



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



Infraestructura Vial



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Publicación semestral / ISSN electrónico: 2215-3705

Volumen 22 / Número 39 / Julio, 2020 / San José, Costa Rica

BRASIL

Análisis de sincronización de semáforos utilizando el programa Synchro

COSTA RICA

Beneficios del uso de cal hidratada en mezclas asfálticas:
Revisión del estado del arte

COLOMBIA

Desempeño del pavimento con mezcla reciclada-RAP y grano de caucho reciclado-GCR

CUBA

Materiales granulares mejorados con emulsión asfáltica catiónica para subbases de pavimentos

DEFINICIÓN DE LA REVISTA

La revista *Infraestructura Vial* pertenece al Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR). Fue creada en el año 1999, su primer número se publicó en diciembre de ese mismo año.

Esta revista cuenta con 30 publicaciones y un tiraje semestral de 2000 ejemplares, que son distribuidos a nivel nacional y en más de 35 países en todo el mundo.

La revista publica artículos de carácter técnico e investigaciones realizadas en el área de la infraestructura vial. También incluye otros contenidos relacionados con nuevas tecnologías que se aplican en la ingeniería de carreteras y para el mejoramiento del aprendizaje continuo. Además, divulga artículos de opinión que permiten compartir las experiencias de los ingenieros de carreteras en el mundo.

REQUERIMIENTOS PARA PUBLICACIÓN DE ARTÍCULOS

1. Los artículos deben corresponder a investigaciones o estudios originales, casos de aplicación de nuevas tecnologías y artículos de opinión, en el campo de la infraestructura vial, ingeniería de transportes y temas afines.
2. El artículo debe presentarse en un documento de Microsoft Word y PDF, siguiendo los lineamientos definidos en el siguiente enlace: <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/normas-para-presentacion-de-articulos.pdf>
3. El título del artículo debe presentarse tanto en español como en inglés (máximo 85 caracteres, cada uno).
4. Se debe presentar un resumen del artículo en español y en inglés (máximo 300 palabras, cada uno).
5. Es necesario presentar al menos 4 palabras clave en español y 4 en inglés, que identifiquen el artículo para una posible búsqueda en un sistema de archivo.
6. Los artículos que corresponden a investigaciones deben poseer: introducción, objetivos, metodología, desarrollo, análisis de resultados y conclusiones. En caso de que no aplique este formato, el autor debe especificar en una introducción a qué tipo de artículo corresponde.
7. La extensión máxima del artículo es de 12 páginas, incluyendo tablas y figuras.

REVISIÓN DE ARTÍCULOS

El procedimiento que se utiliza para seleccionar los artículos que se publican es el siguiente:

1. Entrega de los artículos a la dirección ejecutiva, para revisar si cumplen con los requisitos mínimos de publicación.
2. Cumplido el punto anterior se someten a una preselección por parte del comité director de la revista.
3. Los artículos preseleccionados son revisados por al menos dos de los miembros del consejo editorial.
4. Por último se envían a evaluadores externos, especialistas en el tema.
5. Aprobadas estas etapas se incluye en la lista de artículos que se van a publicar.

En cada etapa se van eliminando los artículos que no cumplan con los requerimientos necesarios para su publicación. En caso de que requieran alguna modificación, se le informará al autor para que tenga la oportunidad de corregirla y continuar el proceso. Si el artículo es rechazado o aprobado para su publicación se le informa de inmediato al autor respectivo.



SUSCRIPCIÓN

Ingrese sus datos personales en el sitio oficial de la revista:
<http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/vial>



La revista *Infraestructura Vial* del LanammeUCR se distribuye bajo la licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional

EN ESTA EDICIÓN

ANÁLISIS DE SINCRONIZACIÓN DE SEMÁFOROS UTILIZANDO EL PROGRAMA SYNCHRO

Synchronization analysis of traffic lights using the software Synchro

Dra. María Liliana Alba Menéndez Dra. Oisy Hernández Menéndez.

01

BENEFICIOS DEL USO DE CAL HIDRATADA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS: REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

Benefits of adding hydrated lime to asphalt mixtures: A review

Karina Kikut Cruz M.Sc. Alejandra Baldi M.Sc. Ana Luisa Elizondo Salas

12

DESEMPEÑO DEL PAVIMENTO CON MEZCLA RECICLADA-RAP Y GRANO DE CAUCHO RECICLADO-GCR

Pavement performance with reclaimed asphalt pavement-RAP and recycled tire rubber-RTR

Ana Sofía Figueroa Infante. I.C., Ph.D. Elsa Fonseca Santanilla. Química. Doctora en Agrociencias.

20

MATERIALES GRANULARES MEJORADOS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA CATIONICA PARA SUBBASES DE PAVIMENTOS

Improved granular materials with cationic asphalt emulsion for pavement sub-bases

MSc. M. Isabel Zambrano Mesa Dr. Eduardo Tejada Piusseaut Dra. Anadelys Alonso Aenlle

29

ESTA REVISTA ES PRODUCIDA POR:



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

PITRA

Programa de
Infraestructura del
Transporte

ESTA REVISTA ESTÁ INDEXADA EN:



Esta es una publicación del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR), ubicado en la Ciudad de la Investigación, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

Tel.: (506) 2511-2500, Fax: (506) 2511-4440, Código Postal: 11501-2060 San José, correo: revistaiv.lanamme@ucr.ac.cr

Los comentarios de los artículos firmados son responsabilidad de sus autores. La revista Infraestructura Vial y el LanammeUCR no necesariamente comparten los criterios expresados en ellos.

El equipo editorial presenta el primer número del año 2020, el cual contempla cuatro artículos. Las investigaciones contenidas en este número representan un gran aporte para solventar problemáticas comunes en la región latinoamericana, como lo son el congestionamiento vial, el aprovechamiento de residuos sólidos y los fenómenos de deterioro en los pavimentos.

En el primer artículo titulado **Análisis de sincronización de semáforos utilizando el programa Synchro**, se expone un estudio sobre la utilización de un *software* de modelación para la simulación de la coordinación de los semáforos en las vías más transitadas de La Habana. Tras evaluar parámetros de eficiencia, se remarca que la sincronización aliviaría aspectos como la congestión vial, la emanación de contaminantes y la ocurrencia de accidentes, entre otros.

En el segundo artículo, **Beneficios del uso de cal hidratada en mezclas asfálticas: Revisión del estado del arte**, las autoras recopilan una serie de estudios en los que se ha empleado la cal hidratada como un aditivo mejorador de las propiedades de las mezclas asfálticas y mezclas asfálticas finas. Se muestra el potencial de la utilización de este aditivo para aminorar la ocurrencia de algunos de los deterioros más frecuentes en los pavimentos en Costa Rica, como lo es el daño por humedad.

El tercer artículo, **Desempeño del pavimento con mezcla reciclada-RAP y grano de caucho reciclado-GCR**, expone un caso de estudio en el cual se incorporan materiales reciclados en una mezcla asfáltica y se analiza su comportamiento en relación con la fatiga y el ahuellamiento. Las autoras abordan el tema del aprovechamiento de materiales de desecho en este tipo de obras viales, destacando su buen rendimiento y potencial para su uso en vías secundarias y terciarias de Colombia.

Finalmente, en el cuarto artículo titulado **Materiales granulares mejorados con emulsión asfáltica catiónica para subbases de pavimentos**, los autores analizan el uso de emulsión para tratar un material granular que incumple las especificaciones mínimas para ser utilizado como subbase. Se muestra que la capacidad del material se ve mejorada tras el tratamiento, por lo que el autor analiza las modificaciones que experimentaría el pavimento, de colocarse una subbase estabilizada con emulsión en lugar de una tradicional aglomerada.

Ing. Ana Luisa Elizondo Salas, M.Sc.
Directora de la Revista Infraestructura Vial
LanammeUCR

DIRECTORA GENERAL

Ing. Ana Luisa Elizondo Salas, M.Sc.
LanammeUCR
ana.elizondosalas@ucr.ac.cr

EDITORA

Quím. Alejandra Baldi, M.Sc.
LanammeUCR
alejandra.baldi@ucr.ac.cr

EDITOR

Ing. Piero Laurent Matamoros
LanammeUCR
piero.laurent@ucr.ac.cr

MAQUETACIÓN Y DIAGRAMACIÓN

Licda. Daniela Martínez Ortiz, LanammeUCR
daniela.martinezortiz@ucr.ac.cr

CONTROL DE CALIDAD

Oscar Rodríguez Quintana, LanammeUCR
oscar.rodriguezquintana@ucr.ac.cr

CONSEJO EDITORIAL

Dr. Jose Pablo Aguiar Moya
Universidad de Costa Rica, LanammeUCR

Dr. Jonathan Agüero Valverde
Universidad de Costa Rica, ProDus

Dr. Adrián Ricardo Archilla
Universidad de Hawaii, Estados Unidos

Dr. Fabricio Leiva Villacorta
Universidad de Auburn, Estados Unidos

M.Sc. Javier Zamora Rojas
Universidad de Costa Rica, LanammeUCR

Análisis de sincronización de semáforos utilizando el programa Synchro

Synchronization analysis of traffic lights using the software Synchro

Dra. María Liliana Alba Menéndez.

Instituto Superior Politécnico de Tecnologías y Ciencias, ISPTEC,
Luanda, Angola
mlalbam@gmail.com

Dra. Oisy Hernández Menéndez.

Universidad Federal del Oeste de la Bahía,
Bahía, Brasil
oisy.menendez@ufob.edu.br

Fecha de recepción: 02 de marzo de 2020 / **Fecha de aprobación:** 03 de julio de 2020

RESUMEN

La congestión del tránsito es un problema que se manifiesta a nivel internacional y del cual Cuba no está exenta, a pesar de que los niveles existentes no llegan a los presentados por los países con alto nivel de motorización. Las intersecciones semaforizadas de las arterias urbanas de La Habana son las más congestionadas, donde se reflejan impactos negativos como accidentes de tránsito, demoras, colas y emisión de contaminantes a la atmósfera. Una de las medidas para mitigar la congestión es coordinar las cadenas semaforicas, lo que clasifica como una importante medida de bajo costo. En esta investigación se aborda el tema de la evaluación de la eficiencia de cadenas sincronizadas utilizando parámetros generales como tiempo de ciclo, intervalos de verde, desfase y ancho de banda, teniendo en cuenta la minimización de las demoras de los usuarios, utilizando el software Synchro, y se exponen los resultados obtenidos para un caso de estudio.

Palabras clave: intersecciones, sincronización, demoras, nivel de servicio.

ABSTRACT

Traffic congestion is a problem that occurs worldwide, and Cuba is not exempt, even when the existing levels do not reach those reported by countries with high level of motorization. Signalized intersections in urban arteries of Havana are the most congested, which reflects negative impacts such as traffic accidents, delays, queue, and emission of pollutants into the atmosphere. A possible low-cost solution to decrease congestion is to coordinate the group of traffic signals. Therefore, this research aims to assess the efficiency of synchronized channels using parameters as cycle time, green intervals, and bandwidth for a case study using Synchro software. This research does not consider the minimization of delays of the users. The results support the feasibility of using these parameters to evaluate and select the design holding the most effective synchronization.

Keywords: intersections, coordination, delays, level of service.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, los mayores problemas de congestión en las redes viales urbanas se producen en las intersecciones semaforizadas, debido fundamentalmente al aumento vertiginoso del parque vehicular, sobre todo en el último siglo (Pirez, 2000; CNIT, 2010; Jiménez García, Medina Flores y Figueroa Fernández, 2015), lo que hizo necesario desarrollar modelos matemáticos capaces de generar soluciones viales adecuadas a las características del flujo vehicular (Osorio et al., 2015; Nyame-Baafi, Adams y Osei, 2018).

Con el aumento exponencial del volumen de tráfico se incrementa el número de intersecciones reguladas por semáforos, lo que hace necesaria una sincronización, tanto más precisa cuanto más cercana a la saturación se encuentre la arteria puesto que, en estos casos, pequeños errores de cálculo conducirían al bloqueo de la misma con el consiguiente aumento desmesurado de los tiempos de recorrido (Díaz et al., 2002).

La sincronización de semáforos mejora potencialmente las operaciones de tráfico reduciendo significativamente las demoras (ATAC, 2003; Trafficware, 2017), produciendo ahorros de tiempo, combustible y contaminación (Koonce et al., 2008; Molina-Navarro, Zamora-Castro, Remess-Pérez y Lagunes-Lagunes 2016). En los últimos 30 años se ha producido un extraordinario desarrollo tecnológico que, mediante la incorporación de la computación y la electrónica en el manejo de complejas situaciones de tránsito, ha permitido el control de amplias redes, con sistemas centralizados y flexibles en relación con la demanda. Los programas como *VISSIM*, *SIDRA*, *Synchro*, *AIMSUM*, *Simtraffic*, *CORSIM* y *TRANSYT* han cambiado completamente la forma de enfrentar el problema, ya que proveen capacidades para avanzar en la optimización de los sistemas de tránsito (Gettman y Head, 2003; Mahmud, Ferreira, Hoque y Tavassoli, 2019).

La simulación del tránsito utilizando programas de modelación permite la evaluación del tráfico real y la evaluación de los parámetros de eficiencia de las intersecciones semaforizadas y no semaforizadas, para proponer estrategias que posibiliten la optimización del control del tránsito en las intersecciones (Araujo, Jacondino y Cybis, 2004; Tianzi, Shaochen y Hongxu, 2013; de Araújo y de Castro Neto, 2018; Mahmud et al., 2019). El programa *TRANSYT*, ha sido ampliamente probado en muchos países, y ha llegado a constituir prácticamente un estándar internacional para la sincronización de redes (Shaaban y Radwan, 2005; Traffic Engineering Division, 2005).

Otros programas que se muestran factibles para coordinar semáforos de tiempo fijo son *Promodel* (Espinoza Mondragón, Jiménez García, Medina Flores y Yáñez Contreras, 2015; Jiménez García et al., 2015), *CORSIM*, *PASSER* (Benekohal, Elzohairy y Saak, 2001) y el *Synchro* (ATAC, 2003; Park y Chen, 2010; Trafficware, 2017).

A pesar de los esfuerzos realizados en los últimos años para la mejora de la circulación, la vialidad urbana cubana presenta todavía deficiencias que se hace imprescindible corregir; se debe mejorar el diseño de las intersecciones, corregir el ciclo de los semáforos, coordinar intersecciones semaforicas en arterias principales, entre otros (CNIT, 2010).

Para enfrentar el reto anterior, las autoridades están tomando importantes medidas tales como la señalización horizontal y vertical de las vías principales, la sustitución de los controles semaforicos por equipos modernos -que en muchos casos cuentan con contadores regresivos que indican a los conductores el tiempo que resta para el cambio de luz, disminuyendo el tiempo perdido y el estrés del conductor y, por lo tanto, aumentando la seguridad vial-, adecuando las temporizaciones a los volúmenes de demanda y sincronizando el movimiento en las principales arterias, siendo esta última acción una de las soluciones viales de más bajo costo que se implementa (Gil, 2012).

Para el diseño del sincronismo en Cuba se utilizan las técnicas tradicionales de cálculo manual basado en criterios puramente geométricos, obteniendo parámetros como tiempo de ciclo, intervalos de verde, desfasaje y ancho de banda que se suele conocer como “onda verde” (Cardoso Espinosa y Moreno, 2012). En algunos casos, se emplea el software *Trafficware* (*Synchro Studio* versión 10.1 con revisión 1 (10.1.1.1) de Trafficware LLC (2017)), el cual permite calcular indicadores de eficiencia por el método del *Transportation Research Board* (2010) y Webster (1958) y, además, evalúa los beneficios obtenidos por disminución de demora, gasto de combustible y emisión de contaminantes. Es muy factible para realizar estudios antes-después mediante simulación sin intervenir en el terreno, ahorrando recursos y evaluando variantes para implementar la más efectiva (Shaaban y Radwan, 2005; Hajbabaie, Medina y Bnekohal, 2011; Trafficware, 2017).

Por otro lado, el Centro Nacional de Ingeniería de Tránsito de Cuba y el Complejo de Investigaciones Tecnológicas Integradas, en conjunto con el Departamento de Automática del ISPJAE, desarrollaron un sistema inteligente de transporte para el control del flujo vehicular y el diseño total de controladores semaforicos. El software muestra como salida

una simulación del sincronismo mediante una gráfica y, además, genera un reporte que informa datos generales de las intersecciones y su plan de tiempo respectivo (Cardoso Espinosa y Moreno, 2012).

En La Habana, capital de Cuba, se concentran los mayores volúmenes de tránsito en las principales arterias, que son: Avenida de Rancho Boyeros, 5ta Avenida, Paseo, Avenida 23, Avenida 26, Salvador Allende y Reina (Alba, 2008). La 5ta Avenida, compuesta por 7 intersecciones semaforizadas tiene problemas de congestión, altos volúmenes de demanda que provocan largas colas y altas demoras, motivo por el cual se realizó una evaluación de las diferentes variantes de sincronización, como cadenas aisladas o en red, con el objetivo de mejorar las condiciones de circulación de la arteria, buscando aumentar la velocidad, mejorar los niveles de servicio de la arteria y sus intersecciones, para disminuir las demoras y colas actuales.

2. MÉTODOS EMPLEADOS EN EL ESTUDIO

Cuando las intersecciones semaforizadas de una arteria se encuentran cercanas y los volúmenes de tránsito son altos, los sistemas de semáforos coordinados son preferibles al trabajo como intersecciones aisladas. La sincronización consiste en programar el encendido de las luces verdes de los semáforos de tal forma que los vehículos puedan atravesar una vía, de extremo a extremo, a una velocidad constante y sin detenerse, procurando que las interrupciones generadas por la luz roja sean mínimas. Es una de las formas más eficientes de reducir demoras, consumo de combustible, contaminación y accidentes (Bezerra, 2007; Koonce et al., 2008).

Los parámetros más importantes que deben considerarse para la sincronización de un sistema semafórico son: el ciclo, el reparto o distribución de tiempos en verde de cada fase, y el desfase, siendo este último parámetro el período de tiempo que transcurre entre el comienzo de una fase específica en un semáforo y su comienzo en la intersección siguiente (Díaz y Díaz, 2002; Bezerra, 2007; Koonce et al., 2008). El Manual de dispositivos de control del tránsito (Koonce et al., 2008) y las regulaciones cubanas recomiendan que las intersecciones semaforizadas cercanas entre sí a 800 metros o menos deben ser sincronizadas con un ciclo común (CNIT, 2008).

Para diseñar la sincronización de intersecciones semaforizadas existen varios métodos, entre los que destaca el conocido como geométrico, ya que maximiza el ancho de banda verde utilizando un diagrama espacio-tiempo al fijar una velocidad

de circulación y un tiempo de ciclo (Cal, Mayor y Cárdenas, 2010; Koonce et al., 2008). Se utiliza para coordinaciones con índice de saturación bajo (relación volumen/capacidad) y el usuario aprecia directamente las ventajas de la sincronización.

El otro método se basa en la optimización de las variables de tráfico, en específico en las demoras. Por su complejidad se utilizan herramientas computacionales especializadas (softwares), que cuentan con complejos algoritmos matemáticos muy utilizados en cadenas semaforizadas próximas a la saturación, para obtener la máxima capacidad posible.

Este último será el método por utilizar en la investigación, auxiliándose del software *Synchro*, un programa ampliamente utilizado por organismos e instituciones de tráfico debido a las grandes ventajas que ofrece, entre ellas, la simulación de las coordinaciones de tráfico existente en una red vial, contando con una variedad de parámetros de eficiencia ligados a un reporte gráfico que permite valorar de manera directa qué tan aproximados son los resultados de campo. Evalúa y optimiza planes de sistemas sincronizados basados en los volúmenes de tránsito y las condiciones geométricas existentes y sus modelos pueden ser utilizados para predecir el comportamiento esperado del sistema (ATAC, 2003; Park y Chen, 2010; Trafficware, 2017).

Con la utilización del *Synchro* se evalúan los siguientes parámetros de eficiencia que caracterizan a las cadenas sincronizadas, para definir la variante que mayores beneficios proporciona: factor de coordinabilidad (FC), calidad de la progresión, maximización del ancho de banda, vehículos en la zona de dilema, demoras, nivel de servicio, relación volumen/capacidad (v/c), paradas totales y paradas por vehículos.

3. CASO DE ESTUDIO

3.1. Caracterización de la arteria 5ta Avenida en La Habana, Cuba

La 5ta Avenida constituye una arteria principal de La Habana, ubicada en el litoral noroeste que, por su origen y destino, forma parte de uno de los ejes viales con función de movilidad más importantes al enlazar de forma directa las zonas este y oeste (Alba, 2008). Con una longitud de cinco kilómetros, presenta siete intersecciones controladas por semáforos, con altos volúmenes de demanda y tráfico pendular que, en la hora pico de la mañana, se mueve en dirección hacia el centro de la ciudad. En la Figura 1 se muestra su trazado y las intersecciones semaforizadas principales que la conforman.

Se realizaron estudios de volúmenes vehiculares en las intersecciones semaforizadas y sus incorporaciones desde las vías transversales, de las características geométricas y del diseño de fases y reglaje existente en cada semáforo.

Partiendo de los resultados, la hora pico se ubicó en el intervalo de 7:30 a 8:30 am. En el Cuadro 1 se muestran las características

de circulación de las intersecciones que componen la arteria, específicamente la pendiente (Pend.), los volúmenes por movimiento (veh/h), factor hora pico (FHP) y porcentaje de vehículos pesados (% VP).

El plan de fases existente en toda la arteria se presenta en el Cuadro 2. El ciclo natural de la arteria es de 100 segundos.



Figura 1. Trazado de 5ta Avenida y sus intersecciones principales

Cuadro 1. Resumen de las características de circulación de 5ta Avenida

Intersecciones	Acceso	Pend. (%)	Volúmenes en la hora pico (veh/h)				FHP	% VP
			Izq.	Recto	Der.	Total		
5ta y 10	Desde este	1		964	33	3171	0,99	0
	Desde oeste	1		1 080	108		0,98	0
	Desde norte	1	110	346	20		0,93	9
	Desde sur	-1	157	298	55		0,93	4
5ta y 20	Desde este	1		838	71	2556	0,94	0
	Desde oeste	1		1080	56		0,91	0
	Desde norte	1	72	82	7		0,95	6
	Desde sur	-2	72	249	29		0,93	3
5ta y 30	Desde este	1		1016	21	2650	0,98	0
	Desde oeste	1		901	60		0,94	0
	Desde norte	1	63	125	24		0,89	8
	Desde sur	-2	106	244	90		0,90	4
5ta y 42	Desde este	1		970	20	2648	0,98	0
	Desde oeste	1		1096	92		0,97	0
	Desde norte	1	24	129	7		0,95	3
	Desde sur	-2	178	110	22		0,98	1
5ta y 60	Desde este	1		1050	28	2709	0,93	0
	Desde oeste	1		1102	35		0,94	0
	Desde norte	1	42	118	19		0,99	9
	Desde sur	-4	90	192	33		0,97	6
5ta y 70	Desde este	-1		1 062	255	3168	0,92	0
	Desde oeste	-1		1120	97		0,97	0
	Desde norte	-1	156	218	16		0,89	12
	Desde sur	-5	156	59	29		0,93	8
5ta y 84	Desde este	2		767	66	3109	0,90	0
	Desde oeste	-4		1191	208		0,94	0
	Desde norte	-1	46	160	12		0,95	5
	Desde sur	-3	323	276	60		0,97	3

Cuadro 2. Plan de fases en la arteria

Fase	Descripción	Movimientos	Diagrama
1	5ta Avenida hacia el este y hacia el oeste	Recto y derecha	
2	Calle transversal (hacia el norte)	Izquierda, recto y derecha	
3	Calle transversal (hacia el sur)	Izquierda, recto y derecha	

3.2 Evaluación de las condiciones de circulación antes de la sincronización

La utilización del *Synchro* permite obtener las principales medidas de efectividad para las intersecciones semaforizadas y las arterias. Las medidas de efectividad de demora, nivel de

servicio (NS) y relación volumen/capacidad (v/c) obtenidas para las intersecciones que componen la 5ta Avenida se muestran en los Cuadros 3 y 4. Los resultados confirman los problemas de congestión y demoras detectados durante los estudios realizados *in situ*.

Cuadro 3. Parámetros de eficiencia para las intersecciones semaforizadas de 5ta Avenida antes del sincronismo

Acceso	5ta Avenida desde este			5ta Avenida desde oeste		
	Demora (s/veh)	NS	v/c	Demora (s/veh)	NS	v/c
5ta y 10	20,10	C	0,68	25,70	C	0,86
5ta y 20	11,30	B	0,82	40,00	D	0,87
5ta y 30	6,60	A	0,79	18,40	B	0,85
5ta y 42	22,80	C	0,74	25,10	C	0,80
5ta y 60	31,10	C	0,79	24,70	C	0,92
5ta y 70	17,40	B	0,87	27,50	C	0,84
5ta y 84	31,50	C	0,85	95,40	F	1,14

Cuadro 4. Indicadores de eficiencia y nivel de servicio arterial en 5ta Avenida antes de coordinar

Sentido	Tiempo de marcha (s)	Demora (s/veh)	Tiempo de recorrido (s)	Velocidad arterial (km/h)	NS
Desde este	210,8	140,8	351,6	39,2	D
Desde oeste	206,4	256,8	463,2	29,2	E

Se evidencia que los niveles de servicio por 5ta Avenida son aparentemente buenos, lo que está condicionado por el alto valor de la relación tiempo de verde/tiempo total de ciclo, permitiendo que la mayoría de los vehículos que arriban se despejen en cada ciclo. Esto ocasiona un nivel de servicio aceptable en las vías transversales ya que no alcanzan, en ningún caso, el nivel C. Se evaluó además la calidad de la progresión, siendo de baja calidad para la mayoría de las intersecciones, lo que incide en el aumento de las demoras y las colas.

4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Para evaluar la conveniencia de coordinar la cadena se utilizó el factor de coordinabilidad, que es una medida de la factibilidad de coordinar las intersecciones en una arteria. Este factor arroja una puntuación entre de 0 y 100, mientras mayor sea su valor mayor será la garantía de mejora en la circulación mediante esta acción. Los factores de coordinabilidad en cada arco de la arteria 5ta Avenida son mostrados en el Cuadro 5. Es posible observar valores elevados de este factor, lo que permite reafirmar que es muy conveniente coordinar estas intersecciones.

Cuadro 5. Factor de coordinabilidad en 5ta avenida

Arco	Factor de coordinabilidad
De 10 a 20	85
De 20 a 30	88
De 30 a 42	80
De 42 a 60	100
De 60 a 70	86
De 70 a 84	72

4.1. Variantes para realizar la sincronización de la arteria

Se analizaron las siguientes variantes de sincronización: para velocidades de 80 y 70 km/h con todos los movimientos existentes permitidos y ciclo natural de 100 segundos (variantes 1 y 2). Para las mismas velocidades y movimientos con ciclo optimizado de 94 segundos (variantes 3 y 4). Los parámetros de eficiencia arterial para cada variante se muestran en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Indicadores de eficiencia y nivel de servicio arterial para cada variante

Variante	Sentido de circulación	Velocidad de sincronismo (km/h)	Ciclo (s)	Demora (s/veh)	Velocidad media marcha (km/h)	NS	Ancho de banda (s)
1	Desde este	80	100	72,90	44,80	B	26
	Desde oeste			78,00	45,50	B	26
2	Desde este	70	100	108,30	40,50	C	15
	Desde oeste			99,60	41,80	C	17
3	Desde este	80	94	89,1	43,1	C	13
	Desde oeste			85,1	43,8	C	14
4	Desde este	70	94	96,00	42,10	C	18
	Desde oeste			106,70	40,90	C	16

Del cuadro anterior se puede concluir que la variante de solución para lograr la mejor circulación de la arteria 5ta Avenida es la variante de sincronización 1, porque presenta el mejor nivel de servicio, las menores demoras, la mayor velocidad arterial y los mayores anchos de bandas para cada sentido.

Si comparamos los resultados obtenidos en la variante seleccionada con los del Cuadro 4, se puede observar que los indicadores de eficiencia mejoran considerablemente con el sincronismo, en especial las demoras (en el sentido desde el este se disminuyen aproximadamente el 50% de las demoras que existen actualmente, y en el sentido desde el oeste se disminuye hasta un 70%). El nivel de servicio arterial se mejora de D o E para B en ambos sentidos de circulación. Por otro lado, la velocidad arterial también aumentó en 5,6 km/h en el sentido desde el este y 16,3 km/h en el sentido desde el oeste.

El diagrama de bandas que proporciona el software para la variante seleccionada se muestra en la Figura 2.

4.2. Calidad de la progresión

La calidad de la progresión caracteriza el movimiento de los pelotones de vehículos desde una intersección semaforizada a la próxima, lo que afecta en la práctica la apreciación por el usuario de la calidad de la operación. La calidad de la progresión se evalúa a través del parámetro relación de columna (R_c), como una función del porcentaje de vehículos que no se detienen en la intersección, empleando la Ecuación 1.

$$R_c = PVV \left(\frac{C}{g} \right) \quad (1)$$

donde

R_c = Relación de columna.

PVV = Porcentaje de vehículos que pasan con luz verde sin detenerse (%).

C = Tiempo total de ciclo (s).

g = Tiempo de verde efectivo por la vía sincronizada (s).

A partir de los cálculos de R_c se evaluó la calidad de la progresión para cada intersección con la cadena sincronizada (Transportation Research Board, 2010) que se muestra en el Cuadro 7.

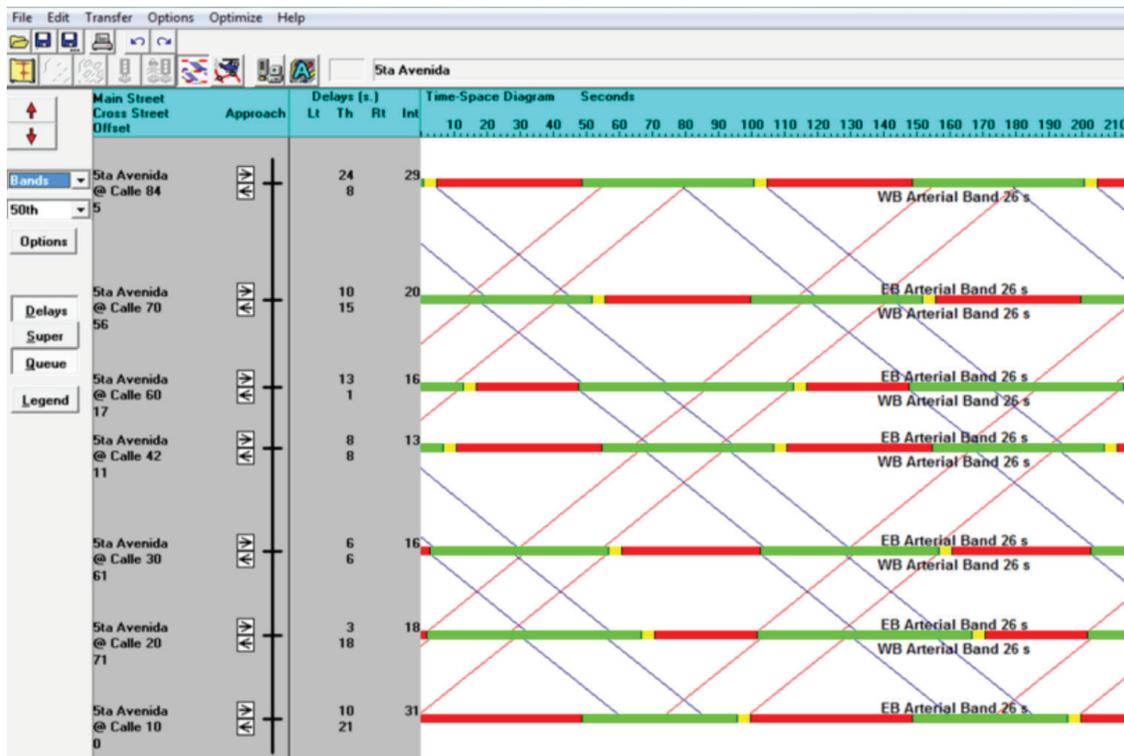


Figura 2. Diagrama de bandas de la variante definitiva (captura del software)

Cuadro 7. Comportamiento del parámetro calidad de progresión

Intersecciones	Tiempo de verde (s)	C/g	5ta Ave desde el este	5ta Ave desde el oeste
			Calidad de la progresión	Calidad de la progresión
5ta y 10	47	1,83	Favorable	Favorable
5ta y 20	65	1,54	Favorable	Favorable
5ta y 30	54	1,85	Altamente Favorable	Favorable
5ta y 42	52	1,92	Favorable	Altamente Favorable
5ta y 60	65	1,54	Favorable	Favorable
5ta y 70	52	1,92	Favorable	Favorable
5ta y 84	52	1,92	Desfavorable	Favorable

La calidad de la progresión es muy buena, lo que indica que existe comodidad y seguridad en la circulación y mide la eficiencia del sincronismo realizado.

4.3. Índice de comportamiento

La mejor longitud de ciclo puede ser encontrada calculando el índice de comportamiento. Mientras menor sea el índice de comportamiento, la operación será de mayor calidad, por tanto, serán menores las demoras totales y los vehículos que paran.

Para el caso de la cadena sincronizada según los datos que muestra el software, en el sentido 5ta desde este el índice es 6,6 y 5ta desde el oeste es 1,3, lo que es un indicador de disminución de las demoras y paradas, aumentando la fluidez del tránsito.

4.4. Vehículos en la zona de dilema

Este parámetro cuantifica el número de vehículos que arriban mientras el semáforo muestra la luz amarilla, que son los que más probabilidad tienen de tener un accidente de tránsito. Normalmente este parámetro se utiliza para mostrar que la coordinación es una mejora de la seguridad del tránsito (Trafficware, 2017). El Cuadro 8 muestra el número de vehículos en la zona de dilema antes y después de sincronizada la arteria, además de la variación en porcentaje (relación de vehículos antes y después de la sincronización) de los vehículos en la zona de dilema.

Cuadro 8. Vehículos en la zona de dilema

Inter.	5ta Ave desde el este			5ta Ave desde el oeste		
	Sin sincronismo	Sincronizada	Variación (%)	Sin sincronismo	Sincronizada	Variación (%)
5ta y 10	63	50	20,63	145	9	93,79
5ta y 20	80	13	83,75	143	21	85,31
5ta y 30	8	6	25,00	19	1	94,74
5ta y 42	36	2	94,44	7	52	-642,86
5ta y 60	24	6	75,00	76	6	92,11
5ta y 70	144	15	89,58	145	11	92,41
5ta y 84	95	4	95,79	83	70	15,66

Cuadro 9. Indicadores de calidad de la arteria en ambos sentidos

Intersección	Accesos	Demora (s/veh)			NS		v/c		
		Sin sincronismo	Sincronizada	Variación (%)	Sin sincronismo	Sincronizada	Sin sincronismo	Sincronizada	Variación (%)
5ta y 10	Desde este	20,1	21,3	-5,97	C	C	0,68	0,59	13,24
	Desde oeste	25,7	9,9	61,48	C	A	0,86	0,72	16,28
5ta y 20	Desde este	11,3	17,7	-56,64	B	B	0,82	0,41	50,00
	Desde oeste	40	2,8	93,00	D	A	0,87	0,53	39,08
5ta y 30	Desde este	6,6	5,6	15,15	A	A	0,79	0,54	31,65
	Desde oeste	18,4	5,6	69,57	B	A	0,85	0,53	37,65
5ta y 42	Desde este	22,8	8,5	62,72	C	A	0,74	0,54	27,03
	Desde oeste	25,1	7,6	69,72	C	A	0,8	0,66	17,50
5ta y 60	Desde este	31,1	5	82,44	C	A	0,79	0,49	37,97
	Desde oeste	24,7	13,2	46,56	C	B	0,92	0,55	40,22
5ta y 70	Desde este	17,4	15,1	13,22	B	B	0,87	0,77	11,49
	Desde oeste	27,5	9,5	65,45	C	A	0,84	0,67	20,24
5ta y 84	Desde este	31,5	8,5	73,02	C	A	0,85	0,48	43,53
	Desde oeste	95,4	24,3	74,53	F	C	1,14	0,81	28,95

Después del sincronismo, los vehículos en la zona de dilema disminuyen considerablemente (en promedio disminuyeron 57 vehículos en el acceso desde el este y 72 desde el oeste) lo que representa un aumento de la seguridad vial, disminución de las demoras, consumo de combustible (Molina-Navarro et al., 2016) y el riesgo de accidentes sería menor. En el Cuadro 9 se muestran los parámetros de eficiencia: demora, nivel de servicio y relación v/c antes y después de la sincronización de las intersecciones en ambos sentidos.

Analizando los parámetros de eficiencia demora, nivel de servicio y relación v/c en la arteria antes y después de ser sincronizada, se puede concluir que las demoras disminuyen en promedio 11,6 s/veh en el sentido desde el este y 16,2 s/veh para el sentido desde el oeste. Se mejoran los niveles de servicio de cada intersección en los dos sentidos, para el sentido desde el este 57,1% de las intersecciones pasaron de nivel de servicio C o D para A y en el sentido desde el oeste 71,5% tienen niveles de servicio A. La relación v/c en el sentido desde el este disminuyó en promedio 0,25 y desde el oeste fue de 0,20.

Los resultados obtenidos muestran cómo la coordinación de la cadena de semáforos en la arteria 5ta Avenida optimiza los parámetros de tráfico, ocasionando una disminución de las demoras y las paradas de vehículos, niveles de servicio de altísima calidad, lo que consecuentemente disminuye el consumo de combustible y las emisiones de contaminantes.

5. CONCLUSIONES

- Con la sincronización de la cadena de semáforos en 5ta Avenida se optimizaron los parámetros del tránsito de la arteria y de la mayoría de las intersecciones por separado. Se mejoran los niveles de servicio, disminuyen las demoras, paradas de vehículos, disminuye el número de vehículos en la zona de dilema, emisión de contaminantes, entre otros.
- La coordinación provoca una disminución de más de 350 vehículos en la zona de dilema de toda la arteria.
- Los niveles de servicio de la arteria pasan de D y E para B, se disminuyen más del 50% de las demoras que existen actualmente y la velocidad arterial aumentó en más de 5 km/h.
- La sincronización de los semáforos fue más favorable para el sentido desde el oeste, donde en media se disminuye la demora en 16,2 s/veh, más del 70% de las intersecciones pasan para el nivel de servicio A y la media de la relación v/c disminuyó en promedio 0,25.

6. REFERENCIAS

- Alba, M.L. (2008). *Procedimiento para el tratamiento de los emplazamientos urbanos con alta concentración de accidentes* (Tesis Doctoral). CUJAE, Cuba.
- de Araújo, A. y de Castro Neto, M. M. (2018). Calibração do modelo de aceitação de brechas em interseções urbanas com o microssimulador de tráfego VISSIM. *Transportes*, 26(3), 25–38. doi: 10.14295/transportes.v26i3.1603
- Araujo, D.R., Jacondino, G. y Cybis, H.B. (2004). Método de calibração de modelos de micro-simulação de tráfego através de otimização multivariada. *Transportes*, 12(1), 5–12. doi: 10.14295/transportes.v12i1.122
- Advanced Traffic Analysis Center (2003). *Signal Coordination Strategies Final Report*. Recuperado de: <https://www.atacenter.org/programs/ops/pdf/GFSigCoord.pdf>
- Benekohal, R.F., Elzohairy, Y.M. y Saak, J.E. (2001). *Comparison of delays from HCS, Synchro, PASSER II, PASSER IV and CORSIM for an urban arterial*. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/2142/46347>
- Bezerra, B.S. (2007). *Semáforos: Gestão Técnica, Percepção do Desempenho, Duração dos Tempos* (Tesis Doctoral). Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Cal y Mayor, R. y Cárdenas, J. (2010). *Ingeniería de tránsito: Fundamentos y aplicaciones*. 8va Edición. México: Editorial Félix Varela.
- Cardoso Espinosa, E. y Moreno, V. (2012). Análisis y diseño de software para la sincronización de intersecciones semafóricas. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 33(1), 16–24.
- CNIT. (2008). *Justificación para los semáforos de ciclos ajustados*. La Habana: Centro Nacional de Ingeniería del tránsito, MININT.
- CNIT. (2010). *Sistema Centralizado de control del tránsito en La Habana*. La Habana: Centro Nacional de Ingeniería del tránsito, MININT.
- Díaz, M., Díaz, J., Ferreira, J., Pérez, M., Serran, M., Tomás, R., Sentana, I. y Sentana, E. (2002). Métodos geométricos de coordinación reguladas por semáforos. *XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica*, Santander, España.
- Díaz, M.C. y Díaz, J.F. (2002). Métodos geométricos de coordinación de intersecciones reguladas por semáforos. *XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica*, Santander, España.
- Espinoza Mondragón, J., Jiménez García, J., Medina Flores, J., y Yáñez Contreras, P. (2015). Sincronización de seis semáforos paralelos mediante simulación con promodel y su efecto en el medio ambiente. *Congreso Internacional de Investigación Academia Journals*. Academia Journals, Celaya.
- Gettman, D., y Head, L. (2003). *Surrogate Safety Measures From Traffic Simulation Models Final Report*. Recuperado de: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/03050/>
- Gil, A. (2012). *Valoraciones del comportamiento de la vialidad y el tránsito en la Habana – situación actual*. Reunión nacional de jefes de ingeniería de tránsito, Centro Nacional de Ingeniería de Tránsito, Villa Clara.
- Hajbabaie, A., Medina, J.C. y Benekohal, R.F. (2011). *Traffic Signal Coordination and Queue Management in Oversaturated Intersection*. Recuperado de: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/20576>
- Jiménez García, J. Medina Flores, J., y Figueroa Fernández, V. (2015). Simulación con promodel para la sincronización de semáforos. *Congreso Internacional de Investigación Academia Journals*. Academia Journals, Tabasco.
- Koonce, P., Rodegerdts, L., Lee, K., Quayle, S., Beaird, S., Braud, C., Bonneson, J., Tarnoff, P. y Urbanik, T. (2008). *Traffic Signal Timing Manual*. Washington, DC, FHWA.

- Mahmud, S.M.S., Ferreira, L., Hoque, M.S. y Tavassoli, A. (2019). Micro-simulation modelling for traffic safety: A review and potential application to heterogeneous traffic environment. *IATSS Research*, 43(1), 27–36. doi: 10.1016/j.iatssr.2018.07.002
- Molina-Navarro, A., Zamora-Castro, S., Remess-Pérez, M., y Lagunes-Lagunes, E. (2016). Los semáforos inteligentes en la logística urbana sustentable. *Revista de Aplicaciones de la Ingeniería*, 3(9), 26–33.
- Nyame-Baafi, E., Adams, C.A. y Osei, K.K. (2018). Volume warrants for major and minor roads left-turning traffic lanes at unsignalized t-intersections: a case study using VISSIM modelling. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 5(5), 417–428. doi: 10.1016/j.jtte.2018.01.005
- Osorio, C., Chen, X., Marsico, M., Talas, M., Gao, J. y Zhang, S. (2015). Reducing gridlock probabilities via simulation-based signal control. *Transportation Research Procedia*, 6, 101–110. doi: 10.1016/j.trpro.2015.03.009
- Park, B. y Chen, Y. (2010). *Quantifying the benefits of coordinated actuated traffic signal systems: A case study*. Recuperado de http://www.virginiadot.org/vtrc/main/online_reports/pdf/11-cr2.pdf
- Pirez, J. (2000). Análisis del comportamiento del volumen del tránsito actual con respecto a 1988. Taller de Ingeniería de Tránsito, La Habana, Cuba.
- Shaaban, K. y Radwan, E. (2005). A calibration and validation procedure for microscopic simulation model: a case study of simtraffic for arterial streets. *TRB Annual Meeting*. Transportation Research Board, National Research Council, Washington.
- Tianzi, C., Shaochen, J. y Hongxu, Y. (2013). Comparative study of vissim and sidra on signalized intersection. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 96, 2004–2010. doi: 10.1016/j.sbspro.2013.08.226
- Traffic Engineering Division. (2005). Traffic signal coordination planning effort. Traffic Engineering, Colorado
- Trafficware, LCC (2017). *Synchro studio 10: Synchro Plus Simtraffic and 3D viewer (No. Synchro Studio 10 User Guide*. Gillingham, Trafficware, LCC.
- Transportation Research Board (2010). Highway Capacity Manual, Washington DC, TRB.
- Webster F. V. (1958). *Traffic Signal Settings*. London: Her Majesty's Stationery Office.

Beneficios del uso de cal hidratada en mezclas asfálticas: Revisión del estado del arte

Benefits of adding hydrated lime to asphalt mixtures: A review

Karina Kikut Cruz

LanammeUCR, Universidad de Costa Rica,
Costa Rica
karina.kikut@ucr.ac.cr

M.Sc. Alejandra Baldi

LanammeUCR, Universidad de Costa Rica,
Costa Rica
alejandra.baldi@ucr.ac.cr

M.Sc. Ana Luisa Elizondo Salas

LanammeUCR, Universidad de Costa Rica,
Costa Rica
ana.elizondosalas@ucr.ac.cr

Fecha de recepción: 30 de abril de 2020 / **Fecha de aprobación:** 01 de julio de 2020

RESUMEN

La cal hidratada es un material utilizado normalmente en las mezclas asfálticas, dado que les brinda propiedades únicas y les permite alargar su vida útil. En el presente trabajo se analizaron diversos artículos con el objetivo de comprender los métodos por medio de los cuales se agrega la cal hidratada, la cuantificación del compuesto y la mejora que éste aporta ante diversos factores adversos que acometen a las mezclas asfálticas. Se encontró que los porcentajes usuales en los que se utiliza este aditivo corresponden a un rango entre 1%-2% en peso de los agregados. Asimismo, utilizar cal como un aditivo en húmedo permite mejoras tanto en la dureza del asfalto como en la resistencia contra la humedad, del asfalto. Se concluye que la cantidad de cal hidratada que se debe agregar corresponde al 1,5% en masa de agregados debido a que, en la mayoría de estudios, con esta cantidad se obtuvo las mejores propiedades del asfalto.

Palabras clave: asfaltos, cal hidratada, daño por humedad, matriz asfáltica.

ABSTRACT

Hydrated lime is used as an additive for asphalt mixtures, since it enhances the properties of the material in a unique way, enabling a longer service life. In this study, several scientific articles were analyzed in order to understand some of the methods employed of adding hydrated lime to the asphalt mixtures, as well as the optimum amount of hydrated lime that will significantly improve the material's response towards diverse factors. It was found that the researchers usually add hydrated lime in percentages ranging between 1%-2% in weight of aggregates. Also, in the case of asphalt modified with hydrated lime, the material is stiffer and more resistant to moisture damage. Finally, after this literature review it is concluded that adding 1,5% of hydrated lime the most promising properties were obtained in most of the studies considered.

Keywords: asphalt, hydrated lime, moisture damage, asphalt matrix.

1. INTRODUCCIÓN

La cal hidratada es un compuesto que se ha estudiado ampliamente en los últimos años como un agregado en la matriz asfáltica por los beneficios que esta le brinda. A este aditivo se le conoce también como *filler*; y de acuerdo con Little y Petersen (2005), se puede definir *filler* como “cualquier partícula que se agregue al asfalto con un tamaño menor a los 74 μm ”. Asimismo, los autores detallan que la cal hidratada se añade al asfalto por sus propiedades excepcionales, como el tamaño de partícula que posee, la rugosidad y la energía superficial de la misma, entre otras.

Hay diversas razones por las que se utiliza este material como agregado, una de ellas es por la resistencia a fisura que le agrega al asfalto. Según Rasouli, Kavussi, Qazizadeh y Taghikhani, (2018), la cal hidratada puede mejorar las propiedades de la mezcla asfáltica de tres maneras: mejorando la resistencia al agrietamiento, mejorando la resistencia a la deformación permanente y reduciendo la tasa de rigidez a causa de la oxidación del material.

Asimismo, la cal hidratada es un aditivo de uso común debido a las propiedades que le brinda al asfalto para resistir el daño por humedad; la cual es una de las causas del fallo prematuro de la mezcla asfáltica. Es por ello que a lo largo de los años se ha tratado de implementar pruebas para determinar la sensibilidad del asfalto ante la humedad. Existen estudios que basan esta sensibilidad en parámetros de fractura, energía superficial, coeficientes de difusión y características de adhesión. La razón por la cual se emplea cal hidratada es porque esta aumenta las características de unión adhesiva entre el agregado y el asfalto (Kim, Lutif, Bhasin y Little, 2008).

Debido a que la cal hidratada se ha utilizado ampliamente para mitigar los daños que sufre el asfalto por la humedad, se decidió realizar una investigación bibliográfica para comprender tanto las propiedades de la cal, como los métodos de adición a la matriz asfáltica y las pruebas que se han realizado a la mezcla asfáltica una vez agregado este compuesto.

Asimismo, es importante destacar que el daño por humedad es de los principales problemas que presentan el asfalto en Costa Rica, debido a que este es un país con un clima tropical donde la época lluviosa corresponde a seis meses del año. De igual manera, Costa Rica posee un único asfalto por lo que este artículo pretende brindar una revisión literaria del uso de cal para mitigar dichos problemas; desde cómo modificarlo, las cantidades óptimas y las mejoras en las propiedades mecánicas que se deben esperar.

El objetivo de este estudio es lograr una noción integral de la técnica de aplicación de cal en las mezclas asfálticas y mástico asfáltico, para poder ser aplicada en Costa Rica.

2. DESARROLLO Y DISCUSIÓN

Contenido óptimo de cal hidratada en mezclas asfálticas

Zamora y Mora (2019), utilizaron briquetas con una masa de 1 kg cada una; de la cual 47,45 g correspondió al *filler* y este no poseía cal hidratada. Posteriormente, se sustituyó el *filler* al 100% por cal hidratada y al 50%; y se les realizaron pruebas de tracción seca, tracción húmeda y desgaste. A partir de las pruebas realizadas los autores determinaron que el porcentaje óptimo de sustitución del *filler* por cal hidratada fue de 2,387% del peso total de la mezcla.

Por otro lado, Bastidas, De Carvalho, y Lucena, (2015) realizaron un estudio con muestras asfálticas modificadas con: 0% cal, 10% cal, 15% cal y 20% cal. Las mezclas con mayores porcentajes de cal tendieron a sedimentarse y producir una mezcla heterogénea. A partir del estudio los autores proponen utilizar 0,96% de cal hidratada y 3,84% de asfalto puro; estos datos surgen a partir de que el contenido de asfalto efectivo se reduce en un 20% por la adición de cal. Este 20% se traduce en un 0,3% del contenido óptimo de un asfalto en un concreto denso.

Lesueur, Petit, y Ritter (2013), exponen que la cantidad típica de cal que se agrega a la mezcla asfáltica está en el rango de 1% a 1,5% en masa de agregados secos. Si se utilizara la cal como aglutinante típico, su contenido debe ser del 5% en masa con base en agregados secos, este porcentaje corresponde al 20%-30% en masa o a 10-15% en volumen de cal hidratada. Asimismo, la Asociación Europea de Cal (European Lime Association), realizó en el año 2011, una tabla comparativa de la cantidad de cal hidratada que se agrega al asfalto por país, así como el método de adición, y partir de esto se determina que el rango de porcentajes de cal hidratada agregada ronda el 1% a 3,5% y esta se agrega pura o mezclada con el *filler* (EuLa, 2011).

Por su parte, Han, Dong, Yin, Liu, y Liu (2020), se enfocaron en hallar la cantidad óptima de cal hidratada, así como su grado de fineza idóneo para la mezcla asfáltica. A partir de este estudio se obtuvo que el contenido óptimo de cal corresponde al 10%. También se descubrió que, el contenido de cal se debe controlar para asegurarlo entre 3% y 10%, para mantener las propiedades reológicas adecuadas del asfalto.

En cambio, Little y Epps realizaron un estudio sobre el uso de cal hidratada, desde su historia hasta los métodos de adición a la matriz asfáltica. Los autores explicaron que la cal seca se puede añadir como agregados secos o húmedos; y los estudios que compilan emplean entre 1%-3% de cal hidratada (National Lime Association, 2006).

De acuerdo con el estudio bibliográfico realizado, se concluye que, si bien es cierto que hay diversos porcentajes en los que se agrega la cal hidratada al asfalto, los más utilizados se encuentran entre 1% y 2% del peso en agregados.

Uso de cal hidratada para mejorar el desempeño del asfalto y de la mezcla asfáltica

Kim et al. (2008), analizaron mezclas asfálticas a las que se les agregó 1% cal hidratada variando la concentración de cal, la cual se agregó tipo lodo. Estas concentraciones fueron 0,33; 0,22 y 0,13 por ciento. A todas se les realizaron pruebas de daño por humedad, susceptibilidad, fractura y energía libre superficial, entre otras. Los resultados se reportan en conjunto, por lo que no se reporta el porcentaje óptimo de cal hidratada que se debe agregar; sin embargo, con el 1% sí se observa una mejora de las propiedades del asfalto.

En el caso del estudio de Kollaros, Kalaitzaki, y Athanasopoulou (2017), este se centró en la investigación de *fillers* para mezclas asfálticas, así como su dosificación. Los *fillers* que se probaron fueron agregados pasando el tamiz No.200 y cal. El contenido de *filler* se varió en 2%, 4%, 6% y 8% y se realizaron pruebas de estabilidad, vacíos y deformación. La adición de cal significó mejoras en todas las pruebas mencionadas anteriormente, la máxima estabilidad se obtuvo con el 4% de *filler*, mientras que la deformación, con el 2%.

Rasouli y colaboradores (2018) utilizaron especímenes con porcentajes entre el 1% y 2% de contenido en masa de cal hidratada. Les realizaron pruebas de fatiga y determinaron que con la modificación se aumentó la dureza de la mezcla asfáltica; así como que hubo una mejora de las propiedades elásticas de la mezcla. Los autores descubrieron que al agregar un porcentaje mayor al 1,5% de cal hidratada se podría conseguir una disminución gradual de flexibilidad de la mezcla y un aumento excesivo de la dureza.

Moon, Falchetto, Wang, Riccardi y Wistuba (2017), analizaron el efecto de adicionar cal hidratada a la mezcla asfáltica como parte del *filler*, variando los porcentajes añadidos de la siguiente forma: 5%, 10% y 20% en volumen de agregado fino. Analizaron el desempeño de las mezclas a temperatura baja

(10°C y -6°C) y alta (28°C y 70°C). Los autores encontraron que a bajas temperaturas las propiedades de la mezcla no se ven afectadas significativamente. Por su parte, a altas temperaturas hubo una mejora en las propiedades de la mezcla con ambos tipos de *filler*.

Otras pruebas diferentes a las discutidas anteriormente las realizó Gutiérrez (2017), al agregar cal hidratada al asfalto en el agregado fino y realizando tres pruebas a las muestras; estas pruebas fueron: equivalente de arena, determinación del peso específico y análisis granulométrico. Las proporciones en las que se agregó la cal hidratada correspondieron a 1%, 1,5% y 2%. La que brindó los mejores resultados fue la de 1,5%, dado que con esta cantidad se obtuvo la mayor estabilidad de la mezcla.

Por otro lado, es común añadir cal directamente al asfalto para evaluar su respuesta ante el envejecimiento químico, el cual es un factor importante que acomete al asfalto y reduce su vida útil. Es también un factor difícil de cuantificar para conocer su avance. Lo anterior, se debe a la dificultad en la toma de muestras del asfalto envejecido, debido a que se deben extraer los primeros centímetros o milímetros de la capa asfáltica, que en ocasiones se mezclan con capas inferiores que no son representativas del envejecimiento químico (EuLA, 2011).

Entonces, se ha probado el efecto de la modificación con cal hidratada y cal hidratada dolomítica sobre el índice de envejecimiento obtenido a 60°C (EuLA, 2011). Entre los resultados obtenidos, se observa la disminución de la susceptibilidad del envejecimiento químico del asfalto mediante un aumento paulatino de la viscosidad. Asimismo, se da una disminución de la formación de carbonilos en los asfaltos modificados; este efecto surge a temperaturas mayores a los 88°C. Además, con 10% de uso de cal hidratada se neutralizaron la mayoría de los ácidos en el asfalto (EuLA, 2011).

Adicionalmente, el experimento elaborado por Aragão, Lee, Kim y Karki (2010) se centró en analizar los efectos de la cal hidratada en el asfalto, para mejorar la resistencia al fisuramiento. La cantidad de cal hidratada se varió en las siguientes proporciones: 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,0% y 3,0% en peso de agregado seco. Las pruebas realizadas corresponden a módulo dinámico, resistencia ante la fatiga, y deformación permanente. Una vez más, se observó una mejora en la dureza de la mezcla asfáltica, así como una mejora en la resistencia ante la fatiga de las muestras. Al agregar contenidos mayores al 2% de cal hidratada a la mezcla no se observó una mejora adicional en sus propiedades.

Lesueur et al. (2013), realizaron una recopilación bibliográfica de la modificación de asfalto con cal hidratada; concluyendo que este aditivo incrementa la durabilidad del asfalto. Este incremento de la durabilidad se logra a partir de la mejora que proporciona la cal hidratada a las propiedades como la resistencia ante el daño por humedad, la resistencia ante el envejecimiento químico, y las propiedades mecánicas (módulo de resistencia, fuerza y fatiga, entre otras). Han et al. (2020), por su parte, realizaron pruebas de energía libre superficial, las propiedades técnicas de la cal y las propiedades mecánicas al asfalto modificado. Se obtuvo que, al aumentar la fineza de la cal, se aumenta también la adhesión del asfalto; y que al agregar cal hidratada aumenta la viscosidad y dureza del asfalto.

En el 2005, Little y Petersen (2005) realizaron un estudio que tuvo como enfoque comparar la adición de cal y cal hidratada en la reología de la matriz asfáltica. La cal hidratada se agregó como *filler* en una proporción del 20% y se le realizaron pruebas mecánicas. Cabe destacar que el 20% en masa de cal hidratada mencionado anteriormente corresponde al 1% típico en mezclas de pavimentos. Se descubrió que cal le brinda al asfalto características importantes, una de ellas corresponde a la dureza, que le otorga resistencia a la mezcla asfáltica ante posibles fracturas o fisuras. Cabe destacar que mostró mejores características el asfalto modificado con cal hidratada que el que se modificó con cal.

Uso de la cal hidratada para mitigar el daño por humedad en mezclas asfálticas

Como se mencionó anteriormente, la cal hidratada brinda diversas propiedades al asfalto, de forma tal que lo convierte en un material más resistente ante factores adversos, como lo es la humedad. Asimismo, posteriormente se ahondará en los avances que se han realizado en el uso de la cal hidratada para mitigar el daño por humedad en Costa Rica.

El daño por humedad consiste en la infiltración de humedad o agua en el asfalto provocando la separación entre este y los agregados. Caro, Masad, Bhasin y Little (2008), lo definen como: “la degradación de las propiedades mecánicas de un material debida a la presencia de humedad en estado líquido o de vapor.” De acuerdo con Kim et al. (2008), este tipo de daño genera diversas señales en el material, como lo es el agrietamiento y la deformación permanente del asfalto. Existen algunos mecanismos para estudiar y comprender el daño por humedad; Caro et al. (2008), exponen que estos mecanismos se basan en dos pasos: transporte de humedad y la respuesta del sistema. El primero es para comprender la forma

en la que la humedad llega al asfalto, y el segundo corresponde a cómo se modificó la estructura interna del material. Algunas manifestaciones de la humedad en el asfalto corresponden al agrietamiento, desnudamiento, desmoronamiento, y erosión hidráulica de la mezcla asfáltica (Caro et al., 2008).

Kim et al. (2008), inician su investigación ahondando en el daño prematuro del asfalto a causa de la humedad y el surgimiento de técnicas para reducir este tipo de daño. Una de las técnicas más utilizadas para reducir el daño por humedad en mezclas asfálticas consiste en agregar cal hidratada, pues es conocido que ésta mejora la compatibilidad adhesiva entre el agregado y el asfalto. Hay diversas formas de agregar la cal hidratada al asfalto, por ejemplo: agregándola a los agregados secos o a los agregados húmedos, entre otros. La razón por la cual la cal hidratada reduce el daño por humedad en el asfalto es que ésta agrega iones de calcio en la superficie del agregado, logrando que tanto los agregados como el asfalto tengan mejor afinidad para resistir el daño por humedad. La cal logra reaccionar con el agua y el dióxido de carbono del aire formando carbonato de calcio que resulta en una superficie dura del mineral y mejorando la adhesión entre los agregados y el asfalto (Han et al., 2020).

Kim et al. (2008), realizaron dos pruebas de laboratorio las cuales consistieron en evaluar el daño por humedad, la susceptibilidad del asfalto, la medición de las propiedades del material y la posibilidad de fractura de este. Como principal conclusión reportan que las mezclas que contenían cal hidratada tuvieron mejor rendimiento en los siguientes aspectos: 1) aumento de la rigidez, 2) aumento de la fuerza y la dureza, que generan mejor resistencia ante la degradación por humedad, y 3) mejor adherencia entre el asfalto y el agregado, que produce mejor resistencia ante las fisuras.

Mouillet, Séjourné, Delmotte, Ritter, y Lesueur (2014), reconocen el uso de la cal hidratada para mitigar los efectos de la humedad en el asfalto, así como para la reducción del envejecimiento químico del asfalto. Además, se encontró que agregar cal aumenta la dureza del asfalto que impacta directamente las propiedades mecánicas del material, esto al punto de que las agencias norteamericanas estiman que agregar cal hidratada a la mezcla asfáltica aumenta la durabilidad del material entre 2 y 10 años (un incremento del 20-50%).

Khattak y Kyatham, realizaron dos estudios en el mismo año. En el primero evaluaron la susceptibilidad tanto de la matriz asfáltica como de la mezcla asfáltica ante la humedad, modificando ambas con cal hidratada. El aglutinante asfáltico se modificó con 20% de cal hidratada; este no se utilizó como

filler. La matriz asfáltica se utilizó con 10% en contenido de aglutinante asfáltico y el agregado fino que pasara por el tamiz No.8. Utilizando el método de área superficial, el aglutinante correspondió entre el 18%-20% en peso de la matriz asfáltica. Se obtuvo una respuesta viscoelástica positiva al haber modificado la mezcla con cal hidratada, es decir, un aumento en el valor del módulo dinámico, G^* (Khattak y Kyatham, 2008a). En el segundo estudio, se enfocaron en el agregado fino debido a que es más susceptible al daño por humedad. Se modificó el mismo con cal hidratada, en 20% para el aglutinante. La matriz asfáltica se compuso de la misma forma que la explicada anteriormente. A partir de diversas pruebas, se da una mejora en la resistencia de la matriz asfáltica que la hace menos susceptible ante el daño por humedad (Khattak y Kyatham, 2008b).

Los autores Little y Epps determinan que la cal hidratada reduce la sensibilidad del asfalto ante la humedad y mejora la adhesión entre el agregado y el asfalto. Asimismo, esta sustancia reduce el envejecimiento del material por oxidación y aumenta la resistencia de este ante la fatiga. Un estudio demostró que al agregar cal hidratada se puede dar un ahorro de \$20/ton de mezcla asfáltica, y puede alargar la vida útil del material en un 38% (National Lime Association, 2006).

Es importante mencionar los métodos para cuantificar el daño por humedad, algunos de estos son: HWTD (*Hamburg Wheel Tracking Device* por sus siglas en inglés), ITSR (*Indirect tensile strength ratio* por sus siglas en inglés), Duriez, Cantabro, SATS (*Saturation ageing tensile stiffness* por sus siglas en inglés), y Lottman, entre otros. Cabe destacar que aún no hay estudios que determinen cuál método a utilizar es el más adecuado para evaluar el daño por humedad. Al hacerse la comparación de los distintos agregados (incluyendo cal hidratada) y diferentes métodos de prueba se ha podido observar que en la prueba Lottman la cal hidratada tiene un mejor desempeño que otros aditivos. También en la prueba HWTD se demuestra que la cal hidratada es más eficiente al mejorar la resistencia del asfalto para el daño por humedad (EuLA, 2011).

En la totalidad de los estudios consultados se determina que agregar cal hidratada tiene un beneficio claro en las propiedades del asfalto, aumentando su dureza, resistencia ante la humedad y mejora las características de la matriz asfáltica, en general.

Uso de cal hidratada en la mezcla asfáltica en Costa Rica

En Costa Rica se han realizado investigaciones para la incorporación de cal hidratada como agregado en la matriz asfáltica para mitigar el daño por humedad. Jiménez (2015), realizó la modificación del ligante asfáltico con nanocal, usándose este tamaño nanométrico para lograr una mejor interacción entre las partículas de ligante y las de cal. A partir de esta investigación se concluyó que no hay una mejora en el grado de desempeño del asfalto (según la metodología Superpave) al comparar la utilización de nanocal o cal convencional. Asimismo, de acuerdo con los parámetros de resistencia retenida y pérdida de adherencia, los asfaltos modificados con cal mejoraron desde 5% hasta 11%.

De igual forma, Vargas (2016), evaluó los efectos de agregar cal y nanocal a las mezclas asfálticas en caliente con tamaños nominales de 9,5 mm y 12,5 mm. A las muestras se le realizaron tres ensayos los cuales fueron: Tensión Diametral, Rueda de Hamburgo y Módulo Dinámico. De la investigación se obtuvo que al agregar cal y nanocal se reducen los porcentajes de asfalto óptimo requerido; por lo que este se traduce en una reducción de los costos de producción. La muestra que presentó los resultados más favorables correspondió al asfalto de 12,5 mm modificado con cal; el cual posee mejor resistencia ante el daño por humedad.

En el 2016 se preparó un informe de daño por humedad en mezclas asfálticas por parte del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, su objetivo correspondió en la preparación de una metodología para lograr cuantificar el daño por humedad en mezclas asfálticas para las condiciones de Costa Rica. Como hallazgos del informe se obtuvo una mejora de la resistencia ante el daño por humedad de las mezclas modificadas con cal. También, se encontró que los modificadores que añadieron a las mezclas asfálticas, como el polímero SBS o la cal, afectan las propiedades volumétricas de la mezcla (LanammeUCR, 2016).

En el 2017 se realizó otro informe para el daño por humedad, cuyo objetivo correspondió a evaluar de manera exhaustiva la susceptibilidad al daño por humedad, de diversas mezclas asfálticas, a través de un análisis por componentes y conglomerados. A partir de este informe, se concluyó que al agregar cal a la mezcla asfáltica hay una ganancia de resistencia al daño por humedad. También se destacó que, al modificar las mezclas asfálticas con el polímero SBS (poliestireno-butadieno-estireno) y agente antidesnudante líquido (ADL), se mejora el desempeño del material ante el daño por humedad y agrietamiento por fatiga (LanammeUCR, 2017).

Por otro lado, en el 2018 se realizó una investigación similar en el Lanamme, la cual concluyó que el parámetro actual definido, utilizado como criterio de aceptación ante el daño por humedad no discrimina si la mezcla es susceptible o no ante dicho problema; lo cual corresponde a la realidad de los pavimentos en Costa Rica. De igual manera, los investigadores concluyeron que, al adicionar cal a la mezcla asfáltica, se observa una mejora en la resistencia del material ante el daño por humedad; en especial cuando la mezcla se sometió a un nivel mayor de daño (LanammeUCR, 2018).

Métodos de Cuantificación de la Cal Hidratada en la Matriz Asfáltica

Muchos de los estudios consultados se basan en la cantidad usual en que se agrega cal hidratada, dado que ha sido una técnica muy estudiada a lo largo de los años. Sin embargo, a falta de cuantificar la cantidad de cal adicionada podría experimentarse problemas de sedimentación. De igual forma, se evidenció que, si bien la cal hidratada brinda beneficios al asfalto, lo hace cuando se agrega en cierta proporción; más allá de la proporción indicada se desperdicia el compuesto y no hay un beneficio adicional en sus propiedades.

Uno de los métodos de cuantificación es el método estadounidense, que emplea la espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR, por sus siglas en inglés) en el cálculo del contenido de cal hidratada en asfaltos. La señal es sencilla de hallar en el espectro y se presenta en longitudes de onda de $1390\text{-}1400\text{ cm}^{-1}$ (Mouillet et al., 2014).

Otro método de cuantificación corresponde al alemán; este método consiste en tres pruebas: la pureza de la cal hidratada, el contenido de cal hidratada en la mezcla como *filler* y lo que se recupera de la cal en el *filler* proveniente de una mezcla asfáltica. Esta prueba se basa en la titulación con ácido clorhídrico de una muestra en suspensión con el producto de interés. El *filler* se recolecta luego de la extracción del asfalto de la mezcla. La suspensión por titular se obtiene disolviendo 1 g del *filler* recolectado en 150 mL de agua, 10 mL isobutanol y 5 mL de una solución surfactante. Este método se aplicó a muestras asfálticas 1,5 años después de haber sido colocadas. Emplearon 4 muestras de las cuales 2 contenían cal hidratada en un 25% en masa y la cantidad de cal hidratada posterior a la prueba fue mayor para ambas muestras. Los autores determinaron que no toda la cal hidratada agregada se recuperó debido a las reacciones entre los agregados y la cal (Mouillet et al., 2014).

3. CONCLUSIONES

La investigación bibliográfica realizada sugiere que, al adicionar cal hidratada a la matriz asfáltica, hay una mejora en las propiedades de la mezcla en cuanto a la dureza y la resistencia ante la fatiga, oxidación, envejecimiento químico y daño por humedad. Asimismo, se observan cambios en las propiedades viscoelásticas del asfalto, cuando la cal hidratada se mezcla, mejorando su resistencia a la deformación permanente.

Por otro lado, con base en los estudios consultados, se infiere que la cantidad óptima de cal en la mezcla asfáltica corresponde al 1,5% en peso de agregados para obtener mejores propiedades y que el material resista a la humedad.

Es importante recalcar que los resultados obtenidos y los beneficios que se hallaron tras el uso de la cal, están ligados al objetivo de cada estudio analizado. Es decir, aquellas investigaciones enfocadas en analizar el efecto de la cal sobre cierta propiedad de la mezcla o del asfalto modificado con este material, presentarán resultados relacionados con dicha propiedad en específico. Es por ello, que se recomienda discreción por parte de los lectores, dado que, a pesar de que este aditivo es en efecto beneficioso para el pavimento, podría percibirse como una solución a todos los deterioros que ocurren en la carretera.

Se recomienda ahondar en las investigaciones sobre el uso de este agregado en la matriz asfáltica en Costa Rica, para determinar su viabilidad y aplicabilidad en las carreteras del país.

4. REFERENCIAS

- Aragão, F., Lee, J., Kim, Y., y Karki, P. (2010). Material-Specific Effects of Hydrated Lime on the Properties and Performance Behavior of Asphalt Mixtures and Asphaltic Pavements. *Construction and Building Materials*, 24(4), 538-544. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.10.005
- Bastidas, J., De Carvalho, J., y Lucena, L. (2015). Optimización del contenido de asfalto modificado con cal hidratada en mezclas asfálticas densas. *Revista Asfaltos y Pavimentos*, 31, 55-64.
- Caro, S., Masad, E., Bhasin, A., y Little, D. N. (2008). Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 1: mechanisms. *International Journal of Pavement Engineering*, 9(2), 81-98. doi: 10.1080/10298430701792128
- EuLA (2011). Hydrated Lime: A Proven Additive for Durable Asphalt Pavements Critical Literature Review. Recuperado de: <https://www.euLa.eu/hydrated-lime-a-proven-additive-for-durable-asphalt-pavements-critical-literature-review-paper/>
- Gutiérrez, L. (2017). *Diseño de asfalto en caliente mejorado con el uso de cal hidratada en la Av. Camino Dibos, ICA, 2017*. (Tesis de grado). Universidad César Vallejo, Lima.
- Han, S., Dong, S., Yin, Y., Liu, M., y Liu, Y. (2020). Study on the effect of hydrated lime content and fineness on asphalt properties. *Construction and Building Materials*, 244, 1-9. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118379
- Jiménez, M. (2015). *Análisis del efecto de nano partículas de cal hidratada en el desempeño del ligante asfáltico*. (Tesis de grado). Universidad de Costa Rica, San José.
- Khattak, M., y Kyatham, V. (2008a). *Mechanistic Characteristics of Moisture Damaged Asphalt Matrix and Hot Mix Asphalt Mixtures*. Airfield and Highway Pavements 2008, Washington.
- Khattak, M., y Kyatham, V. (2008b). Viscoelastic Behavior of Hydrated Lime-Modified Asphalt Matrix and Hot-Mix Asphalt Under Moisture Damage Conditions. *Journal of the Transportation Research Board*, 2057(1), 64-74. doi: 10.3141/2057-08
- Kim, Y., Lutfi, S., Bhasin, A., y Little, D. (2008). Evaluation of Moisture Damage Mechanisms and Effects of Hydrated Lime in Asphalt Mixtures through Measurements of Mixture Component Properties and Performance Testing. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(10), 659-667. doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:10(659)
- Kollaros, G., Kalaitzaki, E., y Athanasopoulou, A. (2017). Using Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt Mixtures in Road Construction. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 6(7), 261-266.
- Lesueur, D., Petit, J., y Ritter, H. (2013). The mechanisms of hydrated lime modification of asphalt mixtures: A state-of-the-art review. *Road Materials and Pavement Design*, 14(1), 1-16. doi: 10.1080/14680629.2012.743669
- Little, D., y Petersen, C. (2005). Unique Effects of Hydrated Lime Filler on the Performance- Related Properties of Asphalt Cements: Physical and Chemical Interactions Revisited. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(2), 207-218. doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:2(207)
- Moon, K., Falchetto, A., Wang, D., Riccardi, C., y Wistuba, M. (2017). Mechanical Performance of Asphalt Mortar Containing Hydrated Lime and EAFSS at Low and High Temperatures. *Materials*, 10(7), 1-20. doi: 10.3390/ma10070743
- Mouillet, V., Séjourné, D., Delmotte, V., Ritter, H., y Lesueur, D. (2014). Method of quantification of hydrated lime in asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 68, 348-354. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.063
- National Lime Association (2006). *The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt*. Recuperado de: <https://scholarworks.unr.edu/handle/11714/4927>
- Rasouli, A., Kavussi, A., Qazizadeh, M., y Taghikhani, A. (2018). Evaluating the effect of laboratory aging on fatigue behavior of asphalt mixtures containing hydrated lime. *Construction and Building Materials*, 164, 655-662. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.003

LanammeUCR (2016). *Daño por humedad en mezclas asfálticas* (Informe LM-PI-UMP-044-R3). Recuperado de: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/991>

LanammeUCR (2017). *Daño por humedad en mezclas asfálticas* (Informe LM-PI-UMP-044-R4). Recuperado de: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/977>

LanammeUCR (2018). *Daño por humedad en mezclas asfálticas* (Informe LM-PI-UMP-044-R5). Recuperado de: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/1710>

Vargas, M. (2016). *Efecto en la resistencia al daño por humedad de la mezcla asfáltica en caliente al añadir cal y nano cal hidratada* (Tesis de grado). Universidad de Costa Rica, San José.

Zamora, F., y Mora, E. (2019). *Influencia de la cal hidratada en mezclas asfálticas drenantes* (Tesis de grado). Universidad Católica de Colombia, Bogotá.

Desempeño del pavimento con mezcla reciclada-RAP y grano de caucho reciclado-GCR

Pavement performance with reclaimed asphalt pavement-RAP and recycled tire rubber-RTR

Ana Sofía Figueroa Infante. I.C., Ph.D.

Investigación en Desarrollo Tecnológico, INDETEC
Universidad de la Salle, Bogotá-Colombia
afigueroa@unisalle.edu.co

Elsa Fonseca Santanilla. Química. Doctora en Agrociencias.

Investigación en Desarrollo Tecnológico, INDETEC
Universidad de la Salle, Bogotá-Colombia
elsafonseca@unisalle.edu.co

Fecha de recepción: 25 de marzo de 2020 / **Fecha de aprobación:** 13 de julio de 2020

RESUMEN

Esta investigación muestra los resultados del desempeño del pavimento flexible (ahuellamiento y fatiga) usando pavimento asfáltico reciclado-RAP y grano de caucho reciclado-GCR. Los dos tipos de materiales son residuos que provienen de diferentes procesos: el primero proviene del reciclaje de pavimento asfáltico y el segundo de las llantas en desuso por desgaste de diferentes vehículos. Los estudios incluyeron el análisis de los materiales en la condición original y una propuesta de su mejoramiento, considerando la disminución de la producción de gases efecto invernadero. El producto obtenido en este proyecto pretende ser utilizado en la red vial secundaria y terciaria de Colombia, para mejorar la conexión entre zonas de producción agrícola y los centros urbanos de tal manera que se contribuye con el mejoramiento y desarrollo de la competitividad de estas zonas.

Palabras clave: RAP, GCR, Fatiga, Ahuellamiento, RCD en carreteras.

ABSTRACT

This research shows the results on the flexible pavement performance (rutting and fatigue) using Reclaimed Asphalt Pavement-RAP and Recycled Tire Rubber. The two types of materials are waste that comes from different processes: the first one comes from recycling asphalt pavement and the second from disused tires due to wear and tear of different vehicles. The studies include analysis of the materials in the original condition and a proposal for improving the material, considering the reduced production of greenhouse gases. The product obtained in this project intended to be used in secondary and tertiary roads (rural roads) in Colombia, to improve the connection between agricultural production areas and urban centers in such a way that it contributes to the improvement and development of the competitiveness of these areas.

Keywords: RAP, RTR, Fatigue, Rutting, C&DW in roads.

1. INTRODUCCIÓN

El reciclaje de pavimento es una técnica ampliamente conocida que requiere de un rejuvenecedor para su reutilización (Minnesota Department of Transportation, 2002) y las investigaciones recientes se han centrado especialmente en la optimización de los porcentajes de *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) permitidos para la fabricación de mezcla nueva (Fernández del Campo, 2003). Los estudios sobre la utilización del RAP datan de los años 80 con apoyo del Departamento de Transporte de Illinois y la Universidad de Illinois, quienes desarrollaron una metodología de diseño e investigaron el aporte del asfalto residual en estas mezclas (Illinois Center for Transportation, 2007). Durante los años sucesivos las diferentes investigaciones han centrado sus esfuerzos en la posibilidad de utilización del máximo porcentaje posible de RAP en mezclas nuevas sin afectar su desempeño. Estos porcentajes típicamente se han conservado en el 30% de RAP con el 70% de material virgen. Sin embargo, hay países como Holanda en el que se tienen experiencias con porcentajes superiores.

En Colombia se han realizado estudios puntuales sobre el uso del RAP, para responder al compromiso del país con la sostenibilidad ambiental. Es así como en la Universidad de la Salle en el año 2009 (Espinosa, 2009) se realizó una investigación con el apoyo de la alcaldía de Engativá para optimizar, en términos del proceso constructivo, la utilización del RAP proveniente de las vías locales de la zona en mención, la cual tenía los acopios de RAP copados y sin posibilidad de uso. En esta investigación quedaron abiertas las opciones para seguir investigando sobre el uso RAP en el país. Otras investigaciones al respecto se han venido realizando por algunas universidades e instituciones gubernamentales (Ostos et al., 2012).

Como parte esencial del estudio del RAP, el análisis de la adhesión, la cohesión, la fatiga y el ahuellamiento del material son necesarias para estudiar su desempeño bajo cargas vehiculares, ya que estos materiales han pasado por un proceso que ha alterado sus propiedades originales y, por lo tanto, requieren estudios adicionales para su utilización, (Figueroa, Velásquez, Reyes, y Bahía, 2013; Herrera, Velásquez, Infante, Gómez, y Lizcano, 2013; Qin, Schabron, Boysen, y Farrar, 2014).

En el año 2011, la *Federal Highway Administration* (FHWA) publicó un documento oficial sobre el estado de la práctica del reciclaje en los Estados Unidos y las metodologías para realizarlo (Federal Highway Administration, 2011). En tal documento se resalta la efectividad del costo, la responsabilidad ambiental y el buen desempeño, como aspectos esenciales que un buen

proceso de reciclaje debe satisfacer. Adicionalmente, se indica que es necesario promover la utilización de la mayor cantidad de RAP, pero garantizando el mismo o mejor desempeño que tiene una mezcla asfáltica completamente virgen.

En el Cuadro 1 se presenta la cantidad de RAP utilizado para diferentes proyectos en los Estados Unidos.

Cuadro 1. Proyectos de campo utilizando altos RAP

Lugar	% RAP	Fecha de construcción
North Carolina	40%	Sep-07
South Carolina	30 y 50 %	Oct-07
Wisconsin	25%	Nov-07
Florida	45%	Dec-07
Kansas	30 a 40 %	May-08
Delaware	35%	verano 2008
Minnesota (MnROAD)	30%	2008
Illinois	10 a 50 % permitido	2008

Fuente: Federal Highway Administration (2019)

2. MARCO TEÓRICO

La determinación de la fatiga de las mezclas asfálticas permite encontrar la deformación máxima de la misma antes de que ocurra la falla a un número de ciclos de carga determinado. Este análisis predice la vida útil de la mezcla asfáltica. Este daño ocurre en las capas ligadas de pavimento flexible y se presenta cuando se generan valores elevados de deformación a tracción en la zona inferior de la capa asfáltica, producto de las cargas repetitivas (Hsu y Tseng 1996; Masad, Muhunthan, Shashidhar, y Harman, 1998).

Según la literatura, la definición para el fenómeno de fatiga de mezclas asfálticas es un proceso de cambio estructural permanente y progresivo, que ocurre en un punto del material sujeto a esfuerzos y deformaciones de amplitudes variables y tiene como resultado la aparición de fisuras que conducen a una fractura total del material, debido a la aplicación de un número determinado de repeticiones o ciclos (Rondón, Reyes, González, y Vásquez, 2012). De acuerdo con Lundstrom, Di Benedetto, y Isacson (2004), se reconocen dos fases de daño: en la primera, conocida como la fase de iniciación, hay aparición de microfisuras generando disminución en la rigidez de la estructura; en la segunda fase, llamada de propagación, hay unión de microfisuras ocasionando que éstas sean cada

vez mayores y que se propaguen rápidamente. Según el mismo autor, los principales factores que inciden en la respuesta a la fatiga de las mezclas asfálticas son: el método de compactación de la muestra, el modo de carga y el tipo de ensayo aplicado, los parámetros de diseño de la mezcla y las variables asociadas al ambiente.

De acuerdo con Tangella, Craus, Deacon, y Monismith (Strategic Highway Research Program, 1990), los métodos de ensayo que se emplean para medir el comportamiento de la fatiga pueden agruparse en las siguientes categorías: ensayos de flexión simple, ensayos de flexión con apoyos, ensayos axiales directos, ensayos diametrales, ensayos triaxiales y ensayos de pistas. Los ensayos de laboratorio han verificado que la relación entre la deformación ϵ (producida por la carga) y la duración o vida de fatiga del material, representada por el número, N , de veces que soporta la carga antes de romperse por fatiga están ligadas por la Ecuación 1.

$$N = K_1 * \epsilon^{K_2} \quad (1)$$

donde

N : Número de ciclos de carga hasta la fatiga del material.

ϵ : Deformación unitaria de tracción (en micro deformaciones, $\mu\text{m}/\text{m}$).

K_1 y K_2 : Constantes que describen el comportamiento a fatiga del material.

Estos últimos se ha comprobado que están principalmente afectados por el módulo de la mezcla, el contenido de asfalto, la viscosidad del asfalto, la granulometría y la naturaleza de los agregados, el contenido de aire y la temperatura del pavimento.

El conocer el comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas es básico para proceder al dimensionamiento del pavimento en los métodos analíticos. La falla por fatiga fue observada en primer lugar en los materiales metálicos, cuando se sometían a una tensión inferior a la de rotura y se fisuraban si se aplicaba la sollicitación repetidamente. Desde los primeros estudios sobre este tipo de fisura por fatiga en metales se dedujo que podía establecerse una relación logarítmica entre la tensión o deformación impuesta y el número de sollicitaciones, como se muestra a continuación (Ecuaciones 2 y 3).

$$\log N\epsilon = a - (b * \log \epsilon) \quad (2)$$

$$\log N\sigma = c - (d * \log \sigma) \quad (3)$$

donde

$N\epsilon$, $N\sigma$: Número de aplicaciones de carga aplicados en un ensayo de fatiga a deformación o tensión controlada.

ϵ : deformación impuesta, en un ensayo de fatiga a deformación controlada.

σ : tensión impuesta, en un ensayo de fatiga a tensión controlada.

a , b , c y d : Características del material ensayado.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

La selección de las muestras de RAP se consiguió a través del Instituto de Desarrollo Urbano-IDU, entidad gubernamental administradora de la red vial en Bogotá con dominio y potestad del material RAP, quienes tienen acopios de diferentes proyectos de la ciudad en donde se están llevando a cabo procesos de mejoramiento vial a partir del fresado y reemplazo de la carpeta asfáltica. Los materiales se clasificaron en cinco grupos con similitud visual homogénea (Figura 1). La selección de los acopios para esta fase de la investigación se realizó con base en la especificación I.N.V. E-201-07.



Figura 1. Muestras de RAP de los diferentes acopios

Se realizó la granulometría del material RAP original (Cuadro 2) para determinar la distribución de los agregados y su correspondencia con las mezclas de rodadura especificadas en la norma colombiana. La distribución gráfica de estos agregados se observa en la Figura 2.

Como se observa en la Figura 2, la granulometría no cumple con las especificaciones del límite inferior, de tal manera que

se realizó un arreglo granulométrico al RAP con agregado virgen para dar cumplimiento a la granulometría más cercana al RAP utilizado para la investigación. De acuerdo con los tamaños obtenidos durante el fresado, se escogió la Mezcla Densa en Frío con tamaño máximo nominal 25mm (MDF-25) según I.N.V. E-440-13. Ver Cuadro 3.

Cuadro 2. Granulometría del RAP original

Tamiz	Abertura (mm)	Peso (g)	% Retenido	% Pasa	Límite Inferior	Límite Superior
1	25,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4	19,00	600,90	6,49	93,51	80	95
1/2	12,50	1273,60	13,75	79,77	0	0
3/8	9,50	678,80	7,33	72,44	69	75
No. 4	4,75	1782,50	19,24	53,20	47	62
No. 8	2,26	1661,90	17,94	35,26	35	50
No. 50	0,30	2348,20	25,35	9,91	13	23
No. 200	0,08	853,70	9,22	0,70	3	8
Fondo		64,40	0,70	0,00		

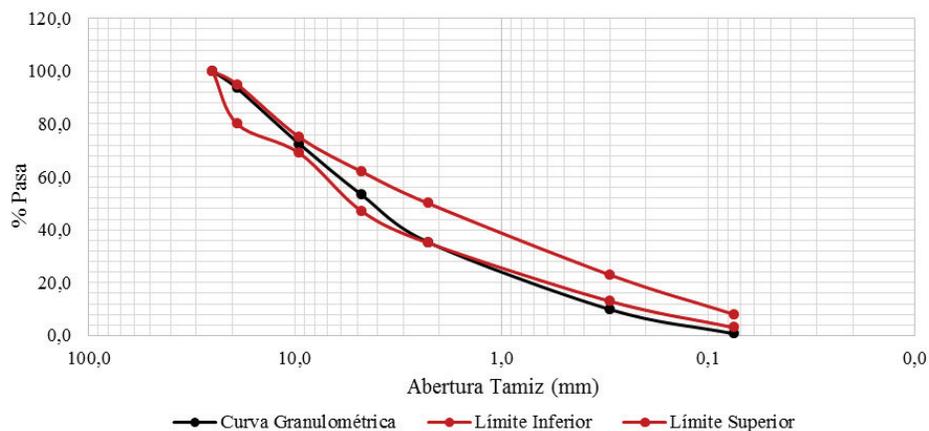


Figura 2. Curva granulométrica del material RAP original

Cuadro 3. Arreglo granulométrico del RAP

Tamiz	Abertura (mm)	Peso (gr)	% Retenido	% Pasa	Límite Inferior	Límite Superior
1	25	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4	19	87,50	12,50	87,50	80	95
1/2	12,5	54,21	7,74	79,75	0	0
3/8	9,5	51,31	7,33	72,42	69	75
No. 4	4,75	134,76	19,25	53,17	47	62
No. 8	2,26	74,69	10,67	42,50	35	50
No. 50	0,3	171,50	24,50	18,00	13	23
No. 200	0,075	88,20	12,60	5,40	3	8
Fondo		37,80	5,40	0,00		
Total		699,97				

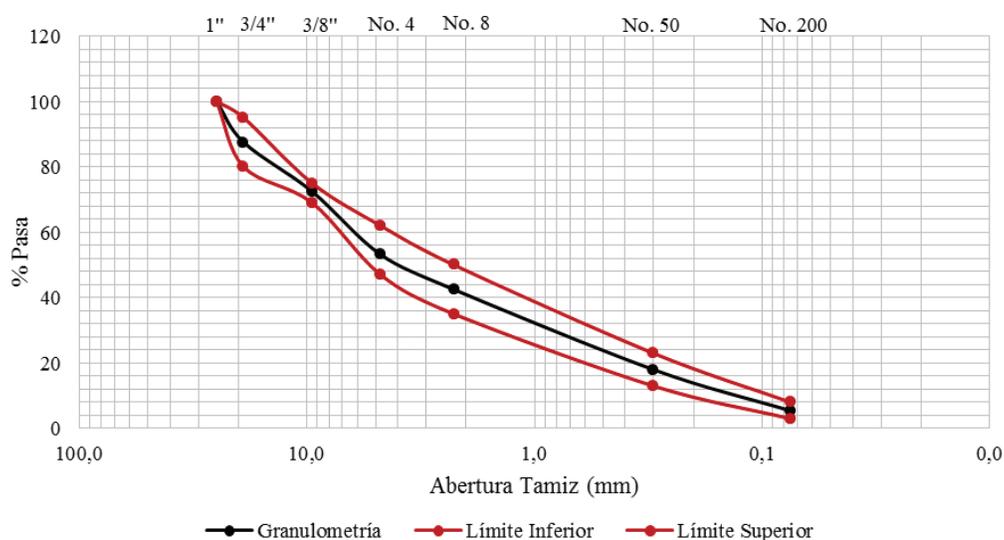


Figura 3. Curva granulométrica del RAP mejorada con agregado virgen

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Fatiga

En la presente investigación se realizó el ensayo de fatiga con muestras trapezoidales, en cuyo caso el comportamiento a la fatiga se estudia por medio de ensayos de flexión realizados a 25°C y 10 Hz.

El principio del ensayo se basa en someter una probeta trapezoidal a un desplazamiento sinusoidal de amplitud constante en la parte superior. Las probetas deben estar sujetas en su base inferior; en la base superior se les aplica un tren de on-

das continuas sinusoidales a una amplitud dada. La ruptura se define en el momento en que la fuerza que se aplica en el extremo de la probeta se reduce a la mitad de la inicial para un desplazamiento dado.

Es necesario evaluar varias amplitudes del desplazamiento para determinar la pendiente de la ley de fatiga (b), y el valor de la deformación admisible, ϵ_p , para 1.000.000 de Hertz.

Las probetas son de forma trapezoidal con altura de 250 mm, espesor de 25 mm y bases mayor y menor de 70 mm y 25 mm, respectivamente, y compactada en el equipo universal garantizando la densidad obtenida en el diseño volumétrico de la mezcla. Ver Figura 4.

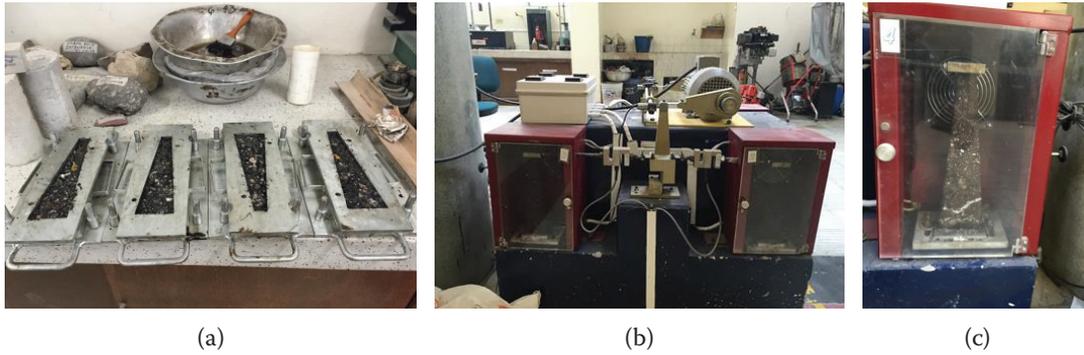


Figura 4. (a) Elaboración de las briquetas trapezoidales, (b) equipo de ensayo, (c) falla de la briqueta RAP original

La ley de fatiga del material RAP original para una Mezcla Densa en Frío (MDF-25) se realizó con base en la norma francesa NFP 98 261-1 a una temperatura ambiente de laboratorio (20°C), teniendo en cuenta tres deformaciones controladas de 90, 150 y 220 μm . Ver la Figura 5.

Para analizar la diferencia en fatiga del material RAP en contraste con una mezcla modificada con emulsión asfáltica Catiónica de Rompimiento Lento (CRL-1) y Grano de Caucho Reciclado (GCR), se realizó el mismo proceso. Ver la Figura 6.

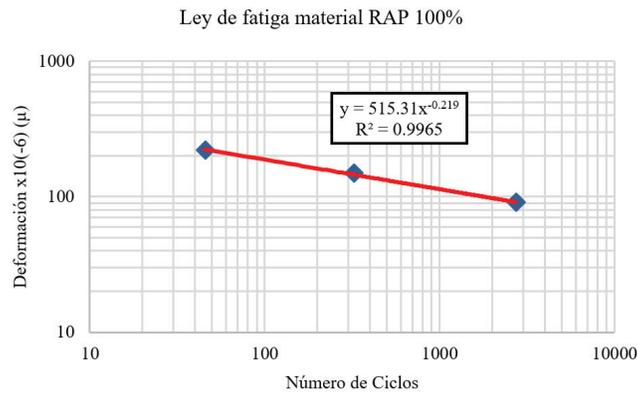


Figura 5. Ley de fatiga del material RAP original

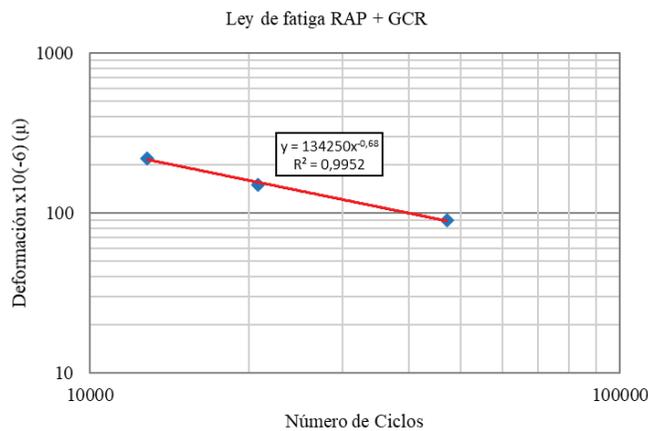


Figura 6. Ley de fatiga para la mezcla RAP+GCR

La comparación de la ley de fatiga de las dos mezclas, 100% RAP y RAP+GCR, evidencia la diferencia de pendientes entre las dos, de tal manera que, para un millón de ciclos, la mezcla 100% RAP presenta mayor deformación respecto a la modificada con emulsión CRL-1 y GCR.

4.2. Ahuellamiento

Para la determinación del ahuellamiento se construyó el equipo descrito en la norma INV E 756 13, y se realizaron las briquetas para tres ensayos y dos briquetas por cada uno, según esta especificación. Al momento de presentar este artículo se tiene la curva de ahuellamiento para el material modificado con emulsión asfáltica y caucho reciclado. Sin

embargo, se están realizando muestras de contraste para tener información suficiente de repetitividad de los ensayos de deformación plástica. Ver la Figura 7.

Para la determinación del desempeño bajo las sollicitaciones esperadas se diseñó y construyó el equipo de ahuellamiento, de acuerdo con la especificación INV E 756-13. Con el propósito de someter el material a condiciones extremas para determinar su respuesta, se consideró alto tráfico. Ver la Figura 8.

La deformación plástica para este primer set (seis briquetas) según la INV E 756-13, arrojó resultados de 0,34 cm de deformación máxima, sin embargo, este dato debe ser contrastado con más muestras y diferentes contenidos de asfalto residual.



Figura 7. Equipo construido según norma INVIAS 756-13 para la determinación del ahuellamiento de mezclas asfálticas¹

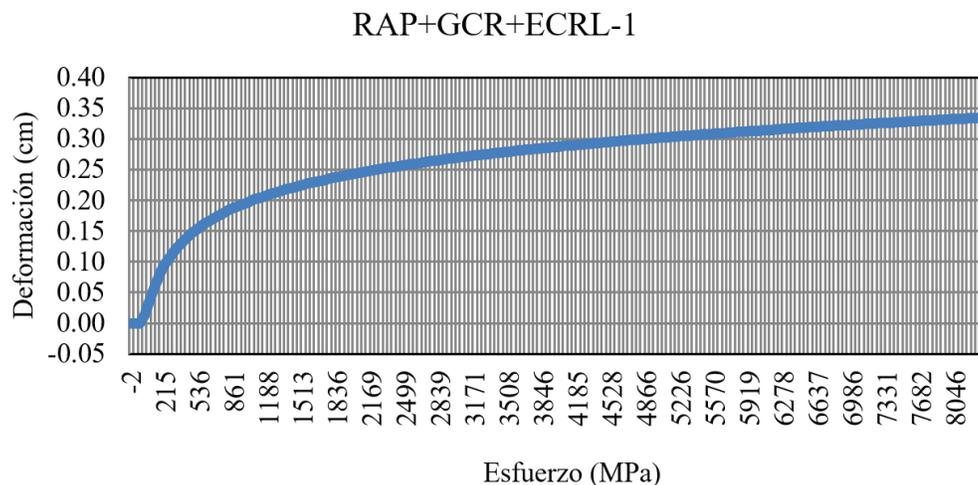


Figura 8. Deformación plástica de la mezcla con RAP modificado con GCR y ECRL-1

¹Equipo financiado por la Vicerrectoría de Investigación, Universidad de la Salle, 2015.

5. CONCLUSIONES

Una de las variables que tuvo mayor influencia durante la consecución del RAP fue el contenido de ligante presente en la mezcla envejecida. Este parámetro es esencial para garantizar la homogeneidad del RAP seleccionado.

Debido a las diversas granulometrías que se consiguen durante los procesos de reciclaje *in situ*, la selección del RAP debe ajustarse a una granulometría para su reutilización, lo cual implica contar con la adición de material en los tamices en los cuales no se da cumplimiento a la granulometría. En este caso, la adición fue de arenas y material fino para quedar en la franja de la mezcla de diseño nueva tipo MDF-25.

El ensayo de fatiga para la mezcla de RAP completamente virgen y sin ligante no se consiguió, dado que por los procesos de envejecimiento la adhesión se pierde completamente. Debido a esto, se realizó un ajuste con emulsión CRL-1+GCR.

Comparando la ley de fatiga para la mezcla con 100% RAP y la mezcla RAP+GCR, se evidencia que los resultados de la adición de emulsión CRL-1 y GCR, mejoran considerablemente los resultados de deformación de las mezclas con pavimento reciclado.

La deformación plástica para la mezcla RAP modificada con emulsión CRL-1 y GCR, da como resultado en esta primera etapa, 0,30 cm en promedio de las seis briquetas. Sin embargo, este valor se debe contrastar con un mayor número de muestras y diferentes dosificaciones de asfalto residual.

6. AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de la Salle por el apoyo financiero para esta investigación, a la empresa Incoasfaltos y al Instituto de Desarrollo Urbano-IDU por su contribución con los materiales para esta investigación. Al ingeniero Fredy Reyes por su asesoría para la construcción del equipo según norma INVIAS 756-13.

7. REFERENCIAS

- Espinosa Rodríguez, D. A. (2009). *Guía de mantenimiento para pavimentos asfálticos de vías locales en Bogotá*. (Tesis de grado). Universidad de la Salle, Bogotá.
- Federal Highway Administration (2011). *Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: State of the practice* (No. FHWA-HRT-11-021). Recuperado de: <https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/40918>
- Federal Highway Administration (2019, Mayo 13). *Asphalt Pavement Recycling with Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)*. Recuperado de: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/RAP/>
- Fernández del Campo, J. A. (2003) Recycling in Road Pavements, *Third International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control*. University of Minho, Guimaraes.
- Figueroa, A. S., Velásquez, R., Reyes, F. A., y Bahía, H. (2013). Effect of water conditioning for extended periods on the properties of asphalt binders. *Transportation Research Record*, 2372(1), 34-45. doi: 10.3141/2372-05
- Herrera, O. A., Velásquez, C. E. D., Infante, A. S. F., Gómez, W. D. F., y Lizcano, F. A. R. (2013). Análisis de la alteración del asfalto colombiano en inmersión en agua. *Ingeniería y universidad*, 17(2), 427-442.
- Hsu, T., y Tseng, K. (1996). Effect of rest periods on fatigue response of asphalt concrete mixtures. *Journal of Transportation Engineering*, 122 (4), 316–322. doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(1996)122:4(316)
- Illinois Center for Transportation (2007). *Reclaimed Asphalt Pavement - A Literature Review* (FHWA-ICT-07-001). Recuperado de: <http://hdl.handle.net/2142/46007>
- Lundstrom, R., Di Benedetto, H., y Isacsson, U. (2004). Influence of asphalt mixture stiffness on fatigue failure. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(6), 516-525. doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:6(516)

- Masad, E., Muhunthan, B., Shashidhar, N., y Harman, T. (1998). Aggregate Orientation and Segregation in Asphalt Concrete. *Application of Geotechnical Principles in Pavement Engineering, Proceedings of Sessions of Geo-Congress 98*. American Society of Civil Engineers, Boston.
- Minnesota Department of Transportation (2002). *Investigation of recycled asphalt pavement (RAP) mixtures* (MN/RC – 2002-15). Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11299/758>
- Norma NFP 98 261-1. *Test relating to pavements - determination of the fatigue resistance of bituminous mixtures - Part 1: Two points flexural fatigue test with constant displacement on trapezoidal isocel specimens*. Association Francaise de Normalisation, 2001.
- Norma I.N.V. E-201-07. *Muestreo de materiales para la construcción de carreteras*. INVIAS, 2007.
- Norma I.N.V. E-440-13. *Mezcla densa en frío*. INVIAS, 2013.
- Norma I.N.V. E.-756-13. *Resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas mediante la pista de ensayo de laboratorio*. INVIAS, 2013.
- Ostos, L., Duarte, J. M., Vargas, G. L, Camacho, J., Reyes-Ortiz, O. J. (2012). Comportamiento de mezclas asfálticas del Instituto de Desarrollo Urbano con adición de pavimento reciclado. *VI Jornadas de Pavimentos y Mantenimiento Vial*. Bogotá.
- Qin, Q., Schabron, J. E., Boysen, R. B., y Farrar, M. J. (2014). Field Aging Effect on Chemistry and Rheology of Asphalt Binders and Rheological Predictions for Field Aging. *Fuel*, 121, 86-94. doi: 10.1016/j.fuel.2013.12.040
- Rondón, H., Reyes, F., González, L., y Vásquez, S. (2012). *Ahuellamiento y fatiga en mezclas asfálticas*. Bogotá, Colombia: Ecoe ediciones Ltda.
- Strategic Highway Research Program (1990). *Summary report on fatigue response of asphalt mixtures* (No. SHRP-A-312). Recuperado de: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/SHRP-A-312.pdf>

Materiales granulares mejorados con emulsión asfáltica catiónica para subbases de pavimentos

Improved granular materials with cationic asphalt emulsion for pavement sub-bases

MSc. M. Isabel Zambrano Mesa

Facultad de Ciencias Matemáticas Físicas y Químicas,
Universidad Técnica de Manabí (UTM)
Portoviejo, Ecuador
misabel@gmail.com

Dr. Eduardo Tejeda Piusseaut

Facultad de Civil, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" (CUJAE).
Facultad de Ciencias Matemáticas Físicas y Químicas
Universidad Técnica de Manabí (UTM)
La Habana, Cuba
etejeda@utm.edu.ec

Dra. Anadelys Alonso Aaenlle

Departamento de Viales. Facultad de Civil.,
Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría"
(CUJAE)
La Habana, Cuba
anadelys@civil.cujae.edu.cu

Fecha de recepción: 05 de abril de 2020 / **Fecha de aprobación:** 16 de julio de 2020

RESUMEN

La utilización de bases tratadas con conglomerantes hidráulicos o ligantes asfálticos, se ha convertido en una solución habitual en la construcción de bases o subbases de pavimentos, por la necesidad de alcanzar altas prestaciones, debido al incremento de las repeticiones y magnitudes de las cargas del transporte automotor. El tratamiento con aditivos proporciona a las capas del pavimento una mayor resistencia y comportamiento en el tiempo. Con el propósito de evaluar la efectividad de uno de estos tratamientos, se seleccionó un material granular que no cumple con las exigencias de una subbase de carreteras debido a su alta plasticidad, para incorporarle una emulsión asfáltica catiónica y comprobar la variación que experimenta en sus prestaciones, en el laboratorio. Con el tratamiento se han alcanzado buenos resultados, incrementando la resistencia a CBR tras inmersión y en la resistencia conservada. Se muestran también las modificaciones que trae el uso de estos tratamientos en el comportamiento de una estructura de pavimento en la que se ha concebido una capa de subbase estabilizada con emulsión, en lugar de una subbase tradicional no aglomerada, utilizando para ello el procedimiento empírico-mecanicista de la Guía de Diseño AASTHO (American Association of State Highway and Transportation Officials).

Palabras clave: pavimentos flexibles, emulsiones asfálticas, bases tratadas con emulsiones asfálticas, resistencia conservada.

ABSTRACT

The use of bases treated with hydraulic binders or asphalt binders has become a common solution in the construction of pavement bases or sub-bases due to the need to achieve high performance, and also because of the increment of the repetitions and magnitudes of loads in transportation. The treatment with additives provides greater resistance and behavior to the pavement layers over time. A granular material was selected with the purpose of evaluating the effectiveness of one of these treatments. This material did not meet the requirements of a road subbase because of its high plasticity. A cationic asphalt emulsion was incorporated to this granular material in order to check the variations that this treatment could experience regarding its resistance in the laboratory. Finally, good results were obtained with this treatment. An increase in resistance to CBR after immersion and conserved resistance were observed. The modifications produced after the treatments, are also shown by comparing a conventional flexible structure and a structure with a stabilized sub-base layer with an emulsion instead of a non-agglomerate traditional subbase, using an empirical-mechanistic procedure of AASTHO Design Guide.

Keywords: flexible pavements, asphalt emulsion, asphalt emulsion treated base, conserved resistance.

1. INTRODUCCIÓN

En la República del Ecuador la mayor parte de los intercambios comerciales a nivel nacional e internacional se realizan por carreteras, en su mayoría construidas con pavimentos flexibles, formadas por superficies de hormigón asfáltico en caliente y capas de bases y subbases de materiales granulares. A pesar del esfuerzo del gobierno en mejorar las comunicaciones en todo el territorio, existen vías con elevado tráfico pesado que no completan su periodo de vida útil en buenas condiciones de serviciabilidad, lo que podría mejorarse si se utilizaran materiales aglomerados en las bases o subbases.

Se conoce que el tráfico pesado exige calidades de bases para pavimentos flexibles con elevada resistencia, para resistir las altas tensiones producidas por el tráfico. De ahí que se utilicen variantes para obtener resistencias más elevadas en las que los materiales granulares son tratados con diferentes aglomerantes o ligantes asfálticos, que mejoran significativamente las prestaciones de los agregados.

Muchos países de la región están sujetos a limitaciones presupuestarias importantes. Por ello, la tecnología en frío realizada con emulsiones asfálticas parece una solución apropiada para toda la región, en la que existe una extensa red de vías secundarias y terciarias. Sin embargo, son escasas las experiencias en el Ecuador en el tratamiento de materiales granulares, de ahí la necesidad de divulgar las investigaciones que muestren la efectividad de estas soluciones en la mejora del comportamiento de los materiales de pavimentos, respondiendo al necesario incremento de la transportación que demanda el desarrollo.

Con este propósito se muestran en este trabajo los resultados de laboratorio obtenidos con materiales pétreos que no son utilizados en la construcción de pavimentos, ya que no satisfacen todas las exigencias para la construcción de subbases de carreteras, pero la adición de emulsión asfáltica permite que se alcancen resistencias acordes a las exigencias de subbase. Se muestra el resultado del diseño de la mezcla de los agregados con una emulsión asfáltica catiónica, demostrándose las mejoras de sus propiedades.

Asimismo, se persigue demostrar cuán importante puede ser el mejoramiento de un material de subbase con este tratamiento, en el comportamiento estructural del pavimento. Se compara una estructura típicamente flexible, con base y subbase no aglomerada, con otra estructura equivalente, con una subbase aglomerada con la emulsión catiónica, formando una estructura invertida. Se utiliza para el diseño,

el procedimiento empírico-mecanicista de la Guía de Diseño (AASHTO 2004 y AASTHO 2008), que permite predecir el comportamiento, pronosticando la evolución en el tiempo de las deformaciones permanentes y el Índice de Regularidad Internacional (IRI).

En relación con la formulación de las mezclas asfálticas con emulsión, el método más divulgado es el de inmersión-compresión. Este procedimiento, creado inicialmente para valorar la susceptibilidad al agua de las mezclas en caliente, implica compactar las probetas con una carga excesiva si se trata de una mezcla en frío. En la bibliografía sobre el tema se encuentran densidades de laboratorio elevadas y valores de resistencia en correspondencia con ello; sin embargo, en los tramos ejecutados, las mediciones de densidades in situ son muy inferiores (Tejeda, 1999).

Como parte del trabajo de Sánchez y colaboradores (Sánchez, Perez, Miro, Paez-Dueñas, 1998) se destaca la alta densidad alcanzada por este procedimiento, muy lejos de la conseguida en obra. Se afirma en este trabajo:

El problema que se plantea es que el porcentaje de emulsión se selecciona sobre un material distinto al que se va a conseguir en obra y que quizás, con los mismos criterios, pero sobre un material más similar al real, podrían obtenerse resultados diferentes. (Sánchez et al., 1998)

Los ensayos de control en el campo dieron densidades mucho menores que las registradas durante la formulación de la mezcla en el laboratorio. A pesar de que se probaron en obra diferentes equipos y procedimientos de compactación, se comprobó la gran dificultad en acercarse a las densidades de laboratorio, con densidades de obra entre el 77-89% de la densidad de laboratorio obtenida por compactación estática de una carga de 17 t.

Existe mayor semejanza entre las densidades de obra y las que se alcanzaron con la compactación Marshall. Esto no puede pasarse por alto en la comparación, porque es sabido que la compactación de un aglomerado asfáltico en caliente se realiza de forma más eficiente que en un suelo y que en una mezcla en frío (Arquíé, 1971). ¿Cómo puede alcanzarse una mezcla en frío densidades del orden de los $2,40\text{g}/\text{cm}^3$, cuando no se alcanzan en una mezcla en caliente de características similares? Es evidente que en esto influye la forma de aplicación de la compactación y la magnitud de la carga utilizada en el laboratorio.

Por otra parte, se sabe que la temperatura de 60°C representa una zona crítica en los betunes. Se han comprobado a esta temperatura fenómenos de deformación plástica debidos a

modificaciones en la consistencia y descritos como una fase de transición en el comportamiento viscoso relacionado con la susceptibilidad a la temperatura (Muñoz, 1983). Esta investigación fue ratificada posteriormente en el trabajo doctoral de (Pérez, 1998), quien demuestra que este fenómeno incluso se puede producir a una temperatura más baja. Se ha podido observar que el módulo a dicha temperatura alcanza valores tan elevados que no es posible lograrlo a temperatura ambiente. ¿Para qué definir un módulo en condiciones del laboratorio que la mezcla nunca alcanzará? (Tejeda, 1999). Por esta razón sería conveniente estudiar la posibilidad de madurar la mezcla a menor temperatura.

Por consiguiente, en las mezclas en frío se puede hablar de un comportamiento ante la compactación comparable al de los suelos, ya que son una mezcla de granos sólidos, aire, agua y emulsión, un líquido de consistencia semejante al agua. Los fluidos durante el proceso de compactación desempeñan el mismo papel que el agua en los suelos; por ello, buscar una analogía con éstos pudiera conducir a esclarecer y comprender determinados comportamientos (Tejeda, 1999).

El objetivo de la investigación es demostrar el incremento de la resistencia a CBR que experimenta un material granular, con alta plasticidad, mediante la incorporación de una emulsión asfáltica catiónica. También, mostrar la influencia que tiene este incremento de resistencia en el comportamiento de la estructura de pavimento, evaluado a través del IRI y las deformaciones permanentes, aplicando el procedimiento empírico-mecanicista de la Guía de Diseño AASTHO.

2. METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE SUBBASE TRATADA CON EMULSIÓN

En los pavimentos flexibles, la superficie de rodamiento, formada por una capa asfáltica, soporta directamente las solicitaciones del tránsito, absorbiendo los esfuerzos horizontales y parte de los verticales, ya que las cargas de los vehículos se distribuyen hacia las capas inferiores, la base y la subbase. La capa de base, situada inmediatamente debajo de la carpeta, tiene como función absorber la mayor parte de los esfuerzos verticales, de modo que su rigidez o resistencia a la deformación bajo las solicitaciones repetidas del tránsito, debe estar en correspondencia con la intensidad del tránsito pesado. Así, para tránsito medio y ligero se emplean las tradicionales bases granulares, pero para tránsito pesado se emplean ya materiales granulares tratados con algún tipo de cementante (Fonseca, 2001).

La subbase, situada debajo de la base y sobre la subrasante, brinda apoyo uniforme y permanente al pavimento. Tiene la función de proporcionar a la base un cimiento uniforme y constituir una adecuada plataforma de trabajo para su colocación y compactación. Se usan normalmente subbases granulares constituidas por suelos, materiales cribados o de trituración parcial, así como suelos estabilizados (Fonseca, 2001).

Las subbases granulares están compuestas por suelos naturales o en combinación con agregados obtenidos por proceso de trituración o de cribado. Deben cumplir determinados requisitos de calidad, estableciéndose una capacidad de soporte mínima de 30% y la porción que pase el tamiz N°40 deberá tener un índice de plasticidad menor que 6% y un Límite Líquido máximo de 25%. También se establece un coeficiente de los Ángeles inferior al 50%. El material de subbase granular debe estar exento de materias vegetales, basura, terrones de arcilla o sustancias que incorporadas dentro de la capa de subbase granular puedan causar fallas en el pavimento. Tales especificaciones son establecidas en las normas ecuatorianas (MTOPT, 2002).

Se precisan tres tipos de subbases, con diferentes especificaciones granulométricas. Los materiales clase 1 están constituidos por agregados obtenidos por trituración de roca o gravas y graduados uniformemente y por lo menos el 30% del agregado deberá obtenerse por proceso de trituración. Las subbases clase 2 están constituidas por agregados obtenidos mediante trituración o cribado en yacimientos de piedras fragmentadas naturalmente o de gravas y graduados uniformemente. La subbase granular clase 3 estará constituida por agregados naturales (MTOPT, 2002).

El comportamiento de las capas granulares, pueden ser mejoradas mediante la incorporación de emulsiones asfálticas. La emulsión asfáltica es un producto conseguido por la dispersión de una fase asfáltica en una fase acuosa, donde las partículas de asfalto quedan cargadas eléctricamente por la acción de un agente emulsificante. Las propiedades de la emulsión dependen notablemente del producto químico usado como emulsificante, que determina si la emulsión es aniónica (polaridad negativa) o catiónica (polaridad positiva).

Las emulsiones asfálticas se pueden clasificar también en emulsiones de rompimiento rápido, de rompimiento medio y de rompimiento lento, de acuerdo con su estabilidad. En estabilizaciones de suelos o agregados tratados, deben usarse emulsiones de rompimiento lento. El propósito de estos tratamientos es mejorar las características resistentes del material, aumentando su cohesión y reduciendo la capacidad de absorción de agua.

La norma colombiana (INVIAS 2012) exige muy buena calidad para los materiales a estabilizar con una emulsión asfáltica. Podrán ser agregados pétreos o suelos naturales, pudiendo ser triturados, clasificados o una mezcla de ambos, exentos de materia orgánica o cualquier otra sustancia perjudicial, con un coeficiente de desgaste no mayor de cincuenta por ciento (50%), así como utilizar una emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta.

Para su utilización en bases o subbases de pavimentos, se requiere además una granulometría continua, existiendo una amplia gama de estos materiales, dentro de los cuales se encuentra la gravaemulsión. Las especificaciones para estos agregados, independientemente de su procedencia, deberán encontrarse exentos de materias vegetales, basura, terrones de arcilla u otras sustancias incorporadas que puedan resultar ambientalmente nocivas o inconvenientes para el buen comportamiento de la capa estabilizada (PROAS, 2013).

En estas mezclas, el agregado forma un esqueleto mineral semejante al de una base granular artificial, que asegura una transmisión de los esfuerzos de compresión por rozamiento interno. Los gruesos quedan encajados por un mortero que rellena sus huecos, dotando al conjunto de cohesión, flexibilidad e impermeabilidad. Esta estructura se mantiene hasta que, en el proceso de compactación, se produce un laminado de los glóbulos de betún que provoca la rotura definitiva, con lo que se consigue desarrollar una buena cohesión y una alta compacidad (Nerveda, 2015).

En lo que concierne a la formulación de la mezcla, el contenido óptimo de agua de preenvuelta se debe precisar basándose principalmente en la humedad con la que se obtenga un cubrimiento uniforme y homogéneo del material mineral por parte del ligante asfáltico, mientras que la humedad para la compactación será la óptima del ensayo modificado del agregado por estabilizar. El diseño de la mezcla se efectúa normalmente utilizando el ensayo de inmersión-compresión, siguiendo el siguiente criterio para la determinación del contenido óptimo de ligante (INVIAS 2012):

- Resistencia seca (R_s) ≥ 10 kg/cm²
- Resistencia húmeda (R_h) ≥ 7.5 kg/cm²
- Resistencia conservada (R_c) $\geq 50\%$, donde: $R_c = \frac{R_h}{R_s} \times 100$

Estableciendo como principio de formulación de la mezcla que debe añadirse un contenido de emulsión capaz de proveer las características de una base estabilizada con emulsión, se exigen mayores valores de resistencia, pero

igualmente una resistencia conservada mayor o igual a 50%, según los criterios siguientes:

- Resistencia en seco mayor o igual a 20 kg/cm²
- Resistencia tras inmersión mayor o igual a 15 kg/cm²

La densidad media de un tramo construido debe ser mayor o igual al 95% de la densidad máxima del ensayo Proctor modificado y la humedad de compactación será la óptima del propio ensayo. Las densidades deben tomarse después de 3 semanas como mínimo, cuando se considera que ha cumplido su período de maduración, y se autoriza el cubrimiento de la capa estabilizada.

La temperatura y el tiempo de permanencia en estufa son factores con los cuales se acelera el proceso de maduración en el laboratorio. El método de inmersión-compresión utiliza una temperatura de maduración de 60°C. A temperaturas cercanas a los 60°C o menores, se crea una zona crítica en la que existe una transición en el comportamiento del asfalto, que lo hace más susceptible a la temperatura, por dicha razón es conveniente aplicar una temperatura menor, que puede ser de 50°C, para la reducción de la humedad en la mezcla (Tejeda, 1999).

En el método de inmersión-compresión, para la compactación de las probetas, se aplica una carga estática de 17 toneladas. Se ha observado que las densidades en laboratorio superan ampliamente las que se alcanzan en obra; densidades y resistencias favorecidos por la utilización de unas condiciones de preparación de las probetas que alteran su verdadero comportamiento.

En las mezclas en frío, como el caso de las estabilizaciones de agregados, se puede hablar de un comportamiento en la compactación comparable al de los suelos, ya que son una mezcla de granos sólidos, aire, agua y emulsión, un líquido de consistencia semejante al agua. Los fluidos durante el proceso de compactación desempeñan el mismo papel que el agua en los suelos; por ello, buscar una analogía con éstos podría conducir a esclarecer y comprender determinados comportamientos (Tejeda, 1999).

Por consiguiente, la prueba de CBR puede ser apropiada para evaluar la resistencia en la mezcla, determinándose del mismo modo la resistencia conservada, hallando la relación porcentual entre el CBR húmedo (tras inmersión) y el CBR seco (inmediato). Además, compactando las muestras con la energía de compactación del Proctor Modificado, de esta manera se utiliza el mismo procedimiento para las pruebas de

resistencia que para fijar el contenido de fluidos con el cual se debe compactar.

En todo diseño de mezcla se debe determinar (INVIAS 2012):

- El porcentaje de agua para mezcla y compactación, respecto al peso seco del componente mineral.
- El porcentaje óptimo de ligante residual y de emulsión, respecto al peso seco del componente mineral.
- El valor mínimo de la densidad seca en la mezcla.

Una vez seleccionada la emulsión catiónica, y comprobar su compatibilidad con los áridos se siguió en el diseño de mezcla el siguiente procedimiento:

- Obtención del porcentaje de fluidos con el que se logra máxima densidad durante la compactación de la mezcla, aplicando el ensayo Proctor Modificado.
- Preparación y compactación de las probetas, empleando un proceso de maduración en estufa en condiciones controladas de temperatura y tiempo, con 50°C y 24 horas.
- Proceso de inmersión para las probetas que se ensayarán en estas condiciones, por 96 horas (4 días).
- Determinación de la resistencia de las muestras compactadas y curadas mediante el ensayo de CBR. Ensayar dos grupos de probetas: en seco y tras inmersión.
- Selección del contenido de emulsión con el cual se alcanzan determinadas propiedades en la mezcla, de acuerdo con la resistencia tras inmersión y la resistencia conservada.

3. DESARROLLO DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO

3.1. Caracterización del Material Granular

El material granular fue primeramente ensayado para comprobar si se cumplen las especificaciones de los materiales de subbases, en cuanto a granulometría, plasticidad, dureza y resistencia a CBR, establecidas por las normas del MTOP. El Cuadro 1 contiene un resumen de las pruebas realizadas y comparaciones con las especificaciones del MOTP para las subbases.

La Figura 1 muestra el resultado del análisis granulométrico, donde se han incluido las especificaciones del MTOP para los materiales de subbases, clase 1. Como se observa, tiene granulometría continua y cumple con las especificaciones. El Límite Líquido es 35,4% y su Índice de Plasticidad es de 10,8%, por lo que incumple las especificaciones para subbase de pavimentos, en cuanto a plasticidad.

Como se conoce, las pruebas para la determinación de los índices de consistencia se realizan con material pasado por el tamiz N° 40, por lo que se presume que este agregado, con porcentaje pasado por dicho tamiz superior al 10%, además de IP superior al 6%, puede tener una afectación significativa de la resistencia a CBR, especialmente cuando es ensayado en condiciones de inmersión. En la Figura 2 se muestran resultados que demostraron esta predicción.

En el ensayo de compactación, ejecutado con la Energía del Proctor Modificado, se obtuvo una densidad máxima de 17,8 kN/m³ y humedad óptima de 16,0%. El material cumple las exigencias en cuanto a dureza, con un Coeficiente de Desgaste de Los Ángeles de 19%, ya que las especificaciones para subbase establecen un coeficiente inferior al 50%.

Cuadro 1. Características del material granular empleado en la investigación y especificaciones de materiales de subbase según normas del MOTP de Ecuador

ENSAYO	Norma de ensayo	Valores mínimos	Material granular
Límite Líquido (%)	ASTM D4318	≤ 25	44,9
Índice de Plasticidad (%)	ASTM D4318	≤ 6	19,7
Equivalente de arena (%)	ASTM D2419	≤ 50	28
Terrones de arcilla y partículas deleznable (%)	ASTM C142	≤ 2	0
Coeficiente de los Ángeles (%)	ASTM C131	≤ 50	19
Peso específico (g/cm ³)	ASTM C127	-	2,08
Densidad seca máxima en el ensayo Proctor Modificado (kN/m ³)	ASTM D1557	-	17,8
Humedad óptima del ensayo Proctor Modificado (%)		-	16,0
CBR mínimo del material sin emulsión asfáltica Compactado al 100% de la densidad seca máxima del Modificado, después de 4 días de inmersión	ASTM D1883	≥ 30	10,2

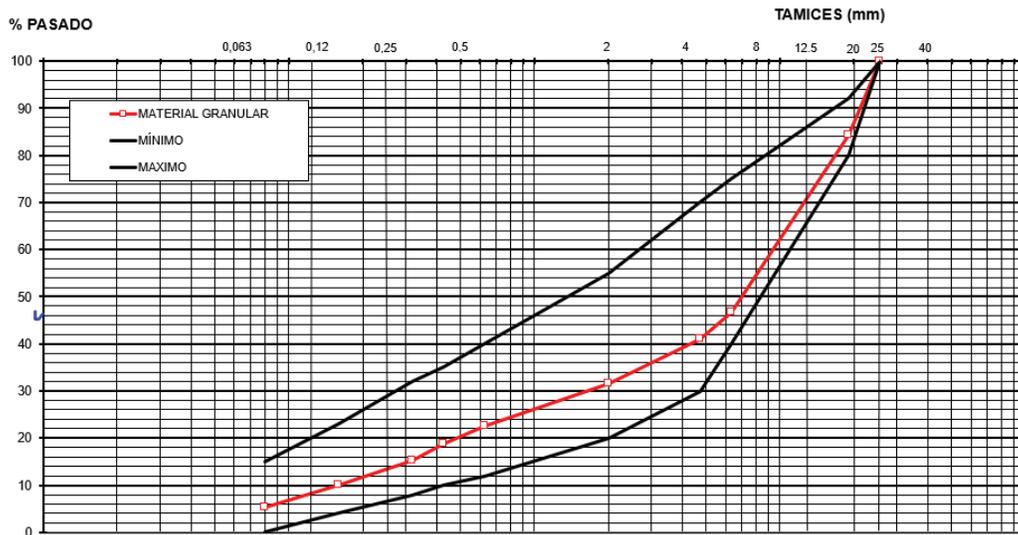


Figura 1. Análisis granulométrico del material granular utilizado en las pruebas

En la Figura 2 se muestran los resultados de la resistencia a CBR del material en forma natural, obtenidos con tres energías de compactación (estándar, intermedia y modificado), por consiguiente, densidades diferentes. En tal figura se puede observar que la resistencia en seco (de forma inmediata) es elevada, por encima del 30% con la energía intermedia y superior al 50% con la del modificado. Sin embargo, después de inmersión se observa una caída apreciable en la resistencia. Para la máxima densidad se obtuvo solo el 17,5% de resistencia conservada tras inmersión. Este descenso de la resistencia no solo se debe al elevado Índice Plástico, sino también a que es significativa la presencia de finos inferior al tamiz 40.

En resumen, el material incumple con las especificaciones para los Índices de Consistencia, además, presenta muy baja resistencia cuando se ensaya en inmersión, y presenta baja resistencia conservada. No obstante, es un agregado de apropiada dureza y buena composición granulométrica.

3.2. Resultados de la incorporación de emulsión asfáltica catiónica

La emulsión asfáltica empleada en la investigación es de tipo catiónica, clasificada como CSS-1 según la norma del MOTP de Ecuador. El Cuadro 2 contiene las especificaciones para este tipo de emulsión.

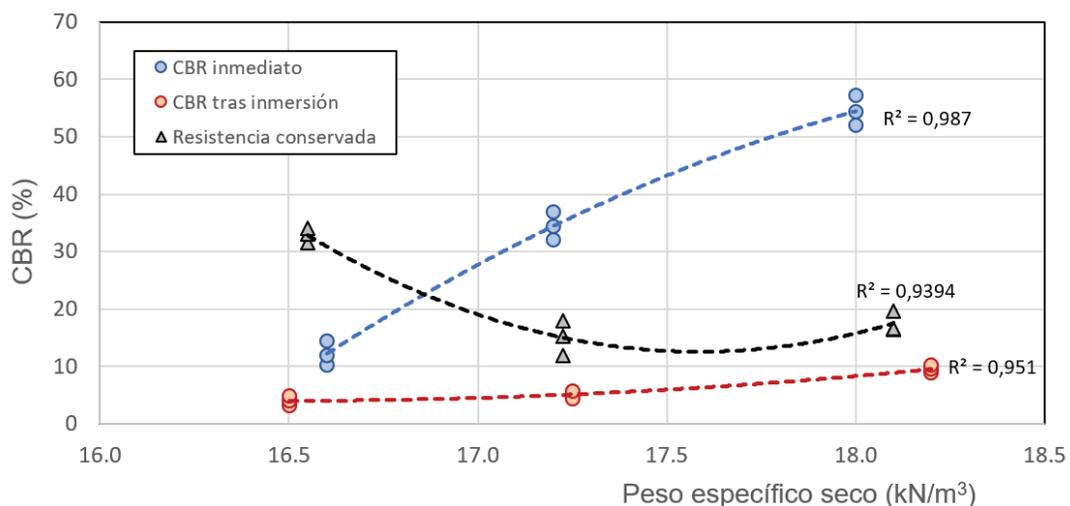


Figura 2. Resistencia a CBR del material granular en su estado natural. Resistencia inmediata (en seco), tras inmersión y conservada, para diferentes densidades

Cuadro 2. Características de la emulsión catiónica empleada en la fabricación de las mezclas, según normas del MOTP de Ecuador

Propiedades	Norma de ensayo	Mínimo	Máximo
Viscosidad Saybolt Furol a 25°C (s)	ASTM D7496 / ASTM D244	20	100
Prueba de estabilidad a 24h (%)	ASTM D6930	-	1
Mezcla con cemento (%)	NLT-144/91	-	2
Residuo por evaporación (%)	NLT-147/72	57	
Prueba de carga eléctrica de partículas	ASTM D7402 / ASTM D244	+	

Se prepararon muestras con porcentajes de emulsión entre 4 y 7%, respecto al peso de áridos, con variaciones del 1%. Se tuvo en cuenta añadir la cantidad de agua de preenvuelta necesaria para completar el contenido de fluidos, obtenido como la humedad óptima del material en su estado natural (16,0%). Por último, se realiza el mezclado tratando de lograr el reparto uniforme en la mezcla, antes de proceder a la compactación, aplicando la energía del Proctor Modificado. Posteriormente, las probetas fueron colocadas en estufa a 50°C, durante 24 horas para lograr eliminar el agua añadida y luego de enfriadas. Se ensayaron a CBR, la mitad de forma inmediata (en seco) y la otra mitad luego de un proceso de inmersión durante cuatro días.

La Figura 3 muestra los resultados de las pruebas realizadas incorporando porcentajes de emulsión de 4, 5, 6 y 7%. Es evidente el efecto que se ha logrado con la incorporación de la emulsión asfáltica sobre la resistencia del material. Se puede apreciar que en condiciones inmediatas (en seco)

se ha incrementado el CBR, incluso por encima del 100% para valores mayores al 5% de emulsión. Sin embargo, es conveniente considerar la pérdida de resistencia por acción del agua, como forma de evaluar la adhesividad pasiva del asfalto, es decir, la resistencia a ser desplazado por la acción del agua.

La resistencia tras inmersión se ha reducido apreciablemente, para cualquier contenido de emulsión, pero en todos los casos se alcanza un CBR superior al 50%, mayor a lo especificado para una subbase (30%). No se aprecian diferencias significativas en las resistencias en seco, tras inmersión y conservada con contenidos de emulsión iguales o superiores al 5%.

La resistencia para una base, que debe ser de 80% después de inmersión, no se alcanza con ningún porcentaje de emulsión, pero el material tratado cumple con la resistencia de una subbase o de una base para tráfico medio. Se puede adoptar el 5% de emulsión como porcentaje apropiado en una mezcla para subbase, con el que se logra el 60% de resistencia tras inmersión y un porcentaje de resistencia conservada superior al 60%.

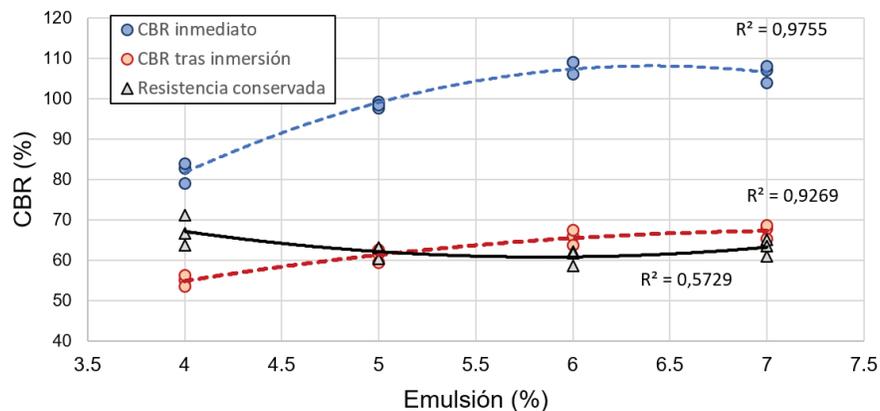


Figura 3. Resistencia a CBR del material granular después de ser tratado con emulsión asfáltica catiónica. Resistencia inmediata (en seco) y tras inmersión

4. COMPARACIÓN ENTRE EL COMPORTAMIENTO DE UNA ESTRUCTURA FLEXIBLE Y UNA SEMIRRÍGIDA

En este apartado se analiza si el empleo de emulsiones asfálticas para mejorar la subbase del pavimento asfáltico, formando un pavimento semirrígido, proporciona una estructura de mejor comportamiento que una estructura típicamente flexible, para lo cual se ha diseñado dos variantes: una estructura flexible, con la base y subbase compuestas por materiales granulares no aglomerados, y otra donde la subbase es tratada con emulsión asfáltica.

La subbase tratada con emulsión es el resultado de la mezcla del material granular, al que se le incorpora un porcentaje de emulsión del 5%. Para el diseño y evaluación del comportamiento de ambas estructuras se utiliza el procedimiento de diseño empírico-mecanicista, con el programa MEPDG (del inglés *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*) que permite, para el caso de pavimentos flexibles, establecer la evolución de los deterioros en el tiempo, tales como deformaciones y el Índice de Regularidad Internacional (IRI).

La guía de diseño en su metodología aplica la teoría elástica y modela la estructura con múltiples capas horizontales homogéneas, con un comportamiento elástico en la explanada y en las bases granulares y un comportamiento visco-elástico para los materiales asfálticos. Las estructuras flexibles se analizan con una superficie asfáltica, y materiales seleccionados para la base y subbase, de forma tal que las presiones verticales a nivel de la subrasante no superen las admisibles por el pavimento. Las estructuras semirrígidas, como las que contienen capas estabilizadas, posibilitan que la superficie trabaje solamente a compresión, siendo representada por el módulo dinámico que varía con la temperatura y la carga.

En general, en el diseño mediante el MEPDG, se adopta inicialmente un diseño de prueba, con varios parámetros estructurales (número y tipo de capas, el módulo resiliente de las capas y las características de la explanada) y se establecen las condiciones de tránsito y clima a las que será sometida. Como respuesta brinda las deformaciones y tensiones asociadas a las

cargas de tráfico y a las condiciones climáticas, acumulando el daño producido durante el período de diseño. A través de modelos de regresión empíricos, predice el daño en el tiempo de los deterioros típicos, tales como: fisuras, ahuellamientos e Índice de Regularidad Internacional (IRI) (Balay, Correia, Jouve, Hornych, y Paute, 1997).

El interés en este caso es analizar el comportamiento del IRI y de las deformaciones provocadas por las cargas y por las condiciones ambientales durante la vida de diseño, considerando las dos estructuras concebidas, la alternativa 1 con pavimento flexible y la alternativa 2 donde se concibe un pavimento semirrígido, con la subbase formada por la subbase mejorada con la emulsión.

4.1. Variables de Diseño del Pavimento

4.1.1. Tráfico de Diseño

En el cálculo de las repeticiones de ejes equivalentes de 18kips (8,2t) o ESAL's (*Equivalent Simple Axial Load*), se convierte el número de vehículos esperados (ADT) en el año inicial, a ejes equivalentes a la carga de diseño durante el período de diseño. Se tiene un tráfico balanceado y se estima que por el carril de diseño circule el 80% de camiones. El Cuadro 3 contiene el tráfico de diseño considerado en el diseño (AASTHO 93).

Las cargas por ejes son convertidas a equivalentes a través de los LEF (Factores de Equivalencia de Cargas), según los tipos de ejes (simple, tándem y tridem) en función de la magnitud de la carga y del número estructural del pavimento. Se consideró 4 como Número Estructural (SN) de partida y un PSI final de 2,5. El tráfico de diseño calculado es de $2,1 \times 10^7$ ejes de 18kips, durante un período de diseño de 15 años.

Cuadro 3. Tráfico de diseño

Tipo de vehículo	No. veh/día	Factor de crecimiento (15 años)	Camiones totales de diseño	factores de carga por vehículo	Ejes equivalentes
Livianos	11991	18,88			
volquetas y camiones	883	18,88	2433972	0,543	1321647
Camiones de 2 ejes	147	18,88	405203	3,190	1292596
2S1	1044	18,88	2877765	6,08	17496812
2S2	2	18,88	5513	6,07	33464
3S2	26	18,88	71668	6,06	434311
3S3	19	18,88	52373	8,655	453289
Vehículos totales	14112			Tráfico de Diseño	2,1 x 10 ⁷ (18kips)
Camiones totales	2121				

4.1.2. Condiciones del Cimiento

El material de cimiento o subrasante de la estructura es un suelo de tipo A-4 con una resistencia a CBR de 5%.

4.1.3. Materiales que Componen la Estructura

La superficie del pavimento es de hormigón asfáltico en caliente, con un grado de penetración del asfalto, entre 60 a 70 (AASHTO M226-80), con graduación por viscosidad de AC-20 (AASHTO M20-70) y con graduación PG en el intervalo de 22 a 70 (AASHTO MP1-98). La temperatura de cálculo asumida para la región del proyecto es de 68°F (30°C), por lo cual el módulo de la superficie es de 300000psi (2070MPa).

El material de base es una grava de granulometría continua, con porcentajes de arena, grava y fino, en los límites normales, por lo que se clasifica como A-1-a, según el sistema de clasificación de la AASHTO, de buena calidad como base. El Límite Líquido es de 6,0% y su Índice de Plasticidad es de solo 1,0%. El índice de CBR es superior al 80%, lo que representa un módulo de 38000psi (262MPa).

Para la subbase se tienen dos alternativas. Una variante es un material calizo con 30% de CBR, por lo que representa un módulo de 20000psi. El Límite Líquido es de 50,0% y su Índice de Plasticidad de 6,0%. La granulometría es continua y se encuentra dentro de los límites especificados como subbase de clase 1. Clasifica como un material A-2-5, por la AASTHO.

En la segunda variante se emplea el material granular que, como no posee las propiedades necesarias para ser empleado

como subbase, se estabilizó con emulsión asfáltica catiónica en un 5%, con lo cual se logró un 60% de CBR tras inmersión, mejorando sus prestaciones, con el doble de la resistencia exigida para una subbase (30%), y módulo de 42000psi (290MPa).

4.1.4. Dimensionamiento del Pavimento

Se contemplan dos alternativas de diseño: Alternativa 1, para un pavimento típico flexible y la Alternativa 2, para un pavimento semirrígido. El procedimiento del diseño empírico-mecanicista, de la Guía (AASHTO 2004 y AASTHO 2008), ofrece capacidad para considerar una gran variedad de secciones estructurales. La Figura 4 muestra esquemas de dos estructuras posibles en los diseños, el pavimento flexible convencional y el pavimento semirrígido, pero este último representa una sección invertida, donde la subbase se encuentra aglomerada con un ligante asfáltico. Esta segunda estructura constituye la segunda alternativa, donde la subbase se encuentra tratada con el 5% de la emulsión asfáltica catiónica.

En los diseños se consideraron como criterio de comportamiento los siguientes valores límites por defecto en el programa:

- Valor inicial del IRI: 1,0mm/m (63pulg/milla)
- Valor final del IRI: 2,7mm/m (170pulg/milla).
- Deformación permanente de la capa asfáltica de HA: 6,35mm (0,25pulgadas).
- Deformación permanente total del pavimento: 17,8mm (0,7pulgadas).
- Agrietamiento por fatiga (25% de daño)

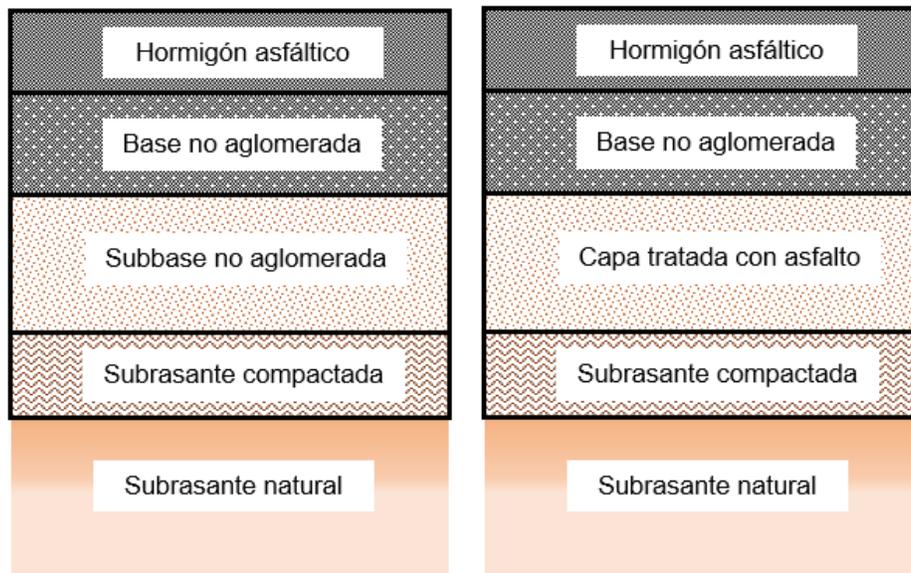


Figura 4. Pavimento flexible convencional (izquierda), pavimento semirrígido (derecha). Guía de diseño AASTHO (2004)

En los procedimientos empírico-mecanicistas, los programas de cómputo entregan tensiones, deformaciones y desplazamientos en puntos críticos de la estructura y en la subrasante (Modelo de Respuesta). Se asume una estructura inicial a la que se le aplican modelos empíricos de deterioro para evaluar el tipo y la extensión de los daños durante cualquier instante de la vida del pavimento. Si algún daño considerado excede el límite fijado como admisible, se debe elaborar un nuevo modelo de estructura y repetir el análisis. Luego de varias iteraciones, los espesores calculados y los módulos considerados en las dos alternativas analizadas se muestran en el Cuadro 4.

4.2. Análisis del comportamiento de las alternativas de estructuras mediante la Guía de Diseño AASTHO

Las roderas son deformaciones permanentes generadas alrededor de la zona por donde pasa con mayor frecuencia el neumático. Se ha establecido para el diseño un límite de 6,8mm para la carpeta asfáltica (HA) y de 17,8mm para la profundidad total de roderas en todo el espesor de pavimento.

Para el pavimento flexible, los resultados durante los 15 años de período de diseño se muestran en la Figura 5, donde se puede observar que las deformaciones que se generan en la superficie tienen un valor máximo de 5,9mm; en la base se genera una deformación de 5,2mm, mientras que en la subbase el valor máximo es de solo 3,0mm. Se estima, entonces, que la deformación permanente para el 90% de confiabilidad, de toda la estructura sea de 17,5mm y para el 50% de confiabilidad, de 14,2mm.

Cuadro 4. Espesores de capas en las variantes analizadas

Capas	Alternativa 1		Alternativa 2	
	Espesor (cm)	Módulo (MPa)	Espesor (cm)	Módulo (MPa)
Superficie	10	2069	8	2069
Base	25	262	20	262
Subbase	40	138	25	290

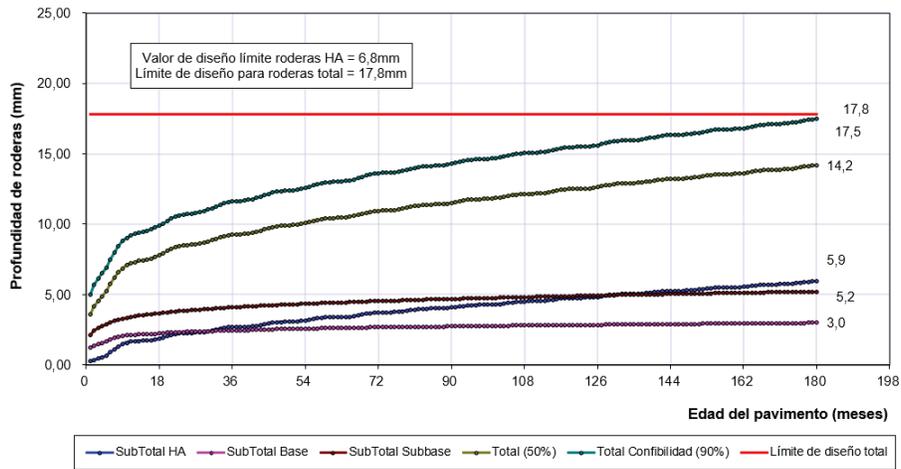


Figura 5. Comportamiento de las deformaciones permanentes (roderas) en el pavimento flexible (Variante 1), durante el período de diseño

La Figura 6 muestra el comportamiento de las deformaciones que se generan en cada una de las capas que componen el pavimento semirrígido (Alternativa 2). En este caso, se observa una deformación similar a la Alternativa 1, en la subbase de 3,1mm; en la base. Sin embargo, es apreciablemente menor e igual a 3,4mm y la superficie experimenta deformaciones algo más elevadas en todo el período de diseño, con valor máximo de 6,7mm; pero esta estructura tiene menos espesor de superficie. Para la confiabilidad del 50% se espera una deformación total de 13,2mm y para el 90% de 16,5mm, valores que son aceptables.

La Figura 7 muestra un resumen de los resultados brindados por el programa acerca del IRI, incluyendo ambas variantes de pavimentos, y considerando los dos diferentes niveles de confiabilidad en el diseño: 50 y 90%. El límite de regularidad establecido en el diseño del pavimento, representado por la línea roja, es de 2,70mm/m. Obsérvese que para el 90% de confiabilidad, el pavimento flexible se acerca más al límite, al final del período de diseño, con un valor esperado de 2,31mm/m, contra 2,23mm/m esperado en la variante de pavimento semirrígido.

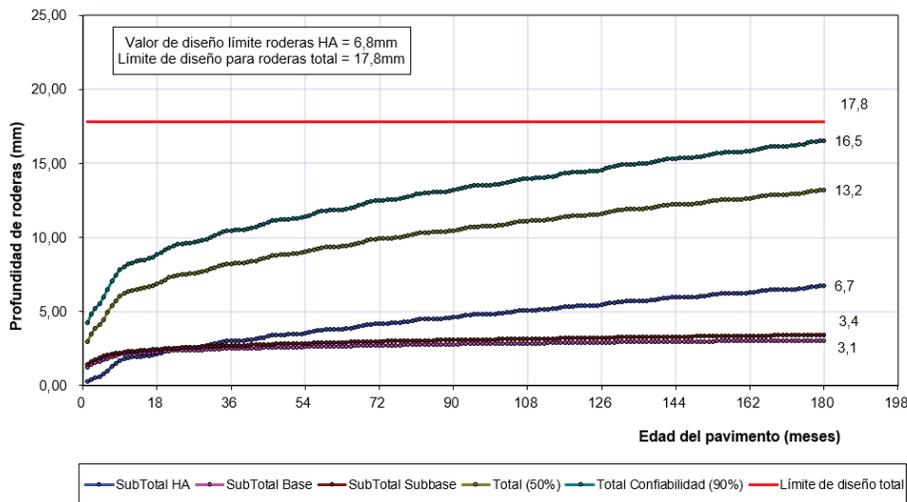


Figura 6. Comportamiento de las deformaciones permanentes (roderas) en el pavimento semirrígido (Alternativa 2), durante el período de diseño

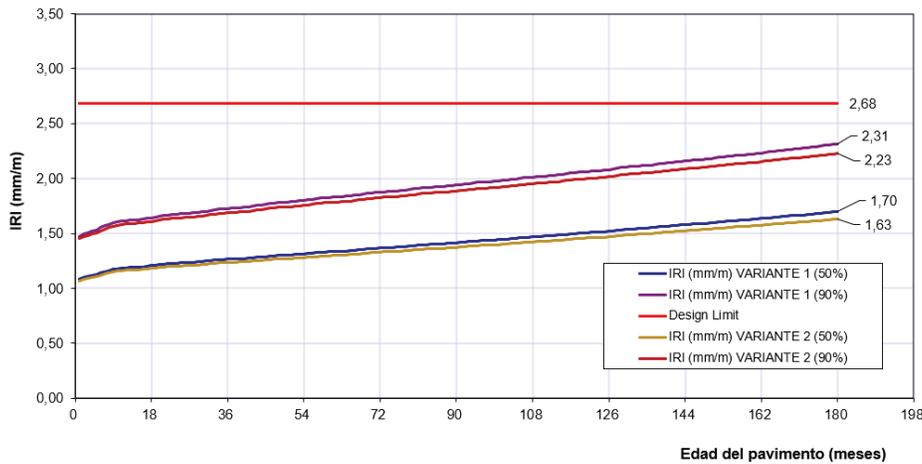


Figura 7. Comportamiento de la regularidad superficial (IRI) en ambas alternativas de pavimento, durante el período de diseño

La Figura 8 contiene un resumen de los resultados brindados por el programa acerca del agrietamiento en forma de piel de cocodrilo, originadas de abajo hacia arriba, para las dos alternativas de pavimento, para el 50% de confiabilidad en el diseño. El límite del daño establecido en el diseño para dicha probabilidad es del 25%, representado por la línea roja. En ambas alternativas se cumple con el máximo admisible, aunque la estructura flexible manifiesta menos daño al final del período de diseño.

Como las estructuras son equivalentes, es evidente la semejanza en el comportamiento, aunque en la estructura semirrígida este resultado se ha logrado con una significativa reducción del espesor de pavimento. El IRI se encuentra muy por debajo del valor de diseño, lo que indica que no se presentan problemas de confort antes de completarse el período de diseño.

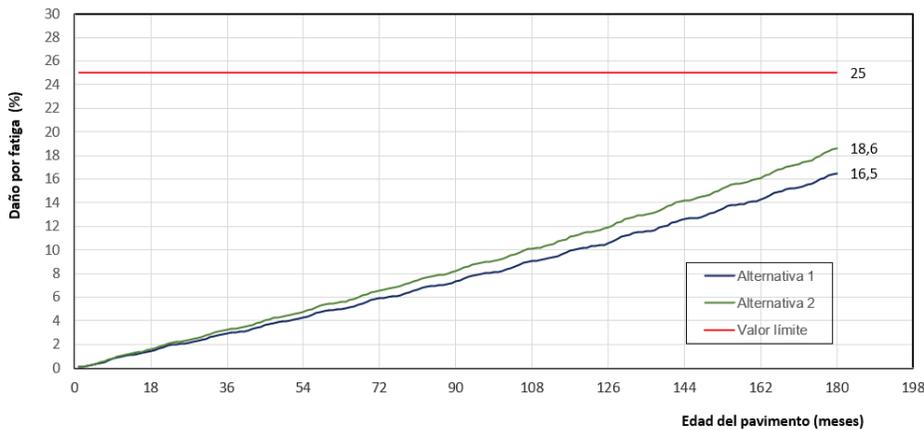


Figura 8. Comportamiento del daño por agrietamiento (grietas piel de cocodrilo) en ambas alternativas de pavimento, durante el período de diseño

5. CONCLUSIONES

Como resultado de la investigación se llega a las siguientes conclusiones generales:

- El agregado utilizado en la experimentación, en su forma natural, no cumple con todas las especificaciones para ser empleado como subbase de pavimentos. Es una grava, que clasifica como A-2-5, con Límite Líquido de 35,4% e Índice de Plasticidad de 10,8%, por lo que incumple las especificaciones para subbase de pavimentos. Sin embargo, cumple las exigencias en cuanto a dureza, con Coeficiente de Desgaste de Los Ángeles de 19%, menor al 50%. En Índice de Plasticidad es superior al 6%, con apreciable porcentaje de finos y aunque tiene resistencia a CBR en seco elevada, su resistencia tras inmersión es muy reducida.
- El agregado, una vez estabilizado con una emulsión asfáltica catiónica, no alcanza resistencia suficiente para una base de pavimento según el CBR que se obtiene tras inmersión, aunque puede ser utilizado en tráfico medio o ligero. Pero satisface ampliamente los requerimientos de una subbase, adicionando el 5% de emulsión.
- Los resultados del diseño de las estructuras flexible y semirígida, demostraron comportamientos similares durante el período de diseño, con valores de IRI, de deformación permanente (roderas) y de agrietamiento por fatiga en la carpeta asfáltica, pero con menores espesores de capas, lo que evidencia que el uso de una subbase estabilizada con emulsión puede representar un ahorro en costos totales.
- Además de las ventajas técnico-económicas que constituye el uso de emulsiones, son evidentes también las ventajas que desde el punto de vista ambiental representa su empleo, ya que el material que se está estabilizando con la emulsión es un residuo que no se puede aprovechar en la construcción de los pavimentos por su alto valor de plasticidad.

6. REFERENCIAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (1980). *Standard Specification for Viscosity-Graded Asphalt Cement*. Washington, D.C., Estados Unidos.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2004). *Guide for Mechanistic -Empirical Design of new and rehabilitated pavement structures*. Washington, D.C., Estados Unidos.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2008). *Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide. A Manual of Practice*. Washington, D.C., Estados Unidos.
- Arquí, G. (1971). *Compactación en carreteras y aeropuertos*. Barcelona, España: Editores Técnicos Asociados.
- Balay, J., Correia, A. G., Jouve, P., Hornych, P., y Paute, J-L. (1997). Mechanical Behaviour of Soils and Unbound Granular Materials, Modelling of Flexible Pavements–Recent Advances, *Eighth International Conference on Asphalt Pavements*. University of Washington, Seattle.
- Figueroa, J. A. 2005. *Guía para el uso del método de diseño de estructuras de pavimento nuevos según método de la AASHTO 2002* (Tesis Doctoral). Universidad de El Salvador, El Salvador.
- Fonseca, A. (2001). *Ingeniería de pavimentos para carreteras (2da ed.)*. Santa Fe de Bogotá, Colombia: Universidad Católica de Bogotá.
- Instituto Nacional de Vías. *Normas y Especificaciones*. INVIAS, (2012). Recuperado de: <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/139-documento-tecnicos>

Ministerio de Transporte y Obras Públicas (2002). *Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes* (MTOPT 001-F-2002). Recuperado de: https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/07/01-07-2013_ConcursoPublico_StoDomingo-Esmeraldas-Especificaciones-Tecnicas.pdf

Muñoz, J. M. (1983). Un método sencillo para determinar las propiedades reológicas del betún en el intervalo 45-75°C. El ensayo del flotador. *Carreteras*, (8), 20-25.

Nerveda, J. (2015). *Mezclas bituminosas en frío. Grava-emulsión*. Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas. Recuperado de: <https://www.ateb.es/images/pdf/1MEZCLAS.pdf>

Pérez, F. E. (1998). Documento de referencia para el reciclado: especificaciones, normativa y recomendaciones. Situación actual y necesidades. *IV Congreso Nacional de Firmes*. Junta de Castilla y León, Segovia.

PROAS (2013). *Grava-emulsión. Manual de consulta*. Recuperado de: https://www.cepsa.es/stfls/CepsaCom/PROAS/Ficheros_proas/Grava-emulsion.pdf

Sánchez, J., Pérez, F., Miro, R., y Paez-Dueñas, A. (1998). Reciclado en frío con emulsión de las capas asfálticas de la carretera C-147, tramo Sort-Esterri D'aneu. Control de ejecución: seguimiento y análisis. *IV Congreso Nacional de Firmes*. Junta de Castilla y León, Segovia.

Tejeda, E. (1999). *Investigación sobre el comportamiento en laboratorio de las mezclas bituminosas recicladas con emulsión. Bases para un nuevo método de formulación* (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, España.

UCR
