

METODOLOGÍA DE DISEÑO EN LABORATORIO PARA MATERIALES GRANULARES ESTABILIZADOS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA

Fabricio Leiva Villacorta¹, Juan Carlos Múnera Miranda²; Pablo Torres Linares³, Fabián Elizondo Arrieta⁴, José Pablo Aguiar Moya⁵, Luis Guillermo Loría Salazar⁶

- ¹ Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales LanammeUCR, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. fabricio.leiva@ucr.ac.cr
- ² Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales LanammeUCR, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. juan.muneramiranda@ucr.ac.cr
- ³ Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales LanammeUCR, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. pablo.torreslinares@ucr.ac.com
- ⁴ Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales LanammeUCR, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. fabian.elizondo@ucr.ac.cr
- ⁵ Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales LanammeUCR, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. jose.aguiar@ucr.ac.cr
- ⁶ Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales LanammeUCR, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. luis.loriasalazar@ucr.ac.cr

Resumen

Una condición necesaria para garantizar un buen desempeño y eficiencia de los materiales componentes de estructuras de pavimento es contar con procedimientos de laboratorio para el diseño y evaluación del desempeño que logren ser representativos de las condiciones reales a las que será sometido el material. Así mismo el mejoramiento de materiales de baja calidad o subproducto de procesos de intervenciones en carreteras para ser reutilizados y reciclados toma cada vez más vigencia por razones ambientales y económicas al escasear las fuentes de materiales.

Recientemente en Costa Rica se ha valorado el uso de emulsiones asfálticas para la estabilización de materiales granulares y capas asfálticas recicladas como alternativa de mejoramiento y rehabilitación en rutas de bajo volumen de tránsito. Uno de los retos para la correcta implementación de esta técnica es el desarrollar una metodología de diseño y de especificaciones para el aseguramiento de la calidad que discrimine acertadamente los materiales que tendrán un comportamiento adecuado de los que no, tomando en cuenta las condiciones climáticas propias del país, caracterizados por humedad y precipitaciones altas.

La siguiente investigación evalúa el tipo de compactación, distintas condiciones de curado y condicionamiento de los especímenes para determinar su incidencia en el desempeño a escala de laboratorio. Mediante ensayos de resistencia retenida a la tensión indirecta, módulo resiliente y pista a escala mediante la Rueda de Hamburgo, se propone una metodología de diseño que permita discriminar mejor el desempeño que se tendrá en campo. Igualmente se valora dentro del esquema propuesto el efecto que tiene la adición de cemento y cal como agentes mejoradores de la adhesión y reductores de la susceptibilidad al daño por humedad.

Palabras Clave: emulsiones asfálticas, estabilización, mejoradores de adherencia.

1 Introducción

Los costos en la explotación de materiales pétreos y su transporte han promovido el desarrollo de técnicas de reciclado y estabilización para poder utilizar los recursos localmente disponibles. En muchas ocasiones, las resistencias y otras propiedades requeridas pueden obtenerse de un

material local “marginal”, a través de la adición de pequeñas cantidades de agentes estabilizadores a un costo relativamente bajo.

La implementación de materiales granulares estabilizados con emulsión asfáltica con la combinación de cantidades pequeñas de cemento o cal (menor a 1% para cemento y menor a 1,5% para cal) cuando es requerido, tiene la ventaja de incrementar la cohesión y reducir la susceptibilidad al daño por humedad, de manera significativa.

En la actualidad Costa Rica tiene una experiencia apenas incipiente en el uso de este tipo de agente estabilizador. Una de las principales causas del uso tan limitado de esta técnica es que se carece de una guía de diseño y de especificaciones para aseguramiento de su calidad. Debido a la anterior problemática, el LanammeUCR ha iniciado un estudio con el objetivo de proponer una guía de diseño para este tipo de materiales evaluado en una primera fase, pavimento asfáltico reciclado como fuente de material a estabilizar. Se realizaron diseños en laboratorio variando el curado y la compactación, así como también el efecto que tiene la incorporación de cal o cemento como promotores de adherencia. Para evaluar la resistencia al daño por humedad se realizaron ensayos de resistencia a la tensión indirecta, así como pista a escala mediante la Rueda de Hamburgo. También se realizó el ensayo de módulo resiliente para evaluar la rigidez de la mezcla.

2 Marco teórico

2.1 Definición y características

Los materiales estabilizados con bitumen (MEB), son materiales para pavimentos tratados con asfalto espumado o emulsión asfáltica. Los materiales estabilizados son generalmente, materiales granulares, materiales tratados previamente con cemento, ó capas de pavimento asfáltico reciclado (RAP) [1]. Los materiales reciclados son usualmente mezclados con capas subyacentes, y estabilizados para formar una nueva base o subbase.

El comportamiento de los MEB es similar a la de los materiales granulares sin estabilizar, pero con un significativo aumento de la cohesión y reducción de la susceptibilidad al daño por humedad. El ángulo de fricción interna del material tratado es típicamente similar al del material sin tratar. 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 en forma de cemento o cal hidratada. Aparte de aumentar la resistencia retenida en condiciones de saturación, el filler activo ayuda a dispersar el bitumen. El contenido de filler no se recomienda que exceda el 1% para cemento y 1,5 % para cal hidratada. Si se coloca más de estos porcentajes recomendados, la estabilización con bitumen pierde las propiedades que se buscan inicialmente, y se convierte en otro tipo de estabilización.

Existen dos mecanismos fundamentales de falla en los materiales estabilizados con asfalto: Deformación permanente y daño por humedad [1].

El curado de los MEB es el proceso donde la mezcla pierde humedad a través de la evaporación, repulsión de carga de partícula y la presión de poro inducida por trayectorias de flujo. La reducción del contenido de humedad provee un aumento en la rigidez que se traduce en un incremento de la resistencia a tensión y a compresión. Cuanto menor sea el grado de saturación del MEB, más alta es la resistencia a la deformación permanente [2].

2.2 Materiales para la estabilización con emulsión asfáltica

Los tratamientos con emulsión asfáltica son adecuados para la estabilización de arenas, gravas naturales, roca triturada y RAP [3]. El diseño utilizando emulsión asfáltica es aplicable en los casos donde el material no es excesivamente fino. Específicamente, la cantidad de material pasando el tamiz N° 200 no debe exceder el 20% y el índice de plasticidad no debe ser mayor a 10 [4]. El análisis granulométrico es un buen indicador de la aplicabilidad del tratamiento, en la

Figura 1 muestra las graduaciones recomendadas para los materiales tratados con emulsión asfáltica (líneas rojas) [3].

Para la estabilización de suelos típicamente se utilizan emulsiones de rompimiento lento (catiónica o aniónica) [5]. Estas emulsiones tienen tiempos largos de trabajabilidad para asegurar una buena dispersión y formuladas para la estabilidad de la mezcla [6].

2.3 Contenido de líquidos totales

La cantidad de agua de mezclado requerida varía con cada emulsión. El agua requerida para la máxima dispersión del asfalto residual en la emulsión varía dependiendo del tipo y el contenido de emulsión [7] y del tipo y configuración granulométrica del agregado. El agua de mezclado y el agua contenida en la emulsión trabajan en conjunto para ayudar en la compactación del espécimen [8]. Cuando se trabaja con emulsiones asfálticas, el Contenido Total de Fluido es utilizado en lugar del Contenido de Humedad al momento de definir la relación humedad/densidad. La densidad máxima se alcanza con el Contenido Óptimo de Fluido Total, que es la combinación del agua de compactación y emulsión asfáltica en la mezcla [3].

2.4 Metodologías de Diseño

Asphalt Academy (2009) presenta una guía de diseño y construcción para materiales estabilizados con emulsión asfáltica y asfalto espumado. Esta guía da una serie de pautas a la hora de seleccionar los materiales adecuados para la estabilización con bitumen, como lo es la granulometría y el índice de plasticidad. También considera la adición de cemento o cal en cantidades inferiores al 1,5 % para mejorar el desempeño de la mezcla. Para el diseño en laboratorio, establece tres niveles de diseño, según las cargas de tránsito a las que va ser expuesto el pavimento. En laboratorio se realizan ensayos de densidad-humedad (Próctor) para determinar el contenido óptimo de fluidos. Para el nivel 1, se elaboran especímenes por medio de compactación Marshall a diferentes porcentajes de emulsión asfáltica, se curan, se realiza la volumetría y por último se hace el ensayo de resistencia a la tensión diametral retenida al daño inducido por humedad, para evaluar la adherencia entre el asfalto y el agregado en condiciones de saturación y determinar un contenido óptimo de emulsión. Para el nivel 2, se cambia el tipo de compactación Marshall a compactación vibratoria y se cambian las condiciones de curado, en esta condición las pastillas llegan a una condición de humedad de equilibrio, que corresponde a la humedad que tendría la mezcla en un periodo de 6 meses después de su colocación en campo y que corresponde a un condicionamiento más crítico que simula mejor las condiciones de humedad de precipitación a la que podría estar expuesta la base. Se realiza el ensayo de ITS. En el nivel 3, se hace ensayo de triaxial con las condiciones de compactación y curado del nivel 2 para evaluar la resistencia al cortante y al daño por humedad [1].

Pennsylvania Department of Transportation (2012) elabora una guía de diseño y construcción para bases estabilizadas con emulsión o asfalto espumado utilizando materiales reciclados en frío (Full Depth Reclamation). Esta guía en lo que concierne al diseño en laboratorio, establece un contenido de finos e índice de plasticidad máximo. Define una granulometría y equivalente de arena adecuado para el material reciclado. Indica la selección de un contenido óptimo de humedad según el ensayo de relación densidad-humedad (Próctor modificado) y el contenido de finos. Elabora especímenes por medio de compactación giratoria. Hace volumetría sobre especímenes compactados y sueltos. Realiza ensayos resistencia a la tensión indirecta sobre especímenes acondicionados y sin acondicionar, módulo resiliente, cohesión a tiempo corto (short term strength), desprendimiento de agregado (raveling), y agrietamiento térmico (IDT) a diferentes contenidos de emulsión. Establece un contenido óptimo de emulsión asfáltica según el cumplimiento de especificaciones mínimas de los ensayos antes mencionados [4].

2.5 Deformación agravada por el daño por humedad

La condición de deformación agravada por el daño por humedad se puede evaluar por medio de equipos como el Analizador de Pavimentos (APA). Mallick (2002) evaluó esta condición en mezclas sin y con filler activo aplicando una presión de 690 kPa por 8000 ciclos, y posteriormente midiendo la deformación permanente en los especímenes. Determinó que la incorporación de aditivos como cal o cemento, disminuye la deformación permanente en condiciones de saturación. Observó que al inicio de los ciclos, los finos ricos en asfalto en la superficie comenzaban a desnudarse y posteriormente las partículas más gruesas se desprendían generando el ahuellamiento. Concluyó que entre mayor sea el desnudamiento más profundo es el ahuellamiento. Obtuvo el mejor desempeño con mezclas con emulsión y cal, luego en mezclas con emulsión y cemento, y de último en mezclas con emulsión y sin filler activo [8].

2.6 Condiciones climáticas de Costa Rica a considerar en el diseño

En Costa Rica factores como la temperatura y la precipitación (que finalmente se traduce como humedad del suelo) causan el deterioro de las estructuras de pavimento. El factor de temperatura afecta directamente a las capas de rodamiento, y el factor de humedad afecta directamente a las capas inferiores conformadas de suelo como material de construcción. No obstante el daño en capas inferiores genera daño de la superficie de rodamiento, de ahí que un problema de humedad también está asociado directamente con problemas a la superficie, aunque técnicamente no se involucre en el diseño de la carpeta de rodamiento [9]. Orozco (2007) definió para Costa Rica 16 regiones climáticas según elevaciones (lo cual caracteriza los regímenes de temperaturas), la precipitación anual, los días de lluvia, el régimen estacional entre período seco y húmedo, y otras. Según esta investigación existen zonas con estación lluviosa que van de los 5, 8 y hasta 11 meses del año; con época de transición que va de 1 a 2 meses; y con época seca que va de los 0, 3 y hasta los 5 meses. Esta situación obliga a poner especial atención a las propiedades y requerimientos que deben especificarse en relación a la resistencia al daño por humedad de las MEB.

3 Objetivo

Proponer una metodología de diseño en laboratorio para estabilización de bases granulares con emulsión asfáltica, analizando su susceptibilidad al daño por humedad, la deformación permanente y su rigidez, en condiciones de curado y compactación diferentes.

4 Materiales utilizados

Para iniciar la investigación se muestreó material de tipo RAP para ser estabilizado y se realizó la caracterización con los ensayos básicos para suelos: granulometría [10], índice plasticidad [11] [12] y relación densidad-humedad (Próctor modificado) [13].

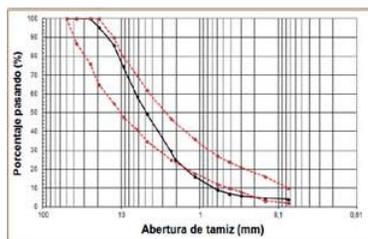


Figura 1. Curva granulométrica de RAP

Se determinó que el material no posee plasticidad. Se obtuvo una densidad máxima seca de 1949,1 kg/m³ y un porcentaje óptimo de humedad de 8,0%.

Se utilizó una emulsión asfáltica con características expuestas en la Tabla 1.

Tabla 1. Caracterización de emulsión asfáltica CSS-1h [14] [15]

Método de ensayo	Norma	Resultado
Estabilidad a 24 horas	AASHTO 59	0,7%
Residuo asfáltico		57%
Malla N°20		0,1%
Viscosidad Saybol Furol		16 s
Penetración (residuo)	AASHTO T 49	59

5 Descripción de métodos de ensayo

La primera fase del estudio consistió en evaluar el daño por humedad variando el tipo de curado en los especímenes compactados:

-Curado A: 72 horas a 40°C sin sellar [1].

-Curado B: 26 horas a 30°C sin sellar y 48 horas a 40°C sellados con bolsa plástica (cada 24 horas se remueve la humedad que se deposita en las bolsas) [1].

-Curado C: 24 horas en molde a temperatura ambiente y 48 horas a 40°C sellados con bolsa plástica (cada 24 horas se remueve la humedad que se deposita en las bolsas).

Se hicieron 3 diseños para el curado A y B: 0% filler activo, 1,5% de cal, y 1,0% de cemento. En cada diseño se utilizaron los mismos porcentajes de asfalto residual en la emulsión de 1,2%, 1,7%, 2,3% y 2,9%. Los especímenes se compactaron con el 100% del óptimo de humedad del Próctor tomando en cuenta el agua en la emulsión y la humedad natural del material. Se utilizó compactación Marshall con 75 golpes por cara. Se compactaron 6 especímenes para cada porcentaje de emulsión. Después del curado se midieron los especímenes (altura y diámetro) y se realizó la gravedad específica bruta seca [16]. Adicionalmente con la misma dosificación de las pastillas se mezclaron máximas teóricas para obtener el porcentaje de vacíos. Las 6 pastillas se dividieron en 2 grupos: sin y con acondicionamiento. El acondicionamiento contempló la saturación de las pastillas en bomba de vacío hasta un 70%-80% de saturación y la sumersión en un baño con agua a 25°C por 24 horas. Seguidamente del acondicionamiento se fallaron las pastillas sin y con acondicionamiento a la tensión indirecta [17].

Para el curado C se hizo solamente un solo porcentaje de asfalto residual de 1,7% sin y con filler activo. También se analizó la influencia del tiempo de sumersión de las pastillas fallando a la tensión indirecta a 1, 7, 14 y 28 días.

En una segunda fase del estudio se analizó el daño por humedad variando el tipo de compactación: Marshall y giratoria Superpave. La compactación Marshall se hizo a 75 golpes [1] y la compactación giratoria Superpave a 30 giros, 600 kPa y un ángulo de 1,25° [4]. Se hicieron 3 diseños con el curado B: 0% filler activo, 1,5% de cal, y 1,0% de cemento. En cada diseño se utilizaron los mismos porcentajes de asfalto residual en la emulsión de 1,2%, 1,7%, 2,3% y 2,9%. Se realizaron los mismos ensayos que en la primera fase.

Para evaluar la rigidez de este tipo de material estabilizado se hizo el ensayo de módulo resiliente [18] a 25°C en especímenes compactados y curados según la segunda fase del estudio. Se evaluaron condiciones sin y con filler activo a diferentes porcentajes de asfalto residual.

Para valorar el daño por humedad y la deformación permanente en condiciones de deterioro acelerado se ensayaron especímenes en la Rueda de Hamburgo [19] hasta un máximo de 20000 ciclos a una temperatura de 50°C. El criterio de falla por deformación permanente fue de 20 mm. Se evaluaron condiciones sin y con filler activo a diferentes porcentajes de asfalto residual.

6 Resultados y análisis

6.1 Análisis del curado

En la Figura 2 se puede observar la variación de los parámetros obtenidos en el ensayo de tensión indirecta para el curado A y B. Los vacíos tienden a disminuir conforme aumenta el asfalto residual de un 19% a 14 % aproximadamente. En general se observa que para el ITS_{seco}

(tensión indirecta especímenes sin acondicionamiento) hay un aumento conforme incrementa el contenido de asfalto residual hasta cierto punto y después las resistencias empiezan a decaer. Para la curvas de ITS_{acond} (tensión indirecta especímenes con acondicionamiento) la tendencia es ir aumentando y después se estabiliza, esto podría indicar que el aumento en el asfalto residual después de cierto valor ya no incide de manera importante en la resistencia. Para el TSR (resistencia retenida a la tensión indirecta) la tendencia general es ir aumentando conforme aumenta el asfalto residual.

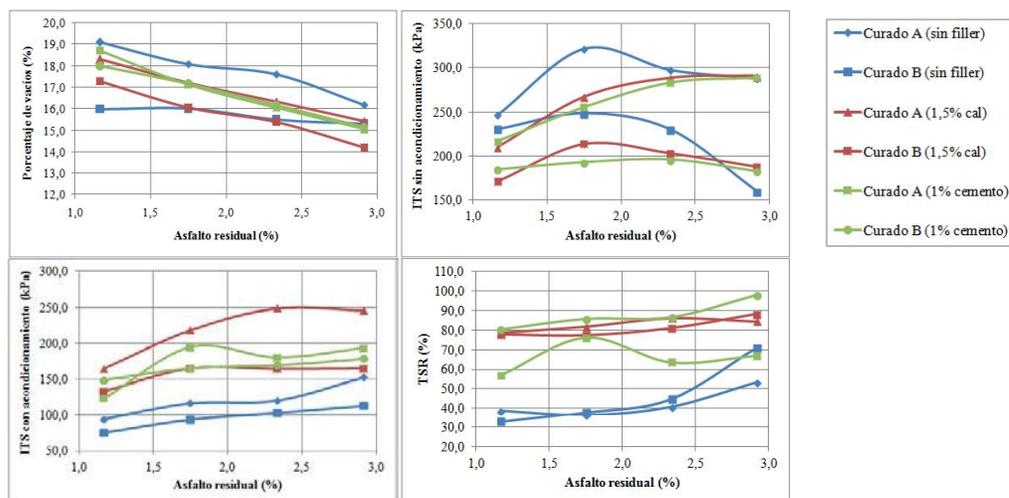


Figura 2. Análisis para curado A y B

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de dos factores con varias muestras por grupo (Tabla 2) para discernir si el tipo de curado y el tipo de filler que se seleccione, tiene una incidencia significativa en los resultados. Adicionalmente, se realizó una comparación entre grupos por medio de la metodología Tukey para un nivel de confianza del 95%.

Los resultados del ANOVA para dos factores revelaron que existe una diferencia significativa ($p_{muestra} < 0,05$) entre curado A y B para las variables de %V, ITS_{seco} , ITS_{acond} , y TSR. También se indica que los valores de ITS_{seco} , ITS_{acond} y TSR se ven afectados de manera significativa ($p_{columna} < 0,05$) por la adición de filler activo, no así el %V ($p_{columna} > 0,05$). Para el curado A se obtuvieron medias más altas que el curado B excepto para en los valores de TSR. Para el ITS_{acond} y TSR de los especímenes con cal y cemento se obtuvieron medias más altas que para los especímenes sin filler activo, siendo la cal superior al cemento, este comportamiento no se dio para el ITS_{seco} . Lo anterior indica que la cal y el cemento aumentan la adherencia y disminuyen el daño por humedad, siendo evidente en al condicionar los especímenes.

Según especificaciones técnicas internacionales [1] se recomienda un ITS_{seco} e ITS_{acond} mínimo de 225 kPa y 100 kPa respectivamente, para el curado A. Para el curado B [1] se recomienda un ITS_{seco} y ITS_{acond} mínimo de 175 kPa y 150 kPa respectivamente. Para ambos curados se cumple con el ITS_{seco} mínimo para la mayoría de puntos de asfalto residual sin y con filler activo. Para el curado A se cumple con el ITS_{acond} mínimo para la mayoría de puntos de asfalto residual sin y con filler activo, sin embargo, para el curado B, sin filler, no se está cumpliendo. Si se fija un TSR mínimo de 70%, las mezclas con curado A y B sin filler no cumplen, esto indica que ambos curados reflejan la necesidad de incorporar del filler activo para mejorar la adherencia. Los resultados anteriores muestran que dependiendo del tipo de curado que se seleccione puede o no cumplir con las resistencias especificadas, y también que el curado B puede favorecer los resultados obtenidos con la cal y el cemento. La elección del curado debe ser acorde a las condiciones esperadas en el campo. Se observa que la mezcla sin filler presenta un daño por humedad importante.

Tabla 2. Análisis de varianza para curado A y B

	ANOVA						Método Tukey			
	Origen variaciones	Sum cuad	GL	Prom cuad	F	Prob p	Tipo	N	Medi a	Agru pado
% V	Curado	33,605	1	33,605	24,82	0,000	Curado A	48	17,11	A
	Filler	4,967	2	2,212	1,63	0,200	Curado B	72	16,03	B
	Interacción	17,533	2	8,767	6,47	0,002	Sin filler	40	16,73	A
	Dentro grupo	154,375	114	1,354			Cemento	40	16,68	A
	Total	210,481	119				Cal	40	16,29	A
ITS _{seco}	Curado	72806	1	72806	74,01	0,000	Curado A	24	271,2	A
	Filler	8969	2	4297	4,37	0,017	Curado B	36	200,1	B
	Interacción	9	2	5	0,00	0,995	Sin filler	20	252,8	A
	Dentro grupo	53124	54	984			Cal	20	228,9	A B
	Total	134909	59				Cemento	20	225,2	B
ITS _{acond}	Curado	14205	1	14205	28,15	0,000	Curado A	24	171,2	A
	Filler	65233	2	33052	65,51	0,000	Curado B	36	139,8	B
	Interacción	7611	2	3805	7,54	0,001	Cal	20	188,3	A
	Dentro grupo	27246	54	505			Cemento	20	169,3	B
	Total	114295	59				Sin filler	20	108,9	C
TSR	Curado	403,5	1	403,5	4,91	0,040	Curado B	12	71,79	A
	Filler	7092,5	2	3546,3	43,12	0,000	Curado A	12	63,59	B
	Interacción	150,1	2	75,0	0,91	0,419	Cal	8	85,23	A
	Dentro grupo	1480,5	18	82,3			Cemento	8	73,49	B
	Total	9126,6	23				Sin filler	8	44,34	C

En la Figura 3 se muestran los resultados que se obtuvieron para el curado C, que es más crítico que los curados A y B. No se logró alcanzar las ITS mínimas con o sin acondicionamiento, esto indica que la mezcla una vez compactada debe tener un tiempo mínimo (humedad relativa baja y temperatura alta) para evacuar la mayor cantidad posible de agua, y también para favorecer el rompimiento de la emulsión. Sin embargo, la incorporación de cal o cemento mejoró el desempeño de la mezcla, aún en estas condiciones, especialmente el cemento, que en condiciones húmedas se beneficiada su hidratación y ganancia de resistencia a edades tempranas. En la Figura 3 también se muestra la variación del ITS_{acond} y el TSR conforme se incrementa el tiempo de saturación del espécimen en agua. Se observa una disminución gradual del TSR hasta un 50% a los 28 días.

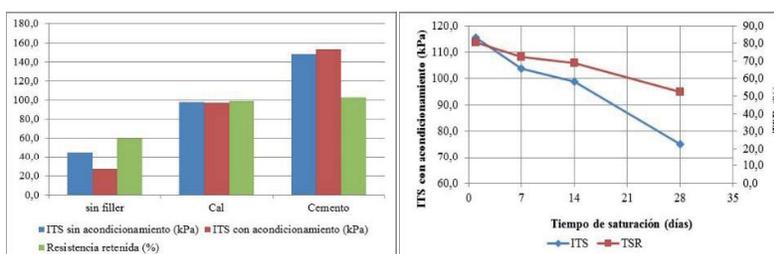


Figura 3. Análisis para curado C y tiempo de saturación

6.2 Análisis de Compactación

En la Figura 5 se puede observar la variación de los parámetros obtenidos en el ensayo de tensión indirecta para la compactación Marshall y Giratoria. Los vacíos tienden a disminuir conforme aumenta el asfalto residual de un 18% a 13% aproximadamente. Se observa que para el ITS_{seco} hay un aumento conforme incrementa el contenido de asfalto residual hasta cierto punto y después las resistencias empiezan a decaer, esto no se cumplió para los diseños con compactador giratorio en el tratamiento con cal y cemento, donde los valores siguen una tendencia al crecimiento. Para la curvas de ITS_{acond} la tendencia es ir aumentando y después se

estabiliza, esto podría indicar que el aumento en el asfalto residual después de cierto valor ya no incide de manera importante en la resistencia, esto no se cumplió de manera importante para el diseño con compactador giratorio, tratamiento con cemento, podría indicar que la humedad de saturación favorece la hidratación del cemento, y por ende su resistencia. Para el TSR la tendencia general es ir aumentando conforme aumenta el asfalto residual, sin embargo, para los diseños con compactador giratorio en el tratamiento con cal y cemento hay una caída en los TSR después de cierto valor de asfalto residual.

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de dos factores con varias muestras por grupo para discernir si la compactación que se escoja tiene una incidencia significativa en los resultados.

Los resultados del ANOVA para dos factores revelaron que existe una diferencia significativa ($p_{muestra} < 0,05$) entre la compactación Marshall y Giratoria para las variables de %V, y ITS_{acond} , no así ITS_{seco} y TSR. También se indica que los valores de %V, ITS_{seco} , ITS_{acond} y TSR se ven afectados de manera significativa ($p_{columna} < 0,05$) por la adición de filler activo. Para la compactación Marshall se obtuvieron medias más altas que la compactación Giratoria para %V, sin embargo, para ITS_{seco} , ITS_{acond} y TSR la compactación Giratoria tuvo medias más altas.

Para el ITS_{seco} , ITS_{acond} y TSR de los especímenes con cal y cemento obtuvieron medias más altas que para los especímenes sin filler activo, siendo la cal superior al cemento. Lo anterior indica que la cal y el cemento aumentan la adherencia y disminuyen el daño por humedad.

Se utilizó el curado B para esta fase, se recomienda un ITS_{seco} e ITS_{acond} mínimo de 175 kPa y 150 kPa respectivamente [1]. Para ambos tipos de compactación se cumple con el ITS_{seco} mínimo para los puntos de asfalto residual sin y con filler activo, excepto para la compactación giratoria sin filler. Para ambos tipos de compactación se cumple con el ITS_{acond} mínimo para la mayoría de los puntos de asfalto residual con filler activo, sin embargo, para ambos tipos de compactación sin filler activo no se cumple con la especificación. Si se fija un TSR mínimo de 70%, para ambos tipos de compactación se cumple sólo cuando se incorpora filler activo. Ambos tipos de compactación revelaron la necesidad de incorporar filler activo como mejorador de adherencia para disminuir la susceptibilidad al daño por humedad y cumplir con las especificaciones mínimas. Se observa que la mezcla sin filler presenta un daño por humedad importante.

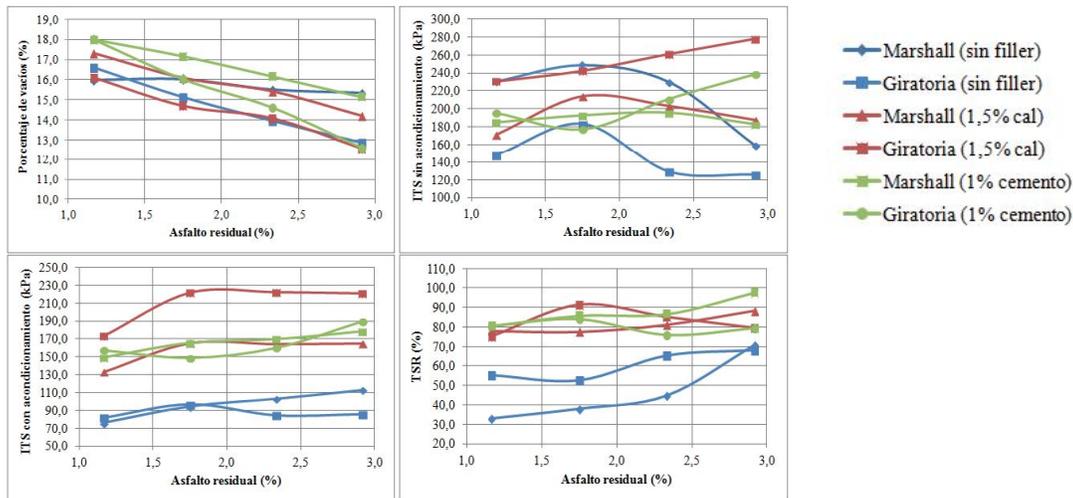


Figura 4. Análisis para compactación Marshall y Giratoria

Tabla 3. Análisis de varianza para compactación Marshall y Giratoria

	ANOVA						Método Tukey			
	Origen variaciones	Sum cuad	GL	Prom cuad	F	Prob p	Tipo	N	Media	Agrupado
% V	Compact.	45,605	1	45,605	23,32	0,000	Marshall	72	16,03	A
	Filler	19,692	2	9,348	5,19	0,007	Giratoria	48	14,77	B
	Interacción	0,541	2	0,271	0,15	0,861	Cemento	40	15,96	A
	Dentro grupo	205,337	114	1,801			Sin Filler	40	15,18	B
	Total	271,175	119				Cal	40	15,05	B
ITS _{seco}	Compact.	37	1	37	0,05	0,826	Giratoria	24	201,7	A
	Filler	8956	2	8495	11,14	0,000	Marshall	36	200,1	A
	Interacción	42065	2	21033	27,58	0,000	Cal	20	223,5	A
	Dentro grupo	41188	54	763			Cemento	20	197,3	B
	Total	92247	59				Sin filler	20	181,9	B
ITS _{acond}	Compact.	2728	1	2728	11,88	0,001	Giratoria	24	153,56	A
	Filler	84740	2	45082	196,38	0,000	Marshall	36	139,80	B
	Interacción	10866	2	5433	23,67	0,000	Cal	20	183,36	A
	Dentro grupo	12396	54	230			Cemento	20	164,93	B
	Total	110731	59				Sin filler	20	91,75	C
TSR	Compact.	40,0	1	40,0	0,50	0,488	Giratoria	12	74,37	A
	Filler	4654,1	2	2327,0	29,21	0,000	Marshall	12	71,79	A
	Interacción	455,8	2	227,9	2,86	0,083	Cemento	8	83,88	A
	Dentro grupo	1434,2	18	79,7			Cal	8	81,94	A
	Total		23				Sin filler	8	53,42	B

6.3 Análisis de módulo resiliente

Para esta clase de mezclas, los módulos resilientes están en valores superiores a los 1000 MPa [3]. Para la mezcla sin filler se obtuvieron resultados inferiores a 1000 MPa después de cierto contenido de asfalto residual (Figura 6). Con las mezclas con cal y cemento se obtuvieron valores por arriba de 1000 MPa. También para el caso con cemento se observó una disminución del módulo conforme aumento el contenido de asfalto residual. Cabe resaltar que para materiales granulares sin estabilizar se pueden obtener módulos resilientes en el rango de 200 MPa [20], si se utiliza esto como referencia se están obteniendo valores de por lo menos un 75% más altos.

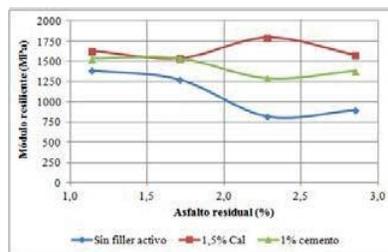


Figura 5. Resultados de Modulo Resiliente a la Tension Indirecta

6.4 Análisis de Rueda de Hamburgo

Los especímenes sin filler y con cemento fallaron ante el daño por humedad de una manera casi inmediata a los 500 y 2000 ciclos en promedio, respectivamente; se evidenció una degradación total del material, en donde se podía observar material pulverizado y sin recubrimiento de asfalto (Tabla 4). Por su parte al momento de someter al ensayo los especímenes con cal estos se comportaron satisfactoriamente y los especímenes con asfalto residual de 1,7 % y 2,3%

sobrepasaron el criterio de falla establecido para deformación y los especímenes con los contenidos restantes sobrepasaron los 15000 ciclos evidencia del buen desempeño del material. Al igual que los resultados que se obtuvieron con el ensayo de tensión indirecta se comprueba que la mezcla con cal tiene mejores resultados que la mezcla con cemento y mejor aún que la mezcla sin filler (Figura 6). Con el ensayo de Rueda de Hamburgo se evidencia de manera más clara cuál material tiene el mejor desempeño ante la deformación agravada por el daño por humedad, y este puede ser un método de ensayo que ayude a discriminar entre diferentes tratamientos cuál puede tener el mejor comportamiento.

Tabla 4. Resultados del ensayo Rueda de Hamburgo

	Asfalto residual (%)	Daño por humedad		Criterio de falla deformación 20 mm	
		Ciclos	Deformación (mm)	Ciclos totales	Deformación (mm)
Sin filler	1,1	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	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	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

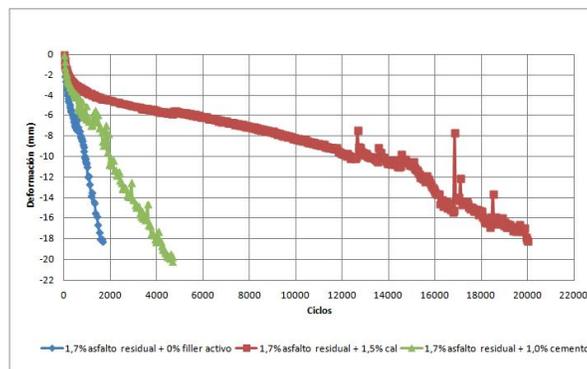


Figura 6. Resultados Rueda de Hamburgo

6.4 Porcentajes óptimos de emulsión

Se determinó el porcentaje óptimo de asfalto residual según los resultados del ensayo de tensión indirecta, tomando como base el ITS_{acond} con el cual se cumple con resistencia mínima especificada, al porcentaje de asfalto respectivo se le sumó un 0,5% para obtener un rango de cumplimiento de $\pm 0,25$ %. Este porcentaje óptimo debe cumplir con el ITS_{seco} , y TSR mínimos. En la Tabla 5 se encuentran los porcentajes óptimos obtenidos. Indiferentemente del tipo de curado o la compactación las mezclas sin filler no lograron cumplir con las resistencias mínimas requeridas, de tal manera, que se pudiera determinar un contenido óptimo de asfalto residual. Los porcentajes de asfalto residual estuvieron un rango de 2,2% a 1,5% independientemente del curado o la compactación. Se puede observar que con el curado B (Marshall) los porcentajes de asfalto residual son levemente inferiores que con el curado A (Marshall), se da una diferencia de 0,4% y 0,3% para cal y cemento respectivamente. Con respecto a la compactación, la compactación giratoria tuvo porcentajes de asfaltos residuales levemente mayores que con la compactación Marshall, para la cal se dio una diferencia de 0,1% y para el cemento un 0,7%.

Tabla 5. Contenido óptimo de asfalto residual

Condición		ITS _{seco}	ITS _{acond}	TSR	Asfalto residual óptimo	Emulsión asfáltica óptima	
		kPa	kPa	%	%	%	
Curado A (Marshall)	Sin filler	No cumple					
	Cal	280	240	85	2,1	3,7	
	Cemento	255	195	76	1,8	3,2	
Curado B (Marshall)	Sin filler	No cumple					
	Cal	210	165	76	1,7	3,0	
	Cemento	190	167	85	1,5	2,6	
Curado B (Giratoria)	Sin filler	No cumple					
	Cal	245	225	91	1,8	3,2	
	Cemento	203	156	78	2,2	3,9	

7 Conclusiones

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

- El tipo de curado afecta significativamente la densidad de los especímenes compactados y su resistencia a la tensión indirecta. La tendencia observada fue que a medida que el curado retenga mayor contenido de humedad menor es la densidad obtenida y menor es la resistencia a la tensión indirecta.
- La incorporación de filler activo mejora significativamente la resistencia mecánica del material estabilizado, su resistencia al daño por humedad y la deformación permanente agravado por la presencia de humedad.
- El tipo de compactación afecta significativamente la densidad del material estabilizado. La compactación giratoria tiende a producir especímenes con mayor densidad que la compactación Marshall. A la vez, la compactación giratoria tiende a aumentar la resistencia a la tensión indirecta de los especímenes acondicionados, los cuales tienen menos contenidos de vacíos donde el agua pueda penetrar y causar daño.
- El ensayo de Rueda de Hamburgo evidencia de forma más clara cuál material tiene el mejor desempeño ante la deformación agravada por el daño por humedad, y este puede ser un método de ensayo que ayude a discriminar entre diferentes tratamientos cuál puede tener el mejor comportamiento.
- Con las condiciones de curado y compactación evaluadas se logra discriminar si un material requiere la incorporación de filler activo para mejorar su adherencia y por lo tanto, su susceptibilidad al daño por humedad.
- El grado saturación del espécimen y más aún el daño por humedad aumenta conforme el espécimen está expuesto a condiciones de humedad prologadas, lo cual es una situación normal en Costa Rica en ciertas zonas donde las época lluviosa está presente todo el año prácticamente. Este es un aspecto importante a tomar en cuenta en el diseño.
- Con la estabilización con emulsión asfáltica se obtienen módulos resilientes mayores a los del material sin estabilizar, lo cual es importante a la hora de diseñar el espesor de base.
- Es importante especificar no solamente un valor de TSR mínimo, sino también valores mínimos de ITS sin y con acondicionamiento para garantizar el correcto desempeño de la mezcla.
- En general, la metodología de diseño y selección del contenido óptimo de bitumen se basa inicialmente en parámetros relacionados con la resistencia al daño por humedad. Se pretende a futuro incorporar elementos mecánicos (módulos y parámetros de ensayo triaxial) y otros tipo de ensayo que evalúen daños típicos en pavimentos con material estabilizado como fatiga. Se propone utilizar el curado B por representar mejor las condiciones de humedad que podría tener el material en campo. Para la compactación se

recomienda para un nivel de diseño básico utilizar compactación Marshall, sin embargo, para obtener un valor más preciso del contenido óptimo de asfalto residual se recomienda la compactación gíratória por ser más acorde a la compactación de campo.

8 Referencias

- [1] D. Collings, J. Grobler, M. Hughes, K. Jenkins, F. Jooste, F. Long and H. Thompson, Technical Guideline: Bitumen Stabilised Material, vol. 2, Pretoria: Asphalt Academy, 2009.
- [2] M. I. Moaveni, D. Zhang and E. Tutumluer, "Characterization of emulsion bitumen stabilized aggregate base," *Advances in Transportation Geotechnics II*, 2012.
- [3] Wirtgen GmbH, Wirtgen Cold Recycling Technology, Windhagen: Wirtgen GmbH, 2012.
- [4] Pennsylvania Department of Transportation, Developing Standards and Specification for Full Depth Pavement Reclamation, Pennsylvania: Pennsylvania Department of Transportation, 2012.
- [5] Transportation Research Board of the National Board, Asphalt emulsion technology, Washington, DC: TRB, 2006.
- [6] Wirtgen GmbH, Manual de Reciclado en Frío, 2 ed., Windhagen: Wirtgen GmbH, 2004.
- [7] S. Franco, S. Moss, D. Yuan and S. Nazarian, Design, Constructability Review and Performance of Dual Base Stabilizer Applications, El Paso, Texas: The University of Texas at El Paso, 2009.
- [8] R. Mallick, P. S. Kandahl, E. R. Brown, M. R. Teto, R. L. Bradbury and E. J. Kearney, Development of a Rational and Practical Mix Design Method for Full Depth Reclamation, 2001.
- [9] E. G. Orozco, "Zonificación climática de Costa Rica para la Gestión de Infraestructura Vial," San José, Costa Rica, 2007.
- [10] AASHTO Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing (AASHTO), AASHTO T27 Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, Washington, D.C., 2012.
- [11] Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing (AASHTO), AASHTO T 89 Determining the Liquid Limit of Soils, Washington, D.C., 2012.
- [12] Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing (AASHTO), AASHTO T 90 Determining the Plastic Limit and Plasticity Index of Soils, Washington, D.C., 2012.
- [13] Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing (AASHTO), Moisture-Density Relations of Soils Using a 4.54 kg (10 lb) Rammer and 457 mm (18 in.) Drop, Washington, D.C., 2012.
- [14] Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing (AASHTO), AASHTO T 59 Emulsified Asphalts, Washington, D.C., 2012.
- [15] Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing, Penetration of Bituminous Materials, Washington, D.C., 2012.
- [16] Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing (AASHTO), AASHTO T 166 Bulk Specific Gravity of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA), Washington, D.C., 2012.
- [17] Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing (AASHTO), Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) to Moisture Induced Damage, Washington, D.C., 2012.
- [18] American Society for Testing Materials (ASTM), ASTM D 4123 Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures, West Conshohocken, PA, 2003.
- [19] Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing (AASHTO), Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA), Washington, D.C., 2012.
- [20] M. Jimenez, "Implementación del Ensayo de Módulo Resiliente en Bases Granulares para Pavimentos," San José, Costa Rica, 2009.