



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL  
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

# PITRA

Programa de  
Infraestructura  
del Transporte

SELLO ASFÁLTICO CON  
EMULSIÓN DE ROMPIMIENTO  
LENTO

LM-PI-GM-INF-04-2016

PREPARADO POR  
Elizondo-Arrieta, Fabián  
Ulate-Castillo, Alonso



programa de infraestructura  
del transporte

PITRA

San José, Costa Rica  
Octubre, 2016

UGM

Unidad de  
Gestión Municipal

# SELLO INTEGRADO CON EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROMPIMIENTO LENTO

Elizondo-Arrieta Fabián<sup>1</sup>, Ulate-Castillo Alonso<sup>2</sup>

1. Subcoordinador general PITRA LanammeUCR
2. Ingeniero Unidad de Gestión Municipal PITRA LanammeUCR

**Palabras Clave:** Emulsión asfáltica de rompimiento lento, sello asfáltico, control de polvo, estabilización con emulsión de rompimiento lento

**Resumen:** El desarrollo e implementación de nuevas técnicas para el mantenimiento y control de polvo en caminos de bajo volumen es una necesidad en Costa Rica, debido a los altos costos de intervención y la escasez cada vez mayor de fuentes de agregados competentes. Se dirige entonces al Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) este documento que pretende establecer un marco general de recomendaciones técnicas, consideradas por el LanammeUCR, para implementar el uso del sello integrado con emulsión asfáltica de rompimiento lento, como medida de mantenimiento para caminos no pavimentados con tránsito promedio diario menor a 500 vehículos por día, tanto de la red vial nacional como cantonal. Se presenta el procedimiento de diseño de mezcla, recomendaciones para el uso de cal y cemento como mejoradores de adherencia (de acuerdo a resultados de ensayos de laboratorio realizados por el LanammeUCR), estudios preliminares requeridos, diseño estructural y catálogo de estructuras de pavimento, recomendaciones para el mantenimiento, proceso constructivo y control de calidad.

---

## Referencias

1. Arias, E., Sequeira, W., Aguiar, J. P., Arriola, R., & Loría, L. G. (2014). Reporte especial LM-PI-GM-INF-22-14, Recomendaciones Técnicas para el Diseño Estructural de Pavimentos Flexibles con la Incorporación de Criterios Mecánico-Empíricos. Universidad de Costa Rica, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), San José.
2. Asphalt Academy c/o CSIR Built Environment. (2009). Technical Guide: Bitumenstabilised Materials TG2: A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials (Vol. 2). Pretoria, Sudáfrica: Asphalt Academy.
3. Erasmus-Liebennberg, J. J. (2003). A Structural Design Procedure For Emulsion Treated Pavemente Layers. University of Pretoria, Faculty of Engineering, Built Environment and Information Technology, Pretoria.
4. Jones, D., & Surdahl, R. (2014). A New Procedure for Selecting Chemical Tratments for Unpaved Roads. University of California Davis, University of California Pavement Research Center, Department of Civil and Environmental Engineering, Davis, CA.
5. Ulloa, A., & Munera, J. C. (2014). Procedimiento de Diseño de Mezcla, Guía para el Diseño de Materiales Estabilizados con Emulsión y Ensayos de Control de Calidad. Universidad de Costa Rica, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), Programa de Insfraestructura del Transporte (PITRA), San José.
6. Wirtgen. (2012). Wirtgen Cold Recycling Technology. Windhagen, Germany: Wirtgen GmbH

# SLOW SETTING ASPHALT EMULSION SEAL

Elizondo-Arrieta Fabián <sup>1</sup>, Ulate-Castillo Alonso <sup>2</sup>

1. Engineer, general sub coordinator PITRA LanammeUCR
2. Engineer, Municipal Management Department PITRA LanammeUCR

**Keywords:** PITRA, sealed roads, asphalt slow setting emulsion, unpaved roads dust management, emulsion stabilized material

**Abstract:** New technologies and construction techniques are required in Costa Rica for low volume roads in terms of maintenance and dust management. Ordinary unsealed roads maintenance costs are high and gravel quarries are everyday more difficult to find. Therefore, this report is directed to the Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) by LanammeUCR in order to establish a technical framework to implement the use of slow setting asphalt emulsion seals in unpaved roads with less than 500 vehicles per day. The document includes: mix design process, use of lime and cement as fillers, structural design, catalogue of designs, construction, and maintenance and quality assurance.

---

## References

1. Arias, E., Sequeira, W., Aguiar, J. P., Arriola, R., & Loría, L. G. (2014). Reporte especial LM-PI-GM-INF-22-14, Recomendaciones Técnicas para el Diseño Estructural de Pavimentos Flexibles con la Incorporación de Criterios Mecánico-Empíricos. Universidad de Costa Rica, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), San José.
  2. Asphalt Academy c/o CSIR Built Environment. (2009). Technical Guide: Bitumenstabilised Materials TG2: A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials (Vol. 2). Pretoria, Sudáfrica: Asphalt Academy.
  3. Erasmus-Liebennberg, J. J. (2003). A Structural Design Procedure For Emulsion Treated Pavemente Layers. University of Pretoria, Faculty of Engineering, Built Environment and Information Technology, Pretoria.
  4. Jones, D., & Surdahl, R. (2014). A New Procedure for Selecting Chemical Tratments for Unpaved Roads. University of California Davis, University of California Pavement Research Center, Department of Civil and Environmental Engineering, Davis, CA.
  5. Ulloa, A., & Munera, J. C. (2014). Procedimiento de Diseño de Mezcla, Guía para el Diseño de Materiales Estabilizados con Emulsión y Ensayos de Control de Calidad. Universidad de Costa Rica, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), Programa de Insfraestructura del Transporte (PITRA), San José.
- Wirtgen. (2012). Wirtgen Cold Recycling Technology. Windhagen, Germany: Wirtgen GmbH

Elizondo-Arrieta, F., & Ulate-Castillo, A. (2016). Sello integrado con emulsión asfáltica de rompimiento lento. San José: Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL  
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

## **Programa de Infraestructura del Transporte**

No. Informe: LM-PI-GM-INF-04-2016

# **SELLO INTEGRADO CON EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROMPIMIENTO LENTO**

Preparado por:  
Unidad de Gestión Municipal  
LanammeUCR

San José, Costa Rica  
Octubre, 2016



<b>1. Informe</b> LM-PI-GM-INF-04-2016		<b>2. Copia No.</b> 1	
<b>3. Título y subtítulo:</b> <b>SELLO INTEGRADO CON EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROMPIMIENTO LENTO</b>		<b>4. Fecha del Informe</b> 24 de octubre de 2016	
<b>7. Organización y dirección</b> Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440			
<b>9. Resumen</b> <i>El desarrollo e implementación de nuevas técnicas para el mantenimiento y control de polvo en caminos de bajo volumen es una necesidad en Costa Rica, debido a los altos costos de intervención y la escasez cada vez mayor de fuentes de agregados competentes. Se dirige entonces al Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) este documento que pretende establecer un marco general de recomendaciones técnicas, consideradas por el LanammeUCR, para implementar el uso del sello integrado con emulsión asfáltica de rompimiento lento, como medida de mantenimiento para caminos no pavimentados con tránsito promedio diario menor a 500 vehículos por día, tanto de la red vial nacional como cantonal. Se presenta el procedimiento de diseño de mezcla, recomendaciones para el uso de cal y cemento como mejoradores de adherencia (de acuerdo a resultados de ensayos de laboratorio realizados por el LanammeUCR), estudios preliminares requeridos, diseño estructural y catálogo de estructuras de pavimento, recomendaciones para el mantenimiento, proceso constructivo y control de calidad.</i>			
<b>10. Palabras clave</b> PITRA, Emulsión asfáltica de rompimiento lento, sello asfáltico, control de polvo, estabilización		<b>11. Nivel de seguridad:</b> Ninguno	<b>12. Núm. de páginas</b> 56
<b>13. Preparado por:</b>			
Ing. Fabián Elizondo Arrieta, MBA. Coordinador General de los Laboratorios de Infraestructura Vial		Ing. Alonso Ulate Castillo Unidad de Gestión Municipal Programa de Infraestructura del Transporte	
<b>14. Revisado por:</b>			
Lic. Miguel Chacón Alvarado Asesor Legal LanammeUCR		<b>15. Aprobado por:</b> Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, Ph.D Coordinador del Programa de Infraestructura del Transporte	

## TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN .....	5
2. TÉCNICA DE SELLO INTEGRADO CON EMULSIÓN ASFÁLTICA.....	5
2.1 Descripción .....	5
2.2 Mecanismos de falla.....	5
2.3 Características de los materiales estabilizados con emulsión .....	7
2.4 Propuesta de objetivo .....	8
2.5 Clasificación .....	8
2.6 Requerimientos de los componentes de la mezcla .....	9
3. METODOLOGÍA DE DISEÑO DEL MATERIAL ESTABILIZADO CON EMULSIÓN ....	14
3.1 Ensayos preliminares.....	14
3.2 Preparación de especímenes de ensayo .....	17
3.3 Mezclado y compactación de especímenes de ensayo .....	21
4. ENSAYOS REALIZADOS .....	22
4.1 Estabilización preparada con material recuperado (RAP) .....	22
4.2 Estabilización preparada con Material granular (Base granular) .....	27
5. ESTUDIOS PRELIMINARES Y PROPUESTA DE DISEÑO DE ESPESORES .....	29
5.1 Estudios preliminares .....	29
5.2 Diseño estructural.....	30
6. MANTENIMIENTO .....	38
7. CATÁLOGOS DE PAVIMENTOS.....	41
8. PROCESO CONSTRUCTIVO.....	46
9. CONTROL DE CALIDAD .....	50
10. REFERENCIAS .....	54

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Indicadores para clasificación de MEA para material sin estabilizar.....	9
Tabla 2. Graduación recomendada para material granular a estabilizar.....	10
Tabla 3. Especificaciones para emulsiones asfálticas. ....	12
Tabla 4. Valores de ITS recomendados- .....	16
Tabla 5. Función de los fluidos dentro de la mezcla.....	18
Tabla 6. Estimación de porcentaje teórico de asfalto residual óptimo. ....	21
Tabla 7. Valoración del recubrimiento y adherencia para las distintas condiciones de filler.....	23
Tabla 8. Valoración de daño por humedad y deformación permanente en Rueda de Hamburgo.....	26
Tabla 9. Valoración del recubrimiento y adherencia para las distintas condiciones de filler.....	27
Tabla 10. Categorías de tránsito vehicular consideradas en el diseño. ....	31
Tabla 11. Categorías de suelos de subrasante de acuerdo a CBR.....	31
Tabla 12. Características básicas de los materiales para el diseño estructural de pavimento.....	32
Tabla 13. Procedimiento de diseño. ....	33
Tabla 14. Estimación de vida a fatiga. ....	35
Tabla 15. Estimación de vida a deformación permanente (20mm).....	37
Tabla 16. Recomendaciones de esquemas de conservación para caminos con sellos asfálticos. ....	38
Tabla 17. Catálogo de diseño de pavimentos para T1 (espesores en cm). ....	42
Tabla 18. Catálogo de diseño de pavimentos para T2 (espesores en cm). ....	43
Tabla 19. Catálogo de diseño de pavimentos para T3 (espesores en cm). ....	44
Tabla 20. Catálogo de diseño de pavimentos para T4 (espesores en cm). ....	45
Tabla 21. Requisitos de muestreo y ensayo para material granular para sello asfáltico integrado con emulsión de rompimiento lento. ....	51
Tabla 22. Requisitos de control para el diseño de mezcla para sello integrado con emulsión de rompimiento lento.....	52
Tabla 23. Requisitos de control para la capa de sello asfáltico integrado con emulsión de rompimiento lento.....	53



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Camino con superficie de ruedo estabilizada con emulsión de rompimiento lento. (Condición superficial aproximadamente 1.5 años después de construcción) .....	6
Figura 2. Requerimientos granulométricos .....	11
Figura 3. Ensayo de Tensión Indirecta.....	16
Figura 4. Determinación del contenido óptimo de asfalto residual. ....	17
Figura 5. Preparación de materiales .....	18
Figura 6. Esquema de fluidos totales. ....	19
Figura 7. Ensayo de recubrimiento y adherencia.....	20
Figura 8. Estabilización preparada con RAP.....	22
Figura 9. %RRTDI y TDI para distintas dosificaciones de asfalto residual.....	23
Figura 10. Efecto del filler activo (cal – cemento) en la resistencia. ....	24
Figura 11. Variación en la TDI respecto a distintos periodos de acondicionamiento. ....	25
Figura 12. Variación en la %RRTDI respecto a distintos periodos de acondicionamiento.....	25
Figura 13. Evolución del daño por humedad y deformación permanente en equipo Rueda de Hamburgo.....	26
Figura 14. %RRTDI y TDI para distintas dosificaciones de asfalto residual.....	28
Figura 15. Efecto del filler activo (cal – cemento) en la resistencia. ....	28
Figura 16. Diseño AASHTO 93 de capas de pavimento (para ESALS).....	33
Figura 17. Diseño AASHTO 93 de capas de pavimento (para vpd).....	34
Figura 18. Desempeño ante fatiga en el sello asfáltico. ....	35
Figura 19. Agrietamiento de riego final de impermeabilización en huella del tránsito. ....	36
Figura 20. Desempeño ante deformación permanente de capas de pavimento. ....	37
Figura 21. Resultados de evaluación visual en tres caminos con sello asfáltico. ....	40
Figura 22. Medición de rugosidad en dos caminos con sello asfáltico. ....	40

# 1. INTRODUCCIÓN

Existe una creciente preocupación por el impacto en la salud, la seguridad del transporte, la productividad y la eficiencia en el uso de recursos que conlleva a la necesidad de proponer nuevas técnicas para el mantenimiento o control de polvo en rutas no pavimentadas a través de la estabilización superficial y técnicas de control de polvo. La generación de polvo en rutas no pavimentadas trae consigo problemas de seguridad (menor visibilidad) y problemas de salud (inhalación de diferentes tipos de partículas). Además, la pérdida de material granular conlleva inevitablemente a costos adicionales de reconfiguración y material de aporte.

## 2. TÉCNICA DE SELLO INTEGRADO CON EMULSIÓN ASFÁLTICA

### 2.1 Descripción

La técnica de sello asfáltico integrado con emulsión asfáltica de rompimiento lento consiste en la estabilización parcial o total de una capa de material granular mediante el uso de emulsiones asfálticas de rompimiento lento y posterior colocación de una capa de impermeabilización superficial.

La estabilización del material granular mediante emulsión asfáltica permite aumentar su resistencia al corte, mejorar la capacidad mecánica, mitigar la susceptibilidad al daño por humedad y las variaciones de su capacidad estructural producto de cambios de humedad.

Por su parte, la colocación de una capa de impermeabilización superficial permite evitar el ingreso de la humedad a las capas granulares inferiores, lo cual reduce la rigidez de la estructura y su desempeño. Esta capa de impermeabilización puede ser de distinta índole, como ejemplos se puede mencionar: riego de imprimación mediante emulsión asfáltica, tratamiento superficial simple o múltiple, lechada asfáltica (slurry seal), cape seal (tratamiento superficial + lechada asfáltica) hasta superficies de ruedo que ya tienen aporte estructural como una carpeta asfáltica.

### 2.2 Mecanismos de falla

La durabilidad, el desempeño y la forma en que estas estructuras se deterioran dependen de distintas variables: tránsito (cantidad y distribución), clima (temperatura y humedad), estructura de pavimento (espesor de capas componentes) y propiedades mecánicas de los materiales.

Informe LM-PI-GM-INF-04-2016	Fecha de emisión: 24 de octubre de 2016	Página 5 de 56
------------------------------	---	----------------

El comportamiento estructural de los materiales estabilizados con emulsión asfáltica está determinado por dos fases de acuerdo a lo indicado por (Erasmus-Liebennberg, 2003):

- Vida a fatiga: se presenta como la primera fase de la vida del material, en la cual el comportamiento es de alta resistencia la deformación permanente y por lo tanto alto módulo elástico. Este comportamiento se mantiene hasta que el material se agrieta por fatiga.
- Equivalente granular: se presenta como la segunda fase, luego de que el material se ha agrietado por fatiga, en la cual el comportamiento es equivalente al de un material granular sin estabilizar.

Por su parte el mecanismo de falla de la capa de impermeabilización depende del material utilizado (por ejemplo: imprimación, tratamiento superficial, carpeta asfáltica, etc.), siendo el agrietamiento por cargas repetidas o por asentamientos excesivos de especial importancia. De perderse su función impermeabilizadora, se someterá a la capa estabilizada con emulsión de rompimiento lento y capas granulares subyacentes a la humedad lo cual puede reducir su vida útil.

En síntesis, la durabilidad de estos pavimentos se basa en la disposición de una estructura competente en función del tránsito, que evite la exposición de las capas inferiores de pavimento a la humedad y la penetración del agua, mediante la colocación y mantenimiento de una capa de impermeabilización. Se aclara que el material granular estabilizado con emulsión no posee por sí mismo la capacidad impermeabilizante de la estructura. De darse un deterioro acelerado producto de un tránsito que sobrepasa la capacidad estructural del pavimento o relacionado con el ingreso de humedad dentro de la estructura (pérdida de capacidad o daño por humedad) los deterioros que se presente se conformarán en baches afectando severamente la regularidad superficial y transitabilidad en nivel que pueden ser más críticos que los observados en una ruta con superficie de ruedo granular, lo cual se muestra en la Figura 1.



**Figura 1. Camino con superficie de ruedo estabilizada con emulsión de rompimiento lento. (Condición superficial aproximadamente 1.5 años después de construcción)**

## 2.3 Características de los materiales estabilizados con emulsión

Las principales características de los materiales tratados con emulsión asfáltica se mencionan a continuación:

- El comportamiento de los materiales granulares estabilizados con emulsión es muy similar al de los materiales granulares sin estabilizar, pero con un aumento significativo en la cohesión y reducción en la pérdida de capacidad 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 mástico (porción fina de los agregados + asfalto) 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. Característica que la define como un material permeable.
- La técnica de estabilización con emulsión asfáltica reduce 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 cal hidratada o cemento, que evita la pérdida de capacidad mecánica del material estabilizado en presencia de humedad-saturación y 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, pudiendo llegar a 1/3 parte de las dosificaciones máximas. 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 cuyos mecanismos de falla son distintos y por tanto su desempeño, no siempre implicando una mejora.

## 2.4 Propuesta de objetivo

El objetivo de la propuesta se enfoca en definir los requerimientos necesarios de la técnica para garantizar la vida útil o durabilidad requerida, en cuanto a:

- Propiedades de materiales componentes.
- Procedimientos de diseño y dosificación.
- Diseño de la estructura.
- Procedimiento constructivo.
- Control de calidad.

## 2.5 Clasificación

Los materiales estabilizados con asfalto se clasifican en tres clases, dependiendo de la calidad de su material original y el tráfico de diseño (Asphalt Academy c/o CSIR Built Environment, 2009):

### MEA1

Material con alta resistencia al corte 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.

### MEA2

Material con resistencia moderada al corte 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.

### MEA3

Material utilizado 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 Tabla 1 define los requerimientos para la clasificación de los materiales de acuerdo a la categorización anterior.

Informe LM-PI-GM-INF-04-2016	Fecha de emisión: 24 de octubre de 2016	Página 8 de 56
------------------------------	---	----------------

**Tabla 1. Indicadores para clasificación de MEA para material sin estabilizar.**

Ensayo	MEA1	MEA2	MEA3	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
<b>MATERIAL SIN ESTABILIZAR</b>				
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 %

*Nota:* Tomado de Wirgten, 2012.

## 2.6 Requerimientos de los componentes de la mezcla

### Materiales granulares

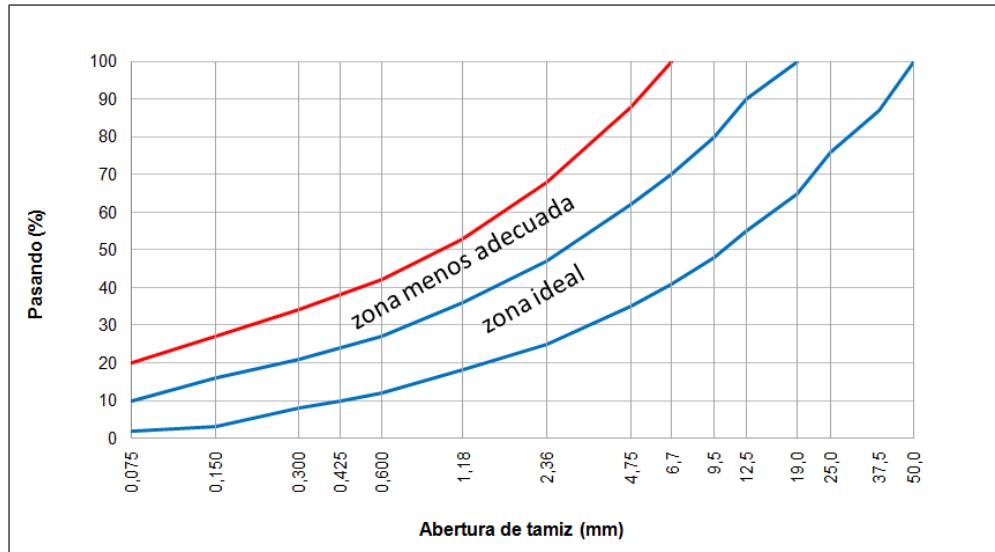
Los tratamientos con asfalto, usando emulsión asfáltica, son adecuados para la estabilización de un rango amplio de agregados, desde las gravas naturales hasta piedras trituradas bien graduadas y/o materiales reciclados. Los materiales granulares clasificados como marginales, ya sea vírgenes o reciclados,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

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% y para el índice de durabilidad se establece un valor mínimo de 35% para finos y gruesos.

**Tabla 2. Graduación recomendada para material granular a estabilizar.**

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



**Figura 2. Requerimientos granulométricos**

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.

### **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.

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.

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.

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. De no tener la opción de cambiar el tipo de emulsión, es posible usar un promotor de adherencia. Se debe tener presente que una emulsión asfáltica puede recubrir eficientemente los agregados pero presentar una baja compatibilidad evidente en la pérdida significativa de resistencia en presencia de humedad. 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 Tabla 3 se detalla los parámetros de calidad de la emulsión asfáltica.

**Tabla 3. Especificaciones para emulsiones asfálticas.**

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		

*Nota:* Tomado de Reglamento Técnico Centroamericano, 2005.

### **Relleno Mineral (Filler)**

Los tipos de relleno mineral utilizados en los MEA son: cal hidratada, cemento (varios tipos, pero no de fraguado rápido), y polvo de piedra. El término de relleno mineral activo se usa para definir el relleno mineral que altera químicamente las propiedades de la mezcla. Para Costa Rica en este tipo de relleno mineral se incluyen la cal hidratada y el cemento. El resto se considera relleno mineral de tipo natural. (Asphalt Academy c/o CSIR Built Enviroment, 2009). El propósito de incorporar relleno mineral activo en los MEA 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. El ensayo de resistencia retenida a la tensión indirecta es buen indicador 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 requerida sean adicionados al material dos horas previas al mezclado con la emulsión asfáltica y sea acondicionado de tal manera que no pierda la humedad. El contenido de humedad se puede chequear y hacer ajustes si es requerido.

### **Agua para mezclado y compactación**

La calidad del agua que se utiliza 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.

### **3. METODOLOGÍA DE DISEÑO DEL MATERIAL ESTABILIZADO CON EMULSIÓN**

#### **3.1 Ensayos preliminares**

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 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 relacionado con la durabilidad del material; 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 que permiten aproximar la tasa de asfalto residual requerido, con lo cual es posible clasificar el material en una determinada clase de MEA. 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. En resumen el diseño de mezcla consiste en lo siguiente.

#### **Pruebas de laboratorio**

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

Informe LM-PI-GM-INF-04-2016	Fecha de emisión: 24 de octubre de 2016	Página 14 de 56
------------------------------	---	-----------------

necesaria la determinación del contenido y tipo de relleno mineral activo para mejorar la resistencia a la humedad 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 (entre 2 y 3% de asfalto residual). Se elabora un grupo de seis especímenes tal como se establece más adelante en el diseño; 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 60%, no es necesario adicionarlo.

Cuando la resistencia retenida de la mezcla sin relleno mineral activo es menor a 60%, 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 relleno mineral 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.

### **Diseño**

Para el diseño 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, el acondicionamiento corresponde a la inmersión de los especímenes por 24h en un baño a 25°C. Los resultados de diseño que se observa en la Figura 4 son utilizados para determinar el contenido óptimo de asfalto residual.

Informe LM-PI-GM-INF-04-2016	Fecha de emisión: 24 de octubre de 2016	Página 15 de 56
------------------------------	---	-----------------



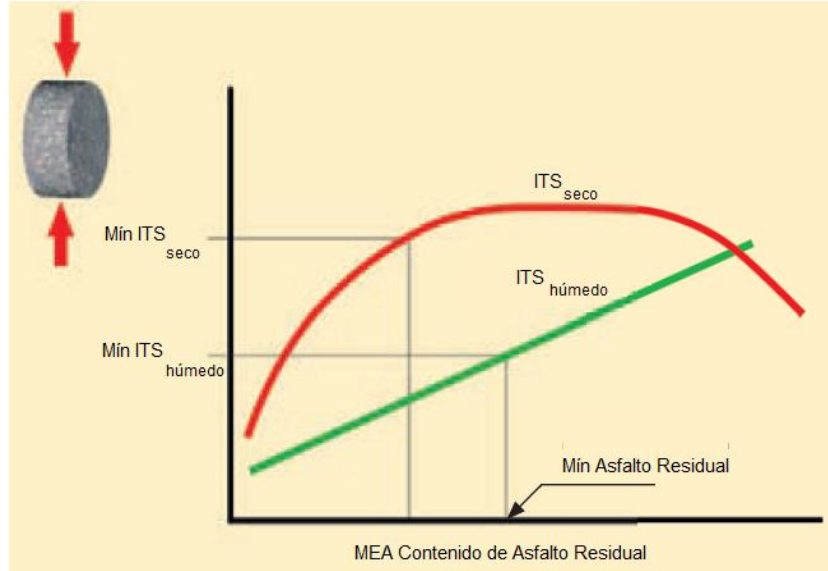
**Figura 3. Ensayo de Tensión Indirecta.**

Con cada punto de asfalto residual se elaboran de 6 a 8 especímenes que se compactan y curan como se discutió anteriormente. Estos especímenes se dividen en dos grupos, uno seco y el otro 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 pre-tratamiento con cal hidratada. En la Tabla 5 se muestran los valores mínimos recomendados de ITS. El porcentaje de asfalto residual es aquél que cumple con las tensiones indirectas mínimas del ensayo como se muestra en la Figura 4.

**Tabla 4. Valores de ITS recomendados-**

Ensayo	Unidades	MEA1	MEA2	MEA3	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

*Nota:* Tomado de Wirgten, 2012.



**Figura 4. Determinación del contenido óptimo de asfalto residual.**

### 3.2 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, 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**

**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 como se indica en la Tabla 6.

**Tabla 5. Función de los fluidos dentro de la mezcla.**

<b>Componente</b>	<b>Función</b>
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

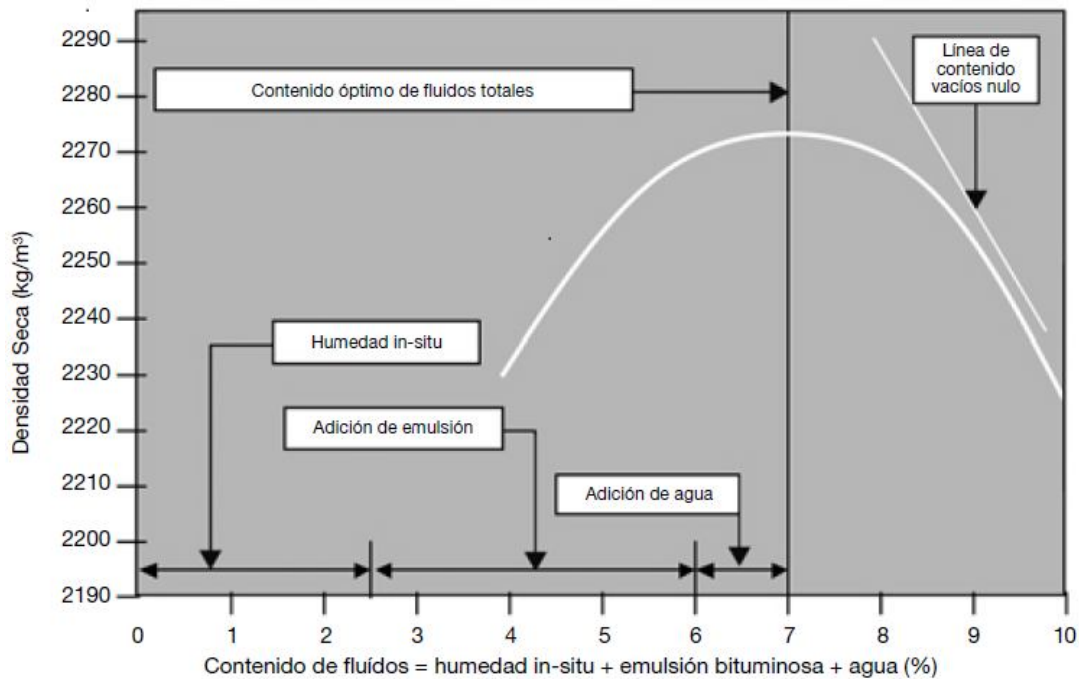
*Nota:* Tomado de Asphalt Academy, 2009

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, 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. 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 6.



**Figura 6. Esquema de fluidos totales.**  
Fuente: Wirtgen GmbH, 2004



### **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.**

### 3.3 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 en la Tabla 6.

**Tabla 6. Estimación de porcentaje teórico de asfalto residual óptimo.**

Fracción pasando el tamiz N° 200	Adición de emulsión asfáltica <sup>1</sup> (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

<sup>1</sup> Porcentajes de emulsión asfáltica indicados son respecto a un residuo asfáltico de 60%.

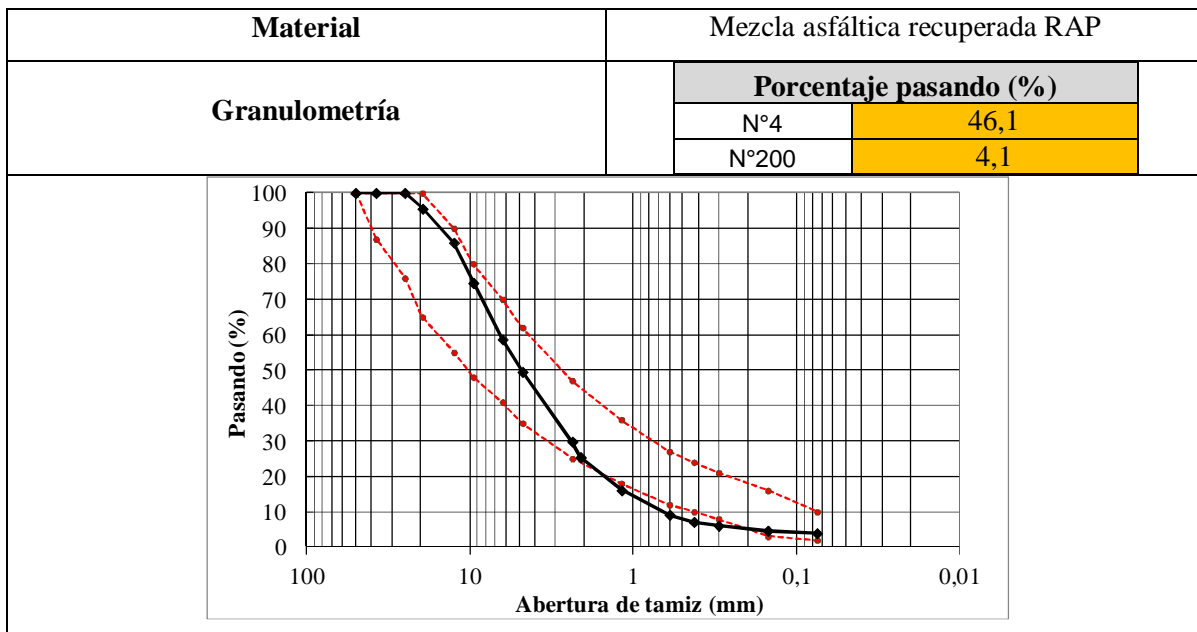
*Nota:* Tomado de Wirtgen, 2012.

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. 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, 2012).

## 4. ENSAYOS REALIZADOS

Se presentan a continuación algunos resultados en relación a estudios previos y ensayos realizados a materiales estabilizados con emulsión de rompimiento lento en Costa Rica. Se puntualizan algunos comentarios generales en relación con los resultados de ensayos realizados en el LanammeUCR.

### 4.1 Estabilización preparada con material recuperado (RAP)



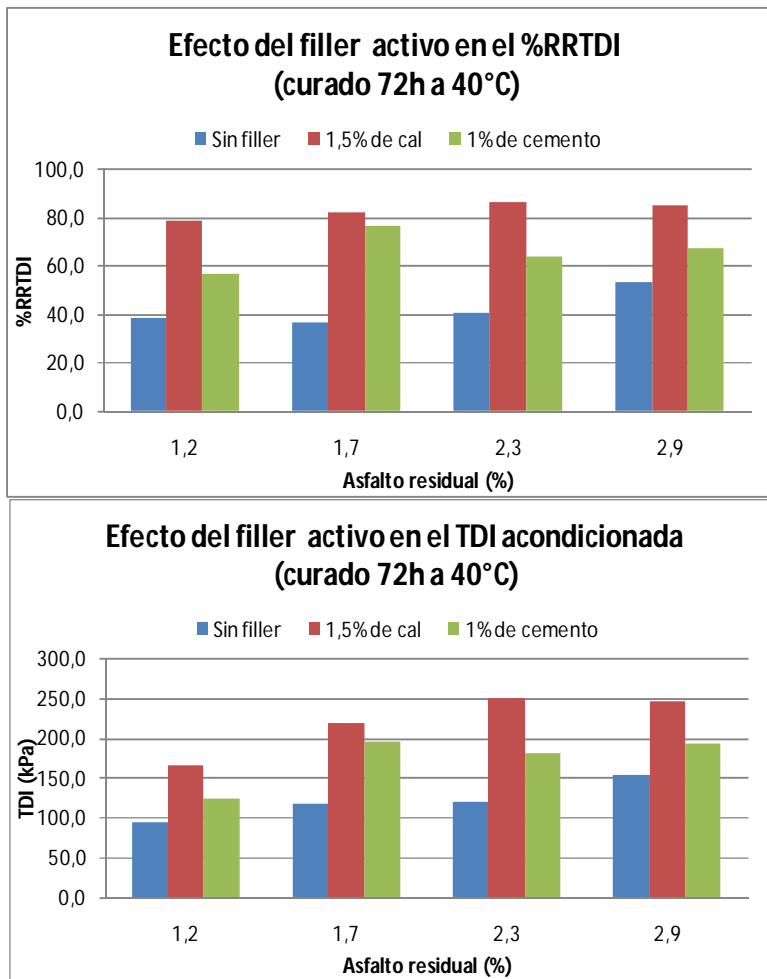
**Figura 8. Estabilización preparada con RAP.**

Los resultados obtenidos con este material se resumen a continuación:

- Para el material reciclado el filler activo no produjo una mejoría en el recubrimiento y adherencia de la emulsión CSS como se observa en la Tabla 7.
- La adición de filler activo produjo un enorme beneficio en la Resistencia (TDI: tensión diametral indirecta y RRTDI: Resistencia retenida a la tensión indirecta) de los especímenes condicionados para distintas dosificaciones de asfalto residual (Figura 9).
- Las mezclas sin filler activo no lograron cumplir con la RRTDI especificada.

**Tabla 7. Valoración del recubrimiento y adherencia para las distintas condiciones de filler.**

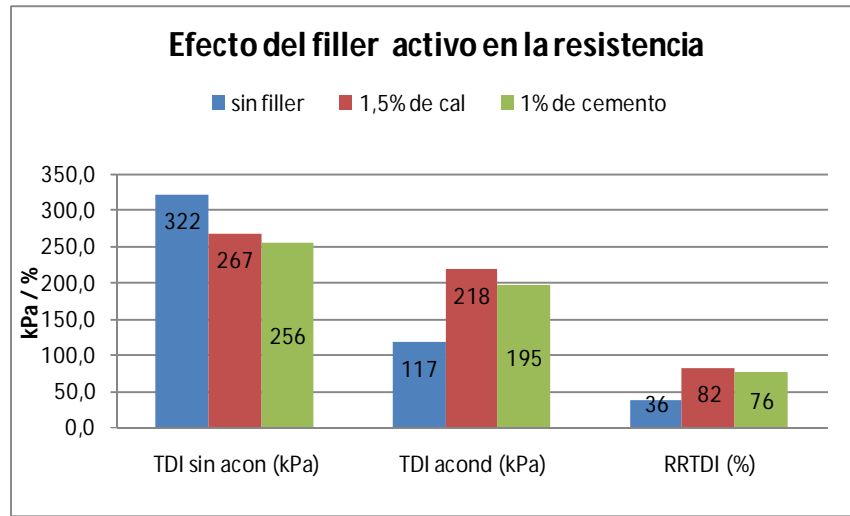
Dosificación			Ensayo de recubrimiento			Ensayo de adherencia		
Porcentaje de asfalto residual	Porcentaje relleno mineral	Tipo de relleno mineral	Cantidad cuadros totales	Cantidad cuadros sin recubrir	Porcentaje recubrimiento	Cantidad cuadros totales	Cantidad cuadros sin recubrir	Porcentaje recubrimiento
%	%				%			%
2,2	0,0	Sin relleno	289	6	97,9	100	8	92,0
2,2	1,0	CAL	289	9	96,9	100	4	96,0
2,2	1,0	CEMENTO	289	6	97,9	100	8	92,0



**Figura 9. %RRTDI y TDI para distintas dosificaciones de asfalto residual.**

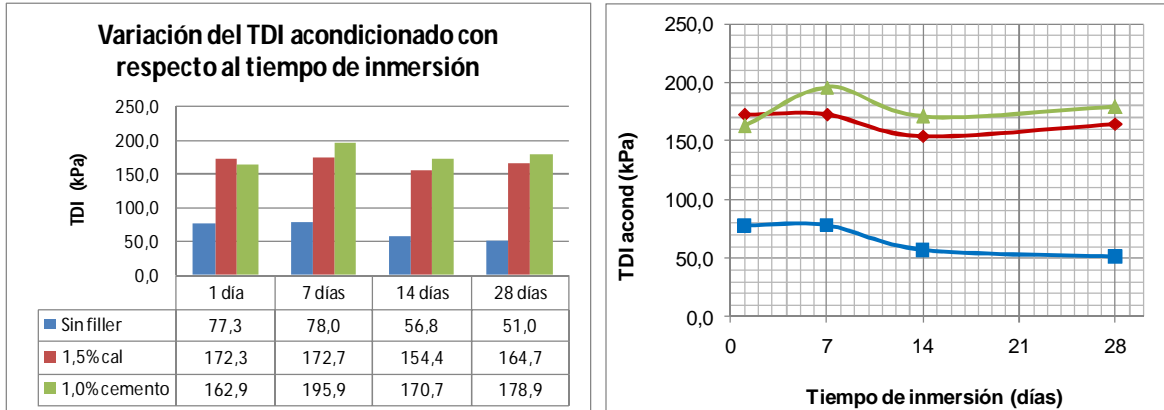
- Las mezclas que utilizaron la cal como filler activo obtuvieron los mejores resultados tanto para la RRTDI como para la TDI, sin embargo el uso del cemento como filler activo permitió el cumplimiento de las especificaciones (Figura 9).

- Se estableció un 1,7% de asfalto residual (2.8% de emulsión CSS) como el porcentaje óptimo de dosificación para este material.
- Para el contenido óptimo de 1.7% de asfalto residual (2.8% de emulsión) la resistencia retenida del material sin filler activo fue de 36% mientras que se obtuvo un 82% y 76% para la cal y el cemento respectivamente.

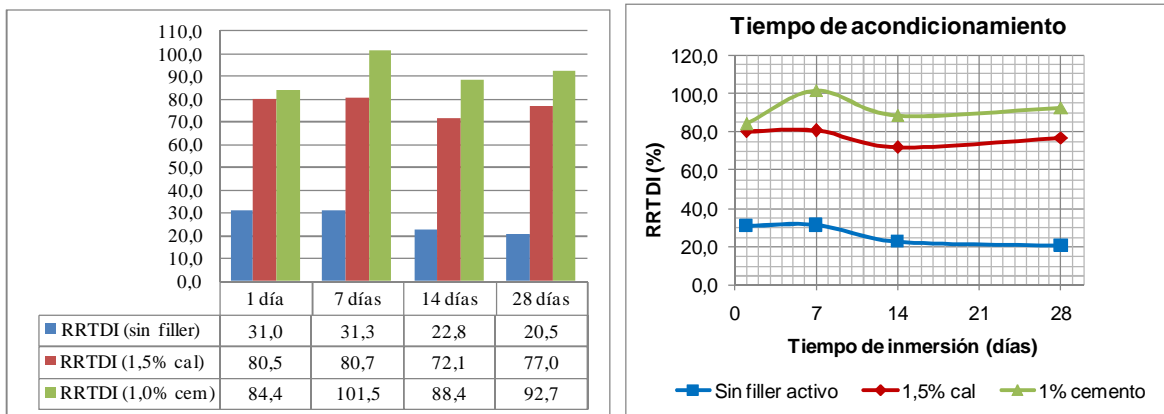


**Figura 10. Efecto del filler activo (cal – cemento) en la resistencia.**

- Al comparar la resistencia (TDI) a diferentes periodos de inmersión (condicionamiento en agua) se observa que los MEA con filler activo (cal y cemento) no presentaron variaciones importantes después de 7, 14 y 28 días (Figura 11).
- Se observa un aumento del deterioro en las mezclas que no utilizaron el filler activo (Figura 11).
- La RRTDI en las mezclas sin filler activo cae de un 31% después de 1 día de condicionamiento 20,5% luego de 28 días de condicionamiento (Figura 12).
- Por su parte las mezclas que utilizaron cemento aumentaron la RRTDI de un 84% (1 día de condicionamiento) a 92% (28 días de condicionamiento) mientras que para las mezclas con cal como filler activo se redujo de un 80% (1 día de condicionamiento) a 77% (28 días de condicionamiento (Figura 12).



**Figura 11. Variación en la TDI respecto a distintos periodos de acondicionamiento.**

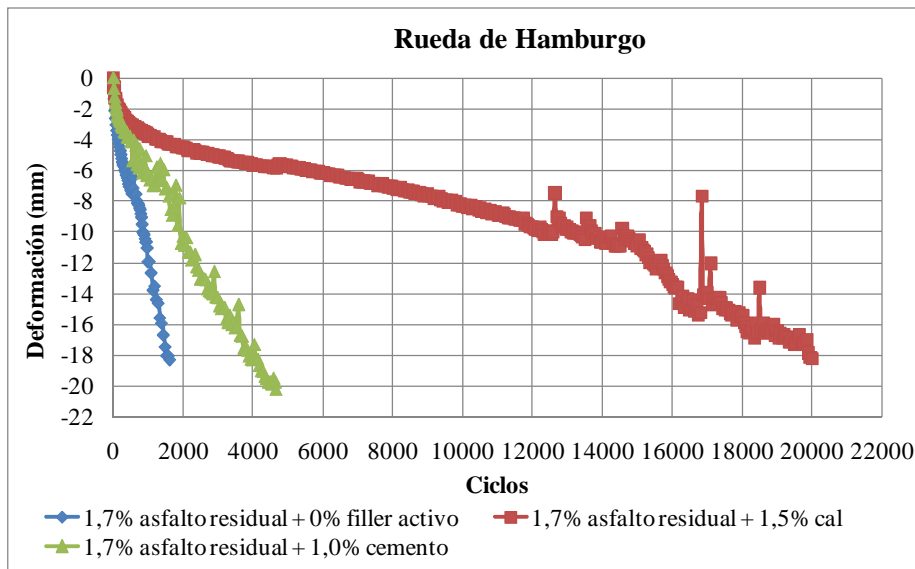


**Figura 12. Variación en la %RRTDI respecto a distintos periodos de acondicionamiento.**

- El ensayo de rueda de Hamburgo se utiliza para valorar la susceptibilidad a la deformación permanente y daño por humedad de materiales asfálticos, mediante un ensayo que consiste en someter a ciclos de carga mediante una llanta metálica (40kg) mientras estos se encuentran sumergidos en agua a 40°C, para este ensayo dos conclusiones importantes:
  - Las MEA con cal como filler activo alcanzaron la falla por humedad a los 14 400 ciclos mientras que los MEA con cemento y sin filler activo llegaron a la condición de falla por humedad a los 1 400 y 710 repeticiones de diferencia.
  - La deformación máxima (20mm) correspondió para las muestras sin filler, con cal y con cemento, a las 1 897 repeticiones, 20 000 repeticiones y 4 670 repeticiones respectivamente.

**Tabla 8. Valoración de daño por humedad y deformación permanente en Rueda de Hamburgo.**

Filler	Asfalto Residual (%)	Temperatura (°C)	Daño por humedad		Criterio de falla deformación > 20 mm	
			Ciclos	Deformación (mm)	Ciclos totales	Deformación (mm)
Sin filler	1,1	50,0	580	-9,0	1637	-20,1
	1,7		710	-8,0	1897	-20,1
	2,3		560	-6,5	1624	-20,4
	2,9		650	-8,5	1624	-20,2
1,5% Cal	1,1	50,0	15800	-8,0	19000	-16,6
	1,7		14400	-10,5	20000	-18,3
	2,3		14700	-6,5	20000	-20,1
	2,9		6800	-8,5	15339	-20,1
1,0% cemento	1,1	50,0	1550	-5,5	5041	-20,2
	1,7		1400	7,0	4670	-20,2
	2,3		2400	-5,0	5664	-20,0
	2,9		2300	-5,5	5687	-20,0



**Figura 13. Evolución del daño por humedad y deformación permanente en equipo Rueda de Hamburgo.**

#### 4.2 Estabilización preparada con Material granular (Base granular)

Material	Material granular de Base	
Granulometría	Porcentaje pasando (%)	
	N°4	50.1
	N°200	10.9

Los resultados obtenidos con este material se resumen a continuación:

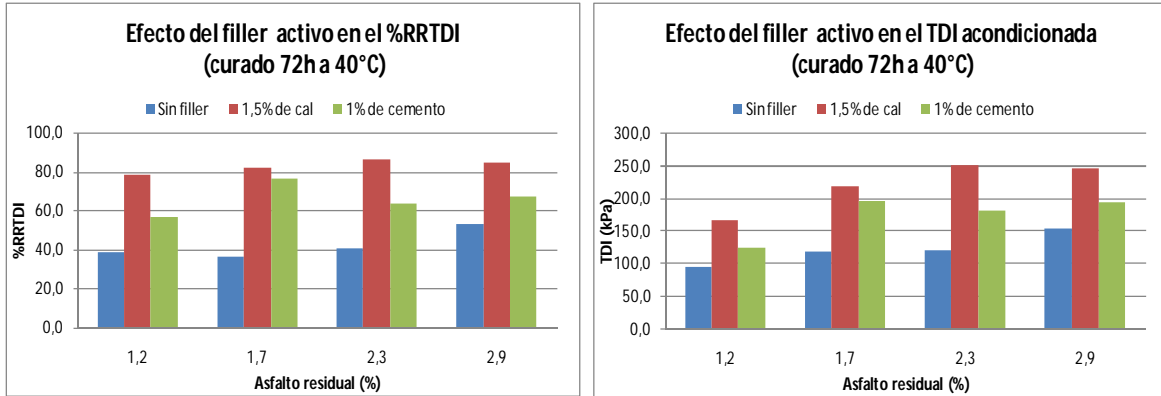
- Para el material granular de base el filler activo produjo una mejoría notoria en el recubrimiento y adherencia con la emulsión CSS.

**Tabla 9. Valoración del recubrimiento y adherencia para las distintas condiciones de filler.**

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

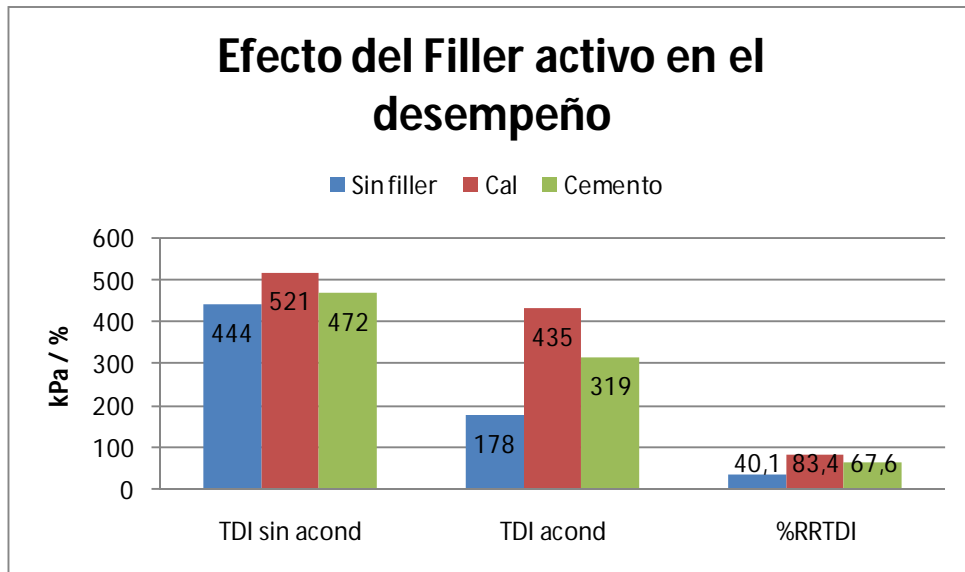
- La adición de filler activo produjo un enorme beneficio en la Resistencia (TDI: tensión diametral indirecta y RRTDI: Resistencia retenida a la tensión indirecta) de los especímenes condicionados para distintas dosificaciones de asfalto residual.
- Las mezclas sin filler activo no lograron cumplir con la RRTDI especificada a excepción de la dosificación más elevada 2.9% de asfalto residual (4.8 de emulsión)
- Las mezclas que utilizaron la cal como filler activo obtuvieron los mejores resultados tanto para la RRTDI como para la TDI, sin embargo el uso del cemento como filler activo permitió el cumplimiento de las especificaciones.





**Figura 14. %RRTDI y TDI para distintas dosificaciones de asfalto residual.**

- Para un contenido de 2.3 % de asfalto residual (3.8% de emulsión) la resistencia retenida del material sin filler activo fue de 40.1% mientras que se obtuvo un 83% y 67% para la cal y el cemento respectivamente.



**Figura 15. Efecto del filler activo (cal – cemento) en la resistencia.**

## 5. ESTUDIOS PRELIMINARES Y PROPUESTA DE DISEÑO DE ESPEORES

### 5.1 Estudios preliminares

Se considera que todo camino de bajo volumen debe someterse a una serie de estudios preliminares básicos que permitan caracterizar las condiciones del tránsito vehicular y suelos o capas de materiales granulares existentes, los cuales son los principales parámetros que se proponen más adelante para el diseño estructural de pavimentos. Se propone la realización de los siguientes ensayos de campo y laboratorio de acuerdo a lo siguiente.

#### Ensayos de campo

Se propone la realización de sondeos a cielo abierto al menos cada 500 m en toda la longitud del camino donde se incluya lo siguiente:

- Profundidad mínima de 0.80 m
- Medición de espesores de materiales granulares existentes.
- Caracterización visual de los materiales granulares existentes y suelos de subrasante.
- Muestreo de materiales granulares y suelos para caracterización en laboratorio.
- Medición de CBR en sitio de capas granulares existentes y suelo subrasante. Se recomienda la utilización del Cono de Penetración Dinámico (CPD).
- Cuando sea posible medición de Módulo Resiliente en sitio con el Deflectómetro Liviano (LWD).

#### Ensayos de laboratorio

Se propone realizar los siguientes ensayos básicos para cada una de las muestras recolectadas en los sondeos a cielo abierto:

- Análisis granulométrico de suelos y materiales granulares
- Límites de Atterberg para los suelos y materiales granulares
- Si es posible Proctor Estándar y Modificado para los suelos y materiales granulares respectivamente y CBR de laboratorio para los suelos y materiales granulares

Informe LM-PI-GM-INF-04-2016	Fecha de emisión: 24 de octubre de 2016	Página 29 de 56
------------------------------	---	-----------------

## 5.2 Diseño estructural

Una visión integral de mantenimiento para caminos no pavimentados, debe incluir el análisis de la suficiencia estructural de las capas que soportarán las cargas del tránsito e inclemencias del clima. Por esta razón, se propone una serie de estructuras de pavimento en las cuales se establecen los espesores mínimos de las capas granulares, que se recomienda colocar de acuerdo al diferentes niveles de tránsito vehicular y capacidad de soporte de la subrasante existente para un período de diseño de 4 a 5 años.

Los diseños propuestos se resumen en cinco catálogos donde se incluye la consideración de una capa granular existente con espesor mínimo de 10 cm, sobre la cual se coloca un espesor variable de material granular seleccionado tipo base y/o subbase cuyos 5 cm más superficiales se mezclan con emulsión de rompimiento lento (“*sello asfáltico*”) que son sellados con un riego de imprimación final.

Los diseños se realizaron por medio de la metodología AASHTO 93 y referencias de diferentes guías y manuales de diseño para pavimentos de bajo volumen que se han elaborado en otros países, con énfasis especial en las estructuras que incluyen capas de protección asfálticas, tratamientos superficiales bituminosos, sellos asfálticos y bases estabilizadas con asfalto. También, se realizó la modelación de cada una de las estructuras de pavimento propuestas para obtener las respuestas mecánicas y realizar verificaciones de desempeño, tanto por fatiga como por deformación permanente.

La influencia de las condiciones climáticas en el diseño de las estructuras propuestas, se incluyó por medio del coeficiente de drenaje  $m_i$  de la metodología AASHTO 93. Esto debido a que actualmente, no se cuenta con información oficial o análisis detallado acerca del comportamiento de los materiales a utilizar en diferentes condiciones climáticas del país, sean éstas secas, húmedas o muy húmedas.

A continuación se resume brevemente las variables consideradas en los diseños y luego se muestran los catálogos de estructuras de pavimento propuestas.

### **Tránsito Vehicular**

La Tabla 10 muestra cuatro categorías de tránsito vehicular que se proponen de acuerdo al tránsito promedio diario (TPD) y volumen diario de vehículos pesados (VPD) estimado para el camino y a

Informe LM-PI-GM-INF-04-2016	Fecha de emisión: 24 de octubre de 2016	Página 30 de 56
------------------------------	---	-----------------

los Ejes Simples Equivalentes de Diseño (ESAL) de 4500kg en un período de diseño (PD) de 4 a 5 años. Las categorías se definieron de acuerdo a datos de conteos vehiculares realizados en caminos de bajo volumen típicos de Costa Rica realizados por el LanammeUCR y a datos del Anuario de Tránsito 2013 del MOPT para rutas de la red vial en lastre (no pavimentados).

**Tabla 10. Categorías de tránsito vehicular consideradas en el diseño.**

Designación	Tránsito Promedio Diario (TPD)	Vehículos pesados por día (VPD)	ESALs (5 años)
T1	≤15	≤3	≤ 3 000
T2	16-50	3-10	3 001-10 000
T3	51-150	21-30	10 001-30 000
T4	151-500	31-100	31 000-100 000

### Suelo de subrasante

Se plantean tres designaciones para el suelo de subrasante de acuerdo a su capacidad de soporte CBR las cuales se muestran en la Tabla 11. Además, se indica el módulo resiliente (MR) de cada categoría de subrasante de acuerdo a las correlaciones indicadas.

**Tabla 11. Categorías de suelos de subrasante de acuerdo a CBR.**

Designación	CBR (%)	Mr (psi)	Mr (MPa)
S1	≤3.0	≤4 500	≤31.0
S2	3.1-5.0	4 501-7 500	31.1-51.7
S3	5.1-10.0	7 501-13 400	51.8-92.4
Referencias para el cálculo de MR a partir de CBR			
Referencia	Rango CBR	Ecuación	
Heukelom & Klomp (1962)	<7.2	$Mr(\text{psi}) = 1500 * CBR$	
CSIR (Witczak et al. 1995)	7.2-20	$Mr(\text{psi}) = 3000 * CBR^{0.65}$	
AASHTO 93	>20	$MR(\text{psi}) = 4326 * \ln(CBR) + 241$	

### Materiales

Los materiales utilizados en las capas de las estructuras de pavimento propuestas y las propiedades consideradas se muestran en la Tabla 12. El sello asfáltico (SA) se consideró como un material granular (tipo base granular o capa granular de rodadura tipo TM-40B) estabilizado con emulsión de rompimiento lento en un espesor de 5 cm. Luego, se dispone material granular tipo base o capa

granular de rodadura sin estabilizar (BG) colocado sobre el material granular existente (GE). Se indica por separado el riego asfáltico (RA) que se requiere aplicar sobre la capa de 5cm con emulsión de rompimiento lento (SA) para impermeabilizar la superficie.

Se definió el módulo resiliente del sello asfáltico a partir de resultados de ensayos realizados por el LanammeUCR en materiales de base granular estabilizados con emulsión de rompimiento lento y asfalto espumado. La estimación coincide con lo indicado por Wirgten (2012) para la categoría MEA1 de material estabilizado con asfalto, donde se recomienda un módulo resiliente entre 300 MPa (43500psi) y 600 MPa (87000psi). La Tabla 12 muestra también los coeficientes  $a_i$  y  $m_i$  de la metodología AASHO 93 asignados a cada capa de los pavimentos.

**Tabla 12. Características básicas de los materiales para el diseño estructural de pavimento.**

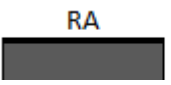
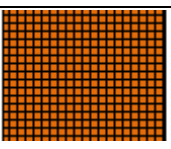

Designación	Material	CBR (%)	Mr (psi)	Mr (Mpa)	Coefficiente Estructural $a_i$	Coefficiente Drenaje $m_i$
RA	Riego Asfáltico (Emulsión de rompimiento lento con gravilla)	-	-	-	-	-
SA	Sello Asfáltico (5cm de material granular estabilizado con emulsión de rompimiento lento)	$\geq 80$	260000 (inicial) 80 000 (terminal)	1800 (inicial) 500 (terminal)	0.200	1
BG	Capa granular de rodadura (TM40-B) Base Granular (Graduación C o D)	$\geq 80$	28000	195	0.135	0.8
GE	Capa granular existente	$\geq 20$	14000	97	0.110	0.8
S	Suelo subrasante	Indicado en Tabla 11			-	-

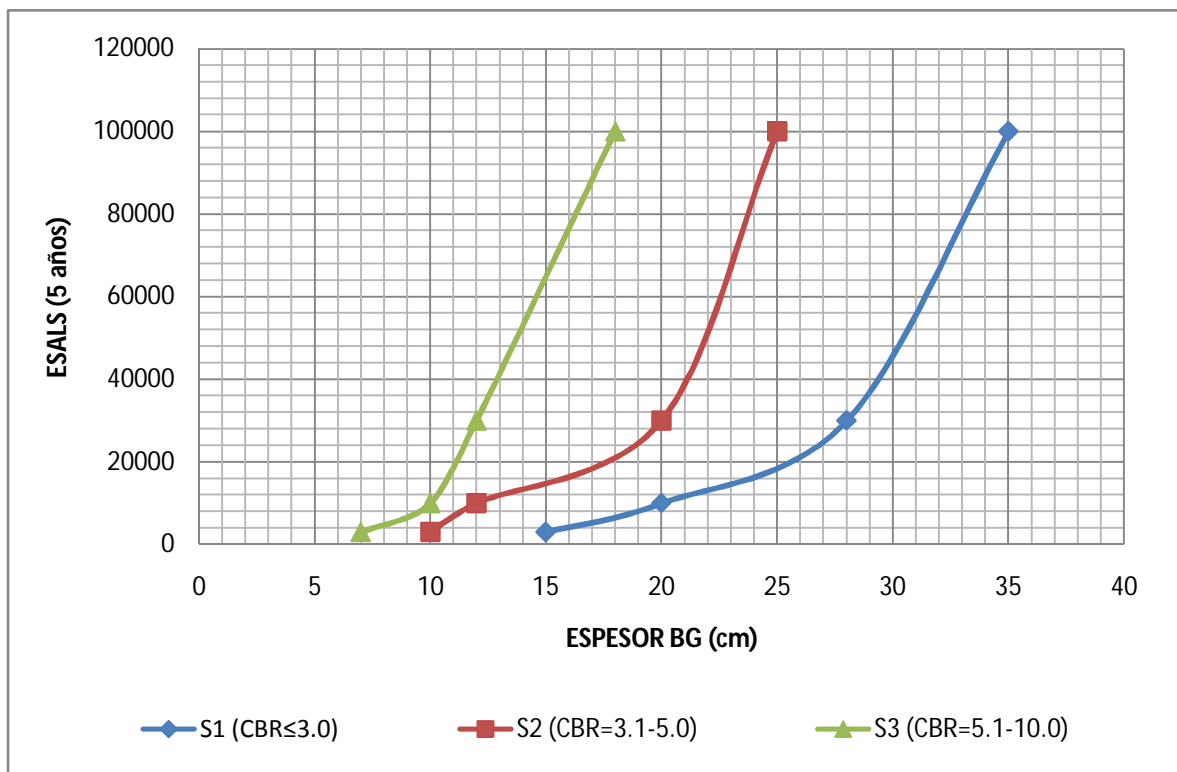
### Procedimiento de diseño

Las estructuras de pavimento que se presentan en los catálogos se obtuvieron a partir de la combinación de los materiales y espesores indicados en la Tabla 13. La capa de SA se consideró con espesor fijo de 5 cm y la capa de GE se consideró con un espesor fijo de 10 cm como aporte del material existente en el camino. Por lo tanto, el espesor de la capa de base granular BG varía de acuerdo a las solicitudes de tránsito vehicular y capacidad de soporte de la subrasante como se observa en la Figura 16 y 17 para Vehículos Pesados por Días (VPD) y ESAL respectivamente, de acuerdo a lo indicado en la Tabla 10. Se presenta una curva para cada uno de los tres rangos de

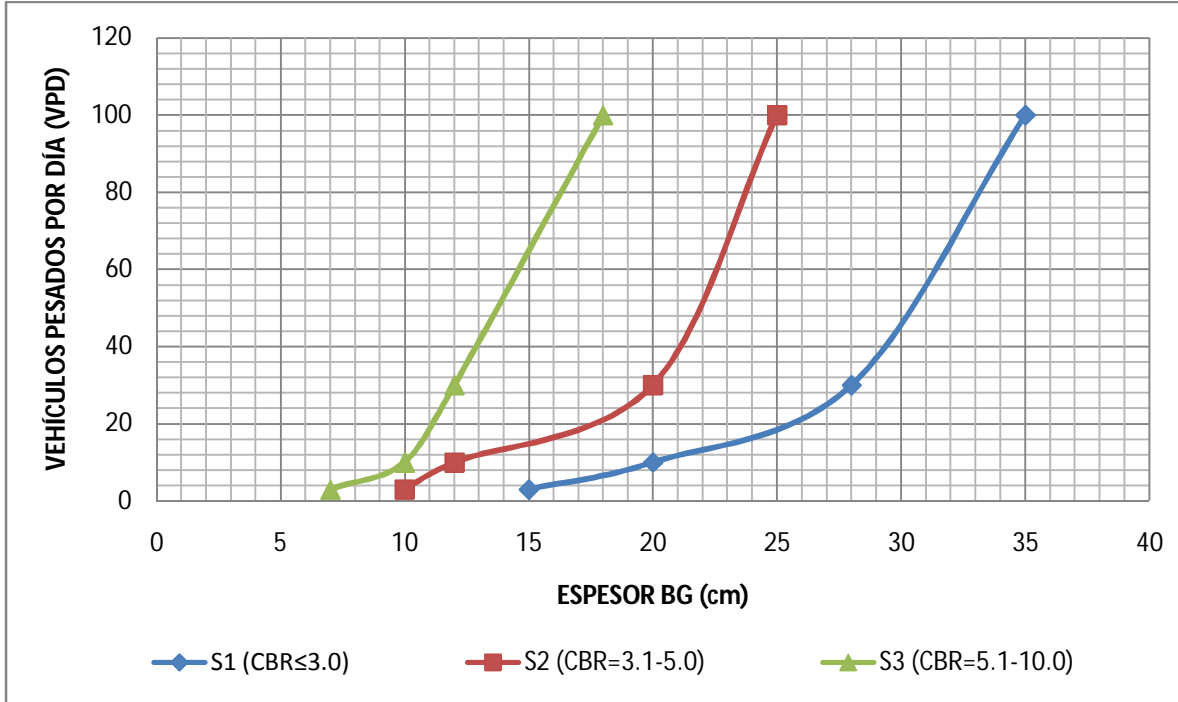
CBR de subrasante sobre la cual se puede proyectar el nivel de tránsito vehicular para obtener el espesor de BG requerido.

**Tabla 13. Procedimiento de diseño.**

Material	Espesor (cm)	Capas
Sello Asfáltico (SA)	5	
Base granular o capa granular de rodadura (BG)	Variable (10-45)	
Material granular existente (GE)	10	



**Figura 16. Diseño AASHTO 93 de capas de pavimento (para ESALS)**



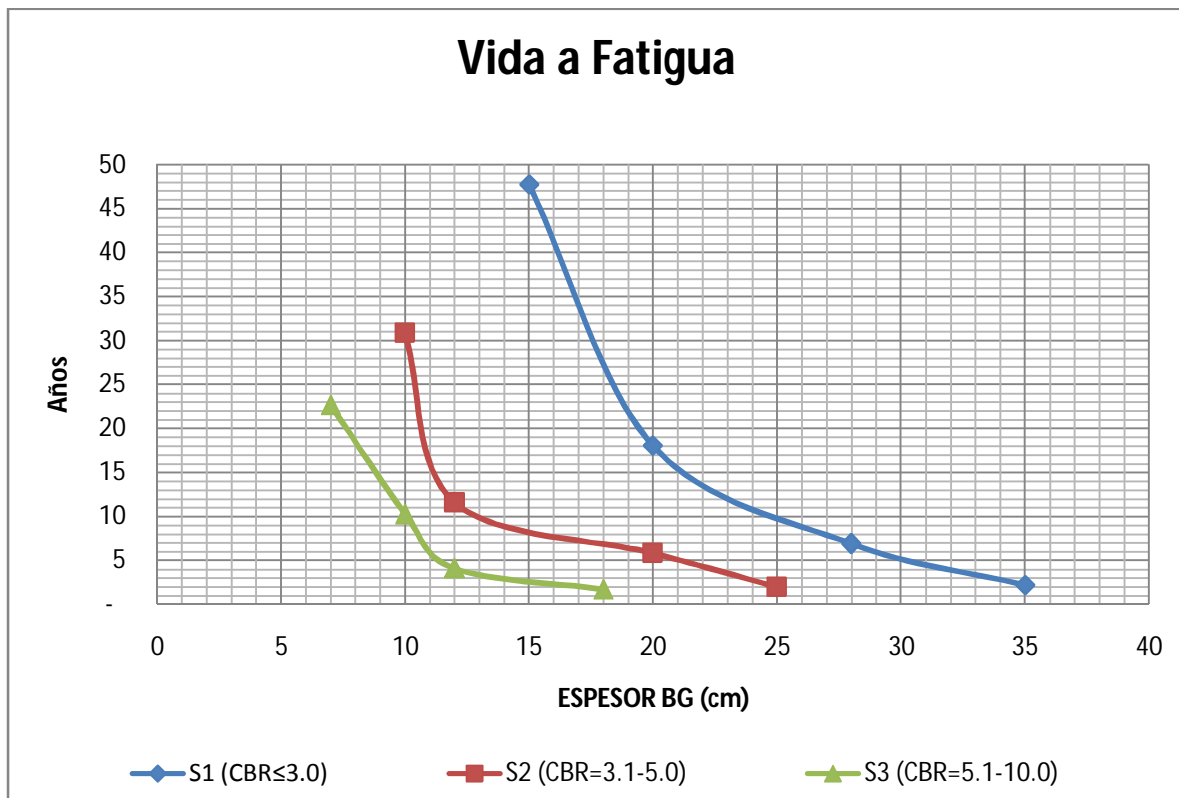
**Figura 17. Diseño AASHTO 93 de capas de pavimento (para vpd).**

### Desempeño ante fatiga

Se modelaron las estructuras de pavimento en un software de multicapa elástica (mePADS) para obtener las respuestas mecánicas; de acuerdo al Método Sudafricano y a las recomendaciones de análisis mecanístico indicadas por (Erasmus-Liebenberg, 2003) para materiales tratados con emulsión asfáltica. La Tabla 14 muestra los resultados de vida a fatiga obtenidos para las estructuras de pavimento propuestas en los catálogos. Se puede observar que las estructuras sometidas a tránsito TPD cercano a 500, VPD cercano a 100 y ESAL de 100000, el material estabilizado con emulsión presenta fatiga a 2 años de servicio en cualquiera de los casos de tipos de subrasante establecidos. Esto se muestra gráficamente en la Figura 18. A pesar de lo indicado en esta análisis, durante las inspecciones visuales realizadas a caminos donde se ha utilizado el “*sello asfáltico*”, se ha observado que pueden mostrar agrietamientos por fatiga en las huellas del tránsito antes de los dos años de servicio, tanto en la capa de 5 cm estabilizada con emulsión como en el sello impermeabilizante superficial, como se muestra en la Figura 20.

**Tabla 14. Estimación de vida a fatiga.**

SR	BG (cm)	Categoría Tránsito	TPD	VPD	ESALS diseño	Fatiga (ESALS)	Vida a fatiga (años)
S1 (CBR≤3.0)	15	T1	15	3	3,000.00	33,304	48
	20	T2	50	10	10,000.00	41,831	18
	28	T3	150	30	30,000.00	47,452	7
	35	T4	500	100	100,000.00	48,483	2
S2 (CBR=3.1-5.0)	10	T1	15	3	3,000.00	21,495	31
	12	T2	50	10	10,000.00	26,730	12
	20	T3	150	30	30,000.00	39,921	6
	25	T4	500	100	100,000.00	43,366	2
S3 (CBR=5.1-10.0)	7	T1	15	3	3,000.00	15,769	23
	10	T2	50	10	10,000.00	23,606	10
	12	T3	150	30	30,000.00	27,956	4
	18	T4	500	100	100,000.00	36,466	2



**Figura 18. Desempeño ante fatiga en el sello asfáltico.**





**Figura 19. Agrietamiento de riego final de impermeabilización en huella del tránsito.  
(Condición superficial 2 años después de construcción)**

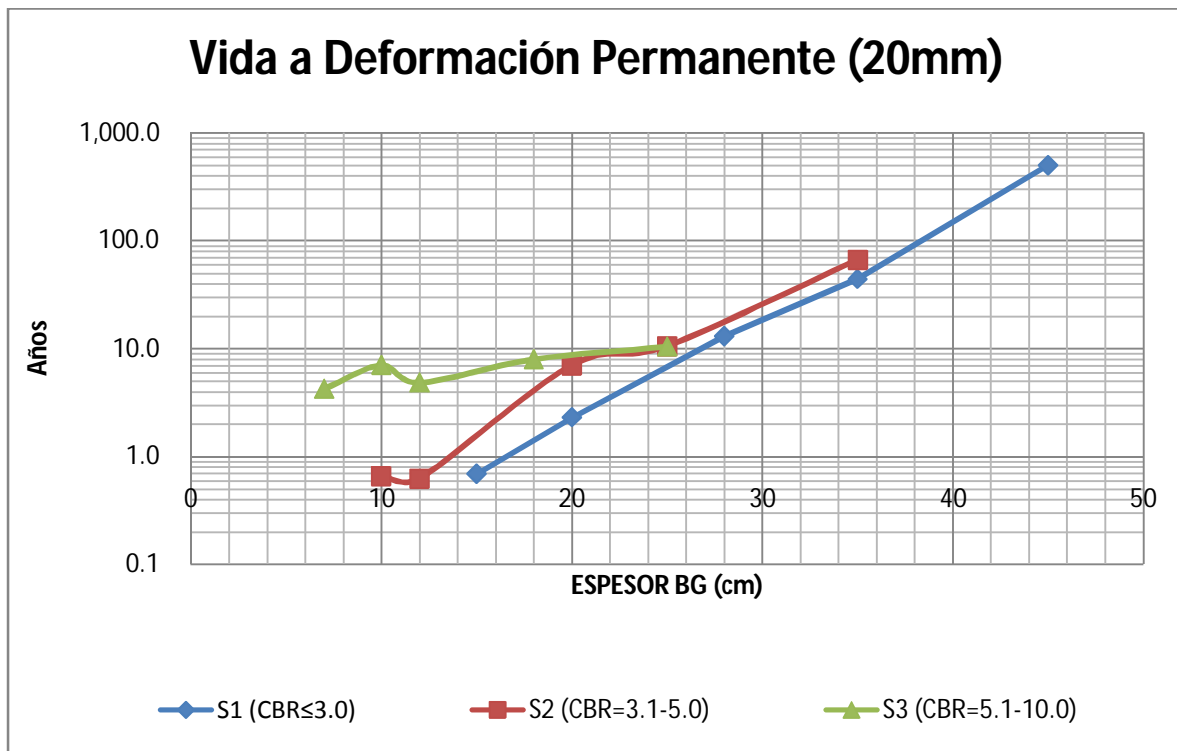
El agrietamiento superficial observado en las inspecciones de caminos donde se ha utilizado sello asfáltico, sugiere la necesidad de medidas de mantenimiento para evitar el ingreso de humedad en la capa mejorada con emulsión y capas granulares subyacentes para evitar su deterioro acelerado.

### **Desempeño ante deformación permanente**

Se verificó el desempeño de las estructuras de pavimento propuestas ante la deformación permanente de acuerdo al Método Sudafricano (Erasmus-Liebennberg, 2003). Los resultados de estimación del desempeño a deformación permanente se observan en la Tabla 15 para las diferentes tipos de subrasante en CBR dependiendo del espesor de BG. Se puede observar que las estructuras colocadas sobre subrasante de menor capacidad de soporte S1 y S2, tránsito vehicular T1 y T2 para las cuales se propone espesores de BG entre 10 y 15 cm, presentaran deformaciones de 20mm previo a un año de servicio. Sin embargo, se considera que este parámetro no representa una falla funcional importante para los caminos en que se desea aplicar esta técnica, ya que con vías donde se tiene un TPD menor a 500 veh/día y generalmente las velocidades son bajas. Por lo tanto, se consideran que las estructuras propuestas cumplen a deformación permanente de acuerdo a los datos de la Tabla 15 y Figura 21.

**Tabla 15. Estimación de vida a deformación permanente (20mm).**

SR	BG (cm)	Categoría Tránsito	TPD	VPD	ESALS diseño	Deformación Permanente 20mm (ESALS)	Vida a Deformación permanente 20mm (años)
S1 (CBR≤3.0)	15	T1	15	3	3,000.00	393	0.7
	20	T2	50	10	10,000.00	5,098	2.3
	28	T3	150	30	30,000.00	90,713	13.1
	35	T4	500	100	100,000.00	1,034,700	44.5
S2 (CBR=3.1-5.0)	10	T1	15	3	3,000.00	369	0.7
	12	T2	50	10	10,000.00	1,146	0.6
	20	T3	150	30	30,000.00	48,452	7.1
	25	T4	500	100	100,000.00	244,215	10.6
S3 (CBR=5.1-10.0)	7	T1	15	3	3,000.00	2,890	4.3
	10	T2	50	10	10,000.00	16,176	7.1
	12	T3	150	30	30,000.00	33,070	4.9
	18	T4	500	100	100,000.00	183,913	8.0



**Figura 20. Desempeño ante deformación permanente de capas de pavimento.**

## 6. MANTENIMIENTO

El estado estructural y funcional de un camino depende tanto del diseño y proceso constructivo como de las actividades de conservación o mantenimiento que se lleven a cabo durante su vida útil. Estas actividades tienen por objetivo prolongar la vida de servicio, mantener las condiciones de seguridad para los usuarios, reducir costos de operación y reducir costos de rehabilitación posterior. El caso de los caminos de bajo volumen no es la excepción, incluyendo aquellos donde se realizan inversiones adicionales como sellos asfálticos o capas de rodadura estabilizadas con emulsión.

Además de las actividades de mantenimiento rutinario, se requiere de mantenimiento periódico que permita conservar el nivel de servicio del camino, por ejemplo sellado de grietas, riegos adicionales de emulsión asfáltica y gravilla (polvo de piedra o material de secado), bacheos y reparaciones en zonas específicas deterioradas o actividades de rehabilitación que permiten aumentar la capacidad estructural de la ruta y aumentar la vida útil. La Tabla 16 muestra algunas recomendaciones de operaciones de mantenimiento para caminos de bajo volumen con sellos o superficies asfálticas de rodamiento de acuerdo a referencias consultadas. Además, se propone la frecuencia de mantenimiento requerido para los caminos donde se utilice “sellos asfáltico” con riego superficial con gravilla o con una TSB simple o doble.

**Tabla 16. Recomendaciones de esquemas de conservación para caminos con sellos asfálticos.**

<b>Tipo de superficie asfáltica</b>	<b>Actividad de conservación</b>	<b>Aplicación</b>
Lechada asfáltica	Refuerzo con 4 cm de Mezcla Asfáltica	Entre año 4 y 6
TSB simple sobre base granular	Nuevo tratamiento superficial simple	Entre año 4 y 6
TSB doble sobre base asfáltica	Nuevo tratamiento superficial doble	Entre año 7 y 10
Sello asfáltico con emulsión de rompimiento lento (5cm) y riego superficial con gravilla	Riego superficial de emulsión con gravilla	Entre año 1 y 2
Sello asfáltico con emulsión de rompimiento lento (5cm) y TSB simple o doble.	Tratamiento superficial simple	Entre año 4 y 5

El LanammeUCR ha dado seguimiento a algunos caminos donde se ha utilizado la técnica de *Sello Asfáltico Integrado con Emulsión de Rompimiento Lento* para analizar su desempeño. Se ha realizado inspección visual y medición de rugosidad de la superficie como se muestra en las Figuras 21 y 22 respectivamente para dos caminos: Nandayure y San Carlos.

Los datos indican que Los caminos de Nandayure y San Carlos se encuentran en regular condición (calificación 3 o inferior) de acuerdo a la inspección visual de deterioros según la metodología PASER. Por otro lado, la medición de rugosidad indica que se encuentran en buena condición con IRI de entre 4 y 3 m/km; sin embargo se puede apreciar como la pendiente de la curva comienza a aumentar levemente para la ruta de San Carlos.

Una diferencia fundamental entre ambos caminos corresponde al tipo de tránsito vehicular. En el caso de San Carlos cuenta con tránsito pesado de hasta 248 vehículos pesados por día, mientras que el camino de Nandayure solo suma aproximadamente 112 vehículos pesados por día según conteos realizados por el LanammeUCR. Además, el camino de Nandayure ha recibido al menos dos intervenciones con actividades de mantenimiento como bacheos, reparaciones localizadas y sello superficial adicional, lo cual ha permitido mantener una condición regular constante en comparación con el camino de San Carlos, donde no se han realizado actividades de mantenimiento.

Los resultados del análisis de desempeño por fatiga para las estructuras de pavimento propuestas en los catálogos, así como los datos de inspección visual y medición de rugosidad, evidencian la necesidad de plantear una estrategia de conservación para los caminos donde se aplique la técnica de *sellos asfáltico*.

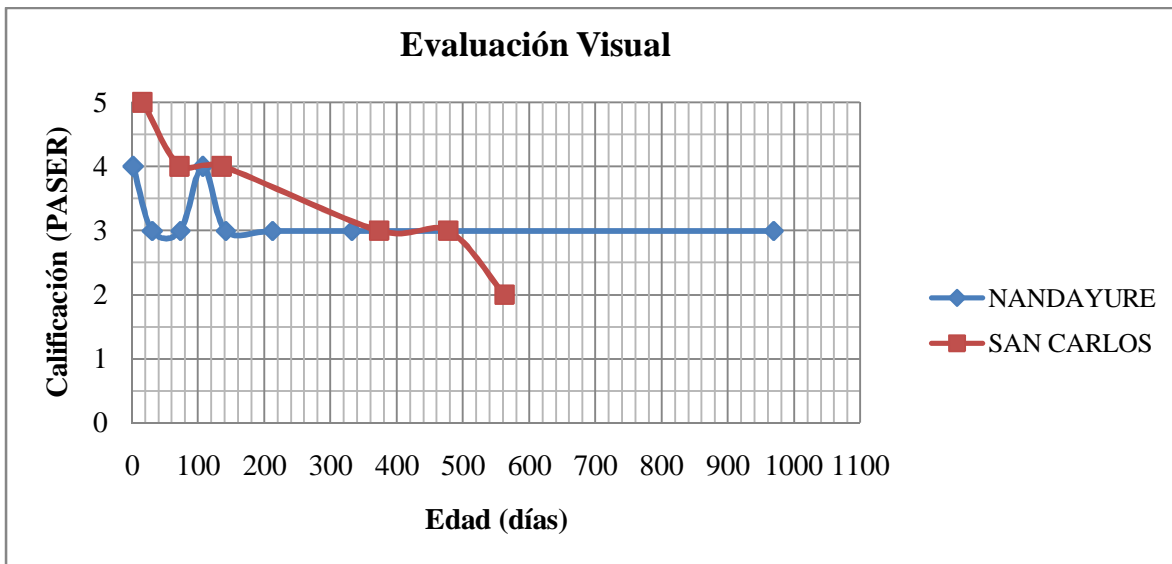


Figura 21. Resultados de evaluación visual en tres caminos con sello asfáltico.

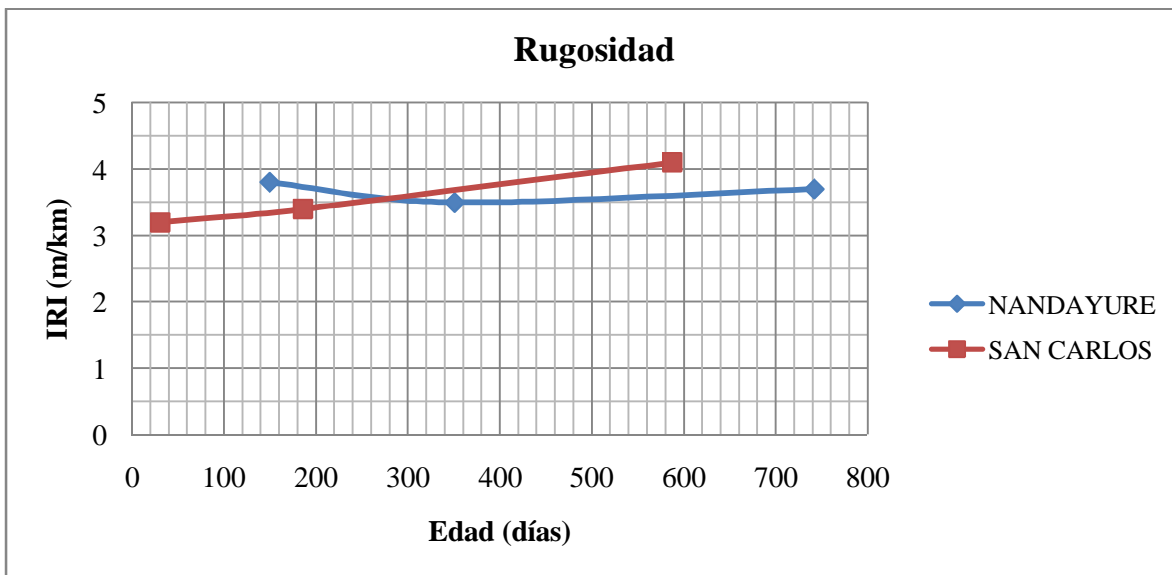


Figura 22. Medición de rugosidad en dos caminos con sello asfáltico.

## 7. CATÁLOGOS DE PAVIMENTOS

Se plantean cuatro catálogos de pavimentos, uno para cada categoría de tránsito donde se proponen estructuras de pavimento para cada una de las designaciones de capacidad de soporte de subrasante como se observa de la Tabla 17 a la Tabla 20.

Como se mencionó antes, se mantiene invariante el espesor de 5cm de material granular mejorado con emulsión de rompimiento lento (SA), de la misma forma que se considera el aporte de la capa existente de material granular (GE) por medio de una espesor fijo de 10cm. Por lo tanto las estructuras de los catálogos presentan la variación en el espesor de la capa granular tipo base (BG) para las diferentes categorías de tránsito vehicular (T1, T2, T3 y T4) y capacidad de soporte de la subrasante (S1, S2 y S3).

Tabla 17. Catálogo de diseño de pavimentos para T1 (espesores en cm).

SUELO		TRÁNSITO T1	
		TPD ≤15 VPD ≤3 ESAL ≤3 000	
CBR ≤3	S1	5	RA
		15	SA
		10	BG
			GE
			S
CBR=3.1-5.0	S2	5	RA
		10	SA
		10	BG
			GE
			S
CBR=5.1-10.0	S3	5	RA
		7	SA
		10	BG
			GE
			S

**Tabla 18. Catálogo de diseño de pavimentos para T2 (espesores en cm).**

SUELO		TRÁNSITO T2		
		TPD=16-50 VPD=4-10 ESAL=3 001-10 000		
CBR≤3	S1	5	RA	SA
		20		BG
		10		GE
				S
CBR=3.1-5.0	S2	5	RA	SA
		12		BG
		10		GE
				S
CBR=5.1-10.0	S3	5	RA	SA
		10		BG
		10		GE
				S



**Tabla 19. Catálogo de diseño de pavimentos para T3 (espesores en cm).**

SUELO		TRÁNSITO T3	
		TPD=51-150 VPD=11-30 ESAL=10 001-30 000	
CBR≤3	S1	5	RA
		28	BG
		10	GE
			S
CBR=3.1-5.0	S2	5	RA
		20	BG
		10	GE
			S
CBR=5.1-10.0	S3	5	RA
		12	BG
		10	GE
			S

Tabla 20. Catálogo de diseño de pavimentos para T4 (espesores en cm).

SUELO		TRÁNSITO T4	
		TPD=151-500 VPD=31-100 ESAL=30 001-100 000	
CBR≤3	S1	5	RA
		35	BG
		10	GE
			S
CBR=3.1-5.0	S2	5	RA
		25	BG
		10	GE
			S
CBR=5.1-10.0	S3	5	RA
		18	BG
		10	GE
			S

## 8. PROCESO CONSTRUCTIVO

Como lo recomienda (Asphalt Academy c/o CSIR Built Environment, 2009) y demás referencias indicadas en este documento, el material granular estabilizado con emulsión asfáltica de rompimiento se puede producir en planta o se mezcla en sitio por medio de equipo móvil, ya sea con recuperadora o motoniveladora. Este último caso es el que se describe a continuación como recomendación básica para ejecutar las actividades de esta técnica constructiva de acuerdo a la práctica y a los equipos de construcción que se manejan con mayor frecuencia en el ámbito nacional para caminos de bajo volumen.

### **Mezcla en sitio con equipo convencional (motoniveladora):**

La construcción de capa de material granular estabilizado con emulsión asfáltica de rompimiento lento por medio de equipo convencional requiere de especiales cuidados para lograr que el adecuado recubrimiento del agregado y homogeneidad de la mezcla como se indica a continuación:

a) Manejo de tránsito y seguridad vial en obra:

Se deberá señalar la zona de trabajo previo al inicio de las actividades de construcción, además se deberá implementar un plan de control de tránsito en obra de acuerdo al programa de trabajo definido para el proyecto. Todo el personal que trabaje en la obra así como los visitantes deberá estar identificados con la vestimenta obligatoria y contar con los implementos de seguridad ocupacional correspondientes. Se deberán acatar las disposiciones indicadas en el Manual Técnico de Dispositivos de Seguridad y Control Temporal de Tránsito para la ejecución de Trabajos en las Vías del MOPT, oficializado mediante Decreto Ejecutivo No. 38799-MOPT.

b) Equipo requerido:

- a. Motoniveladora: se utiliza para las labores de escarificación de la rasante existente, para el proceso de mezclado del material granular con la emulsión de rompimiento lento, la distribución del material en la capa requerida y conformación final de la calzada previo a la compactación.
- b. Trituradora: equipo alternativo a la motoniveladora para escarificar la rasante existente, sobre todo cuando se trata de material granular de sobretamaño o una capa granular estabilizada. Además, permite realizar la trituración del material en partículas de tamaño adecuado para el proceso de estabilización con emulsión de rompimiento lento. La trituradora puede además funcionar para mejorar un material existente con otro material granular al mezclarlos en sitio.

Informe LM-PI-GM-INF-04-2016	Fecha de emisión: 24 de octubre de 2016	Página 46 de 56
------------------------------	---	-----------------

- c. Tanque distribuidor de emulsión: tanque de emulsión autopropulsado de 1500 litros de capacidad con el correspondiente sistema de calentamiento y dosificación con aspersores ajustables a una ancho mínimo total de 4.6 m. Debe contar con sistema de control con tacómetro, medidor de presión de rocío (manómetro), dispositivo indicador para medir el volumen aplicado sobre el ancho con una precisión de  $\pm 0.08L/m^2$ . Debe contar con termómetro para medir la temperatura del tanque.
  - d. Tanque distribuidor de agua: tanque autopropulsado para la distribución de agua requerida para alcanzar la humedad de compactación requerida.
  - e. Compactador vibratorio de rodillo liso: se requiere para la compactación de la capa estabilizada con emulsión asfáltica de rompimiento lento. Se requiere una compactador de rodillo liso delantero y llanta de hule trasera o preferiblemente una compactadora de doble rodillo liso de al menos 7-10 ton.
  - f. Compactador llanta de hule: autopropulsado con una ancho mínimo de compactación de 1.5 m. Preso bruto ajustable de 3.5 a 6.5 kg/mm de ancho de compactación. Presión mínima de contacto de 550kPa.
  - g. Distribuidor de agregado: principalmente para las labores de distribución de agregado o gravilla para impermeabilización superficial. Debe ser autopropulsado. Mínimo de 4 llantas de hule en 2 ejes. Debe tener el sistema de control para depositar el agregado de manera uniforme sobre el ancho total del riego de emulsión asfáltica con una precisión de 10% de peso de la tasa de dosificación de diseño.
- c) Tramo de prueba:

Se debe construir un tramo de prueba para la calibración de la fórmula de trabajo. Se definirá el riego de emulsión asfáltica, riego de agua, número de pasadas de compactador de rodillo y número de pasadas de compactador llanta de hule para cumplir con los requerimientos de la capa estabilizada con emulsión asfáltica de rompimiento lento y conformación de la calzada según indicación del cartel, especificaciones especiales y sección transversal del proyecto. La longitud mínima del tramo de prueba será de 100 m.

- d) Escarificación del material granular:

En todo momento se deberá garantizar que se cumple con los niveles y conformación y compactación de la subrasante, calzada y cunetas de acuerdo a lo indicado en el cartel, especificaciones especiales y sección transversal del proyecto.

Se utilizará una motoniveladora equipada con rippers en su parte posterior para escarificar el material a mezclar con emulsión asfáltica. El espesor a escarificar estará indicado en la sección transversal del proyecto, pero no será menor a 50 mm. Se deberán eliminar las

Informe LM-PI-GM-INF-04-2016	Fecha de emisión: 24 de octubre de 2016	Página 47 de 56
------------------------------	---	-----------------

partículas de sobre-tamaño mayor a 50 mm y otros materiales inadecuados que se identifiquen en la capa.

e) Homogenización y distribución:

Luego de la eliminación de sobre-tamaños, el material granular se distribuirá suelto sobre la calzada por medio de la motoniveladora para ser homogenizado. Además, se realizará la verificación de la humedad del material previo al riego de emulsión asfáltica para determinar si es necesario realizar ajustes hasta obtener  $\pm 2\%$  de la humedad óptima de compactación de acuerdo al diseño de mezcla.

f) Mezcla en sitio y tendido con motoniveladora:

Una vez homogenizado el material granular se mezclará con la emulsión asfáltica de rompimiento lento por medio de la motoniveladora de la siguiente manera:

- Utilizando la cuchilla de la motoniveladora se procederá a mover el material de un lado a otro, conformando un cordón o terraplén aplanado en su parte superior sobre el cual se distribuye la emulsión de acuerdo a la dosificación indicada en el diseño de mezcla por medio del tanque distribuidor de emulsión.
- Luego la motoniveladora moverá el material con emulsión, por medio de la cuchilla en posición de mezclado hasta formar otro cordón o terraplén en el otro lado de la calzada. Se repite este procedimiento dos o tres veces según se requiera añadiendo cada vez un riego de emulsión asfáltica de acuerdo a la dosificación definida en el paño de prueba.
- Durante el proceso de mezclado debe evitarse que la cuchilla de la motoniveladora recoja mayor cantidad de material que el que fue escarificado así como evitar perder material que se segregue hacia los espaldones o cunetas.
- Se deberá verificar visualmente la homogeneidad de la mezcla y el recubrimiento de las partículas del material granular con emulsión asfáltica. Si se observa segregación del material granular o falta de recubrimiento se deberá repetir el proceso para garantizar una mezcla homogénea y con mayor recubrimiento de partículas.
- Finalmente, se procederá a extender y distribuir la mezcla homogénea de material granular y emulsión de rompimiento lento en toda la calzada.
- Previo a compactar se deberá verificar la humedad para determinar si se procede inmediatamente o si se permite la evaporación de fluidos al aire hasta alcanzar la humedad óptima de compactación. No agregar agua luego de aplicada la emulsión.

g) Compactación y acabado:

Luego de extendido se deberá compactar el material granular estabilizado con emulsión asfáltica de rompimiento lento de acuerdo a lo siguiente:

Informe LM-PI-GM-INF-04-2016	Fecha de emisión: 24 de octubre de 2016	Página 48 de 56
------------------------------	---	-----------------

- Se deberá utilizar con un compactador de rodillo vibratorio para suelos y materiales granulares de al menos 7-10 ton de peso estático.
- Iniciar la compactación de la capa de material granular mezclado con emulsión asfáltica aplicando vibración con altas frecuencias para promover la compactación a mayores profundidades.
- El patrón de compactación en la calzada deberá iniciar desde los bordes hacia el centro de la calzada, poniendo atención a zonas sueltas por donde no ha transitado la maquinaria, por ejemplo entre las huellas de la motoniveladora.
- La velocidad de compactación no debe exceder los 3km/h.
- La cantidad de pasadas debe calibrarse de acuerdo al espesor de la capa de material a compactar y a la formula de trabajo que se defina en el paño de prueba. Al menos se deben realizar dos pasadas del compactador vibratorio.
- Las zonas cercanas a cordones de caño, cabezales de alcantarilla, muros y otras que no sean de fácil acceso para el compactador de rodillo vibratorio, se compactarán con compactador de impacto (plancha vibratoria o brincón).
- Se deberá verificar que la capa compactada alcance una densidad igual o mayor al 95% de la densidad máxima obtenida por medio del ensayo de Proctor Modificado (AASHTO T180, método D). Esto se verificará en campo por medio de los métodos nucleares (AASHTO T238 y AASHTO T239) u otros métodos aprobados.
- La capa superficial de la capa ya compactada será cortada por la niveladora a los niveles requeridos para obtener el bombeo indicado en la sección transversal del camino.
- Luego se deberá realizar una pasada final del compactador vibratorio aplicando una vibración de baja amplitud para que en la parte superior de la capa se forme una superficie sellada.
- Finalmente se dará acabado por medio de una pasada de compactador llanta de hule.

h) Curado:

Luego de terminada la sección de camino a estabilizar con emulsión asfáltica de rompimiento lento, no se deberá abrir al tránsito vehicular inmediatamente para evitar daños prematuros. Se requiere de un período de curado para favorecer el rompimiento de la emulsión que permitirá la generación de cohesión entre las partículas del material estabilizado. Esto ocurre en algunas horas en la superficie, pero tarda más tiempo en el espesor de la capa. Se deberá entonces mantener la regulación de tránsito al menos durante las siguientes 24 horas luego de completadas las actividades de estabilización.

i) Tratamiento superficial bituminoso:

Luego de transcurridas al menos 24 horas de compactada y terminada la capa de material estabilizado con emulsión asfáltica de rompimiento lento se procederá a colocar un tratamiento superficial asfáltico que permita impermeabilizar la capa granular estabilizada con emulsión y reducir el deterioro causado por el tránsito vehicular.

Informe LM-PI-GM-INF-04-2016	Fecha de emisión: 24 de octubre de 2016	Página 49 de 56
------------------------------	---	-----------------

Se podrá aplicar un tratamiento superficial simple o de capa múltiple (doble o triple), de acuerdo a lo que se indique en el diseño y documentos del proyecto. Se aplicará lo indicado en el CR-2010, Sección 411.11 para tratamientos superficiales simples y Sección 411.12 para tratamientos superficiales múltiples.

Se recomienda como estándar mínimo la aplicación de un tratamiento superficial simple de acuerdo a lo siguiente:

- Humedecer la superficie de la capa de material granular estabilizado con emulsión de rompimiento lento previo a la aplicación del tratamiento superficial. También se deberá asegurar que la superficie esté libre de material suelto u otro material extraño.
- Previo a la aplicación del tratamiento superficial, reparar todo tipo de deterioros presentes en la superficie estabilizada con emulsión de rompimiento lento.
- Utilizar agregado designación E o F de acuerdo a los establecido en la Tabla 703-11 del CR-2010.
- Se recomienda una dosificación de agregado de 8 a 11 kg/m<sup>2</sup> si se utiliza designación E y de 5 a 8 kg/m<sup>2</sup> si se utiliza designación F, como se indica en la Tabla 411-3 del CR-2010. Esto será calibrado en el paño de prueba.
- Se recomienda una tasa de aspersión de emulsión asfáltica para el tratamiento superficial de 0.7 a 1.0 l/m<sup>2</sup> si se utiliza designación E y de 0.5 a 0.8 si se utiliza designación F, como se indica en la Tabla 411-3 del CR-2010. Esto será calibrado en el paño de prueba.

## 9. CONTROL DE CALIDAD

El marco general de control de calidad óptimo que se recomienda para la construcción de un camino con sello asfáltico integrado con emulsión de rompimiento lento es el siguiente:

### 9.1 Agregado para sello asfáltico integrado.

Se recomienda que el agregado a utilizar para la construcción de una capa de sello asfáltico integrado con emulsión de rompimiento lento sea material pétreo, de partículas granulares, limpio, libre de arcillas, contaminación orgánica u otro elemento indeseable.

Se utilizará material granular quebrado en al menos 50%. El agregado grueso (retenido en malla No.4) debe estar compuesto por partículas resistentes, durables, constituidas de fragmentos de roca y grava. Se debe evitar el uso de materiales lajosos o que se quiebren con los ciclos de humedad-secado. El agregado fino (pasando malla No.4) deberá estar compuesto por arenas naturales o trituradas. Las recomendaciones de graduación y plasticidad son las siguientes:

Informe LM-PI-GM-INF-04-2016	Fecha de emisión: 24 de octubre de 2016	Página 50 de 56
------------------------------	---	-----------------

- a) Granulometría: se recomienda el uso de materiales bien graduados que cumplan con lo indicado en las Tablas 311.02 y/o 703-6 del CR-2010 para capas granulares de rodadura y bases/subbases granulares respectivamente.

Preferiblemente se recomienda el uso de los materiales para capas de rodadura tipo TM40-b, TM40c o Base Granular Graduación C.

- b) Plasticidad: la utilización de materiales granulares con baja plasticidad es importante para lograr buena cohesión y recubrimiento con la emulsión de rompimiento lento. Por lo tanto, se recomienda ajustarse a un material con Límite Líquido (LL) menor a 35 y un Índice de Plasticidad (IP) entre 4 y 12.

Se recomienda aplicar un esquema similar de control de calidad al correspondiente a materiales como bases o subbases granulares (Tabla 301.1 CR-2010) de acuerdo a lo indicado en la Tabla 21.

**Tabla 21.** Requisitos de muestreo y ensayo para material granular para sello asfáltico integrado con emulsión de rompimiento lento.

Material	Características	Especificación o norma aplicable	Frecuencia de ensayos
Calidad de la fuente de agregados	<ul style="list-style-type: none"> <li>Abrasión LA</li> <li>Caras fracturadas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>AASHTO T96</li> <li>ASTM D5821</li> </ul>	1 por fuente de agregados
Material granular para sello integrado con emulsión asfáltica	<ul style="list-style-type: none"> <li>Graduación</li> <li>Límite líquido</li> <li>Índice de plasticidad</li> <li>Humedad-densidad (densidad máxima)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>AASHTO T27 y T11</li> <li>AASHTO T89</li> <li>ASSHTO T90</li> <li>AASHTO T180</li> </ul>	1 cada 1000 Tm
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Densidad y compactación en sitio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>AASHTO T310 u otro procedimiento aprobado.</li> </ul>	1 cada 500 Tm

## 9.2 Emulsión asfáltica de rompimiento lento para sello asfáltico integrado.

Se utilizará emulsión asfáltica de rompimiento lento ya sea catiónica u aniónica, de forma tal que se fomente la interacción electrostática entre agregado y emulsión. Esto deberá ser recomendado por el laboratorio en el diseño de mezcla correspondiente. Se deberá contar con el certificado del fabricante de la emulsión de rompimiento lento en el cual se debe especificar lo indicado en la Sección 702.03 del CR-2010, Tabla 702-05 y 702-06 para emulsiones aniónicas y catiónicas



respectivamente. Se deberá contar con el certificado del fabricante al menos para cada camión cisterna entregado en el proyecto o por día de trabajo.

### 9.3 Diseño de mezcla para sello asfáltico integrado

Se recomienda que el diseño de mezcla de material granular y emulsión de rompimiento lento sea verificada y controlada por medio de lo indicado en la Tabla 22.

**Tabla 22.** Requisitos de control para el diseño de mezcla para sello integrado con emulsión de rompimiento lento.

Material	Características	Especificación o norma aplicable	Frecuencia de ensayos
Diseño de mezcla de agregado con emulsión de rompimiento lento	<ul style="list-style-type: none"> <li>Densidad-humedad</li> <li>Dosificación de emulsión asfáltica de rompimiento lento</li> <li>Dosificación de aditivos mejoradores de adherencia (cemento o cal)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Procedimiento de Diseño de Mezcla, Guía para el Diseño de Materiales Estabilizados con Emulsión y Ensayos de Control de Calidad. (Lanamme.UCR, 2014).</li> <li>Manual de reciclado en Frío. (Wirtgen 2012)</li> </ul>	1 por fuente de agregados

### 9.4 Capa de sello asfáltico integrado

Se recomienda que la calidad de la capa de sello asfáltico integrado con emulsión de rompimiento lento se controle como se indica en la Tabla 23.

### 9.5 Agregado y emulsión asfáltica de rompimiento rápido para tratamiento superficial

Se recomienda cumplir con las especificaciones de agregado y emulsión asfáltica de rompimiento rápido para tratamiento superficial simple o múltiple (doble o triple) indicadas en la Sección 411 del CR-2010.

**Tabla 23.** Requisitos de control para la capa de sello asfáltico integrado con emulsión de rompimiento lento.

<b>Material</b>	<b>Características</b>	<b>Especificación o norma aplicable</b>	<b>Frecuencia de ensayos</b>
Tasa de riego de emulsión de rompimiento lento	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se deberá cumplir con la dosificación indicada por el diseño de mezcla realizado en el laboratorio y calibrado en el paño de prueba con tolerancia de <math>\pm 0.15</math> L/m<sup>2</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Medición de dosificación por medio de papel protector de manera similar a lo indicado en la sección 411.08 del CR-2010.</li> </ul>	1 por tanque de emulsión aportado al sitio de obras o 1 por día de trabajo
Humedad densidad (compactación)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se deberá cumplir con la humedad óptima de compactación <math>\pm 2\%</math>.</li> <li>Se deberá cumplir con una compactación 95% de Proctor Modificado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>AASHTO T310 u otro procedimiento aprobado.</li> </ul>	1 cada 2500 m <sup>2</sup> o 500 m lineales de calzada
Conformación de la calzada (pendiente transversal)	<ul style="list-style-type: none"> <li>De no indicarse diferente en os documento del proyecto el bombeo será de entre 4% y 6%.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Medición manual en sitio o con inclinómetro aprobado.</li> </ul>	Se medirá cada 20 m en secciones rectas el bombeo y en secciones curvas se medirá cada 10 m el peralte.

## 10. REFERENCIAS

Arias, E., Sequeira, W., Aguiar, J. P., Arriola, R., & Loría, L. G. (2014). *Reporte especial LM-PI-GM-INF-22-14, Recomendaciones Técnicas para el Diseño Estructural de Pavimentos Flexibles con la Incorporación de Criterios Mecánico-Empíricos*. Universidad de Costa Rica, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), San José.

Asphalt Academy c/o CSIR Built Environment. (2009). *Technical Guide: Bitumenstabilised Materials TG2: A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials* (Vol. 2). Pretoria, Sudáfrica: Asphalt Academy.

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

Barnes, D., & Connor, B. (2014). *Managing Dust on Unpaved Roads and Airports*. Alaska University Transportation Center, University of Alaska Fairbanks & Alaska Department of Transportation, Fairbanks, AK.

Beaulieu, L., Pierre, P., Juneau, S., & Lérege, G. (2011). *Maintenance Guide for Unpaved Roads, A Selection Method for Dust Suppressants and Stabilizers*. FP Innovations y Universite LAVAL.

Bolander, P., & Yamada, A. (1999). *Dust Palliative Selection and Application Guide*. United States Department of Agriculture, Forest Servicem Technology & Development Program . San Dimas, California: San Dimas Technology and Development Center.

Del van Melus, M. A., & Bardesi, A. (1991). *Manual de Pavimentos Asfálticos para Vías de Baja Intensidad de Tráfico* . Madrid: Espas.

Dirección de Ingeniería de Tránsito, Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT). (2015). *Manual para Técnico de Dispositivos de Seguridad y Control Temporal para la ejecución de Trabajos en las Vías*. San José, Costa Rica.

Erasmus-Liebennberg, J. J. (2003). *A Structural Design Procedure For Emulsion Treated Pavemente Layers*. University of Pretoria, Faculty of Engineering, Built Environment and Information Technology, Pretoria.

Informe LM-PI-GM-INF-04-2016	Fecha de emisión: 24 de octubre de 2016	Página 54 de 56
------------------------------	---	-----------------

Jones, D., & Surdahl, R. (2014). *A New Procedure for Selecting Chemical Treatments for Unpaved Roads*. University of California Davis, University of California Pavement Research Center, Department of Civil and Environmental Engineering, Davis, CA.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones de la República del Perú, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles (DGCF). (2005). *Manual para el Diseño de Caminos No Pavimentados de Bajo Volumen de Tránsito*. Lima.

National Cooperative Highway Research Board (NCHRP). (2004). *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Part 4. Low Volume Roads*. Champaign, Illinois: ARA, Inc., ERES Consultants Division.

Overseas Centre, Transport Research laboratory. (1993). *A Guide to the Structural Design of Bitumen-Surfaced Roads in Tropical and Subtropical Countries*. Crowthorne, Berkshire, UK: Road Note 31.

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

Thenoux, G., Halles, F., Gonzalez, A., & Barrera, E. (2002). *Guía de Diseño estructural de Pavimentos para Caminos de Bajo Volumen de Tránsito*. Chile: Centro Ingeniería e Investigación Vial, DICTUC S.A., Escuela de Ingeniería Pontificia Universidad de Chile y Ministerio de Obras Públicas de Chile.

Ulloa, A., & Munera, J. C. (2014). *Procedimiento de Diseño de Mezcla, Guía para el Diseño de Materiales Estabilizados con Emulsión y Ensayos de Control de Calidad*. Universidad de Costa Rica, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), San José.

Wirtgen GmbH. (2004). *Manual de Reciclado en Frío* (2 ed.). Windhagen, Alemania: Wirtgen GmbH.

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

Informe LM-PI-GM-INF-04-2016	Fecha de emisión: 24 de octubre de 2016	Página 55 de 56
------------------------------	---	-----------------