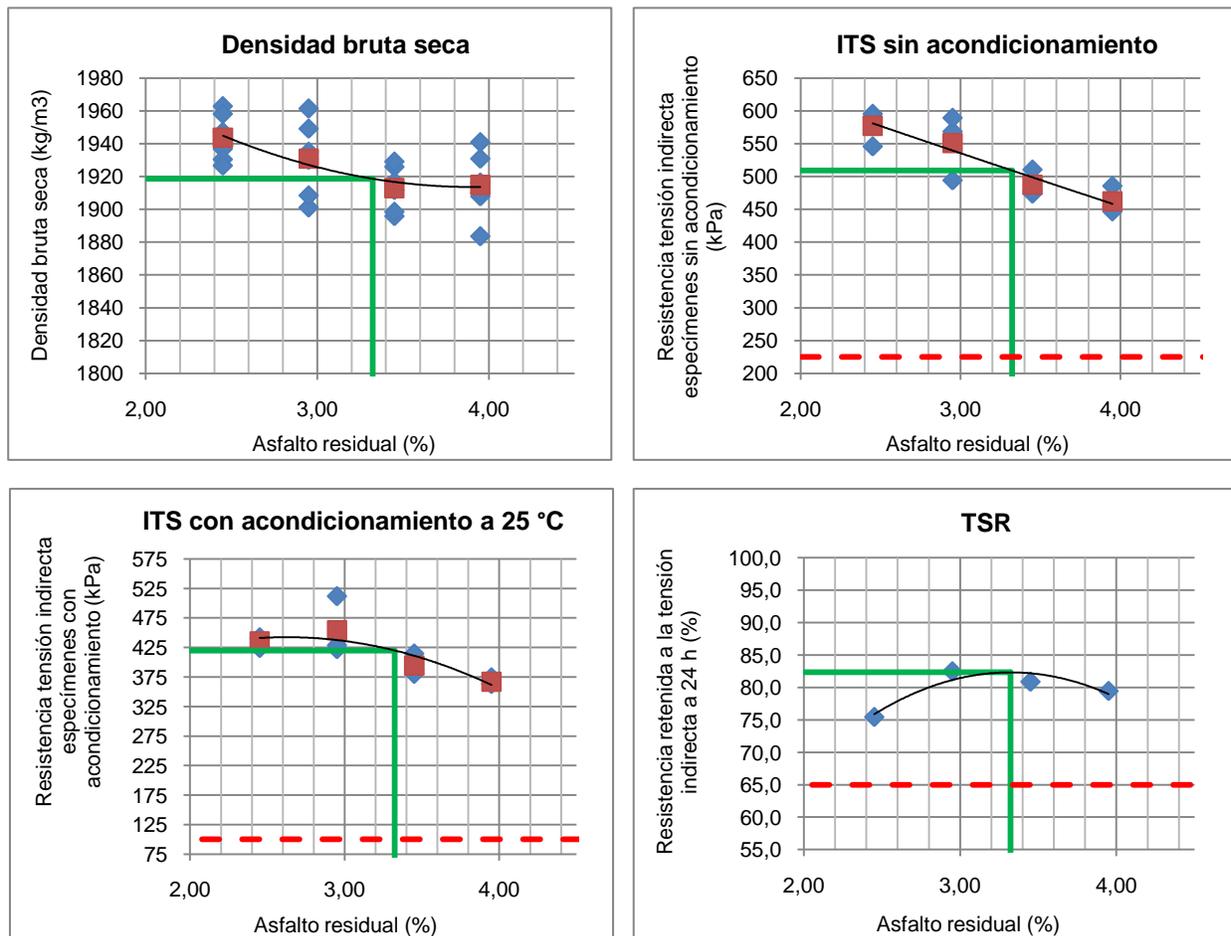


Figura 15. Variación de parámetros de diseño con respecto al contenido de asfalto residual en la mezcla nivel de diseño 1

Se determinó que el contenido óptimo de asfalto residual es **3,32%**, tomando como referencia la mayor resistencia retenida y que cumpla con las tensiones indirectas mínimas sin y con acondicionamiento. El material según estos resultados se clasifica preliminarmente como **BEA1** según Tabla 6.



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 que se realizó para determinar los fluidos totales. A partir de esta 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, las pastillas compactadas son curadas para alcanzar el contenido de humedad de equilibrio (curado en horno por 24 horas a 30°C y posteriormente, en bolsas plásticas 48 horas a 40°C); sin embargo, se observó que el curado inicial por 24 a 30 °C en el horno provoca una pérdida acelerada de humedad en los especímenes, por lo que se decidió que para este primer curado solamente se dejarían a temperatura ambiente durante un periodo de 18 horas aproximadamente, posteriormente se llevarían a un horno a 30 °C para alcanzar de manera controlada entre 65 % y 75 % del contenido óptimo de humedad. Una vez se alcance ese rango de humedad se procede a colocar los especímenes en bolsas selladas por un periodo de 48 horas a 40 °C, con el fin de que la emulsión termine de romper 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 18 y la Figura 16.

Tabla 18. Contenido óptimo de asfalto residual nivel de diseño 2

Asfalto residual	Densidad	Compact.	ITS sin acond	ITS acond	TSR
%	kg/m ³	%	kPa	kPa	%
2,75	1932,3	98,8	377,6	336,9	89,2
3,25	1936,4	99,9	350,8	341,4	97,3
3,75	1899,0	98,8	330,1	300,8	91,1

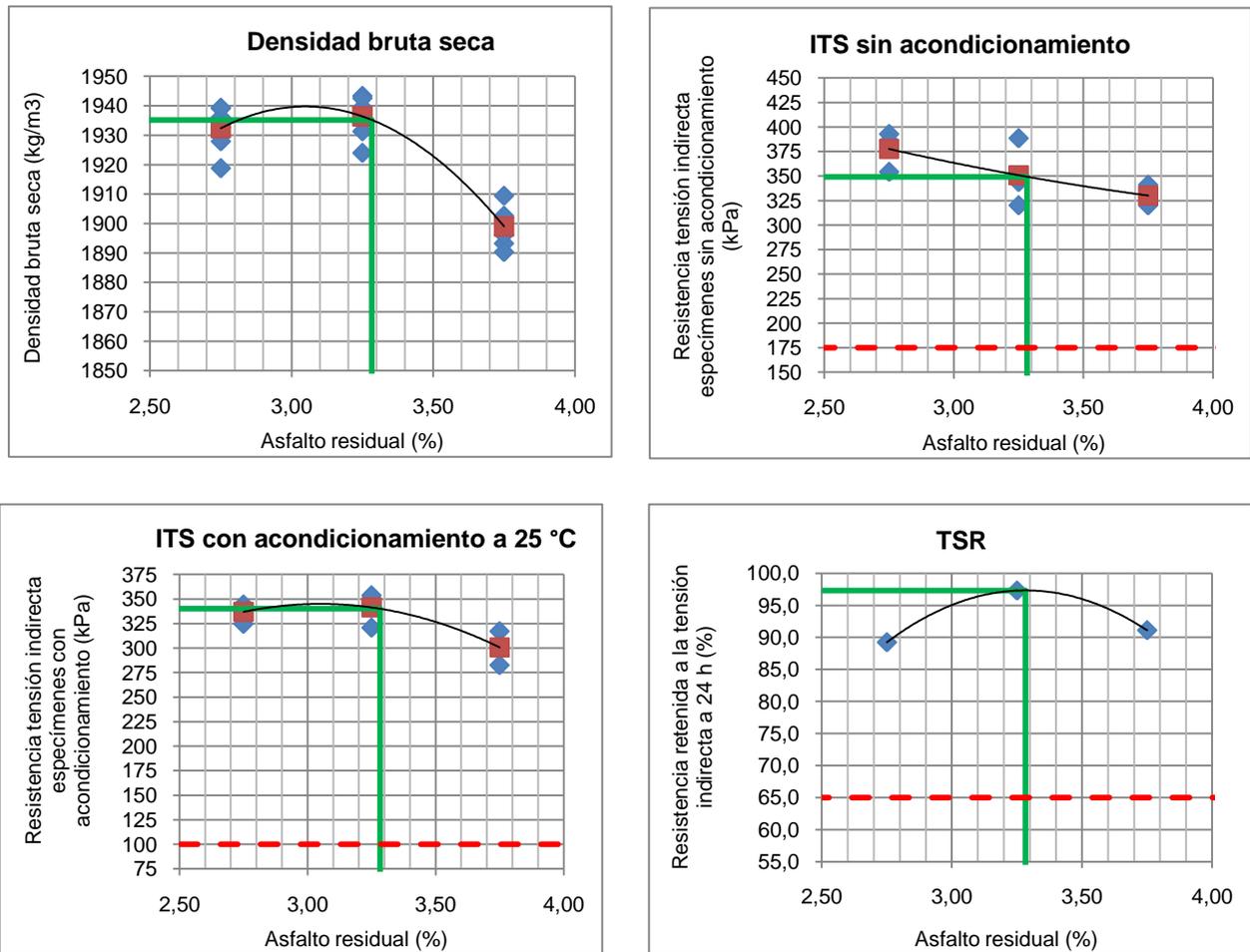


Figura 16. Variación de parámetros de diseño con respecto al contenido de asfalto residual en la mezcla nivel de diseño 2

Se determina que el contenido óptimo de asfalto residual **3,28%**, 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.

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 19 y Figura 17.

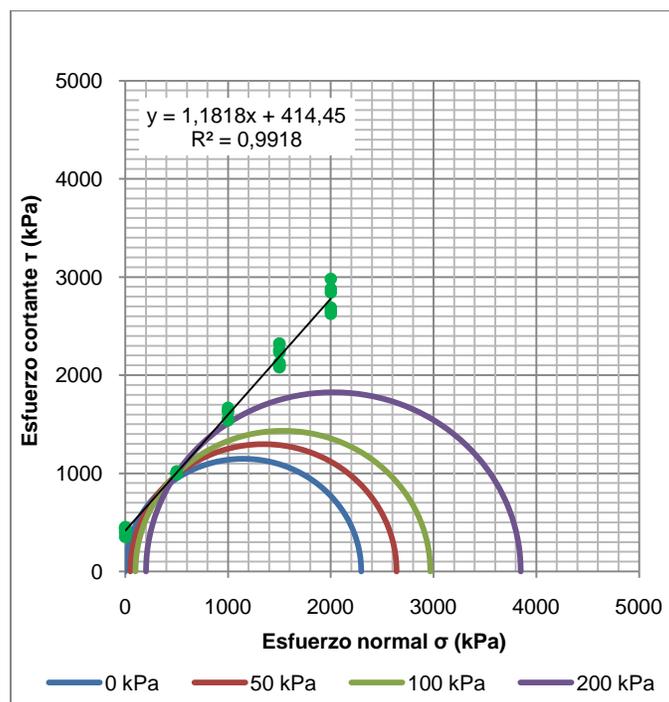


Figura 17. Resultados del ensayo de resistencia al corte

Tabla 19. Resumen de resultados ensayos de triaxial

Asfalto residual	Densidad	Compact.	Angulo fricción interna ϕ	Cohesión C	Cohesión retenida	Clasificación del material según C y ϕ
%	kg/m^3	%	$^\circ$	kPa	%	BEA1
3,28	1966,3	101,5	49,8	414,5	72,1	



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, para 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 20 se muestran los datos para la obtención del modelo de regresión lineal, y en las Tablas 21 y 22 los resultados de los parámetros de la ecuación final del modelo (ecuación [6]), así como, las Figuras 18 y 19.

Tabla 20. 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(θ /Pa)	log((τ_{oct} /Pa)+1)	kPa
1	31	21	21	10	72	5	101	224225	3	0	0	190536
2	62	41	41	21	145	10	101	260725	3	0	0	245957
3	104	69	69	35	242	16	101	277550	3	0	0	299401
4	155	104	104	52	362	24	101	329425	4	1	0	352857
5	207	138	138	69	483	33	101	382675	4	1	0	398402
6	41	21	21	21	83	10	101	224275	3	0	0	202820
7	83	41	41	41	166	20	101	256250	3	0	0	265552
8	138	69	69	69	276	33	101	292900	3	0	0	328611
9	207	104	104	103	414	49	101	381125	4	1	0	393843
10	276	138	138	138	552	65	101	496475	4	1	0	451482
11	62	21	21	41	103	20	101	232250	3	0	0	225855
12	124	41	41	83	207	39	101	281250	3	0	0	302783
13	207	69	69	138	345	65	101	385850	4	1	0	383984
14	310	104	104	207	517	98	101	535650	4	1	0	471079
15	414	138	138	276	690	130	101	652350	4	1	0	549666
16	83	21	21	62	124	29	101	240550	3	0	0	247369
17	166	41	41	124	248	59	101	324900	4	0	0	338030
18	276	69	69	207	414	98	101	456050	4	1	0	436372
19	414	104	104	311	621	146	101	616050	4	1	0	543260
20	552	138	138	414	828	195	101	725400	4	1	0	640361
21	124	21	21	103	166	49	101	274075	3	0	0	287302
22	249	41	41	207	331	98	101	389725	4	1	0	404116
23	414	69	69	345	552	163	101	543600	4	1	0	533814
24	621	104	104	518	828	244	101	706700	4	1	1	676729
25	828	138	138	690	1104	325	101	813325	4	1	1	806842
26	166	21	21	145	207	68	101	309575	3	0	0	324396
27	331	41	41	290	414	137	101	427375	4	1	0	465712
28	552	69	69	483	690	228	101	581325	4	1	1	624583
29	828	104	104	725	1035	342	101	763025	4	1	1	800013
30	1104	138	138	966	1380	455	101	863650	4	1	1	959680



Tabla 21. Resultados de la regresión lineal múltiple, para el material estabilizado

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,982027569
Coefficiente de determinación R ²	0,964378146
R ² ajustado	0,96173949
Error típico	0,03648023
Observaciones	30

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,972769024	0,486384512	365,4808315	2,80655E-20
Residuos	27	0,035931794	0,001330807		
Total	29	1,008700818			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	3,317199456	0,012560163	264,1048079	1,30466E-47	3,291428131	3,342970782	3,291428131	3,342970782
Variable X 1	0,344255244	0,04053453	8,492888515	4,17376E-09	0,261085259	0,427425228	0,261085259	0,427425228
Variable X 2	0,363264058	0,069468614	5,229182453	1,64604E-05	0,220726237	0,505801878	0,220726237	0,505801878

Tabla 22. Resumen de resultados de constantes, para MR del material sin estabilizar

$\beta_1 =$	3,317	K1	2075,9
$\beta_2 =$	0,344	K2	0,344
$\beta_3 =$	0,363	K3	0,363

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad [4]$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad [5]$$

$$M_r = k_1 \cdot P_a \cdot \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3} = 2075,9 \cdot P_a \cdot \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,344} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{0,363} \quad [6]$$

Para el cálculo del modelo de módulo resiliente, se utilizaron las ecuaciones 4, 5 y 6, según la referencia (Jimenez, 2009). 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 23, 24 y 25; y las Figuras 20 y 21.

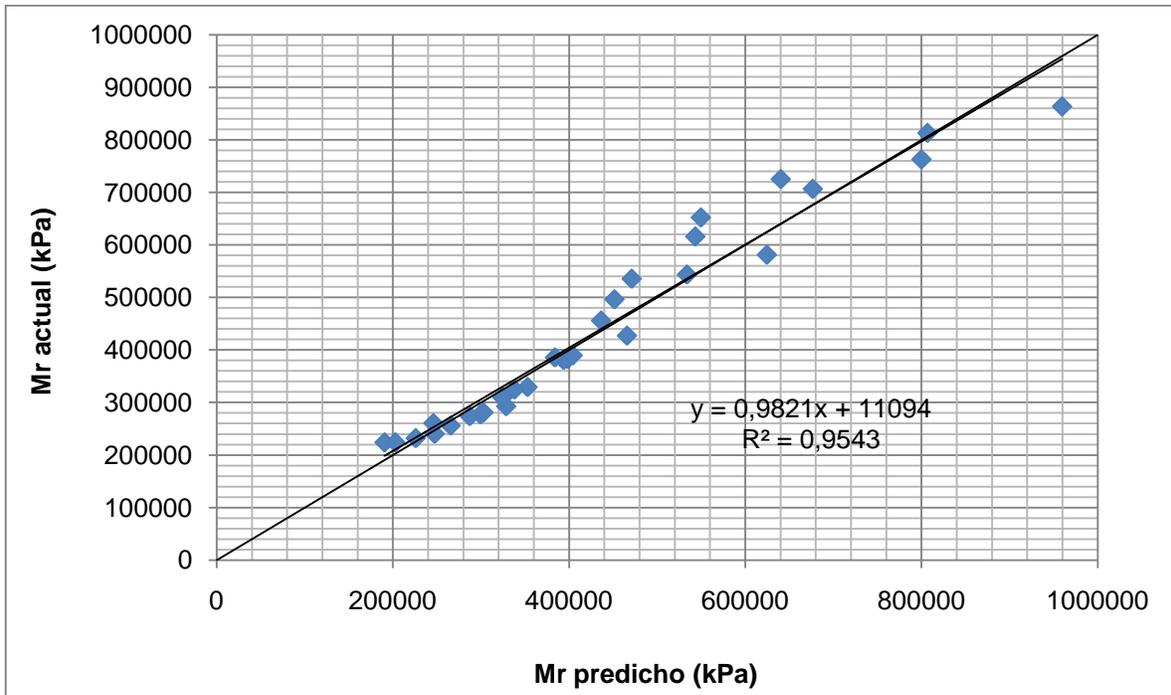


Figura 18. Mr actual vs Mr predicho (material estabilizado)

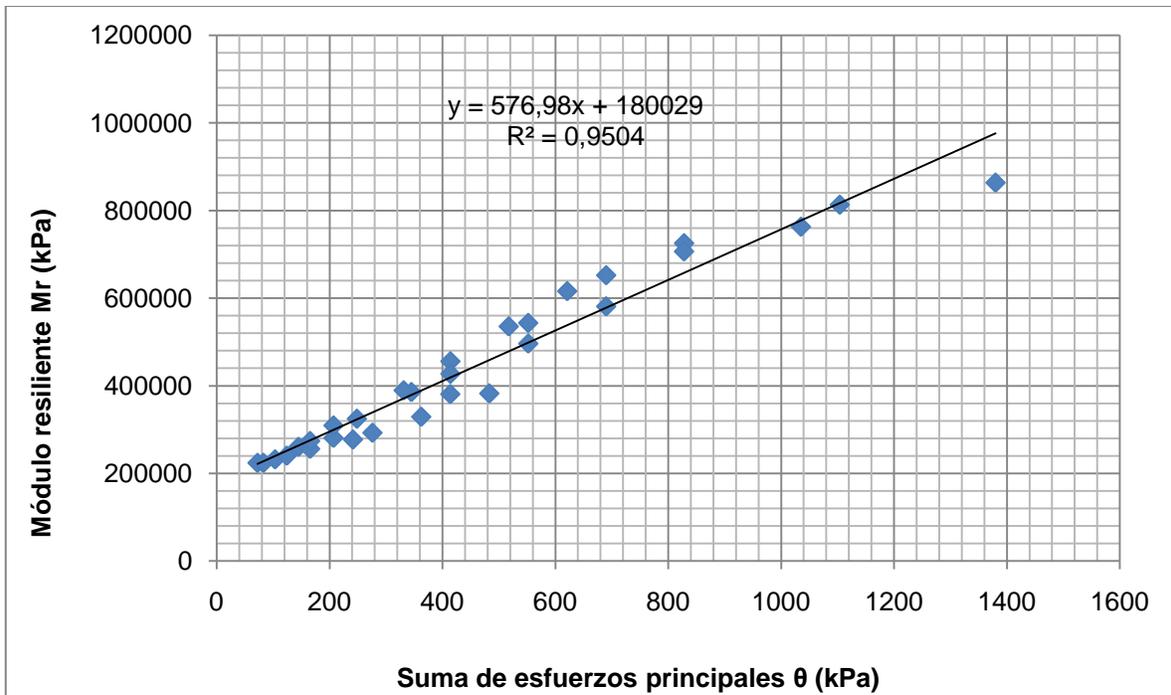


Figura 19. Variación del Mr vs esfuerzo bruto (material estabilizado)



Tabla 23. 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 24. Resultados de la regresión lineal múltiple, para el material sin estabilizar

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,992453232
Coefficiente de determinación R ²	0,984963417
R ² ajustado	0,983849596
Error típico	0,035072911
Observaciones	30

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	2,175596427	1,087798213	884,310371	2,46328E-25
Residuos	27	0,033212945	0,001230109		
Total	29	2,208809372			

	Coefficiente s	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	2,758733479	0,012078668	228,3971628	6,57765E-46	2,73395016858	2,783516858	2,73395016858	2,783516858
Variable X 1	0,98718939	0,038974359	25,32920126	2,36866E-20	0,907220611	1,067158168	0,907220611	1,067158168
Variable X 2	0,369844147	0,066782195	5,538065189	7,20381E-06	0,50686989	0,232818404	0,50686989	0,232818404

Tabla 25. Resumen de resultados de constantes, para MR del material sin estabilizar

$\beta_1 =$	2,759	K1	573,8
$\beta_2 =$	0,987	K2	0,987
$\beta_3 =$	-0,370	K3	-0,370

$$M_r = k_1 \cdot P_a \cdot \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3} = 573,8 \cdot P_a \cdot \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,987} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-0,370} \quad [7]$$

Como se esperaba, hubo un aumento de 4 veces el valor de k_1 entre el material sin estabilizar y el material estabilizado con emulsión, al comprar las ecuaciones [6] y [7]. De igual forma, en la secuencia 30, donde el protocolo de ensayo arroja los valores de M_r más altos, se presentó un incremento de un poco más del doble en el material estabilizado con emulsión.

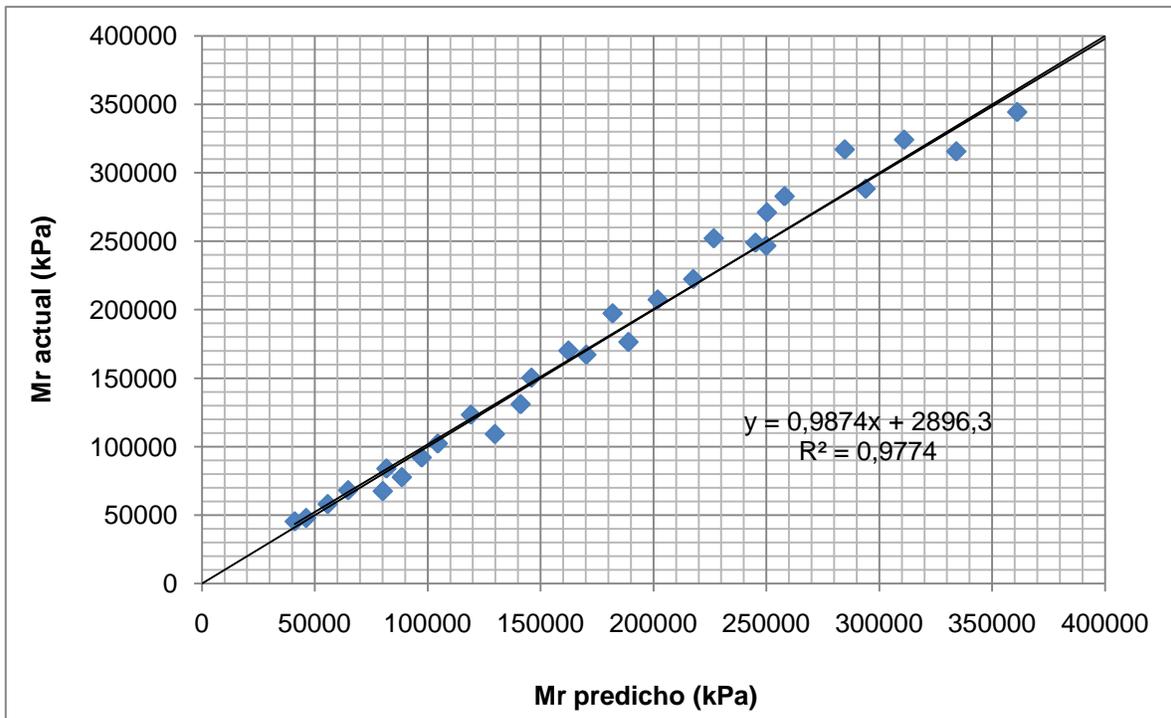


Figura 20. Mr actual vs Mr predicho (material sin estabilizar)

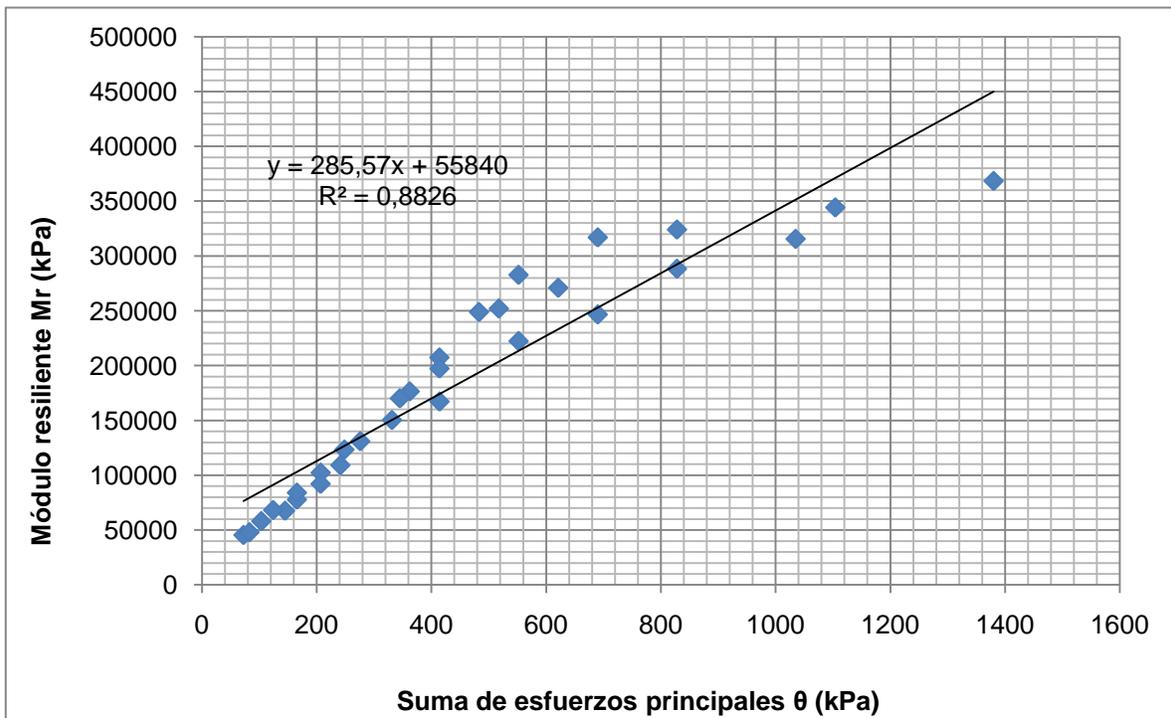


Figura 21. Variación del Mr vs esfuerzo bruto (material sin estabilizar)

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.

$$\sigma_{1,f} = A \cdot \sigma_3 + B \quad [8]$$

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

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

Y se utiliza la ecuación 1 para despejar el esfuerzo desviador para el ensayo de deformación permanente.

Los esfuerzos desviadores resultantes para las relaciones de esfuerzo requeridas son: 729 kPa, 850 kPa y 972 kPa, para las mismas condiciones de confinamiento establecidas. Para lo cual se obtuvo los resultados graficados en la Figura 22.

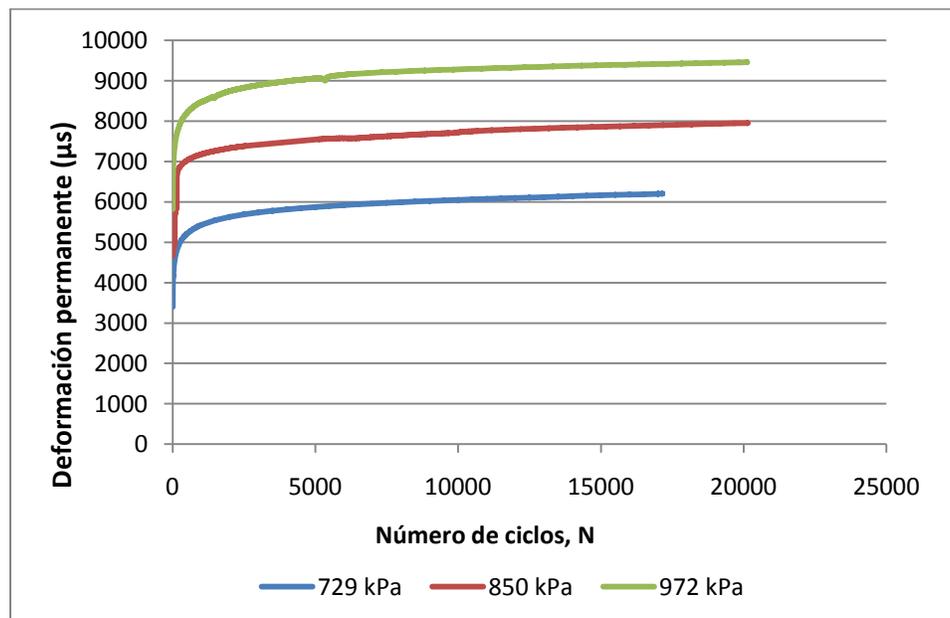


Figura 22. Deformación permanente a 729, 850 y 972 kPa de esfuerzo desviador

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 26 y 27 se definen los rangos de deformación para cada esfuerzo desviador, tanto para los datos observados como para los obtenidos a partir del modelo.

Tabla 26. Rangos de deformación para cada esfuerzo desviador aplicado (valores observados)

Relación de esfuerzos	Esfuerzo (kPa)	Deformación permanente unitaria (mm/mm)			Rango
		ϵ_p 3000	ϵ_p 5000	Diferencia	
0,30	729	5,74E-03	5,87E-03	1,34E-04	B
0,35	850	7,39E-03	7,56E-03	1,67E-04	B
0,40	972	8,89E-03	9,06E-03	1,67E-04	B

Tabla 27. Rangos de deformación para cada esfuerzo desviador aplicado (valores predichos)

Relación de esfuerzos	Esfuerzo (kPa)	Deformación permanente (mm/mm)			Rango
		ϵ_p 3000	ϵ_p 5000	Diferencia	
0,30	729	5,85E-03	5,96E-03	1,14E-04	B
0,35	850	7,28E-03	7,47E-03	1,95E-04	B
0,40	972	8,91E-03	9,08E-03	1,73E-04	B

De lo anterior, se tiene que el material se comporta de acuerdo con el rango B, 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 para conocer cuando el material estabilizado con emulsión puede llegar un punto crítico de fluencia y posterior falla, dado que el equipo de ensayo trabaja mediante presión hidráulica, lo que 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, tal como se explicó previamente, para la cantidad de esfuerzos y ciclos aplicados la respuesta del material a la deformación de acuerdo al rango B. En la Tabla 28 se muestran los resultados de regresión lineal y en la Tabla 29 se resumen los resultados de los parámetros de la ecuación final del modelo (ecuación [9]). En la Figura 23 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 a la respuesta no lineal y comprobar si efectivamente el material se comportará indefinidamente de esa forma.

Tabla 28. Resultados de la regresión lineal múltiple, para el material estabilizado

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,99792177
Coefficiente de determinación R ²	0,99584786
R ² ajustado	0,9958445
Error típico	0,00391377
Observaciones	2476

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	9,0852093	4,54260469	296561,84	0
Residuos	2473	0,0378803	1,5318E-05		
Total	2475	9,1230897			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
β_1	-1,48643456	0,0007987	-1861,04308	0	1,4880007	1,48486	1,48800	1,484868
β_2	1,46266671	0,0019144	764,031865	0	1,4589127	1,46642	1,45891	1,466420
β_3	0,03763874	0,0002480	151,728628	0	0,0371523	0,03812	0,03715	0,038125

Tabla 29. Resumen de resultados de constantes, para ϵ_p del material estabilizado

$\beta_1 =$	-1,486	K1	0,033
$\beta_2 =$	1,463	K2	1,463
$\beta_3 =$	0,038	K3	0,038

$$\epsilon_p = k_1 \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_{d,f}}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{N}{1000}\right)^{k_3} = 0,033 \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_{d,f}}\right)^{1,463} \cdot \left(\frac{N}{1000}\right)^{0,038} \quad [9]$$

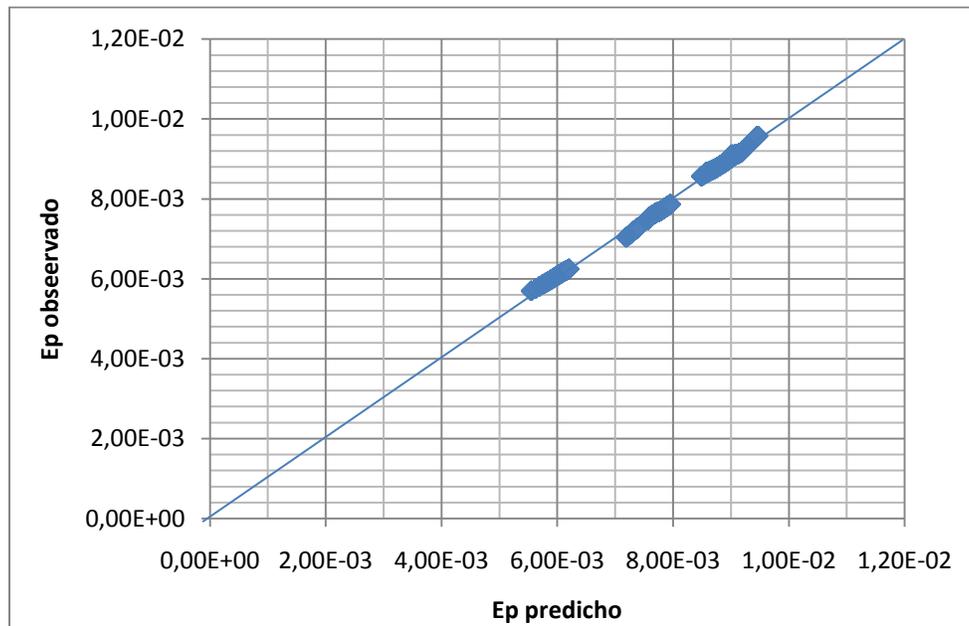


Figura 23. ϵ_p actual vs ϵ_p predicho (material estabilizado)

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 24. 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).

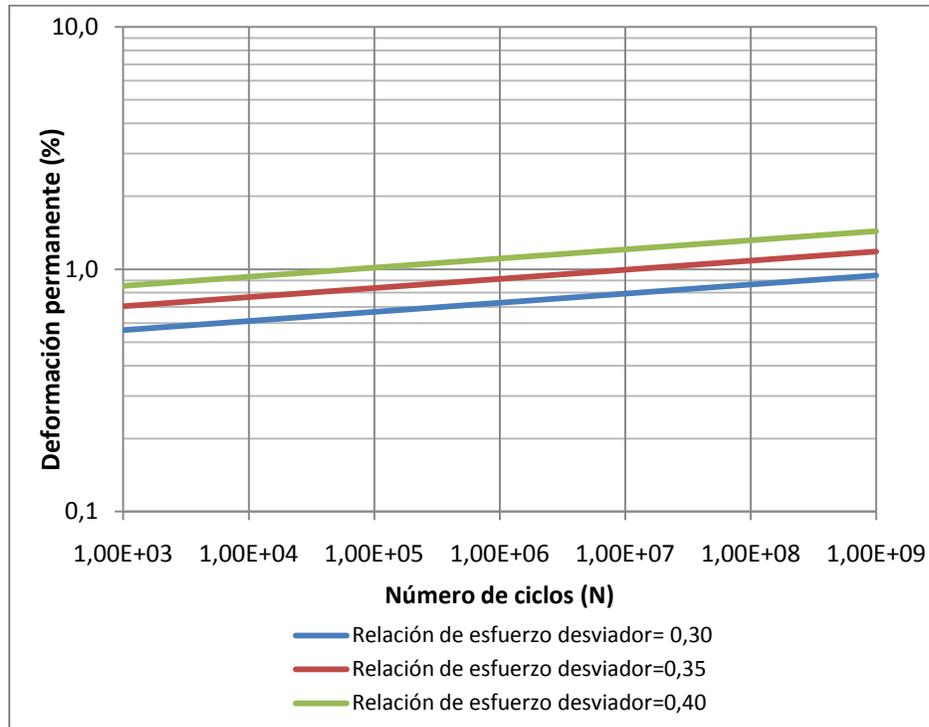


Figura 24. Desempeño del material en función de la deformación permanente, la relación de esfuerzos desviadores y el número de ciclos de carga



5. CONCLUSIONES

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

En el país es posible hallar materiales granulares aptos para su uso en la técnica de estabilización con asfalto.

El lote de la emulsión producida por Recope que se utilizó para la investigación cumple con las especificaciones requeridas para su uso en la estabilización de bases granulares, suministrando un adecuado recubrimiento, trabajabilidad y cohesión.

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.

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.

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 arriba de las mismas.

Es importante especificar no solamente un valor de TSR mínimo, sino también valores mínimos de ITS sin y con acondicionamiento para garantizar el correcto desempeño de la mezcla.

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 en prácticamente la mayor parte del país.

Con el material estabilizado con emulsión asfáltica se obtuvieron resultados de módulos resilientes en más del doble 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.



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 razones críticas de esfuerzo desviador.

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.

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 con 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.

Para las relaciones de esfuerzo ensayadas en el caso de los datos resultantes del ensayo, así como de los predichos a partir del modelo, se obtuvo una respuesta plástica definidas en el rango B, con lo cual se puede concluir que el material estabilizado con emulsión podría desempeñarse adecuadamente para un nivel de medio a alto volumen de tránsito sin alcanzar deformaciones severas durante su vida útil.

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, la obtención de



la emulsión asfáltica producida a granel para dosificarse en un paño de prueba no ha sido posible, puesto que la emulsión de rompimiento lento requerida no está siendo producida homogéneamente y de manera continua por Recope, por lo que esta última fase deberá quedar fuera de los alcances de esta investigación.

5. RECOMENDACIONES

El nivel de diseño 1, se recomienda para caminos de bajo volumen de tránsito, mientras que los niveles de diseño 2 y 3, es apto para medios a altos volúmenes de tránsito respectivamente.

El procedimiento hasta nivel de diseño 1, es económico y accesible para la mayoría de los laboratorios en el país, donde los resultados son adecuados para aquellas rutas en las que requieren de forma expedita una rehabilitación en ciertas épocas del año en las que se presentan altos niveles de polvo o que las fuertes lluvias no permiten el paso de siquiera vehículos livianos, dejando incomunicados a los pobladores de la comunidad.

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.

Finalmente, se recomienda 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. Además, es necesario la calibración del modelo mediante la colocación del material en un tramo de prueba.



6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Standard Testing and Materials. (2013). *Standard Practice for Moisture Conditioning Compacted Asphalt Mixture Specimens by Using Hydrostatic Pore Pressure*. ASTM International.

Asphalt Academy. (2009). *DETERMINATION OF TRIAXIAL SHEAR PARAMETERS USING SIMPLE TRIAXIAL TEST*. Pretoria, South Africa: Asphalt Academy.

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

Asphalt Institute. (1998). *A Basic Asphalt Emulsion Manual (MS-19)*. Lexington , Kentucky, Estados Unidos: Asphalt Institute.

Carpenter, S. H. (1992). *Soil and base stabilization and associated drainage considerations, volume II, mixture design considerations*. Office of technology applications. Washigton, D.C.: Federal Highway Administration.

Collings, D., Grobler, J., Hughes, M., Jenkins, K., Jooste, F., Long, F., y otros. (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.-J. (2008). *Characterisation of material properties and behavior of cold bituminous mixtures for road pavements*. South Africa: Stellenbosch University.

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.

Pennsylvania Department of Transportation. (2012). *Developing Standards and Specification for Full Depth Pavement Reclamation*. Pennsylvania: Pennsylvania Department of Transportation.

Porras, C. A. (2015). *Desarrollo de modelos de deformación permanente para materiales granulares y suelos*. San José: Proyecto de graduación. Universidad de Costa Rica.

Reglamento Técnico Centroamericano. (2005). *Productos de Petróleo. Asfaltos. Especificaciones*. Costa Rica: La Gaceta.

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.

Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. (2012). *Bulk Specific Gravity of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) (T 166)*. Washington, D.C.: AASHTO.

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

Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. (2012). *Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage (T 283)*. Washington, D.C.: AASHTO.

Transportation Research Board. (2006). *Asphalt emulsion technology*. Washington, DC: TRB.

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.

Informe LM-PI-UMP-054-R3	Fecha de emisión: 05 de February de 2018	Página 69 de 79
--------------------------	--	-----------------



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

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



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 emulsión asfáltica	
Programa de adscripción:	Ley 8114 Impuesto a combustibles	
Unidad base	LanammeUCR	Escuela de Ingeniería Civil
Período vigencia:	2015-2019	
Fecha de presentación:	Enero 2017	

2. Descripción general:

Para garantizar un buen desempeño y eficiencia de los materiales componentes de estructuras de pavimento es necesario 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 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.

El uso de emulsiones asfálticas actualmente ha ido creciendo a nivel nacional, para la estabilización de materiales granulares y como técnica en la conformación de capas asfálticas recicladas en el mejoramiento y rehabilitación en rutas de bajo 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.

Para llevar cabo los diseños del material estabilizado se debe definir el contenido óptimo de filler activo y de asfalto residual, al igual que en los ensayos de resistencia retenida a la tensión

Informe LM-PI-UMP-054-R3	Fecha de emisión: 05 de February de 2018	Página 71 de 79
--------------------------	--	-----------------



indirecta y módulo resiliente. En el estudio se realizan ensayos de verificación del ensayo triaxial a los esfuerzos propuestos en la bibliografía investigada y de esta forma poder discriminar mejor el desempeño que se tendrá en campo. Como parte de los ensayos innovadores en investigación se buscó medir la susceptibilidad del material ante la deformación permanente, dado que se espera que este sea el principal modo de falla para este tipo de materiales.

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: Identificar la metodologías actuales en técnicas de estabilización, principalmente en las que se utilice asfalto.</p>	100%	Recolectar, revisar y resumir la literatura existente.	Ninguna
<p>2) Muestrear y caracterizar una fuente de material granular y de emulsión asfáltica de rompimiento lento para llevar a cabo los ensayos de diseño y desempeño.</p> <p>META: Determinar si los materiales muestreados son aptos para la técnica de estabilización con emulsión asfáltica.</p>	100%	Caracterización de materiales granulares: Granulometría de agregados Contenido de humedad óptima y densidad máxima seca Caracterización de emulsión asfáltica.	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 emulsión asfáltica.</p> <p>META: 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>	<p>100%</p>	<p>Llevar a cabo pruebas dosificación de emulsión, de acuerdo a las características granulometrías del material granular, según lo establecido en la normativa revisada. Pruebas de recubrimiento y desnudamiento para medir: trabajabilidad, adherencia y cohesión.</p>	<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: Determinar contenido óptimo de relleno mineral, emulsión asfáltica y agua. Definir parámetros recomendados de cumplimiento al analizar los</p>	<p>100%</p>	<p>Realizar un diseño utilizando compactación Marshall (Nivel de diseño 1). Realizar un diseño utilizando compactación gírotoria (Nivel de diseño 1) Optimización del contenido de emulsión asfáltica</p>	<p>Adaptar las especificaciones internacionales a las condiciones del país, tales como tipos de agregado, emulsión asfáltica y políticas locales.</p>



Objetivos específicos y metas	% de logro	Actividades desarrolladas	Dificultades y formas de resolverlas
resultados del diseño.		(Nivel de diseño 2).	
<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: Implementar un ensayo de deformación permanente en materiales estabilizados con emulsión asfáltica. Comparar los resultados con los indicadores internacionales para la verificación de la capacidad del material estabilizado con las dosificaciones de cal y emulsión obtenidas en el diseño. Establecer si desempeño del material se encuentra dentro de los límites recomendados internacionalmente.</p>	100%	<p>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 de la deformación permanente. Calcular en qué rango de respuesta a la deformación permanente del materia estabilizado, para las condiciones del ensayo. Calcular la deformación permanente máxima obtenida en los ensayos y compararla con los parámetros de aceptación.</p>	<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>



Objetivos específicos y metas	% de logro	Actividades desarrolladas	Dificultades y formas de resolverlas
<p>6) Observar la respuesta del material estabilizado ante condiciones normales de servicio en campo a través de un tramo de prueba.</p> <p>META:</p> <p>Estudiar las características del material granular y determinar si este cumple con los requerimientos de la técnica.</p> <p>Caracterizar la emulsión asfáltica disponible para determinar si cumple con los requisitos establecidos para la técnica.</p> <p>Obtener las dosificaciones de agua, relleno mineral y emulsión asfáltica de acuerdo al nivel de diseño requerido.</p> <p>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.</p> <p>Obtención de la densidad, humedad, temperatura, módulo resiliente y cargas vehiculares mediante</p>	<p>0%</p>	<p>Muestreo de emulsión asfáltica en Recope.</p>	<p>Al caracterizar la emulsión muestreada en diferentes meses la producción de la emulsión presentó características no aptas para su aplicación en técnicas de estabilización en materiales granulares: no era trabajable, rompía rápidamente y no lograba recubrir adecuadamente el material. Por lo tanto, no es posible colocarse en algún tramo de prueba para llevar a cabo el estudio en campo.</p>



Objetivos específicos y metas	% de logro	Actividades desarrolladas	Dificultades y formas de resolverlas
monitoreo periódico.			
<p>7) Proponer una guía de diseño en laboratorio para estabilización de materiales granulares con emulsión asfáltica.</p> <p>META: 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 emulsión asfáltica.</p>	80%	<p>Redacción de una guía de diseño base:</p> <p>Procedimiento para la escogencia del relleno mineral y contenidos iniciales de asfalto y agua. Determinación del nivel de diseño de acuerdo a las condiciones del proyecto. Procedimiento para los ensayos de diseño.</p>	Ninguna

4. Resultados globales:

Resultados principales:

El principal resultado de la investigación consiste en desarrollar una metodología de diseño en laboratorio para estabilización de materiales granulares con emulsión asfáltica en la que considere condiciones propias de Costa Rica.

Impacto del proyecto en los ámbitos que corresponda:

El desarrollo de una metodología de diseño de materiales granulares estabilizados con emulsión asfáltica 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.

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>Interrogantes y nuevas investigaciones:</p> <p>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.</p> <p>Estudio de costos de la aplicación de la técnica en campo y logísticas de construcción.</p> <p>Posibilidad de obtener emulsiones asfálticas de diferentes tipos para la técnica en estudio y muchas otras que aún no pueden aplicarse en el país.</p>
<p>Actividades pendientes:</p> <p>Conclusión de la guía de diseño y su posterior publicación.</p> <p>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 emulsión de rompimiento lento requerida, 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> <p>Guía de diseño para consultores, constructores, técnicos laboratoristas, etc.</p> <p>Generación de especificaciones dentro del Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes de Costa Rica, CR-2010.</p>
<p>Títulos de las ponencias y participación en eventos, lugar y fechas:</p> <p>Metodología de diseño para materiales granulares estabilizados con emulsión asfáltica, CILA XVIII 2015, Bariloche, Argentina, 16-20 noviembre 2015.</p>
<p>Impacto en procesos de enseñanza aprendizaje:</p> <p>Talleres de capacitación, cursos, participación en foros y congresos nacionales.</p>
<p>Otros productos:</p> <p>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):

Comentarios:

Ley 8114 de Simplificación y Eficiencia Tributaria

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

Comentarios:



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

05 de febrero de 2018

Versión 20-11-2017.