



# Evaluación de un agregado de base recuperada y RAP estabilizado con cal y asfalto espumado

Natalia Pérez García Imelda Casarez Lozada Francisco Javier Castañeda Garay Rodrigo Iqtzbal Rubio Arrieta Ricardo Solorio Murillo

Publicación Técnica No. 723 **Querétaro, México 2022** 

ISSN 0188-7297

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Infraestructura de Vías Terrestres del Instituto Mexicano del Transporte por Natalia Pérez García, Imelda Casarez Lozada, Francisco Javier Castañeda Garay, Rodrigo Iqztbal Rubio Arrieta y Ricardo Solorio Murillo.

La investigación es el producto final del proyecto de investigación interna II-19/21, "Evaluación del comportamiento de una base estabilizada con asfalto espumado aplicándole el protocolo de evaluación de aditivos."

Se agradece la revisión realizada por Alfonso Pérez y Ma. Guadalupe López Domínguez.

### **Tabla de Contenido**

	Página
Tabla de Contenido	iii
Sinopsis	V
Abstract	vii
Introducción	1
1. El material reciclado de carpeta asfáltica (RAP)	3
1.1 Aspectos generales	3
1.2 Definiciones de RAP	6
1.3 Producción de RAP en Europa y Estados Unidos	6
1.4 Producción de RAP en Colombia	7
1.5 Producción de RAP en México	7
1.6 Propiedades del RAP	9
1.6.1 Propiedades físicas	9
1.6.2 Propiedades químicas	10
1.6.3 Propiedades mecánicas	11
2. Antecedentes sobre las bases espumadas	19
2.1 ¿Qué es el asfalto espumado?	19
2.2 Orígenes del asfalto espumado	19
2.3 ¿Cómo se caracteriza el asfalto espumado?	21
2.4 Estudios sobre asfalto espumado en laborata acelerados y de campo	
3. Materiales y procedimientos de prueba	37

3.1 Los materiales	.37
3.1.1 El agregado	.37
3.1.2 La cal	.38
3.1.3 El agua	.38
3.2 Procedimientos de prueba	.38
3.2.1 Protocolo para evaluación de aditivos	.38
3.2.2 Caracterización del agregado	.39
3.2.3 Diseño de la mezcla con asfalto espumado	40
3.2.4 Evaluación de las propiedades mecánicas	44
3.2.4.1 Preparación de los especímenes para las pruebas resistencia en compresión simple y módulo de resiliencia	
3.2.4.2 Prueba de compresión simple	47
3.2.4.3 Prueba de módulo de resiliencia	48
4. Discusión de resultados	51
4.1 Propiedades del agregado	51
4.2 Características de compactación	.52
4.3 Contenido óptimo de asfalto para espumar	.52
4.4 Propiedades mecánicas	.55
4.4.1 Resistencia en compresión simple (q <sub>u</sub> )	.56
4.4.2 Módulos de resiliencia	60
Conclusiones	.65
Bibliografía	.67
Anexo 1. Características de especímenes ensayados en prueba compresión simple y módulo de resiliencia	

### **Sinopsis**

Este documento presenta un estudio sobre el comportamiento de un agregado de base estabilizado con 1 % y 5 % de cal hidratada, y con 2.2 % de asfalto espumado y 1 % de cal hidratada como *filler*. El agregado en estudio estaba constituido por un 50 % de carpeta asfáltica reciclada y un 50 % de base hidráulica recuperada.

La evaluación del comportamiento de las mezclas se llevó a cabo con pruebas de compresión simple y módulo de resiliencia.

Los resultados de compresión simple indican, para algunas de las condiciones del estudio, que el agregado con asfalto espumado tiene mayor resistencia. También se observó que la resistencia del agregado con 5 % de cal supera la resistencia del material estabilizado con asfalto espumado. Las pruebas de módulo de resiliencia también indicaron que los valores obtenidos en el material estabilizado con asfalto espumado son más altos que los obtenidos en el agregado estabilizado solo con 1 % o con 5 % de cal hidratada. Otro aspecto que se notó fue que, ante la absorción de agua, los especímenes no perdieron ni resistencia ni rigidez (esta última evaluada en términos del módulo de resiliencia); por el contrario, ambos parámetros se incrementaron.

Evaluación de un agregado de base espumado	e recuperada y RAP estabilizado con cal y asfalto

### **Abstract**

This document presents a study on the performance of an aggregate stabilized with 1% and 5% of hydrated lime, and with 2.2% of foamed asphalt and 1% of hydrated lime as filler. Originally, the aggregate under study consisted of 50% RAP and 50% recovered granular base.

The evaluation of the behavior of the mixes was carried out through unconfined compression strength and resilient modulus tests.

The results of unconfined compression indicate, for some of the study conditions, that the aggregate with foamed bitumen has greater strength. It was also observed that the strength of the aggregate with 5 % lime exceeds the strength of the material stabilized with foamed bitumen. The resilient modulus tests also indicated that the values obtained for the material stabilized with foamed asphalt are higher than those obtained in the material stabilized only with 1 % or with 5 % of hydrated lime. Another aspect noted was that, when absorbing water, the specimens did not lose strength nor stiffness (the latter in terms of resilient modulus); on the contrary, both parameters increased.

Evaluación de un agreg espumado	gado de base recuperada y RAP estabilizado con cal y as	sfalto
'		

### Introducción

La construcción de estructuras de pavimento requiere de diferentes materiales. Entre ellos se encuentran el asfalto, los agregados pétreos y los suelos. Los dos últimos generalmente son transportados de bancos de materiales cercanos a las obras. En la actualidad, también se está introduciendo el uso de otros materiales como los materiales reciclados.

En Europa y Estados Unidos el uso de materiales reciclados en la construcción de carreteras es una práctica usual, sin embargo, existen otros países en donde aún es difícil que los materiales reciclados sean aceptados. Con frecuencia, la poca aceptación de estos materiales se debe a que no se conoce su comportamiento en campo o en laboratorio. Por esto, es importante que los estudios que se lleven a cabo con estos materiales se difundan. En este sentido, el Instituto Mexicano del Transporte está desarrollando proyectos de investigación en materiales reciclados para contribuir a su conocimiento y como consecuencia a su uso.

Mediante este documento, los autores comparten el estudio de un agregado granular conformado por 50 % de agregado de carpeta asfáltica reciclada (en adelante RAP) y 50 % de base granular recuperada.

El objetivo general del estudio fue verificar de qué manera las propiedades del agregado se mejoraban al mezclarlo con 1 o 5 % de cal hidratada. Asimismo, se buscó determinar si las propiedades mecánicas se potenciaban al estabilizar el agregado con asfalto espumado.

El documento se encuentra organizado de la siguiente manera:

Como preámbulo a la presentación de las pruebas de laboratorio, el capítulo uno del documento resume aspectos importantes del RAP como su definición y las cantidades de este material generados en Europa, Estados Unidos, Colombia y México. En este mismo capítulo se documentan las propiedades típicas del RAP y se destacan las propiedades mecánicas obtenidas en varias investigaciones reportadas en la literatura.

Puesto que uno de los aditivos empleados para mejorar las propiedades del agregado fue el asfalto espumado, el capítulo dos muestra los aspectos relacionados con las bases espumadas. Este capítulo incluye la definición de asfalto espumado, su origen y el resumen de algunos estudios en los que se ha investigado el comportamiento de este material, ya sea en laboratorio o en pruebas aceleradas o de campo.

En el capítulo tres se describen los materiales utilizados en el estudio. El énfasis del capítulo se pone en los procedimientos de prueba y, sobre todo, en el proceso de fabricación de los especímenes de prueba y en los procedimientos para determinar la resistencia en compresión simple y los módulos de resiliencia.

El capítulo cuatro aborda los resultados obtenidos. Se discuten con detalle los resultados de resistencia en compresión simple y módulo de resiliencia.

Finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo y las referencias utilizadas en el desarrollo de los dos capítulos de preámbulo.

Cabe señalar que el proyecto desarrollado se alineó al objetivo prioritario 1 del Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes 2020-2024, es decir, "contribuir al bienestar social mediante la construcción, modernización y conservación de infraestructura carretera accesible, segura, eficiente y sostenible, que conecte a las personas de cualquier condición, con visión de desarrollo regional e intermodal"; en específico, con la estrategia prioritaria 1.5, "mejorar la planeación y prospectiva de la infraestructura carretera, para contar con procesos sólidos y ágiles de terminación de obra y detectar oportunamente las necesidades futuras de la infraestructura carretera" y, con la acción puntual 1.5.5, "aumentar la investigación científica y capacidad tecnológica vinculadas a las necesidades del sector".

### 1. El material reciclado de carpeta asfáltica (RAP)

### 1.1 Aspectos generales

A medida que se observan las consecuencias de la contaminación del planeta, se han llevado a la práctica varias acciones para mitigar sus efectos. En la construcción de infraestructura, por ejemplo, se reúsan productos residuales. De hecho, en la Gaceta Oficial de la Ciudad de México de fecha 20 de junio de 2021, se publicó la norma NACDMX-007-RNAT-2017, que establece la clasificación y especificaciones de manejo integral para residuos de la construcción y demolición en la Ciudad de México. De esta gaceta, es de especial importancia el inciso 8.6.2. que se refiere al aprovechamiento de agregados reciclados. Este indica lo siguiente:

"8.6.2.1. Los generadores de residuos de construcción y demolición (RCD) deberán, siempre que sea factible y de conformidad con los requisitos especificados en las normas, reutilizar los RCD en el sitio de generación, indicándolo en su plan de manejo. El material residual, deberá ser enviado a centros de acopio, transferencia y/o Plantas de residuos de la construcción y de la demolición (PR-RCD) para su debido aprovechamiento, o en caso, cuando el material sea no reciclable o aprovechable, debe enviarse a un sitio de disposición final.

8.6.2.2. Se deberá incorporar producto reciclado para las obras privadas y públicas de construcción, tales como: construcción, modificación, ampliación, rehabilitación, restauración, reparación, sustitución de infraestructura, conservación, mantenimiento, instalación, demolición u otras, en todos los elementos de la Tabla 1.1, asimismo el porcentaje de agregados reciclados se debe asentar en el proyecto ejecutivo de obra, e indicar en el catálogo de conceptos aquellos trabajos o elementos no estructurales en los que se utilicen agregados reciclados para su construcción, de conformidad con lo establecido en la presente norma ambiental o los

instrumentos que para tal efecto emita la Secretaría de Obras y Servicios.

8.6.2.3. Los agregados provenientes de residuos de la construcción deberán aprovecharse de acuerdo con la tabla siguiente":

Tabla 1.1 Aprovechamiento de agregados reciclados en elementos estructurales

Categoría Origen del Agregado Uso del agregado reciclado		% mín. de agregado reciclado	& de uso en la obra o edificación	
A) Residuos de concreto	Bases y subbases	100 %	100 %	
	Bases hidráulicas en caminos y estacionamientos	100 %	100 %	
B) Residuos de concreto armado				
E) Residuos pétreos	Concretos hidráulicos para la construcción de firmes, ciclopistas, banquetas y guarniciones	100 %	100 %	
	Bases para ciclopistas, firmes, guarniciones y banquetas	100 %	100 %	
	Construcción de andadores y trotapistas	100 %	100 %	
	Construcción de terraplenes	35 %	100 %	
	Construcción de pedraplenes	35 %	100 %	
	Material para relleno o para la elaboración de suelo-cemento	35 %	100 %	
	Material para lecho, acostillamiento de tuberías y relleno total de cepas	35 %	100 %	
	Material para la conformación de terrenos	35 %	100 %	
	Rellenos en cimentaciones	35 %	100 %	
	Plantillas para cimentación			
	Concreto ciclópeo			
	Rellenos en jardines	35 %	100 %	
	Mobiliario urbano	100 %	100 %	
	Lechos, acostillamientos y rellenos de tuberías	100 %	100 %	
	Conformación de parques y parterres	100 %	100 %	
	Zanjas drenantes	35 %	100 %	
D) Residuos de mampostería o	Bases y subbases	100 %	100 %	
pétreos con recubrimiento	Subbases en caminos y estacionamientos	100 %	100 %	
	Construcción de terraplenes	35 %	100 %	
	Cobertura y caminos interiores en los rellenos sanitarios	35 %	100 %	
	Construcción de andadores y trotapistas	100 %	100 %	
	Bases para ciclopistas, firmes, guarniciones y banquetas	100 %	100 %	
	Material para lecho, acostillamiento de tuberías y relleno de cepas	35 %	100 %	
	Construcción de pedraplenes	35 %	100 %	
	Material para la conformación de terrenos	35 %	100 %	
	Relleno en jardineras	35 %	100 %	
	Rellenos en cimentaciones			
	Caminos de jardines			
	Construcción de banquetas, guarniciones y bordillos	35 %	100 %	
F) Asfálticos	Bases asfálticas o negras	90 %	100 %	
	Concretos asfálticos elaborados en caliente	90 %	100 %	
	Concretos asfálticos templados o tibios	90 %	100 %	
	Concretos asfálticos elaborados en frío	90 %	100 %	
	Bases asfálticas espumadas	35 %	100 %	
	Micro carpetas en frío (slurries)	35 %	100 %	

Fuente: Norma NACDMX-007-RNAT-2017

Para una mejor comprensión de la Tabla 1.1, a continuación, se transcribe la tabla de la norma en donde se resume qué materiales caen dentro de las categorías del origen del agregado.

Tabla 1.2 Clasificación de los residuos de construcción y demolición

Categorías	Residuos *
A) Concreto simple	Concreto de elementos prefabricados
	Concreto de elementos estructurales y no
	estructurales
	Sobrantes de concreto (sin elementos
	metálicos)
B) Concreto armado	Elementos de concreto armado prefabricados
	y colados en obra
C) Metales	Residuos metálicos como:
	Acero de refuerzo
	<ul> <li>Metales ferrosos</li> </ul>
	Metales no ferrosos (aluminio, cobre, etc.)
D) Mampostería con recubrimiento	Residuos de mampostería y pétreos con
	recubrimiento y mortero de juntas, como:
	blocks, tabicones, adoquines, block cerámico,
	prefabricados de arcilla recocida (tabiques,
	ladrillos, tejas, etc.), muros de piedra braza,
	etc.
E) Pétreos	Materiales pétreos sin recubrimiento o sin
	juntas de mortero.
F) Mezcla asfáltica	Proveniente de bases asfálticas o negras
G) Excavación	Suelos no contaminados y materiales
	arcillosos, granulares y pétreos naturales
H) Elementos prefabricados con materiales	Paneles y sistemas prefabricados
mixtos	conformados por materiales mixtos (como
	panel de yeso, panel de tabla cemento y otros
	paneles en general)
I) Otros residuos de manejo especial	Residuos con tratamiento y manejo especial,
generados en obra	listados de manera enunciativa y no
	limitativamente:
	• Llantas
	• Textiles
	Madera
	Lodos bentoníticos
	Unicel

<sup>\*</sup> Los residuos no enlistados en esta tabla deberán clasificarse de acuerdo con sus características de similitud con los establecidos en la tabla.

Fuente: Norma NACDMX-007-RNAT-2017

La norma NACDMX-007-RNAT-2017 indica que se deben utilizar los residuos de construcción cuando sea factible. De hecho, cuando el origen son materiales asfálticos y en específico para las bases asfálticas espumadas, se permite 35 % mínimo de material reciclado.

A pesar de que existen las normativas que permiten el uso de materiales reciclados (como la anterior de la Cd. de México), los ingenieros en muchas ocasiones deciden utilizar materiales tradicionales. Para que el ingeniero recurra al uso de materiales reciclados es necesario que se pongan a su disposición resultados de estudios en donde se demuestre su comportamiento tanto en laboratorio como en campo. En este sentido, este trabajo muestra los resultados que se obtuvieron al evaluar las

propiedades mecánicas de un agregado constituido por 50 % de carpeta asfáltica reciclada y 50 % de base granular recuperada.

#### 1.2 Definiciones de RAP

El material recuperado de pavimentos asfálticos envejecidos es denominado *RAP* (*Recycled Asphalt Pavement*) (Botasso et al., 2008), citado en (Castellanos y Socho, 2014).

La FHWA (FHWA, 2008) define como RAP a los materiales de pavimento removidos y/o reprocesados que contienen asfalto y agregados. Estos materiales se generan cuando los pavimentos de asfalto se retiran para reconstrucción, repavimentación o para tener acceso a instalaciones.

### 1.3 Producción de RAP en Europa y Estados Unidos

Es importante conocer las cantidades de RAP que se generan en un país, así como sus principales aplicaciones. En este sentido, la Asociación Europea de Pavimentos Asfálticos (EAPA por sus siglas en inglés) publicó las cantidades de asfalto reciclado disponibles y los usos de este material (Figura 1.1). La Tabla 1.3 muestra los mismos datos con mayor detalle. De esta información, se desprende que solo el 33 % del RAP se utiliza como agregado para capas no ligadas y otras aplicaciones de ingeniería civil, y que el mayor porcentaje de RAP se destina a la construcción de carpeta asfáltica.

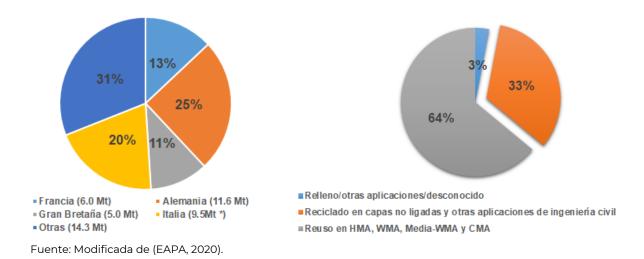


Figura 1.1 Cantidad total de asfalto recuperado en 17 países de Europa que proporcionaron datos en 2020 (izquierda) y aplicaciones (derecha)

Tabla 1.3 Reúso y reciclado de RAP en 2020

			% RAP disponible usado en:						
	RAP	RAP disponible	Mezcla	Mezcla	Reciclado	Reciclado	Capas no	Otras	Rellenos/
País	generado	para la	en cal.	media	en frío en	en frío en	ligadas	aplicaciones	otras
	en 2020 (ton)	industria del asfalto (ton)	y tibia	tibia	sitio	planta		de Ing. civil	aplic./des -conocido
Austria	1800 000	1260 000	70	30					
Bélgica	Sin datos	1 981 500	47	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
Croacia	280 000	240 000	33	0	0	2	Sin datos	Sin datos	Sin datos
República Checa	2 700 000	2 500 000	15	Sin datos	25	Sin datos	25	7	28
Dinamarca	1 410 000	1 260 000	85	Sin datos	Sin datos	Sin datos	15	Sin datos	Sin datos
Finlandia	1600000	Sin datos	100	0	0	0	0	0	0
Francia	8 056 000	6 042 000	76	10	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
Alemania	13 800 000	11 600 000	84	0	0	0	16	0	0
Gran Bretaña	5 525 673	4 973 106	37	0	0	0	63		Sin datos
Hungría	200 000	140 000	95	0	0	3	2	0	0
Irlanda	500 000	220 000	100	0	0	0	0	0	0
Italia	Sin datos	9 500 000*	25*	75*	•			•	•
Noruega	1300 000	840 000	35	0	0	0	65	0	0
Rumania	10 425	Sin datos	0	0	100	0	0	0	0
Eslovaquia	Sin datos	135 846	53	0	30	0	17	0	0
Eslovenia	Sin datos	170 000	29	0	10	1	25	10	25
España	2 400 000	19 000 000	72.7	0.2	0.2	0	24	3.0	0
Turquía	Sin datos	2 143 354	2	0	0	0	98	0	0
USA	87 000 000	85 000 000	93	0	0	0.4	6.2	0.3	0

Fuente: Modificada de (EAPA, 2020).

#### 1.4 Producción de RAP en Colombia

Benítez (Benítez, 2013) indica que en Colombia no se hace un registro del asfalto reciclado como el que presenta la NAPA, sin embargo, menciona que, a partir de 2007, en las especificaciones de construcción de carreteras del INVIAS se reglamentaron tanto el reciclado de pavimentos asfálticos en frío y en sitio como el reciclado en planta y en caliente, esto a través de los artículos 461 y 462. También, por el lado del Instituto de Desarrollo Urbano de la ciudad de Bogotá (IDU), en 2011 se reglamentó el reciclaje de pavimentos asfálticos en sitio y su estabilización con aditivos bituminosos y/o hidráulicos (IDU, 2011), citado en (Benítez, 2013).

### 1.5 Producción de RAP en México

En México, al igual que en otros países de Latinoamérica, no se han publicado qué volúmenes de RAP se están generando, pero al viajar por algunas carreteras se observa que a los costados de las mismas se tienen almacenados estos materiales, como lo muestra la Figura 1.2 a y b.



#### (a) RAP almacenado al costado de la carretera Federal 45D (km 38+500)



### (b) RAP almacenado en el parque de maquinaria de la Comisión de Infraestructura de Querétaro

Figura 1.2 RAP almacenado a los costados de dos carreteras en México

La única información que se recopiló para el caso de México es un registro que tiene la Dirección General de Conservación de Carreteras de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT) sobre almacenamiento de material fresado. La Tabla 1.4 muestra las cantidades reportadas por los centros SICT y los usos que se están dando a este material. Cabe hacer notar que la información anterior solo corresponde a la que posee la SICT, sin embargo, sería conveniente recopilar este tipo de información tanto para la infraestructura carretera federal como para la estatal.

Tabla 1.4 Material fresado registrado por la Dirección General de Conservación de Carreteras.

Centro SCT	Volumen (m³)	Comentarios sobre su posible	
		utilización	
Aguascalientes	2 320.00	Uso en formación de bases hidráulicas	
Baja California		No se dispone del material	
Baja California Sur		No se dispone del material	
Campeche	8 520.00	Para usarse como base estabilizada con emulsión	
Coahuila		No cuenta con material fresado	
Colima	4 980.00	Donación al municipio	
Chiapas	No indica el volumen	El producto del fresado fue utilizado en arrope de taludes y	
•		paraderos	
Chihuahua	2 210.00	Arrope de taludes	
Durango	390.00	Arrope de taludes	
Guanajuato	50 820.00	Recargue de taludes, revestimiento de caminos laterales	
-		como desvío, utilización en casos de accidentes, reutilizar	
		mezclando con materiales nuevos como mezcla asfáltica	
Guerrero		No cuenta con material fresado	
Hidalgo	2 387.00	Recargue de taludes	
Jalisco		No tiene material fresado	
Estado de México	5 600.00	Donación para caminos municipales	
Michoacán	2 450.00	Reutilizar en paraderos y recargue de taludes	
Morelos		No se dispone de material	
Nayarit	900.00	No indica uso	
Nuevo León	22 307.81	Rellenos, recargue de taludes y nivelación de paraderos	
Oaxaca	2 800.00	Reutilización en acotamientos, mezcla fría para bacheo	
Puebla		No se dispone de material	
Querétaro	2 000.00	Donación a caminos municipales	
Quintana Roo		No se dispone de material	
San Luis Potosí	33 110.00	Bacheo	
Sinaloa	1 200.00	No indica uso	
Sonora		No tienen material fresado	
Tabasco	9 740.00	49 553, se reutilizaron 39 813 m³ y el restante no está disponible	
Tamaulipas		No se dispone de material	
Tlaxcala	5 040.00	Donación para caminos municipales y vecinos del municipio	
Veracruz	14 130.00	Caminos vecinales, calles municipales, mezcla de bacheo	
Yucatán	19 600.00	Reciclado en caliente	
Zacatecas	1 060.00	No indica uso	
Total	191 564.81	•	

Fuente: Comunicación personal con el Ing. Salvador Fernández Ayala en 2021, año en el que se desempeñaba como Director General de Conservación de Carreteras de la SICT.

### 1.6 Propiedades del RAP

### 1.6.1 Propiedades físicas

De acuerdo con la Administración Federal de Carreteras Estadounidense (FHWA por sus siglas en inglés) (FHWA, 2008), las propiedades del RAP dependen en buena medida de los materiales constituyentes y de cada tipo de mezcla asfáltica. El fresado y triturado pueden causar degradación del material, y la granulometría del RAP fresado es más fina y más densa que la de los agregados naturales. El triturado no provoca tanta degradación como el fresado, por lo tanto, genera un material con una granulometría intermedia entre la del producto del fresado y la del agregado convencional triturado con el mismo tipo de equipo.

La distribución granulométrica del RAP fresado puede variar, dependiendo del equipo que se utilice, del tipo de agregado del pavimento y de si se opta por mezclar la base o la subbase con la carpeta asfáltica reciclada. La Tabla 1.5 lista el rango típico de tamaño de partícula.

Tabla 1.5 Distribución granulométrica típica para carpeta asfáltica reciclada (RAP) ya sea por fresado o por triturado

Tamaño de partícula (mm)	Porcentaje más fino después de procesado o fresado	Observaciones
37.5	100	a = Usualmente menor que 30 %
25	95-100	b = Usualmente menor que 20 %
19	84-100	c = Usualmente menor que 15 %
12.5	70-100	d = Usualmente menor que 10 %
9.5	58-95	
4.75	38-75	
2.36	25-60	
1.18	17-40	
0.60	10-35ª	
0.30	5-25 <sup>b</sup>	
0.15	3-20°	
0.075	2-15 <sup>d</sup>	

Fuente: Informe FHWA-RD-97-148 (FHWA, 2008).

Por el lado del peso unitario, este depende del tipo de agregado y del contenido de agua del material almacenado. Los rangos típicos van de 1940 a 2000 kg/m³. Con respecto al contenido de cemento asfáltico, los rangos típicos van de 3 a 7 % respecto al peso. La Tabla 1.6 resume las propiedades físicas y mecánicas típicas del RAP.

Tabla 1.6 Propiedades físicas y mecánicas del RAP

Propiedad	Propiedad	Rangos típicos
Propiedades	Peso volumétrico (kg/m³)	1940-2300
físicas	Contenido de agua (%)	Normal: hasta 5
		Máximo: 7-8
	Contenido de asfalto (%)	Normal: 4.5-6
		Rango máximo: 3-7
	Penetración del asfalto (a 25 °C)	Normal: 10-80
	Viscosidad absoluta o asfalto	Normal: 4000-25000
	recuperado	poises a 60 °C
Propiedades	Peso volumétrico compacto (kg/m³)	1600-2000
mecánicas	Relación de Soporte California (CBR)	100 % RAP: 20 - 25
	(%)	40 % RAP-60 % agregado
		natural: 150 o más

Fuente: Informe FHWA-RD-97-148 (FHWA, 2008).

### 1.6.2 Propiedades químicas

El RAP está compuesto por agregado mineral en un 93 a 97 % y solo de 3 a 7 % es asfalto rigidizado. Por tanto, la composición química es similar al

agregado tradicional o natural. Con respecto al asfalto, la oxidación causa que los aceites se conviertan en resinas y las resinas en asfaltenos, lo que produce rigidización por envejecimiento y una viscosidad más alta (Tabla 1.6) (FHWA, 2008).

### 1.6.3 Propiedades mecánicas

La literatura especializada comprende estudios en los que se han determinado las propiedades de resistencia o rigidez del RAP o de mezclas de este con otros agregados. En lo que sigue se resumen algunos de estos estudios:

Bennert et al., (Bennert et al., 2000) llevaron a cabo pruebas de módulo de resiliencia y deformación permanente en RAP, agregado de concreto reciclado (RCA por sus siglas en inglés), agregado tradicional con granulometría densa (DGABC) y mezclas de agregado DGABC con RAP o con RCA. En este estudio, los autores utilizaron especímenes de 15.42 cm de diámetro por 30.42 cm de altura compactados en condiciones óptimas con respecto a la prueba Proctor estándar. Las pruebas de módulo de resiliencia se llevaron a cabo con el procedimiento AASHTO TP46-94, mientras que las de deformación permanente se realizaron a 100 000 ciclos con un esfuerzo desviador de 310.26 kPa y una presión de confinamiento de 103.42 kPa.

Bennert et al. concluyeron que el RAP tiene mayores módulos de resiliencia y que, a medida que se mezcla con una mayor cantidad de agregado tradicional, los módulos de resiliencia se reducen (Figura 1.3).

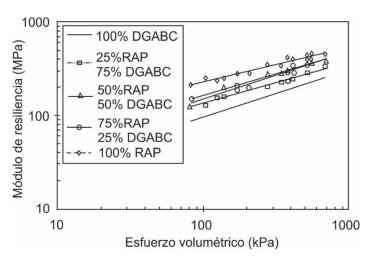


Figura 1.3 Resultados de módulo de resiliencia del RAP y mezclas

Por el contrario, en cuanto a deformación permanente, el RAP mostró valores más altos; los autores concluyeron que esto pudo deberse al rompimiento progresivo del ligante asfáltico por la carga aplicada (Figura

1.4). En la misma gráfica se presentan los resultados de las mezclas RAP-agregado. Se observó que a medida que se fue incorporando agregado tradicional al RAP, la deformación permanente se redujo. Las menores deformaciones se obtuvieron para el material granular tradicional y la mezcla de este con RAP al 25 %.

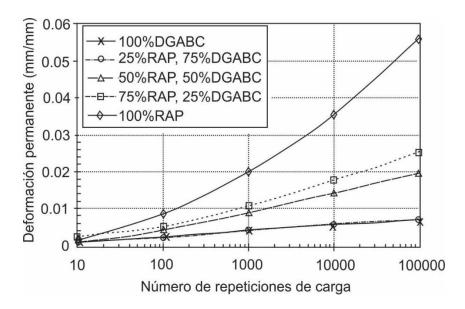


Figura 1.4 Deformación permanente para RAP y mezclas RAP- agregado

Wu et al. (Wu et al, 2012) efectuaron un estudio sobre propiedades de mezclas de agregados con RAP (mezclas con 0, 20, 40, 60 y 80 % de RAP). El comportamiento de las mezclas se estudió con pruebas de módulo de resiliencia (protocolo NHCRP 1-28A), de permeabilidad de carga constante y de escaneo con rayos X. Los resultados obtenidos por Wu y sus colaboradores indicaron que el módulo de resiliencia se incrementó con el porcentaje de RAP (ver Figura 1.5).

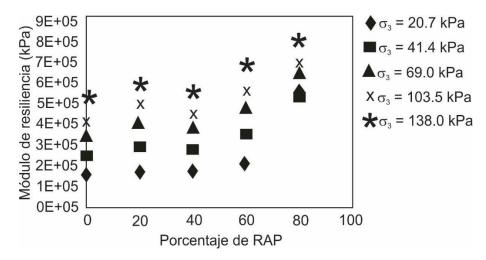


Figura 1.5 Efecto del porcentaje de RAP en el módulo de resiliencia para un esfuerzo cíclico alto (esfuerzo cíclico/□3 = 7)

Las pruebas de permeabilidad revelaron que, al añadir RAP al agregado triturado, la permeabilidad se reduce por la disminución de la porosidad (Figura 1.6). Los autores señalan que lo anterior provoca que el material retenga humedad por más tiempo, lo que puede debilitar la capa de base.

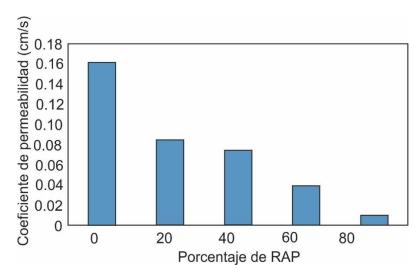


Figura 1.6 Tendencia de la permeabilidad con el incremento de RAP

Por su parte, Kim et al. (Kim et al., 2006) también determinaron módulos de resiliencia de mezclas de agregado con RAP (mezclas RAP/agregado: 0 %/100 %, 25/75, 50/50 y 75/25). Los especímenes del estudio se prepararon en un compactador giratorio y los módulos de resiliencia se determinaron con el protocolo NCHRP 1-28A.

En este caso, los resultados del estudio indicaron que los especímenes preparados a 65% del contenido de agua óptimo fueron más rígidos que los preparados al 100% (Figura 1.7 y 1.8). Por otro lado, la mezcla 50/50 desarrolló una rigidez equivalente a la de los especímenes con 100% de agregado para bajos niveles de confinamiento; para confinamientos más altos, los especímenes de RAP resultaron más rígidos (Figura 1.8). Al mismo tiempo, se observó mayor deformación permanente en los especímenes con RAP.

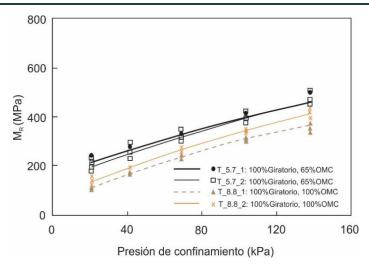


Figura 1.7 Módulos de resiliencia del agregado CR3 (muestra T, 100 %, giratorio=2032 kg/m³, 100% contenido de agua óptimo = 8.8 %, 65% OMC = 5.7 %)

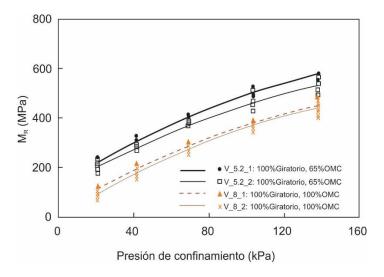


Figura 1.8 Módulos de resiliencia de la mezcla CR3 50 % agregado - 50 % RAP (muestra V, 100 %, giratorio =  $2032 \text{ kg/m}^3$ , 100 % OMC = 8.0%, 65 % OMC = 5.2%)

Stolle et al. (Stolle et al., 2014) también investigaron las propiedades de mezclas agregado-RAP. En el estudio se utilizaron dos materiales RAP, uno con agregado triturado de roca ígnea y otro con agregado de roca caliza; se utilizaron también dos agregados naturales, una grava natural y una grava triturada de roca caliza.

Para determinar el efecto del RAP en las propiedades, se prepararon mezclas con 0, 30, 40, 50 y 75 % de RAP. Las propiedades evaluadas fueron características de compactación, CBR y deformación permanente determinada en pruebas cíclicas.

Stolle et al. encontraron que el contenido de agua óptimo, el peso volumétrico y el CBR se redujeron al incrementar el porcentaje de RAP (Figura 1.9). Observaron también, por una parte, que las mezclas con agregado de caliza triturada tuvieron una mayor capacidad de carga y, por otra, que en las mezclas agregado natural-RAP, aparentemente, la presencia de RAP no tuvo un gran efecto (mezclas TBM y TBC, Figura 1.9b).

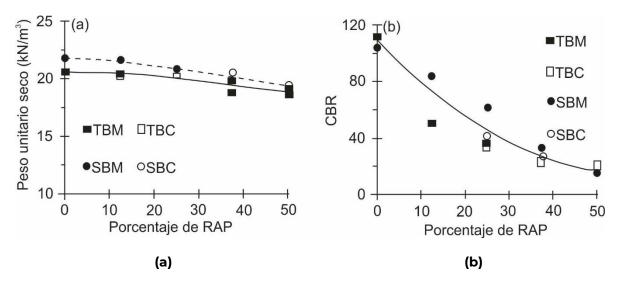


Figura 1.9 Efecto del porcentaje de RAP en (a) peso unitario seco y (b) CBR: T, material granular natural; S, agregado de caliza triturado; BM, RAP con agregado de caliza; BC, RAP con agregado de roca ígnea

En las pruebas triaxiales, se observó que a medida que se incrementa el porcentaje de RAP, el módulo elástico sufre una reducción (Figura 1.10).

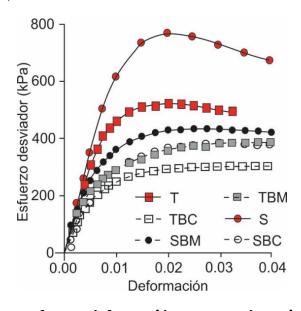


Figura 1.10 Relaciones esfuerzo-deformación para pruebas triaxiales (CP = 55 kPa)

Con respecto a la deformación permanente, los dos agregados naturales acumularon menos deformación que las mezclas con RAP, como lo indica la Figura 1.11.

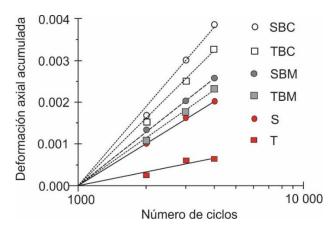


Figura 1.11 Deformaciones acumuladas para especímenes secos (CP = 32 kPa y q = 138 kPa)

Mokwa y Peebles (Mokwa y Peebles, 2005) reportaron resultados de propiedades ingenieriles para mezclas de materiales granulares con RAP. En este estudio, los autores mezclaron cuatro tipos de agregados con RAP en porcentajes de 20, 50 y 75 % con respecto al peso.

Mokwa y Peebles encontraron que la densidad del material se redujo al mezclar los agregados con RAP, y que hubo una disminución en el desgaste de Los Ángeles al colocar 20 o 50 % de RAP (ver Tabla 1.7).

Tabla 1.7 Resumen de densidades relativas y desgaste de Los Ángeles de las mezclas

Material	Gs	Desgaste de Los Ángeles (%)
CBC#1	2.67	35.7
CBC#1-20%RAP	2.67	32.6
CBC#1-50%RAP	2.59	32.1
CBC#2	2.70	33.4
CBC#2-20%RAP	2.66	30.6
CBC#2-50%RAP	2.59	30.9
CBC#3	2.68	25.1
CBC#3-20%RAP	2.66	29.4
CBC#3-50%RAP	2.59	35.6
Grava natural	2.72	25.5
Grava natural-20%RAP	2.63	23.0
Grava natural-50%RAP	2.61	26.7

Fuente: Modificada de (Mokwa y Peebles, 2005).

Con respecto a las curvas de compactación se observó que, exceptuando al agregado CBC#1, al adicionar RAP se redujeron el peso volumétrico seco máximo y el contenido de agua óptimo (Ver Figura 1.12).

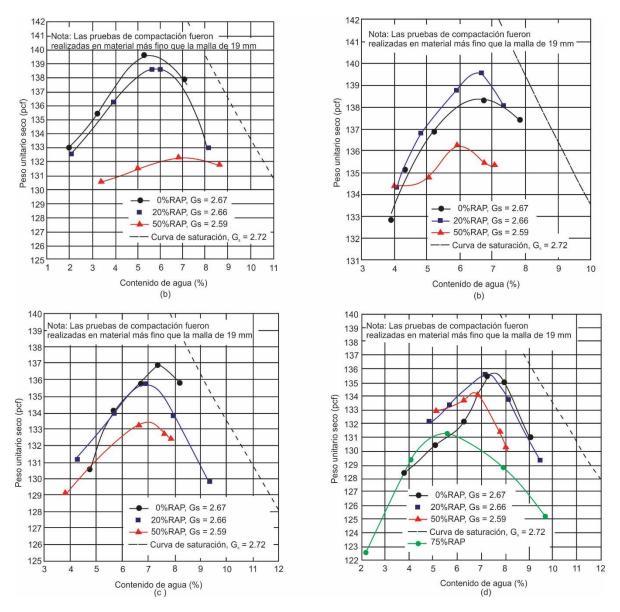


Figura 1.12. Curvas de compactación. (a) Mezcla CBC #1, (b) CBC #2, (c) CBC #3 y (d) mezcla de agregado natural

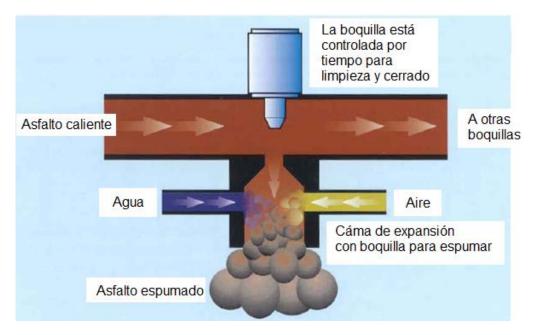
Los estudios anteriores demuestran que algunas propiedades se mejoran al incrementar la cantidad de RAP que se mezcla con la base granular, mientras que otras propiedades se degradan. No obstante, una manera de mejorar las propiedades de las bases con RAP es adicionando asfalto espumado. En el siguiente capítulo se trata el tema de las bases con asfalto espumado, como parte del contexto de la investigación presentada en este documento.

Evaluación de un agregado de base recuperada y RAP estabilizado con cal y asfalto espumado

### 2. Antecedentes sobre las bases espumadas

### 2.1 ¿Qué es el asfalto espumado?

El asfalto espumado o ligante expandido es un material producido mediante un proceso mecánico en el cual se inyecta, con ayuda de aire presurizado, una cantidad pequeña de agua (entre 1 y 2 % sobre el peso del ligante) al asfalto caliente (160-180 °C) dentro de una cámara de expansión, lo que genera instantáneamente el efecto de la espuma en el asfalto, como se ilustra en la Figura 2.1 (Thenoux y Jamet, 2002), citado en (Jiménez, 2011).



Fuente: (Romanoschi y Hossain 2004).

Figura 2.1 Proceso del asfalto espumado.

### 2.2 Orígenes del asfalto espumado

En 1957, el profesor Ladis H. Csanyi de la Universidad Estatal de Iowa publicó un artículo titulado *Foamed Asphalt in Bituminous Paving Mixtures* (Csanyi, 1957). En el documento, el profesor Csanyi indica que la preparación de las mezclas asfálticas y la forma de colocación dependen

en gran medida de las propiedades físicas y las características de los ligantes (viscosidad y tensión superficial). El profesor señala también que, al preparar la mezcla, el ligante debe ser lo suficientemente líquido para cubrir las partículas del agregado y, durante la colocación, debe conservar su plasticidad para facilitar el esparcimiento. Por último, cuando la mezcla esté tendida, debe endurecer rápidamente de tal manera que se compacte y se abra al tránsito lo más rápido posible.

El profesor destaca que la tensión superficial del ligante es muy importante en el proceso de mezclado. La adhesión entre la película del ligante y el agregado depende de las tensiones superficiales de los dos materiales y de la tensión interfacial que se desarrolle. La tensión superficial del ligante debe ser tal que, en relación con la del agregado, la humedad superficial del agregado pueda desplazarse y se pueda generar una liga fuerte entre el agregado y el ligante. De hecho, al preparar las mezclas asfálticas con asfalto como ligante, la viscosidad del ligante se ajusta y se controla con la temperatura del ligante y del agregado; durante el transporte, la mezcla debe mantener una temperatura alta y también durante la colocación. Este proceso es costoso, por lo que tales mezclas se usan generalmente en proyectos importantes. Por esto, en otros proyectos donde no se tiene la capacidad económica para solventar tal procedimiento, se pueden utilizar otros ligantes como asfalto rebajado o emulsiones asfálticas. Como la viscosidad del asfalto rebajado se ajusta por el tipo y cantidad de solvente adicionado, la necesidad de ajustar más la viscosidad del ligante por medio de calor durante el mezclado se reduce.

Cuando el ligante se usa en conjunto con agentes humectantes, el calor del agregado se puede reducir. La viscosidad del asfalto emulsificado se ajusta por el método usado en la preparación de la emulsión, por el tipo de emulsión utilizada y por la cantidad de agua adicionada. Cuando se utiliza un asfalto emulsificado como ligante en una mezcla asfáltica, se elimina prácticamente la necesidad de calentarlo. Por otro lado, al utilizar el agente emulsificante, se puede lograr una buena adhesión aún con agregados húmedos y fríos.

El profesor Csanyi menciona que, aunque el proceso de producción de la mezcla se simplifica cuando se usan estos materiales como ligantes, el proceso de colocación se hace más complicado, ya que el ligante debe fraguar rápidamente después de esparcir la mezcla para permitir una compactación adecuada: el solvente en el asfalto rebajado debe removerse rápidamente, el asfalto emulsificado debe romper en el tiempo apropiado y el agua liberada debe eliminarse con prontitud. Por esta razón, las mezclas que usan estos materiales como ligantes deben airearse para permitir la evaporación del solvente o del agua. Esto requiere no solo

equipo de construcción adicional y otras operaciones, sino que también retrasa la apertura al tránsito. Por lo tanto, se acorta el tiempo de uno de los procesos, pero se hace más larga la duración de otros.

Adicionalmente, el profesor indica que el ligante ideal para mezclas de bajo costo sería aquel cuyas propiedades físicas (viscosidad y tensión superficial) fueran tales que pudieran usarse agregados fríos y húmedos en la mezcla, que hiciera que esta retuviera la plasticidad deseada hasta el esparcimiento y que, una vez que la mezcla fuera esparcida, fraguara rápidamente. Csanyi se pregunta entonces, ¿cómo se pueden ajustar las propiedades físicas de un ligante sin alterar la composición química, de tal manera que se logren las propiedades y características deseadas para un ligante ideal? El profesor concluye que todo lo anterior se puede lograr espumando el ligante. Afirma que un asfalto relativamente rígido, cuando se espuma, se expande de forma importante, lo que provoca que fluya lentamente, aún a bajas temperaturas, penetrando en el suelo, en la ropa, en los zapatos de piel, o en cualquier objeto con el que tuviera contacto, penetrando en grietas y hendiduras. La espuma permanece blanda aun a temperaturas a las que el cemento asfáltico parental se rigidiza. Además, la espuma tiene una naturaleza tipo goma y es extremadamente pegajosa, por lo que se adhiere a todo tipo de materiales y, una vez que esto ocurre, es difícil removerla o limpiarla.

En su artículo, Csanyi demuestra la efectividad de mezclas de bajo costo preparadas mediante la estabilización de agregados marginales locales como grava, arena y loess con asfalto espumado que se genera al introducir vapor saturado en el asfalto caliente a través de una boquilla especialmente diseñada. Al reducirse la viscosidad, se incrementa el volumen y disminuye la energía superficial del asfalto espumado, lo que produce una cubierta íntima cuando se mezcla con el agregado húmedo y frío (Roberts et al., 1984), citado en (Mohammad et al., 2013).

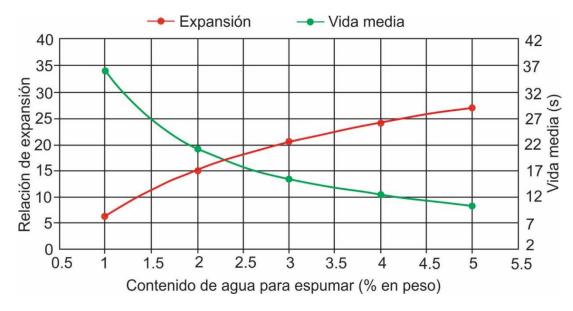
En 1968, Mobil de Australia adquirió los derechos de la patente del proceso de Csanyi. Esta empresa modificó el proceso de producción del vapor mezclando 1 a 2 % de agua fría con el asfalto caliente antes de mezclarlo con el agregado frío (Roberts et al., 1984). Con lo anterior, el procedimiento se volvió más rápido y más barato.

### 2.3 ¿Cómo se caracteriza el asfalto espumado?

El asfalto espumado se caracteriza por dos aspectos. La relación de expansión y la vida media. Romanoschi y Hossain (Romanoschi y Hossain, 2004) definen esos aspectos como:

Relación de expansión: Relación entre el volumen máximo logrado del asfalto espumado con respecto al volumen original (Figura 2.2).

Vida media: Tiempo transcurrido desde que el espumado está en su máximo volumen con respecto al tiempo en el que obtiene la mitad de ese máximo. Se mide en segundos y está en el rango de 10 a 15 s (Figura 2.2).



Fuente: (Romanoschi y Hossain, 2004).

Figura 2.2 Parámetros para determinar la calidad del asfalto espumado

Como regla, a mayor expansión y mayor vida media, se tendrá una mejor calidad del asfalto espumado. Las especificaciones mínimas aceptables son de 8 veces y 6 s para relación de expansión y vida media, respectivamente (Wirtgen, 2004).

## 2.4 Estudios sobre asfalto espumado en laboratorio, ensayes acelerados y de campo

En la literatura se reportan varios estudios de estabilización con asfalto espumado. A continuación, se resumen algunos de ellos:

He y Lu (He y Lu , 2004) publicaron resultados de dos materiales de base estabilizados con asfalto espumado. Una de las bases fue de agregado virgen y la otra de una mezcla de RAP y agregado virgen. En el estudio, se utilizó un asfalto AH-70 que se espumó a 150 °C con 1.5 % de agua. Con respecto al *filler*, se utilizó cemento con porcentajes de 0, 1 y 1.5 %. El asfalto se aplicó en porcentajes de 1, 2, 3, 4 y 5 %.

Para evaluar las propiedades, se compactaron especímenes con 75 golpes Marshall, se dejaron después en su molde por 24 horas y posteriormente se colocaron durante 72 horas en un horno a 40 °C. Terminado este proceso, se llevaron a cabo las pruebas de tensión indirecta en especímenes húmedos y secos, y se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 2.1. He y Lu indican que el contenido de asfalto óptimo se eligió como el que proporcionó la resistencia máxima en tensión indirecta de la condición húmeda.

Tabla 2.1 Resultados de resistencia en tensión indirecta (He y Lu, 2004)

Tipo de mezcla	Contenido de cemento (%)	Contenido óptimo de asfalto en condición seca (%)	Contenido óptimo de asfalto en condición húmeda (%)	
Grava virgen	0	2.92	3.87	
	1	2.92	3.58	
	1.5	3.30	3.60	
RAP	0	3.55	3.83	
	7	3.26	3.92	
	1.5	3.32	3.90	

He y Lu realizaron pruebas de fatiga en las mezclas de RAP y encontraron que, a mayor porcentaje de cemento, se incrementó el número de ciclos a la falla. Con respecto a las pruebas de rodera, observaron que las mezclas de base virgen con asfalto espumado tuvieron mejor resistencia a rodera comparadas con las mezclas de RAP con asfalto espumado.

Por su parte, Schwartz y Khosravifar (Schwartz y Khosravifar, 2013) publicaron resultados de un estudio en el cual determinaron propiedades de diferentes agregados a los que se añadió asfalto espumado. Los resultados, condensados en la Tabla 2,2, muestran que se estudiaron agregados de RAP combinados con concreto reciclado, mezclas de RAP con agregado granular tradicional y agregado constituido solo por RAP.

Tabla 2.2 Combinaciones de las mezclas y contenido de asfalto espumado

Mezcla	Descripción de la	Asfalto espumado	Porcentaje que pasa			
Mezcia	mezcla	(%)	3/4 in	#4	#8	#200
А	40%RAP-1+60%RC	2, 2.5, 3, 3.5	100	54	40	3.5
В	60%RAP-1+40%RC	2, 2.5, 3, 3.5	100	53	38	2.7
С	80%RAP-1+20%RC	2, 2.5, 3, 3.5	100	52	36	1.9
D	40%RAP-1+40%GAB	2, 2.25, 2.5, 2.75	100	50	36	5.3
E	60%RAP-1+40%GAB	2, 2.25, 2.5, 2.75	100	50	36	3.9
F	80%RAP-1+20%GAB	2, 2.25, 2.5, 2.75	100	50	35	2.5
G	100%RAP-2	2, 2.3, 2.6	100	64	41	7.5
Н	100%RAP-3	1.75, 2, 2.25, 2.5	100	59	33	1.6

Los especímenes de diseño se compactaron con un 90±6 % de contenido de agua con respecto a la prueba Proctor modificada (suelo no estabilizado). Se compactaron 6 especímenes de cada mezcla. En cada cara del espécimen se aplicaron 56 golpes y, posteriormente, se colocaron en un horno a 40 °C durante 72 horas. Después de sacar las muestras del horno, 3 de ellas se equilibraron a 25 °C y otras tres se saturaron en un tubo. Los resultados del diseño se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Resumen los óptimos de asfalto espumado

Mezcla	Descripción de la mezcla	Óptimo de asfalto espumado	% de cemento	IDT en húmedo (psi)	TSR (%)
Α	40%RAP-1+60%RC	3.0	0	64	85
A*	40%RAP-1+60%RC	3.0	1	79	90
В	60%RAP-1+40%RC	3.0	0	64	98
С	80%RAP-1+20%RC	3.5	0	58	96
D	40%RAP-1+40%GAB	2.8	0	29	38
Е	60%RAP-1+40%GAB	2.5	0	32	50
F	80%RAP-1+20%GAB	2.5	0	48	76
G	100%RAP-2	2.3	0	15	34
G*	100%RAP-2	2.3	1	61	98
Н	100%RAP-3	2.2	0	41	78

Fuente: Modificada de (Schwartz y Khosravifar, 2013).

Schwartz y Khosravifar indican que, en algunos casos, al graficar contenido de asfalto contra TSR no se obtuvo una curva hacia abajo con un máximo, por lo que era difícil determinar el óptimo. En esos casos se sugirió elegir el porcentaje de asfalto espumado como el que cumpliera con todas las especificaciones, pero no utilizar, en ningún caso, menos de 2 % ni más de 3.5 % para eliminar el problema potencial de rodera debido a inestabilidad. Se observó también que el cemento Portland incrementó la resistencia en tensión indirecta para condiciones húmedas y secas. En la Tabla 2.3 se observa que, al incrementarse el porcentaje de RAP y reducir el de agregado tradicional, tanto la resistencia en tensión indirecta como la TSR se incrementaron. Los autores afirman que esto se debe a que existen más ligas con los agregados de RAP por la adhesión con el asfalto oxidado.

En el mismo estudio, Schwartz y Khosravifar realizaron estudios complementarios y encontraron lo siguiente:

• En pruebas de saturación de especímenes por absorción con duraciones de 24 y 72 h, que también comprendieron la saturación con una presión baja de vacío, la duración de 72 h proporcionó el contenido de agua más alto, pero las resistencias a la tensión presentaron mayor variabilidad. La menor dispersión en los

- resultados se obtuvo con 24 h de humedecimiento, y esta opción de saturación resultó más efectiva que la de vacío.
- La adición de cemento propició una ganancia en resistencia. El proceso de hidratación del *filler* es más rápido que el proceso de curado del asfalto espumado. Por esto, se forman primero las ligas debidas al *filler* que al asfalto espumado.
- La posibilidad de almacenar la mezcla con asfalto espumado es una importante consideración práctica. Kenkings et al. (Kenkings et al, 2000) reportan que el agregado se puede almacenar varios meses, sin embargo, Schwartz y Khosravifar encontraron que el almacenamiento puede reducir la resistencia a tensión, tanto en estado húmedo como en seco, por lo tanto, recomiendan evitar el almacenamiento hasta donde sea posible.

Mohammad et al. (Mohammad et al., 2013) realizaron un estudio sobre el comportamiento de secciones con un equipo HVS de ensaye acelerado. Las secciones estudiadas se muestran en la Figura 2.3. En ella, se observan los espesores de cada capa y la instrumentación utilizada. El ancho de las secciones fue de 3.96 m y la longitud de 32.77 m. Como se observa, la única diferencia en las secciones es la base. En la sección 4-2B, se tiene un material granular tradicional y en la 4-3A una base espumada conformada por 50%RAP y 50%suelo-cemento. La tercera sección, fue construida con una base espumada de 100%RAP. En adelante, las secciones se identifican como FA/50RAP/50SC y FA/100RAP. Las propiedades de las bases espumadas se muestran en la Tabla 2.4.

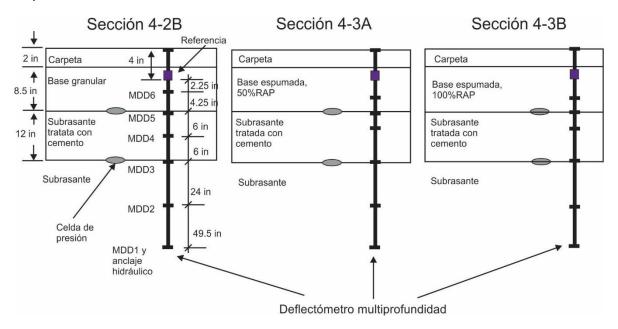


Figura 2.3 Estructuras de pavimento para las secciones de prueba

Tabla 2.4 Propiedades de las bases espumadas

Propiedad	FA/100RAP	FA/50RAP/50SC
Tipo de cemento asfáltico	PG58-22	PG58-22
Porcentaje de asfalto espumado	2.5	2.8
Tensión indirecta (ITS) en seco, psi	53.0	46.7
ITS en húmedo, psi	50.0	38.4
ITS retenido, psi	94.5	82.4
Contenido de agua seleccionado (%)	6	8
Densidad relativa bruta (lb/ft³)	124.8	117.3
Vacíos de aire (%)	15.3	20.3

Fuente: (Mohammad et al. 2013).

El RAP de base tenía un contenido de agua óptimo de 8.6 % y un peso volumétrico seco máximo de 18.6 kN/m³. El material se clasificó como A-1-a o GP. La subrasante para las tres secciones fue una arcilla limosa a la que se le adicionó 8 % de cemento.

Se llevaron a cabo evaluaciones de laboratorio y de campo. En el laboratorio, se determinaron los módulos de resiliencia en muestras de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, empleando la norma AASHTO T307. También se efectuaron pruebas de deformación en las que, primeramente, se aplicó una fase de acondicionamiento con 500-1000 ciclos y con  $\sigma_3$  = 103.4 kPa y  $\sigma_d$  = 93.1 kPa. Posteriormente se aplicaron 10 000 ciclos con un confinamiento de 34.5 kPa y un esfuerzo desviador de 103.4 kPa.

Los resultados del estudio indican que los módulos de resiliencia de la base granular tradicional fueron más altos que los obtenidos con la base espumada (ver Figura 2.4).

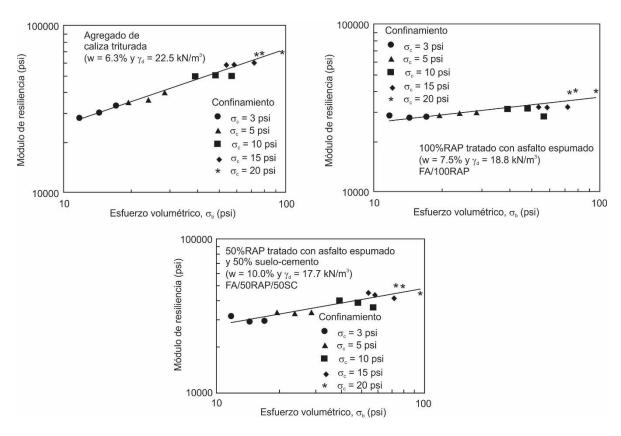


Figura 2.4 Resultados de módulo de resiliencia para los tres agregados ensayados

Por el lado de la deformación permanente, el RAP con asfalto espumado fue el que presentó los mayores valores. De acuerdo con la gráfica de la Figura 2.5, la base granular tradicional fue la que presentó un mejor comportamiento también para este indicador.

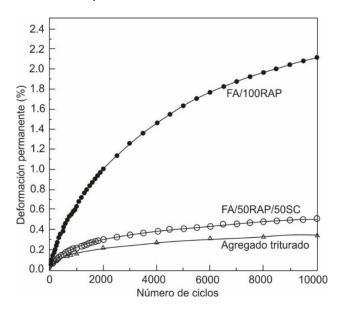


Figura 2.5. Curvas de deformación permanente para los materiales de RAP

En el estudio también se llevaron a cabo pruebas en la rueda cargada de Hamburgo. En este caso se encontró una mayor rodera en el material FA/50RAP/50SC (0.8 mm de rodera) con respecto al FA/100RAP (aproximadamente 0.3 mm).

En relación con los resultados de las pruebas aceleradas, Mohammad et al. presentan, en primer lugar, las fotografías de las superficies de cada sección, y en ellas se observa que la magnitud de rodera es importante. Los autores destacan también la ocurrencia de agrietamiento en la zona en la que se desarrolló la rodera (Figura 2.6) Adicionalmente, en la sección FA/100RAP se observó exudación del asfalto.

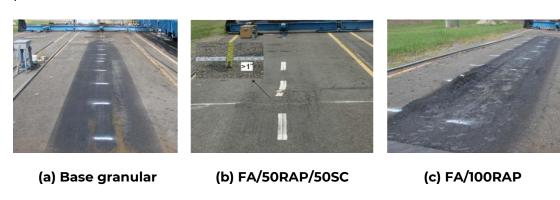


Figura 2.6 Fallas en las superficies de las secciones

La Figura 2.7 muestra la profundidad de rodera medida de las secciones. En lo que respecta a este parámetro se observó que, a 175 000 repeticiones, las dos secciones de espumado aparentemente estaban teniendo un comportamiento igual o mejor que el de la base granular tradicional. Sin embargo, cuando se incrementó el número de ciclos, las dos secciones con base espumada mostraron una mayor velocidad de desarrollo de la rodera que la sección con base granular. Esta última, falló a las 282 000 aplicaciones, la base con 100%RAP a 230 000 y la de espumado con suelo-cemento a 228 000.

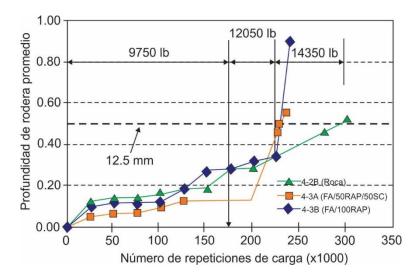


Figura 2.7. Medición de profundidad de rodera en las secciones de prueba

Los autores concluyeron que mientras la carga se mantenga por debajo de un cierto umbral, los tres materiales de base se comportarán de forma adecuada.

Como se indica en la Figura 2.3, también se colocaron celdas de carga para medir esfuerzos. La Tabla 2.5 muestra los resultados de los esfuerzos medidos.

Tabla 2.5 Resultados de los esfuerzos de compresión medidos.

		Esfuerzo vertical (kPa)			
Sección	Estadísticas	En la parte	En la parte		
Seccion	Estadisticas	inferior de la	superior de la		
		base	subrasante		
4-2B (base granular)	Promedio	128.2	4.8		
	Std	2.8	0.7		
	CV (%)	2.2	7.7		
4-3A	Promedio	70.32	2.76		
FA/50RAP-50SC	Std	8.3	0.7		
	CV (%)	12.2	18.5		
4-3B	Promedio	66.2	2.1		
FA/100RAP	Std	10.3	0.7		
	CV (%)	15.7	9.7		

Std: Desviación estándar (kPa)

CV: Coeficiente de variación (%)

Los resultados de esfuerzos de compresión muestran una mayor variabilidad para la base con asfalto espumado, lo cual, en opinión de los autores, pudo deberse a que este material tuvo mayores afectaciones por los cambios de temperatura. Por otro lado, los esfuerzos más elevados se observaron en la base granular, lo que implica valores más bajos de los módulos. Es importante hacer notar que los datos mencionados

corresponden a un nivel de hasta 175 000 repeticiones, ya que, después de este nivel, las celdas de carga comenzaron a fallar.

Con los deflectómetros multiprofundidad se observó que la base granular contribuyó con el 85 % de la deformación permanente total de la sección, la base FA/50RAP/50SC con el 95 % y la capa FA/100RAP con el 50 %. Asimismo, en la sección con material granular, la capa subrasante tratada con cemento y la subrasante convencional presentaron deformaciones permanentes de 5 y 10 %, respectivamente. En la sección con la base FA/50RAP/50SC, las otras capas presentaron deformaciones permanentes despreciables. Por último, para la sección con la capa de base FA/100RAP, la subrasante tratada con cemento aportó 40 % de la deformación permanente y la subrasante convencional 10 % (ver Figura 2.8).

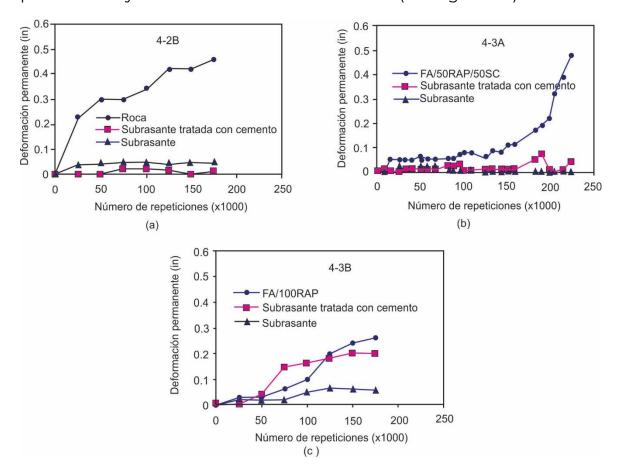


Figura 2.8 Deformación permanente medida en cada sección

Al terminar el experimento, se llevaron a cabo cortes en las secciones para observar los perfiles de deformación. En ellos, se observó que el perfil transversal de la sección con base granular mostró densificación de la base y la carpeta. Las secciones con base espumada, no solo presentaron densificación sino también levantamiento (Figura 2.9). Mohammad et al.

destacan que las bases espumadas fallaron por corte debido a una resistencia insuficiente, especialmente en el último nivel de carga.

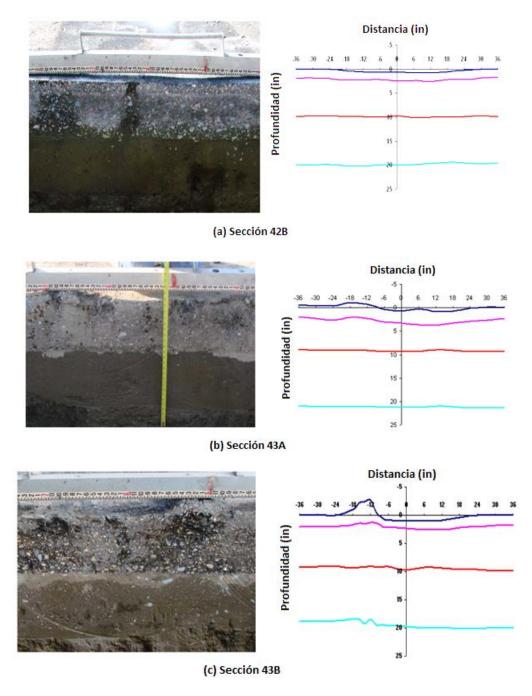


Figura 2.9 Cortes en las secciones de prueba

Al final del documento los autores señalan que el uso de un riego de impregnación sobre la base espumada debe hacerse con precaución. Además, no recomiendan emplear bases espumadas en ambientes húmedos, pero sí en caminos de bajo volumen en los que las cargas de tránsito no sean muy altas y el ambiente sea relativamente seco.

Finalmente, Schwartz y Khosravifar (Schwartz y Khosravifar, 2013) publicaron los resultados de otro trabajo que no solo comprendió estudios de laboratorio para evaluar el comportamiento de las bases espumadas, sino también estudios de campo. El trabajo se llevó a cabo en la carretera MD295, cerca del aeropuerto de Baltimore-Washington, y en él dieron seguimiento al comportamiento de bases espumadas (Figura 2.10). Las secciones (identificadas como "A" y "B") se estructuraron con 8 in de carpeta asfáltica y 8 in de base espumada. En la sección "A", la base espumada se construyó en dos capas de 4 in; con un tiempo entre la colocación de ambas de 4 días. En el segmento B, se compactaron dos capas, también de 4 in, pero las dos compactaciones se realizaron el mismo día.



Nota: Los números entre paréntesis indican las fechas de colocación, mientras que los números en recuadros blancos representan cadenamientos.

#### Figura 2.10 Plano del proyecto

Para la base espumada se utilizó una mezcla de 60%RAP-40%RC, con 2.8 % de asfalto tipo PG64-22 que se espumó a 160°C con un contenido de agua de 2.2 %.

La Figura 2.11 muestra las curvas granulométricas de los materiales. En la Tabla 2.6 se presentan valores de los porcentajes que pasan la malla 200, los contenidos de agua óptimos y los pesos volumétricos secos máximos.

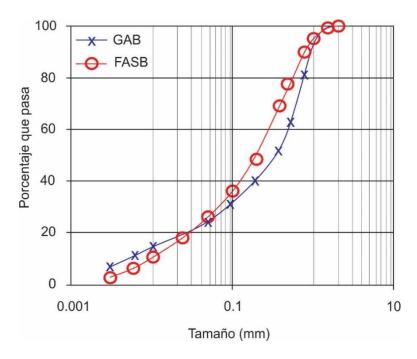


Figura 2.11 Granulometría del material de base (GAB) y de la base espumada (FASB)

Tabla 2.6 Propiedades de los materiales GAB y FASB

Material	Pasa malla 200 (%)	Contenido de agua óptimo ª (%)	Peso volumétrico seco máximo <sup>b</sup> (pcf)
GAB	6.7	5.2	148.8
FASB	3.1	10.2	122.4

#### Notas:

Fuente: Modificada de Schwartz y Khosravifar (2013)

En el estudio, se realizaron mediciones con *geogauge* y con LWD Zorn ZFG. Los resultados indican que el LWD subestima la rigidez por un factor de 0.5 en comparación con el *geogauge* (Figura 2.12). Schwartz y Khosravifar atribuyen esta diferencia a la velocidad de aplicación de la carga, a los esfuerzos inducidos y, principalmente, a la zona de influencia de la medición de los equipos. El *geogauge* tiene una zona de influencia (en profundidad) de 9 a 12 in y en el LWD es de cerca de 2 veces el diámetro de la placa, o 24 in. Ambas profundidades se extienden más allá del espesor de la base o de la base espumada, por tanto, los valores de E reportados corresponden a un módulo promedio de los materiales comprendidos en las zonas de influencia.

<sup>&</sup>lt;sup>a</sup> AASHTO T180 método D; AASHTO T224

<sup>&</sup>lt;sup>b</sup> AASHTO T180 método D; AAHTO T224

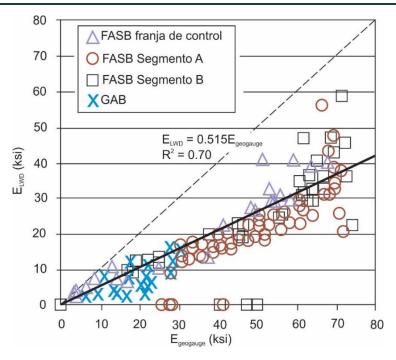


Figura 2.12 Mediciones de geogauge y LWD

Schwartz y Khosravifar también realizaron mediciones de rigidez conforme ocurría el proceso de curado. En la Figura 2.13 se observa la rigidez en la primera subcapa de 4 in del segmento A. Los autores indican que en el segundo punto la rigidez se redujo debido a una posible inhibición del curado por la presencia de lluvia. Posteriormente el módulo se incrementa, aunque no de forma importante. En este caso, Schwartz y Khosravifar presentan como causa probable la influencia del material colocado por debajo de la capa de espumado.

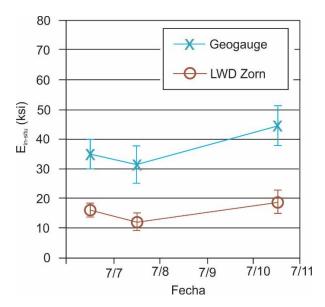


Figura 2.13. Rigidez medida durante el curado con equipos LWD y geogauge

La Figura 2.14 muestra los resultados del comportamiento de la rigidez en el tiempo para la segunda subcapa de 4 in del segmento A. La razón para la alta rigidez de esta segunda subcapa es que la primera ya se había curado y se había rigidizado durante algunos días. Además, las mediciones estuvieron influenciadas por el curado parcial de la primera subcapa. Nótese que los incrementos de rigidez de la base tradicional fueron inferiores a los incrementos de las bases espumadas.

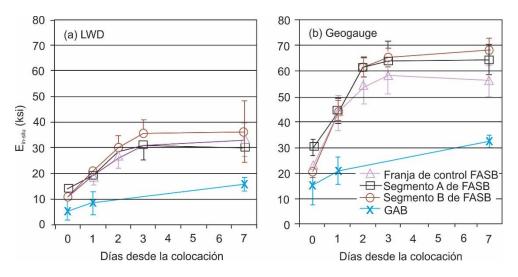


Figura 2.14 La rigidez promedio se incrementa con el tiempo usando (a) LWD Zorn, (b) Geogauge, en la franja de control de FASB, segmento A (segunda subcapa de 4 in), segmento B y GAB. Las barras de error muestran la desviación estándar

Los estudios anteriores nuevamente muestran que los agregados estabilizados con asfalto espumado no han presentado un comportamiento adecuado en todos los casos. Por otro lado, los estudios de laboratorio indican que las propiedades mecánicas evaluadas dependen en gran medida de las combinaciones de agregados que se utilicen.

Evaluación de un espumado	agregado de base	recuperada y R.	AP estabilizado d	con cal y asfalto

# 3. Materiales y procedimientos de prueba

#### 3.1 Los materiales

#### 3.1.1 El agregado

El material utilizado fue producto del fresado de la carpeta asfáltica (50 %) y parte de la capa granular de base (50 %) de la carretera federal no. 90. El material contenía partículas con diámetro superior a una pulgada, por lo tanto, el proceso de preparación incluyó el cribado del material para eliminar esas partículas. Como siguientes pasos, el material se secó al aire durante varios días y se cuarteó y almacenó en costales (Figura 3.1). En adelante se hará referencia a este material como "agregado", con conocimiento de que está formado por 50 % de RAP y 50% de base hidráulica.



Figura 3.1. Preparación del material

#### 3.1.2 La cal

Para el estudio se utilizó cal hidratada con 80 % de óxido de calcio, en un porcentaje de 5% que fue determinado de tal manera que proporcionara una resistencia de al menos 14 kg/cm² a 7 días de curado acelerado.

#### **3.1.3** El agua

El agua para mezclado se tomó de la red de agua potable del IMT.

#### 3.1.4. El asfalto

El asfalto empleado fue del tipo PG64-22.

## 3.2 Procedimientos de prueba

#### 3.2.1 Protocolo para evaluación de aditivos

Desde hace 10 años el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), en conjunto con la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) de la Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transportes, lleva a cabo la verificación del comportamiento de aditivos estabilizantes. Para realizar esta verificación, el IMT y la DGST acordaron aplicar un protocolo basado en la realización de una serie de pruebas tanto en el material estabilizado como en el de referencia, de manera que al comparar los resultados pudiera definirse en qué medida el producto estabilizante potencia las propiedades de los materiales estudiados. La Tabla 3.1 muestra el conjunto de pruebas que se realizan de acuerdo con el protocolo propuesto.

Tabla 3.1 Pruebas que se realizan para verificar el comportamiento de un aditivo

Prueba	Almacenamiento después de compactación (días)	Secado (días)	Humedecimiento (días)	Almacenamiento después de humedecimiento y secado (días)	Nomenclatura
CS	0	0	0	0	OA
CS	7	0	0	0	7A
CS	14	0	0	0	14A
CS	28	0	0	0	28A
Mr	0	0	0	0	OA
Mr	7	0	0	0	7A
Mr	14	0	0	0	14A
Mr	28	0	0	0	28A
Dp	14	0	0	0	14A
CS	0	7	0	14	7S-14A
CS	0	14	0	14	14S-14A
CS	0	28	0	14	28S-14A
Mr	0	7	0	14	7S-14A
Mr	0	14	0	14	14S-14A
Mr	0	28	0	14	28S-14A
Dp	0	14	0	14	14S-14A
CS	7	0	14	14	7A-14H-14A
CS	14	0	14	14	14A-14H-14A
CS	28	0	14	14	28A-14H-14A
Mr	7	0	14	14	7A-14H-14A
Mr	14	0	14	14	14A-14H-14A
Mr	28	0	14	14	28A-14H-14A
Dp	14	0	14	14	14A-14H-14A
Dp	0	14	14	14	14S-14H-14A
CS	0	7	14	14	7S-14H-14A
CS	0	14	14	14	14S-14H-14A
CS	0	28	14	14	28S-14H-14A
Mr	0	0	14	14	0A-14H-14A
CBR	0	7	4	0	CBR-7S
CBR	0	0	4	0	CBR-0A

Nota: Las pruebas se realizan en material con y sin aditivo.

En este proyecto se efectuaron solo algunas de las pruebas, ya que no se contaba con una cantidad suficiente de material para la realización de todas ellas.

## 3.2.2 Caracterización del agregado

Para determinar las propiedades físicas del agregado, se utilizaron los procedimientos que se describen en las normas listadas en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Normas utilizadas para determinar propiedades físicas

Designación de la norma	Nombre
ASTM D4318-10	Determinación de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad
ASTM D854-10	Determinación de la gravedad específica de suelos mediante picnómetro
ASTM D 1140-00	Determinación de la cantidad de suelo más fino que la malla no. 200
ASTM C136-06	Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos
ASTM D1557-12	Determinación de las características de compactación

### 3.2.3 Diseño de la mezcla con asfalto espumado

El diseño de la mezcla con asfalto espumado comprendió los siguientes pasos:

#### Determinación del contenido de agua para espumar el asfalto

En este proyecto, la cantidad de agua para espumar el asfalto fue de 2.7 % a una temperatura de 170 °C (estos valores se determinaron en un proyecto previo).

# Determinación del porcentaje de asfalto óptimo para la mezcla (Figura 3.2)

- En primer lugar, se caracterizó el agregado de acuerdo con las pruebas indicadas en el inciso 3.2.1.
- A continuación, se registraron los valores de peso volumétrico seco máximo y contenido de agua óptimo de la prueba Proctor modificada.
- Se pesaron muestras de 12.5 kg de agregado.
- Se pesó el 1% de cal hidratada con respecto al peso del agregado seco.
- El agregado y el *filler* se mezclaron por un minuto (1 min es la duración de un ciclo).
- Se añadió a la mezcla anterior el 75% del contenido de agua previsto para alcanzar la humedad óptima y se mezcló durante otro ciclo.
- En un ciclo adicional, se inyectó y se mezcló el asfalto espumado.
- Para finalizar el mezclado, se agregó el 25% restante de agua y se mezcló durante otro ciclo.
- Se retiró el material del equipo de mezclado y se cuarteó.



Figura 3.2 (a) Pesado de muestras de 12.5 kg; (b) Colocación del material en la mezcladora; (c) Adición del 1% de cal hidratada; (d) Adición del agua; (e) Agregado mezclado con agua, cal y asfalto espumado; (f) Cuarteo del agregado mezclado con todos los componentes

# Compactación de los especímenes de 15 cm diámetro por 9.5 cm de espesor (Figura 3.3)

- Se determinó la cantidad de suelo que debía compactarse para cada espécimen. La cantidad de material debe garantizar que se alcance el peso volumétrico requerido.
- Mediante el compactador giratorio, se compactaron los especímenes utilizando como control el peso volumétrico seco máximo (de acuerdo con la prueba Proctor modificada). Para esto, se establecieron los siguientes parámetros en el equipo giratorio: Presión vertical de 600 kPa; ángulo de giro: 1.16 °; No. de giros: 500; velocidad: 30 giros/min.
- Se compactaron 6 especímenes por cada porcentaje de asfalto utilizado, los cuales fueron 1.8, 2.0, 2.2, y 2.4 %.

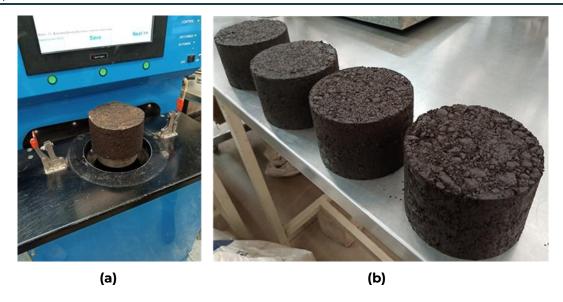


Figura 3.3 (a) Compactación de probetas en el compactador giratorio; (b) Muestras compactadas

# Proceso de acondicionamiento y ensaye de los especímenes (Figura 3.4)

- Los 24 especímenes se sometieron a un proceso de curado en el que fueron sometidos a un secado de 24 horas con una temperatura de 40°C.
- Concluido lo anterior, se colocaron en bolsas de plástico y se introdujeron en el horno, donde permanecieron nuevamente a 40°C durante 48 horas.
- Los especímenes previstos para los ensayes en seco permanecieron a una temperatura de 25°C durante unas horas, y posteriormente se pesaron y se midieron.
- Enseguida, se ensayaron con la prueba de tensión indirecta, controlando la deformación a una velocidad de 50.88 mm/min.
- Las muestras destinadas a ensayarse como especímenes saturados se dejaron enfriar durante 4 horas, se midieron y se pesaron.
- A continuación, se mantuvieron en agua a una temperatura de 25 °C durante 24 horas.
- Se aplicó la prueba de tensión indirecta a los especímenes saturados con el control de velocidad de deformación indicado previamente.
- Terminado el ensaye, cada espécimen se disgregó a fin de determinar su contenido de agua final.



Figura 3.4. (a) Acondicionamiento de probetas; (b) Ensaye en tensión indirecta

#### Determinación del TSR

 Una vez que se obtuvieron los resultados de tensión indirecta de los especímenes en seco y en húmedo, se determinó el TSR como la siguiente relación de resistencias:

$$TSR = \frac{ITS_{saturado}}{ITS_{seco}}$$

donde:

ITS<sub>saturado</sub>: Valor promedio de ITS en condición de saturación (kPa) ITS<sub>seco</sub>: Valor promedio de ITS en condición seca (kPa)

 La guía técnica TG2 indica que el contenido de asfalto óptimo será el que provea al menos un 75% de TSR.

#### 3.2.4 Evaluación de las propiedades mecánicas

# 3.2.4.1 Preparación de los especímenes para las pruebas de resistencia en compresión simple y módulo de resiliencia

# Procedimiento de preparación de especímenes de agregado sin aditivo

- 1 Al agregado se le adicionó la cantidad de agua necesaria para alcanzar la compactación óptima.
- 2 Se mezcló hasta tener un material homogéneo.
- 3 La muestra se compactó en seis capas, por lo que ya se había calculado la cantidad de material que debía compactarse por cada capa. Se pesaron las 6 porciones de la mezcla agregado-agua.
- 4 Se preparó el molde de compactación (diámetro de 15 cm y 30 cm de altura, sin collarín). En el fondo del molde se colocó un disco de plástico rígido y en la pared interior una mica adherible para que, al desmoldar, el espécimen no quedara pegado.
- 5 Una vez preparado el molde, se colocó la primera capa de material y se compactó con 119 golpes utilizando un pisón de 4.5 kg de masa y 45.7 cm de altura de caída, según lo mostrado en la Figura 3.5 (a).
- 6 Después de aplicar los 119 golpes, se escarificó la superficie y se procedió a compactar la segunda capa. El proceso de repitió hasta la sexta capa.
- 7 Enseguida se retiró el collarín, se cortó la mica que sobresalía y se enrasó la superficie del espécimen. Las Figuras 3.5 (b) y (c) ilustran estas tareas.







Figura 3.5 (a) Compactación del espécimen; (b) Superficie de la muestra después de la sexta capa compactada; (c) Enrase de la superficie

(b)

8 Finalmente, el espécimen se extrajo del molde, se pesó y se midió, como puede apreciarse en las Figuras 3.6 (a), (b) y (c).

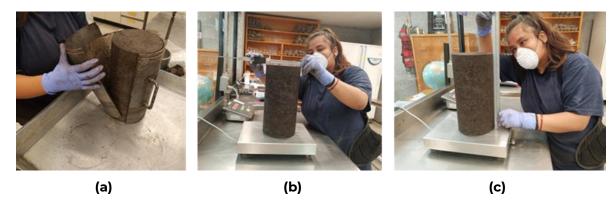


Figura 3.6. (a) Extracción de la muestra; (b) Medición del diámetro; (c) Medición de la altura.

- 9 Después de la compactación, algunos especímenes se acondicionaron y otros se ensayaron inmediatamente. Algunas de las condiciones fueron las siguientes (Figura 3.7):
  - Secado durante 7 días a temperatura controlada y 14 días de almacenamiento (nomenclatura: 7S-14A).
  - Secado durante 14 días y 14 días de almacenamiento, (14S-14A).
  - 28 días de secado y 14 días de almacenamiento (28S-14A).
  - 7 días de almacenamiento a temperatura controlada (7A).
  - 14 días de almacenamiento a temperatura controlada (14A).
  - 28 días de almacenamiento a temperatura controlada (28A).
  - 7 días de almacenamiento, 14 días de humedecimiento y 14 días de almacenamiento (7A-14H-14A).
  - 14 días de almacenamiento, 14 días de humedecimiento y 14 días de almacenamiento (14A-14H-14A).
  - 28 días de almacenamiento, 14 días de humedecimiento y 14 días de almacenamiento (28A-14H-14A).
  - 7 días de secado, 14 días de humedecimiento y 14 días de almacenamiento (7S-14H-14A).
  - 14 días de secado, 14 días de humedecimiento y 14 días de almacenamiento (14S-14H-14A).
  - 28 días de secado, 14 días de humedecimiento y 14 días de almacenamiento (28S-14H-14A).

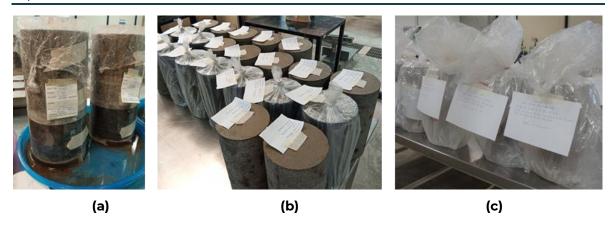


Figura 3.7 (a) Humedecimiento de muestras por capilaridad; (b) Secado de muestras en un cuarto de temperatura controlada; (c) Almacenamiento de muestras después de humedecerse, secarse o compactarse

# Procedimiento de preparación de muestras de agregado con 1 o 5% de cal hidratada (Figura 3.8)

- 1 Se adicionó al agregado el 1 o 5% de cal hidratada con respecto al peso seco.
- 2 Se mezcló completamente hasta obtener un material homogéneo.
- 3 Se adicionó el mismo contenido de agua que al material sin aditivo y se mezcló nuevamente.
- 4 Para el proceso de compactación de los especímenes, se repitieron los pasos especificados en los incisos 3 a 8 del procedimiento de preparación de los especímenes sin aditivo.



Figura 3.8. (a) Incorporación de la cal al agregado; (b) Añadido del agua; (c) Mezclado del material; (d) Muestra compactada; (e) Toma de dimensiones

# Procedimiento de preparación de muestras de agregado con asfalto espumado

El procedimiento de preparación de la mezcla para los especímenes con asfalto espumado fue similar al utilizado previamente para preparación de especímenes para diseño. Sin embargo, en este caso, el agregado solo se mezcló con 2.2 % de asfalto espumado y con el 1 % de cal hidratada.

La compactación de las muestras se realizó con el mismo procedimiento utilizado para los especímenes sin aditivo.

#### 3.2.4.2 Prueba de compresión simple

La prueba de resistencia en compresión simple consiste en colocar el espécimen en un marco como el de la Figura 3.9 (a) y aplicarle carga a una velocidad de deformación controlada. En este caso, la velocidad se mantuvo en 1.2 %/min. La prueba se da por terminada cuando ocurre la falla del espécimen, condición que se ilustra en la Figura 3.9 (b). Si es necesario medir el módulo de elasticidad, se colocan LVDTs en el cuerpo de la probeta (partes b y c de la Figura 3.9), de tal manera que las deformaciones para cálculo de módulo sean solo del espécimen y no del equipo de prueba.

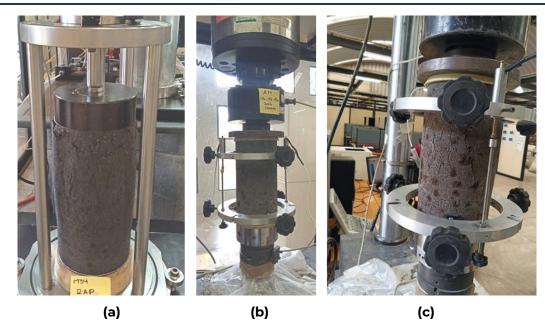


Figura 3.9 (a) Falla del espécimen; (b y c) LVDT colocados en el cuerpo del espécimen

#### 3.2.4.3 Prueba de módulo de resiliencia

Para obtener los módulos de resiliencia en este trabajo se aplicó el protocolo NCHRP 1-28A, cuya denominación es "Determinación del módulo de resiliencia para diseño de pavimentos flexibles".

Para las pruebas llevadas a cabo durante la investigación se utilizó el equipo triaxial cíclico que se muestra en la Figura 3.10 (a).

En esta prueba, se aplican al espécimen diferentes cargas y presiones de confinamiento dependiendo del tipo de material ensayado. La Tabla 3.3 muestra las secuencias de prueba para el material de base.

La secuencia cero es la de preacondicionamiento y no se registran datos. En las siguientes secuencias se aplican 100 ciclos de carga y se toman datos de los últimos cinco ciclos para obtener un módulo de resiliencia promedio. En cada ciclo, la carga se aplica durante 0.1 s y después se da paso a un período de descarga de 0.9 s para el caso de materiales de base, como puede apreciarse en la Figura 3.10 (b).

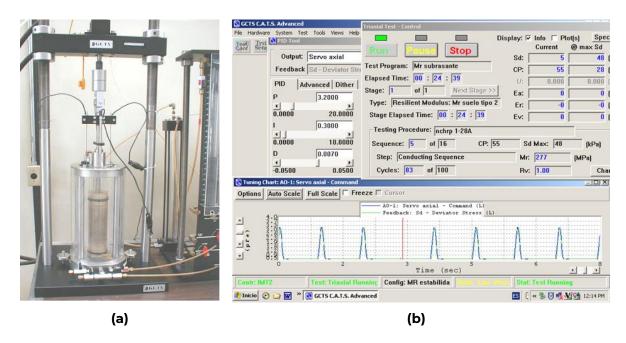


Figura 3.10. (a) Equipo triaxial para determinar el módulo de resiliencia; (b) Vista de la aplicación de la carga cíclica al espécimen contra el tiempo

Tabla 3.3. Esfuerzos de confinamiento y desviadores aplicados en la prueba de módulo de resiliencia según el protocolo NCHRP 1-28A. Procedimiento para materiales de base/subbase

Sección no.	σ₃ (kPa)	Esfuerzo cíclico (kPa)	No. de repeticiones
0	103.5	207.0	1000
1	20.7	10.4	100
2	41.4	20.7	100
3	69	34.5	100
4	103.5	51.8	100
5	138.0	69.0	100
6	20.7	20.7	100
7	41.4	41.4	100
8	69.0	69.0	100
9	103.5	103.5	100
10	138.0	138.0	100
11	20.7	41.4	100
12	41.4	82.8	100
13	69.0	138.0	100
14	103.5	207.0	100
15	138.0	2760	100
16	20.7	62.1	100
17	41.4	124.2	100
18	69.0	207.0	100
19	103.5	310.5	100
20	138.0	414.0	100
21	20.7	103.5	100
22	41.4	207.0	100
23	69.0	345.0	100
24	103.5	517.5	100
25	138.0	690.0	100
26	20.7	144.9	100
27	41.4	289.8	100
28	69.0	483.0	100
29	103.5	724.5	100
30	138.0	966.0	100

## 4. Discusión de resultados

## 4.1 Propiedades del agregado

En la Tabla 4.1 se resumen las características del agregado y en la Figura 4.1 se muestra su curva granulométrica. La figura incluye, como referencia, las zonas granulométricas recomendadas para agregados de bases espumadas (Wirtgen Cold Recycling Technology, 2012).

Tabla 4.1. Resumen de las propiedades del agregado

Característica	Valor
Clasificación de acuerdo con el SUCS	SW
Límite líquido (%)	NP
Límite plástico (%)	NP
Índice de plasticidad (%)	NP
Gravedad específica del material que pasa malla No. 4	2.39
Gravedad específica del agregado grueso	2.56
Pasa malla No. 200 (%)	1.49

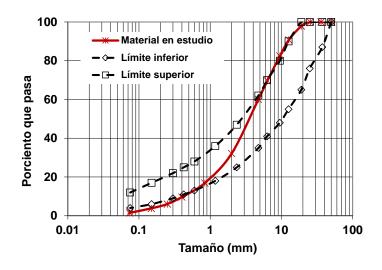


Figura 4.1. Granulometría del agregado

En la Figura 4.1 puede apreciarse que las gravas se encuentran alineadas a la curva de límite superior, mientras que las arenas se adhieren a la curva de límite inferior. Cabe señalar que no se realizó ninguna modificación a la granulometría adicional al retiro de material con un tamaño mayor a 1".

## 4.2 Características de compactación

La Figura 4.2 muestra la curva de compactación Proctor modificada del agregado. De acuerdo con la gráfica, el contenido de agua óptimo fue de 7%, con un peso volumétrico seco máximo de 19.77 kN/m³.

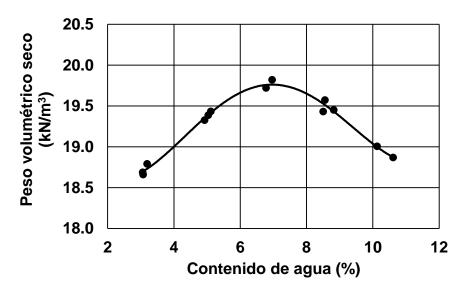


Figura 4.2 Curva de compactación Proctor modificada del agregado en estudio.

A fin de controlar la compactación de todos los especímenes se utilizó el contenido de agua óptimo y el peso volumétrico seco máximo, sin embargo, se permitió que el contenido de agua variara ±0.5 % y el peso volumétrico seco ±1 %.

# 4.3 Contenido óptimo de asfalto para espumar

La determinación del contenido óptimo de asfalto para espumar se basó en pruebas de tensión indirecta y en la relación entre pruebas efectuadas con especímenes húmedos y secos (TSR). En la Tabla 4.2 se resumen las características de los especímenes para determinar la resistencia a la tensión en ambas condiciones. Cabe hacer notar que para cada condición se utilizaron tres réplicas.

La Tabla 4.3 condensa las resistencias a la tensión indirecta, así como el valor de TSR calculado. Asimismo, en la Figura 4.3 se muestra la relación existente entre el porcentaje de asfalto espumado y el valor de TSR. A partir de estos resultados, se determinó 2.2% como el óptimo para el contenido de asfalto espumado.

Tabla 4.2 Características de los especímenes después de la compactación y posterior al curado

			Caracterís	ticas des	pués de c	ompactar			Caracte	rísticas de	spués de	l curado	
%Asfalto espumado	No. especímen	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
	Diámetro (cm)	15.24	15.28	15.29	15.26	15.28	15.27	15.27	15.27	15.26	15.25	15.25	15.27
4.0	Altura (cm)	9.77	9.66	9.58	9.65	9.61	9.48	9.87	9.59	9.69	9.59	9.59	9.54
1.8	Peso (g)	3589	3593	3594	3592	3591	3596	3473	3472	3471	3476	3474	3464
	$\gamma_{\rm m}$ (kN/m <sup>3</sup> )	19.76	19.90	20.04	19.97	19.99	20.32	18.85	19.39	19.21	19.47	19.46	19.45
	Diámetro (cm)	15.26	15.25	15.24	15.24	15.26	15.25	15.26	15.26	15.25	15.24	15.27	15.25
0	Altura (cm)	9.54	9.59	9.53	9.59	9.51	9.59	6.53	9.59	9.61	9.63	9.63	9.66
2	Peso (g)	3593	3597	3598	3597	3594	3599	3491	3493	3483	3489	3493.5	3498
	$\gamma_{\rm m}$ (kN/m <sup>3</sup> )	20.20	20.14	20.30	20.17	20.27	20.16	28.68	19.54	19.47	19.48	19.43	19.45
	Diámetro (cm)	15.28	15.24	15.26	15.26	15.27	15.27	15.27	15.23	15.25	15.25	15.23	15.24
0.0	Altura (cm)	9.82	9.7	9.8	9.77	9.81	9.81	9.96	9.76	9.81	9.89	9.86	9.74
2.2	Peso (g)	3590	3594.5	3597	3592.5	3593	3600	3488	3494	3483.5	3490.5	3490.5	3496.5
	$\gamma_{\rm m}$ (kN/m <sup>3</sup> )	19.56	19.93	19.69	19.72	19.62	19.66	18.76	19.28	19.07	18.96	19.06	19.31
	Diámetro (cm)	15.24	15.27	15.27	15.26	15.24	15.26	15.24	15.27	15.26	15.27	15.24	15.26
0.4	Altura (cm)	9.85	9.77	9.79	9.85	9.76	9.7	9.78	9.65	9.7	9.7	9.65	9.66
2.4	Peso (g)	3585	3588.5	3587	3589.5	3585	3587.5	3484	3486	3479	3485	3486	3487
	$\gamma_{\rm m}$ (kN/m <sup>3</sup> )	19.57	19.68	19.63	19.55	19.75	19.84	19.16	19.35	19.24	19.25	19.43	19.36

Tabla 4.3 Resultados de resistencia a tensión y valores de TSR

%asfalto espumado	Condición	Espécimen no.	RTI (kPa)	RTI <sub>prom</sub> (kPa)	TSR (%)
1.8	Seco	1	152	170	66
		2	172		
		3	185		
	Húmedo	1	103	113	
		2	119		
		3	116		
2.0	Seco	1	192	195	68
		2	215		
		3	179		
	Húmedo	1	125	132	
		2	134		
		3	137		
2.2	Seco	1	146	146	134
		2	138		
		3	154		
	Húmedo	1	191	196	
		2	198		
		3	199		
2.4	Seco	1	149	160	101
		2	163		
		3	169		
	Húmedo	1	144	163	
		2	173		
		3	171		

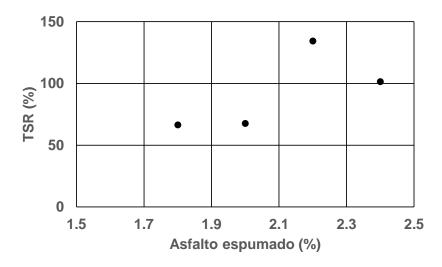


Figura 4.3 Relación entre porcentaje de asfalto espumado y TSR

La determinación del contenido de asfalto espumado también se llevó a cabo a través de pruebas de resistencia en compresión simple con muestras de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura. Luego de su acondicionamiento, algunos especímenes se ensayaron en condición seca y otros en húmeda. La Tabla 4.4 resume las características iniciales y finales de cada espécimen. Adicionalmente, en la Tabla 4.5 se concentran los resultados de resistencia en compresión simple (qu) y las relaciones de resistencia retenida, Rr. Con estos resultados se observa que un contenido de asfalto del 2.2 % proporciona el valor más alto de Rr (Figura 4.4).

Tabla 4.4 Características de los especímenes ensayados en compresión simple para determinar contenido óptimo de asfalto.

Fan á sim an		Condiciones iniciales					Condiciones finales				
Espécimen	% <b>A</b>	d	h	Peso	wi	γm	d	h	Peso	wi	γm
no.		(cm)	(cm)	<i>(g)</i>	(%)	$(kN/m^3)$	(cm)	(cm)	<i>(g)</i>	(%)	$(kN/m^3)$
3 (húmedo)	1.8	15.0	30.0	11066	6.48	20.48	30.00	14.997	10671		19.75
4 (húmedo)		15.0	30.0	10997	6.58	20.35	30.06	15.005	10615		19.58
1 (seco)		15.0	30.0	11054	6.72	20.45	30.03	15.003	10649	2.68	19.68
2 (seco)		15.0	30.0	10939	6.91	20.24	30.03	15.048	10540	2.54	19.61
1 (húmedo)	2.0	15.0	30.0	10695	6.38	19.79	30.03	14.958	10291	6.10	19.13
3 (húmedo)		15.0	30.0	10665	6.17	19.73	30.03	14.910	10264	6.86	19.20
4 (seco)		15.0	30.0	10824	6.30	20.03	30.07	14.980	10438	2.96	19.32
1 (húmedo)	2.2	15.0	30.0	10720	6.21	19.84	29.99	14.991	10317	5.76	19.12
3 (húmedo)		15.0	30.0	10799	5.56	19.98	30.00	15.020	10399	6.26	19.19
4 (seco)		15.0	30.0	10681	6.25	19.76	30.07	14.980	10300	2.44	19.07
1 (húmedo)	2.4	15.0	30.0	10581	6.11	19.58	30.07	14.996	10209	6.49	18.86
2 (húmedo)		15.0	30.0	10705	6.30	19.81	30.03	14.996	10318	5.88	19.08
3 (seco)		15.0	30.0	10674	5.60	19.75	30.00	15.017	10293	2.37	18.56

Espécimen no.	%Asfalto	q <sub>u</sub> (kPa)	q <sub>upromedio</sub> (kPa)	Resistencia retenida, Rr (%)
3	1.8	641	649	67
4		657		
1		1007	972	
2		938	]	
1	2.0	475	436	74
3		396	1	
4		592	592	
1	2.2	587	589	87
2		590	1	
3		675	675	
1	2.4	487	516	67
2		545	1	
3		767	767	1

Tabla 4.5. Resumen de la resistencia en compresión y resistencia retenida

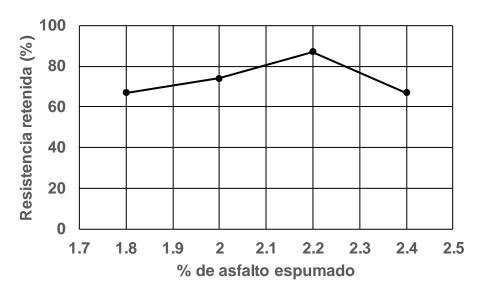


Figura 4.4. Relación entre porcentaje de asfalto espumado y resistencia retenida

### 4.4 Propiedades mecánicas

El objetivo del trabajo era evaluar las propiedades mecánicas del agregado con asfalto espumado y compararlo con las propiedades del agregado sin tratamiento alguno. No obstante, dado que las probetas de asfalto espumado contenían 1% de cal hidratada, se decidió preparar también especímenes de mezcla de agregado con 1% de cal para determinar en qué medida la cal contribuía a la modificación de las propiedades. El estudio se complementó con propiedades obtenidas en probetas de agregado estabilizado con 5% de cal hidratada. El conjunto de resultados se resume en los siguientes incisos.

### 4.4.1 Resistencia en compresión simple (qu)

Para todas las pruebas de resistencia en compresión simple se construyeron las curvas esfuerzo-deformación, pero las comparativas mostradas en este inciso se realizan exclusivamente en términos de las resistencias máximas o  $q_u$ . La Figura 4.5 muestra los resultados de  $q_u$  para las mezclas curadas mediante almacenamiento. Cabe hacer notar que la nomenclatura del asfalto espumado en todas las gráficas es "AE".

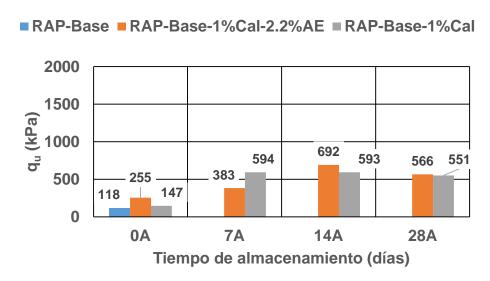


Figura 4.5 Comportamiento de la resistencia en compresión simple con el tiempo de almacenamiento

En la Figura 4.5 se observa, en primer lugar, que el agregado sin aditivo solo se ensayó inmediatamente después de la compactación, mientras que las otras dos mezclas se ensayaron para los distintos tiempos de almacenamiento previstos.

Los resultados de la figura indican que los especímenes con asfalto espumado ensayados inmediatamente y los ensayados a 14 y a 28 días tuvieron una resistencia mayor a la que presentaron los especímenes de agregado sin aditivo y de agregado con 1% de cal hidratada. Para 7 días de almacenamiento, la resistencia es más alta en el agregado con 1% de cal.

En porcentaje, para 0, 14 y 28 días, el agregado con asfalto espumado presenta resistencias de 73, 17 y 2.7 % mayores a las del agregado estabilizado únicamente con 1% de cal hidratada. Para 7 días de curado, el agregado con 1 % de cal hidratada presenta una resistencia 55 % mayor con respecto al agregado con asfalto espumado.

En lo que respecta a los especímenes que se almacenaron y humedecieron, la Figura 4.6 muestra que, para todas las condiciones, la resistencia en compresión es mayor en los especímenes con asfalto espumado que en los del agregado con 1% de cal. Los porcentajes de incremento son 48, 10 y 18 %. En este caso sí se ensayaron especímenes de agregado con un 5 % de cal para la condición de 28A-14H-14A. Esta mezcla presentó una resistencia 21 % mayor en relación con los especímenes de asfalto espumado. La figura muestra además que los especímenes sin aditivo tuvieron la resistencia más baja, pero, sin embargo, resistencia mayor a la observada en especímenes ensayados de manera inmediata.

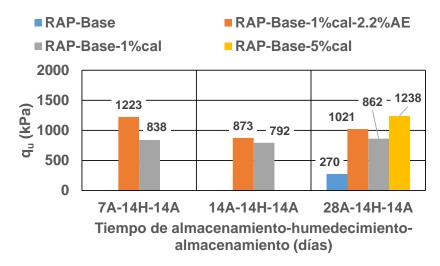


Figura 4.6. Comportamiento de la resistencia en compresión simple con el tiempo de almacenamiento y posterior humedecimiento

Con respecto a los especímenes que se secaron y luego se humedecieron, si se comparan las resistencias de las probetas con asfalto espumado y con 1% de cal, el agregado con asfalto espumado tuvo una resistencia mayor (de 4%) solo en la condición 28S-14H-14A. Para 7 y 14 días de secado con posterior humedecimiento, el agregado con 1% proporcionó mayor resistencia que el espumado en porcentajes de 4 y 0.2 %. Asimismo, de acuerdo con la Figura 4.7, el agregado con 5% cal tuvo resistencias mayores que el agregado con asfalto espumado en proporciones de 78, 69 y 60 %, para 7, 14 o 28 días de secado con posterior humedecimiento. Según la misma figura, el agregado con 5% de cal hidratada presentó las resistencias más altas.

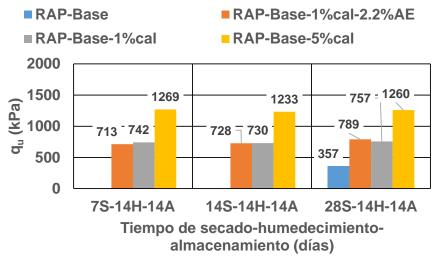


Figura 4.7 Resistencia de especímenes que se secaron y posteriormente se humedecieron

Otra de las condiciones estudiadas fue la de solo secado con almacenamiento posterior (el almacenamiento tuvo por objeto redistribuir el contenido de agua en los especímenes). En este caso se observó que, para 7 días de secado, los especímenes con asfalto espumado tuvieron una resistencia 26 % mayor con respecto a la obtenida en el agregado con 1 % de cal hidratada. Para 14 y 28 días de secado, el agregado con 1 % de resultó más resistente, con porcentajes de 14 y 6 %, respectivamente. En la Figura 4.8 puede apreciarse que, para esta condición, nuevamente el agregado con 5% de cal alcanzó resistencias mayores que las del asfalto espumado, con porcentajes de 58, 89 y 56 %, para 7, 14 y 28 días de secado.

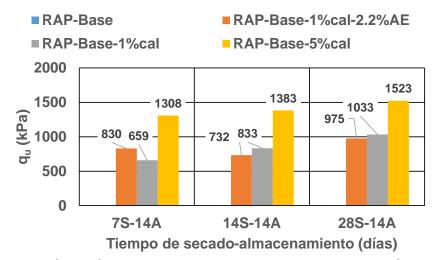
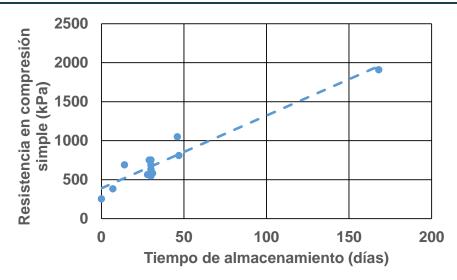


Figura 4.8 Resistencia de especímenes que se secaron y posteriormente se almacenaron

Si se comparan las resistencias en compresión simple obtenidas para las condiciones 7S-14H-14A, 14S-14H-14A, 28S-14H-14A con las de las condiciones 7A-14H-14A, 14A-14H-14A y 28A-14H-14A, se observa que las resistencias de los especímenes que fueron almacenados y posteriormente humedecidos están por arriba de los que primeramente se secaron y posteriormente se humedecieron. Lo mismo ocurre para el agregado al que se adicionó 1 % de cal. De acuerdo con lo anterior, si se permite que el material absorba agua después de ser compactado, se promueve el desarrollo de ligas en la mezcla, lo cual genera el incremento de resistencia observado. Este hecho podría estar relacionado con las reacciones producidas por la cal contenida en la mezcla.

Finalmente, una de las características que se evalúa en las mezclas asfálticas es la degradación de la resistencia por efecto del agua. Para esta evaluación se utiliza la TSR, que es una relación de las resistencias a la tensión indirecta medidas en especímenes húmedos y secos. Siguiendo una línea de evaluación similar, en este estudio se determinaron las resistencias en compresión simple de especímenes almacenados durante 7, 14 y 28 días. En otros especímenes la resistencia se evaluó a 7, 14 o 28 días de almacenamiento que posteriormente se humedecieron y después se almacenaron. Con estas dos condiciones se determinó un parámetro similar al TSR, pero en este caso, al que se denominó "resistencia retenida" y se abrevió como Rr.

Cabe señalar que si se comparan especímenes bajo la condición 7A-14H-14A con especímenes bajo 7A, estos últimos tendrían solo 7 días de almacenamiento, mientras que los primeros habrían alcanzado una edad de 35 días justo antes del ensaye. Para igualar condiciones, se desarrolló una gráfica de tiempo de almacenamiento contra resistencia (Figura 4.9). Utilizando esta curva se interpoló la resistencia a 35, 42 y 56 días para determinar las relaciones Rr que se resumen en la Tabla 4.5.



Nota: Se asume que no existe pérdida de agua durante el tiempo de almacenamiento.

Figura 4.9. Relación entre el tiempo de almacenamiento y la resistencia en compresión simple

Tabla 4.5. Resumen de las resistencias retenidas

Tipo de mezcla	Condición de estudio y q <sub>u</sub> (kPa)				Rr (%)
Agregado con asfalto espumado	35A	750	7A-14H-14A	1223	163
	42A	830	14A-14H-14A	873	105
	56A	980	28A-14H-14A	1021	104

La Tabla 4.5 contiene valores de Rr mayores a 100 %, lo que significa que, al ganar agua, el agregado estabilizado con asfalto espumado y 1 % de cal no pierde resistencia, sino que esta parece incrementarse.

#### 4.4.2 Módulos de resiliencia

La Figura 4.10 representa los módulos de resiliencia de las muestras que se ensayaron inmediatamente después de compactarse. Se hace notar que estos especímenes no soportaron todas las secuencias de esfuerzo aplicadas. Por otro lado, el agregado sin aditivo proporciona valores de módulo de resiliencia menores aproximadamente a 250 MPa, el agregado con 1 % de cal incrementa ligeramente sus módulos (valores entre 200 y 300 MPa) y los módulos crecen aún más para el agregado con 5 % de cal. Los especímenes de agregado con asfalto espumado muestran una pendiente más pronunciada, es decir, el módulo se incrementa más rápidamente en función del esfuerzo volumétrico, sin embargo, los módulos de resiliencia para esta condición están por debajo de los obtenidos para especímenes con 5 % de cal.

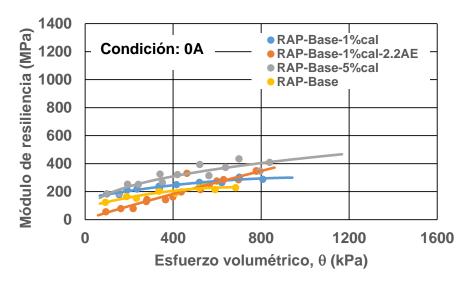


Figura 4.10 Módulos de resiliencia de las mezclas para especímenes ensayados inmediatamente después de compactarse

También fue objeto de análisis la condición en la que los especímenes se secaron, humedecieron y almacenaron secuencialmente durante periodos de 14 días por etapa. Los resultados de esta condición, mostrados en la Figura 4.11, indican que el agregado con 5 % de cal tuvo mayor afectación por el esfuerzo volumétrico, de acuerdo con la pendiente de la curva de tendencia. Lo anterior también es un signo característico de un material más granular. Por otro lado, los valores de módulo de resiliencia resultaron más bajos para el agregado granular con 1 % de cal y los más altos para el agregado con asfalto espumado.

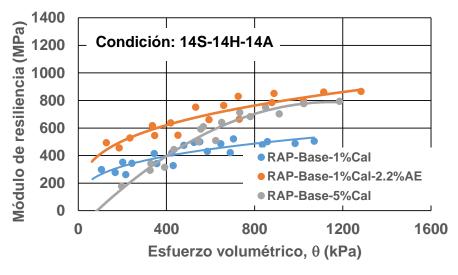


Figura 4.11 Valores de módulo de resiliencia para tres mezclas: agregado con 1 % cal, 1 % cal y 2.2 % de asfalto espumado y 5 % cal

Colocando en la gráfica solo las curvas de módulo de resiliencia para los agregados con 1 % de cal, por un lado, y con 1 % de cal y 2.2 % de asfalto

espumado por el otro, se puede observar el aporte en rigidez del asfalto espumado (Figura 4.12). El incremento en módulo de resiliencia al añadir el asfalto espumado es aproximadamente de 50% con respecto al del agregado con 1% de cal (ejemplo para un esfuerzo volumétrico de 400 kPa).

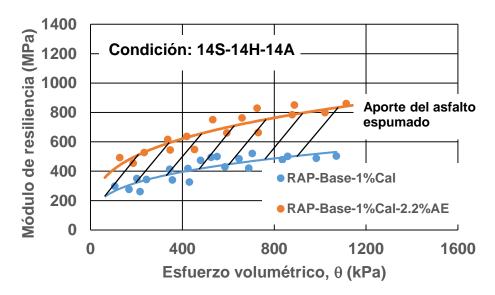


Figura 4.12 Módulos de resiliencia de las mezclas solo con cal y con cal y asfalto espumado

También se realizaron las pruebas de módulo de resiliencia en especímenes con 28 días de almacenamiento, 14 días de humedecimiento y 14 días de almacenamiento (Figura 4.13).

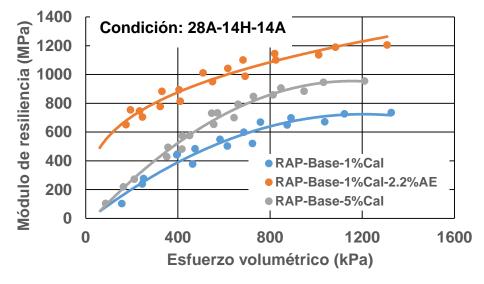


Figura 4.13 Módulo de resiliencia de mezclas: 1 % cal, 5 % cal y 1 %cal con 2.2 % de asfalto espumado.

Graficando solo la curva de 1% de cal y la de espumado, se observa que, en este caso, los módulos de resiliencia con asfalto espumado se incrementan en un 125% (Figura 4.14).

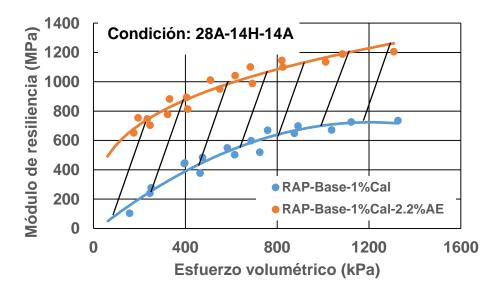


Figura 4.14. Módulos de resiliencia para agregado con 1% de cal y con asfalto espumado

Las características de los especímenes utilizados en la evaluación de las propiedades mecánicas se resumen en el Anexo 1.

oumado			

# **Conclusiones**

En el trabajo presentado en este documento se llevaron a cabo pruebas de resistencia en compresión simple y módulo de resiliencia para agregados sin modificar y modificados con aditivos estabilizantes. Se utilizaron como aditivos estabilizantes los siguientes: 1% y 5% de cal hidratada, y 1% de cal hidratada con 2.2% de asfalto espumado. Las conclusiones que se desprenden del estudio son las siguientes:

- El agregado estudiado fue producto de recuperación de carpeta asfáltica y base hidráulica. La granulometría no fue modificada, solo se descartó el agregado con tamaño mayor a 1".
- El contenido de agua óptimo y peso volumétrico seco máximo del agregado, de acuerdo con la prueba Proctor modificada, fueron 7.0 % y 19.77 kN/m³, respectivamente.
- El contenido de asfalto óptimo para espumar fue de 2.2 %. Este porcentaje se obtuvo tanto con pruebas de tensión indirecta como con pruebas de resistencia en compresión simple.
- Para 0, 14 y 28 días, el agregado con asfalto espumado presenta resistencias de 73, 17 y 2.7 % mayores a las del agregado con 1 % de cal hidratada. Para 7 días de curado, el agregado con 1 % de cal hidratada presenta una resistencia mayor en 55 % respecto al agregado con asfalto espumado
- Los especímenes que se almacenaron y humedecieron muestran que, para todas las condiciones, la resistencia en compresión simple es mayor en los especímenes con asfalto espumado que en el agregado con 1 % de cal. Los porcentajes de incremento son 48, 10 y 18 %.
- La prueba con especímenes de agregado estabilizado con 5 % de cal se realizó para la condición 28A-14H-14A. Esta mezcla presentó una resistencia mayor en 21 % con respecto a los especímenes con asfalto espumado.
- En relación con los especímenes que inicialmente se secaron y luego se humedecieron, el agregado con asfalto espumado presentó una resistencia mayor en un 4 % para la condición 28S-14H-14A. En los casos de 7 y 14 días de secado con posterior humedecimiento, el agregado con 1 % proporcionó mayor resistencia que el espumado en porcentajes de 4 y 0.2 %. Para las condiciones de secado-humedecimiento-almacenamiento, el

- agregado con 5 % de cal tuvo resistencias mayores que las del agregado con asfalto espumado. Las diferencias fueron de 78, 69 y 60 %, para 7, 14 o 28 días de secado.
- Se observó que las resistencias de los especímenes que fueron almacenados y posteriormente humedecidos están por arriba de los que inicialmente se secaron y enseguida se humedecieron. Considerando lo anterior, si se permite que el material absorba agua después de la compactación, se promueve el desarrollo de ligas en la mezcla, lo cual se traduce en un incremento de resistencia que podría explicarse por las reacciones debidas a la cal contenida en el agregado.
- Se determinó la resistencia retenida (Rr) con pruebas almacenadas y almacenadas y humedecidas para agregado con asfalto espumado. Las resistencias retenidas fueron mayores a 100%, esto indica que, al ganar agua, el agregado estabilizado con asfalto espumado y 1 % de cal no pierde resistencia, sino que, más bien, el agua parece fortalecer esta propiedad.
- Los especímenes que se ensayaron inmediatamente no soportaron todas las secuencias de esfuerzo aplicadas en las pruebas de módulo de resiliencia, para agregado con y sin aditivos.
- Los valores de módulo de resiliencia más bajos se obtienen con mezclas ensayadas inmediatamente después de la compactación.
- Los módulos de resiliencia más altos se alcanzan para agregado con asfalto espumado bajo las condiciones 14S-14H-14A y 28A-14H-14A.
- Los aportes del asfalto espumado en el incremento de los módulos de resiliencia para las condiciones 14S-14H-14A y 28A-14H-14A son evidentes en las comparaciones con el agregado que solo contiene 1 % de cal hidratada.

# Bibliografía

- Benítez, J. (2013). Diagnóstico del estado actual del reciclaje de У pavimentos en Colombia recomendaciones para implementación efectiva. [Proyecto de Colombia: Grado]. Universidad de Andes. https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/19394/u67 0475.pdf?sequence=1
- Bennert, T., Papp, W., Maher, A. & Gucunski, N. (2000). Utilization of Construction and Demolition Debris Under Traffic-Type Loading in Base and Subbase Applications. In Transportation Research Record: *Journal of the Transportation Research Board*, 1714, 33-39. Washington, DC. <a href="https://doi.org/10.3141/1714-05">https://doi.org/10.3141/1714-05</a>.
- Castañeda, F. (2022). Estabilización de suelos con cal. [1ª ed.). México: Trillas.
- Castellanos, J. y Socha, A. (2014). Evaluación del comportamiento mecánico en pavimentos de espesor completo de asfalto reciclado (RAP) estabilizado con emulsión asfáltica y adición de cemento Portland tipo I, sin intervención de la subrasante. Colombia: Universidad Piloto de Colombia. <a href="http://polux.unipiloto.edu.co:8080/00001872.pdf">http://polux.unipiloto.edu.co:8080/00001872.pdf</a>
- Csanyi, L. (1957). Foamed-asphalt in Bituminous Paving Mixtures. *HRB, National Research Council, Bull. 160*, 108-122. Washington, D.C. <a href="https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrbbulletin/160/160-002.pdf">https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrbbulletin/160/160-002.pdf</a>
- Delgado, H., García, F. y Campos, D. (2018). *Diseño de bases estabilizadas con asfalto espumado*. [Publicación técnica No 519]. México: Instituto Mexicano del Transporte. <a href="https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt519.pdf">https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt519.pdf</a>
- European Asphalt Pavement Association [EAPA]. (2022). Asphalt in Figures 2020. [Commented Version]. <a href="https://www.itafec.club/wp-content/uploads/2022/01/Asphalt-in-Figures-2020.pdf">https://www.itafec.club/wp-content/uploads/2022/01/Asphalt-in-Figures-2020.pdf</a>
- Federal Highway Administration (2008). User Guidelines for by products and Secondary Use Materials in Pavement Construction. FHWA-RD-97-148).

- He, Z. & Lu, W. (2004). Research on the properties of Road Building Materials Treated with Foamed Bitumen in China. In Proceedings of the 8<sup>th</sup> Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, Sun City, South Africa, 12-16 October 2004. Pp 2-9.
- Jiménez, M. (2011). ¿Qué es el asfalto espumado, se puede utilizar en Costa Rica? *Boletín Técnico PITRA*, 2 (13), Febrero 2011. https://es.slideshare.net/castilloaroni/asfalto-espumado-67848176
- Kim, W., Labuz, J. & Dai, Ch. (2006). Resilient Modulus of base Course Containing Recycled Asphalt Pavement. TRB Paper 07-0767. November 2006. https://doi.org/10.3141/2005-04.
- Mohammad, N., Wu, Z. & King, M. (2013). Treated Loading Evaluation of foamed Asphalt Treated RAP Layers in Pavement Performance. FHWA/LA.09/475. Department of Civil and Environmental Engineering. Louisiana State University.
- Mokwa, R. y Peebles & C. (2005). Evaluation of the engineering characteristics of RAP/aggregate blends. Federal Highway Administration. Report FHWA/MT-05-008/8117-24. <a href="https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/24855">https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/24855</a>
- Secretaría del Medio Ambiente (2021). Norma NACDMX-007-RNAT-2017. Clasificación y especificaciones de manejo integral para residuos de la construcción y demolición en la Ciudad de México. México: Gaceta Oficial de la Ciudad de México. 20 de junio de 2021. <a href="http://data.sedema.cdmx.gob.mx/sitios/conadf/documentos/proyect\_os-normas/NACDMX\_007\_RNAT\_2019.pdf">http://data.sedema.cdmx.gob.mx/sitios/conadf/documentos/proyect\_os-normas/NACDMX\_007\_RNAT\_2019.pdf</a>
- Schwartz, Ch. & Khosravifar, S. (2013). *Design and Evaluation of Foamed Asphalt Base Materials. Report MD-13-SP909B4E.* University of Maryland. Schwartz, Ch. W. y Khosravifar, S. (2013). Design and Evaluation of Foamed Asphalt Base Materials. Report MD-13-SP909B4E. University of Maryland.
- Stolle, D., Guo, P. & Emery, J. (2014). *Mechanical properties of reclaimed asphalt pavement –natural aggregate blends for granular base*. Canadian J. Civ. Eng. 41:493-499 (2014). <a href="https://doi.org/10.1139/cjce-2013-0009">https://doi.org/10.1139/cjce-2013-0009</a>
- Wu, M., Wen, H., Muhunthan, B. & Manahiloh, K. (2012). *Influence of Recycled Asphalt Pavement Content on Air Void Distribution*, Permeability, and Modulus of Base Layer. Transportation Research

Record Journal of the Transportation Research Board. September 2012. http://dx.doi.org/10.3141/2267-07.

Evaluación de un agregado de base recuperada y RAP estabilizado con cal y asfalto espumado

# Anexo 1. Características de especímenes ensayados en prueba de compresión simple y módulo de resiliencia

## Especímenes para compresión simple

Tabla A.1 Características de RAP-Base

				Condi	ciones	iniciales	}	Condiciones finales					
Muestra	Tipo de	Característica	dprom	hprom	Peso	w (%)		dprom,	hprom	Poso (a)	w (%)	$\gamma_{d}$	
No.	prueba	Caracteristica	, cm	(cm)	(g) W (78)		$(kN/m^3)$	cm	(cm)	Peso (g)	W (70)	$(kN/m^3)$	
1	CS	0A	14.977	29.917	11373	7.32	19.72	14.98	29.92	11373	7.32	19.72	
3	CS	0A	14.97	29.9	11370	7.53	19.71	14.97	29.90	11370	7.53	19.71	
4	CS	0A	14.974	29.917	11389	7.35	19.75	14.97	29.92	11389	7.35	19.75	
171	CS	28S-14H-14A	15.00	29.95	11464	6.93	19.87	15.05	29.90	11540	6.86	19.92	
178	CS	28A-14H-14A	14.995	29.95	11405	7.03	19.76	15.05	29.90	11561	7.23	19.89	
179	CS	28A-14H-14A	14.992	29.95	11458	7.02	19.86	15.05	29.88	11572	7.48	19.88	

Tabla A.2 Características de RAP-Base-1% cal hidratada-2.2% Asfalto espumado

			Car	acteristicas	de las mues	tras de agre	gdo con asfa	Ito espuma	do			
			Co	ndiciones in	iciales de lo	s especímei	nes	C	ondiciones f	inales de los	especímen	es
Condicion	Prueba a ensayar	Especimen	w (%)	Peso (g)	d (cm)	h (cm)	γd (kN/m³)	w (%)	Peso (g)	d (cm)	h (cm)	γd (kN/m³)
0A	Cs	9	6.59	11135.0	15.00	29.98	19.337	6.62	11135.0	15.00	29.98	19.34
0A	Cs	10	6.76	11128.5	15.00	29.90	19.346	6.43	11128.5	15.00	29.90	19.41
7A	Cs	90	6.6	11122.0	14.98	30.00	19.3418	6.37	11130.5	15.04	29.90	19.33
7A	Cs	91	7.04	11214.0	14.99	30.00	19.413	6.59	10199.5	15.04	29.92	17.66
14A	Cs	84	6.61	11145.0	14.99	29.95	19.3916	5.86	11084.0	15.01	29.93	19.40
14A	Cs	85	6.57	1113.5	14.99	29.97	19.348	6.7	11118.5	15.02	29.90	18.28
14A	Cs	86	6.89	11099.5	14.98	29.95	19.286	6.3	1199.5	15.01	29.90	19.36
28A	Cs	61	7.07	11000.5	15.01	29.97	18.989	7.16	10967.0	15.05	29.97	18.83
28A	Cs	62	6.67	10957.5	15.03	29.97	18.955	6.7	10936.5	15.03	29.88	18.96
7A-14H-14A	Cs	51	7.03	10901.0	15.03	29.97	18.78	6.03	10855.0	15.02	29.87	18.98
7A-14H-14A	Cs	52	6.82	11118.5	14.95	29.95	19.43	6.07	11073.0	15.04	29.92	19.26
7A-14H-14A	Cs	53	7.33	11148.0	15.03	29.93	19.182	6.35	11113.0	15.03	29.90	19.33
14A-14H-14A	Cs	11	6.89	11056.5	15.05	29.93	19.052	6.32	11057.0	15.06	29.95	19.13
14A-14H-14A	Cs	12	7.08	11059.0	14.99	29.93	19.174	6.5	11035.5	15.01	29.90	19.21
14A-14H-14A	Cs	13	6.35	11018.5	15.03	30.03	19.104	6.34	10947.5	15.00	29.98	19.06
14A-14H-14A	Cs	14	6.82	11032.5	15.02	29.90	18.8961	6.68	10857.0	15.03	29.90	18.81
14A-14H-14A	Cs	15	6.94	10964.0	14.97	29.97	19.043	6.42	10964.0	15.00	30.00	19.06
28A-14H-14A	Cs	1	7.25	11038.5	5.03	30.03	18.94	6.65	11000.5	14.99	30.08	19.06
28A-14H-14A	Cs	2	7.54	11032.5	14.98	30.07	18.98	7.01	11012.0	15.02	30.00	19.00
28A-14H-14A	Cs	3	6.31	11245.0	15.00	29.97	19.586	6.27	11207.0	15.05	30.02	19.38
28A-14H-14A	Cs	4	6.79	11240.5	14.98	30.03	19.5	6.35	11196.5	15.02	30.02	19.41
7S-14H-14A	Cs	39	7.15	11062.5	14.99	29.93	19.1566	3.55	10738.5	15.05	29.90	19.13
7S-14H-14A	Cs	40	7.29	10985.0	15.00	29.97	18.9596	3.51	10683.5	15.04	29.93	19.03
7S-14H-14A	Cs	41	6.84	10882.5	15.03	29.97	18.783	3.57	10598.5	15.07	29.87	18.85
14S-14H-14A	Cs	24	7.16	10925.5	15.05	29.97	18.765	3.63	10606.5	15.06	29.93	18.83
14S-14H-14A	Cs	25	6.69	10917.0	14.98	29.95	19.018	3.93	10655.5	15.03	29.90	18.97
28S-14H-14A	Cs	19	6.94	11117.0	14.97	29.93	19.362	3.35	10781.6	15.04	29.93	19.24
28S-14H-14A	Cs	20	6.6	11064.5	14.99	29.97	19.222	3.35	10743.0	15.05	29.93	19.16
7S-14A	Cs	77	6.86	11106.0	15.02	30.00	19.1679	2.14	10660.0	15.00	29.97	19.33
7S-14A	Cs	78	6.92	11043.0	15.03	29.97	19.041	2.31	10594.0	15.00	29.93	19.20
7S-14A	Cs	79	6.67	11118.5	15.04	29.98	19.1943	2.47	10672.5	15.00	30.00	19.27
14A-14A	Cs	66	6.92	10840.0	15.01	29.93	18.7683	1.72	10359.0	15.00	29.91	18.84
14A-14A	Cs	67	6.65	10968.0	15.01	30.00	19.01	1.79	10448.0	15.00	30.00	18.99
14A-14A	Cs	68	6.64	10973.5	15.01	29.97	19.035	1.83	10469.5	15.00	29.90	19.08
28S-14A	Cs	33	6.61	10994.0	15.00	29.97	19.1	1.53	10478.5	15.02	29.93	19.08
28S-14A	Cs	34	6.65	11059.0	14.99	29.93	19.26	1.49	10545.5	15.02	29.87	19.26
28S-14A	Cs	35	6.93	11024.0	14.99	29.97	19.0935	1.73	10482.5	15.04	29.93	19.02

Tabla A.3 Característica de RAP-Base-1% cal hidratada

				Condicio	nes inicial	25			Con	diciones fin	ales	
Muestra No.	Características	Ensave	dprom (cm)				v . (kN/m³)	dprom. cm	hprom (cm)		w (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )
28	0A	Cs	15.02	30.02	11409	7.00	19.66	15.02	30.02	11409.0	7.00	19.66
29	0A	Cs	14.98	29.95	11355.5	6.73	19.77	14.98	29.95	11355.5	6.73	19.77
30	0A	Cs	15.02	29.98	11398	7.09	19.64	15.02	29.98	11398.0	7.09	19.64
31	0A	Cs	15.04	30.05	11515	7.18	19.73	15.04	30.05	11515.0	7.18	19.73
109	7A	Cs	15.00	29.93	11302	7.10	19.58	15.01	29.98	11050.0	4.97	19.45
110	7A	Cs	15.00	30.00	11367.50	7.24	19.60	15.03	30.00	11215.0	6.75	19.38
101	14A	Cs	15.01	30.00	11451.5	6.97	19.78	15.00	30.00	10954.0	2.38	19.79
102	14A	Cs	15.00	30.00	11357.5	6.59	19.72	15.01	30.00	10854.0	2.44	19.59
103	14A	Cs	15.00	30.00	11349.5	7.04	19.61	15.01	29.97	10860.0	2.52	19.60
74	28A	Cs	15.00	30.00	11360	6.66	19.71	15.04	29.98	11232.5	6.11	19.49
75	28A	Cs	15.01	29.93	11319.5	6.74	19.64	15.06	29.97	11286.0	6.86	19.42
76	28A	Cs	15.01	30.00	11354	6.91	19.63	15.06	29.97	11328.0	6.79	19.49
78	28A	Cs	15.02	30.00	11384.5	7.16	19.61	15.05	29.95	11311.0	6.80	19.51
81	28A	Cs	14.99	29.97	11288.5	6.51	19.65	15.09	29.95	11280.0	6.63	19.37
82	28A	Cs	15.01	30.00	11411	6.64	19.76	15.05	29.92	11361.5	6.68	19.63
83	28A	Cs	15.00	29.93	11310	6.55	19.68	15.05	30.05	11270.0	6.78	19.36
84	28A	Cs	15.00	29.93	11310	6.55	19.68	15.05	30.05	11270.0	6.78	19.36
88	28A	Cs	15.01	30.00	11410.5	6.72	19.77	15.05	30.00	11248.0	5.37	19.63
40	7A-14H-14A	Cs	15.02	30.00	11542.5	6.78	19.96	15.06	29.97	11376.0	7.60	19.43
115	7A-14H-14A	Cs	15.01	30.03	11438	7.33	19.68	15.02	29.80	11298.0	6.97	19.61
116	7A-14H-14A	Cs	15.00	29.97	11303.5	6.60	19.64	15.03	29.95	11300.0	6.89	19.51
52	14A-14H-14A	Cs	14.99	29.97	11429	6.54	19.89	15.05	30.00	11450.0	7.14	19.64
18	14A-14H-14A	Cs	14.95	30.00	11321.5	7.09	19.69	15.05	29.92	11347.5	7.27	19.50
19	14A-14H-14A	Cs	14.99	29.97	11502	7.18	19.91	15.02	29.97	11372.0	7.08	19.62
37	14A-14H-14A	Cs	15.01	30.00	11412	7.38	19.65	15.05	29.98	11448.0	7.09	19.67
42	14A-14H-14A	Cs	15.04	30.00	11402	7.18	19.58	15.09	30.00	11424.0	7.35	19.45
43	14A-14H-14A	Cs	15.02	30.03	11451.5	7.22	19.70	15.05	30.03	11445.5	6.97	19.65
44	14A-14H-14A	Cs	14.99	29.97	11403	6.67	19.82	15.04	29.95	11251.5	7.06	19.39
48	14A-14H-14A	Cs	14.97	30.07	11421	6.68	19.84	15.05	30.10	11393.0	6.93	19.53
117	14A-14H-14A	Cs	15.04	30.07	11561.5	7.21	19.82	15.10	30.08	11596.0	7.06	19.73
15	28A-14H-14A	Cs	15.00	29.97	11302	6.52	19.66	15.05	29.95	11461.0	7.10	19.71
17	28A-14H-14A	Cs	15.03	29.97	11387	6.52	19.72	15.01	29.98	11313.5	6.92	19.56
32	28A-14H-14A	Cs	14.98	29.93	11446	6.96	19.91	15.05	29.95	11465.5	8.54	19.44
45	28A-14H-14A	Cs	15.00	29.97	11350.5	6.69	19.71	15.04	29.98	11367.5	7.23	19.52
47	28A-14H-14A	Cs	15.02	29.98	11342	6.76	19.62	15.05	29.93	11312.0	7.11	19.45
34	7S-14H-14A	Cs	15.00	30.00	11394	6.91	19.71	15.03	30.07	11193.0	5.19	19.56
67	7S-14H-14A	Cs	15.01	29.98	11347.5	6.74	19.65	15.04	29.95	11148.5	4.93	19.60
69	7S-14H-14A	Cs	15.02	29.97	11357	7.11	19.58	15.01	29.98	11050.0	4.79	19.49
35	14S-14H-14A	Cs	15.03	30.00	11454.5	6.86	19.76	15.01	30.03	11159.0	5.62	19.49
56	14S-14H-14A	Cs	15.02	30.00	11354.5	6.86	19.60	15.07	30.00	11203.5	5.70	19.43
57	14S-14H-14A	Cs	15.01	30.00	11366.5	6.84	19.67	15.06	30.00	11207.0	5.56	19.49
58	14S-14H-14A	Cs	15.02	30.00	11335.5	6.90	19.58	15.04	30.03	11177.5	5.49	19.47
7	28S-14H-14A	Cs	15.02	29.97	11372	6.60	19.70	15.10	29.95	11297.0	6.11	19.48
8	28S-14H-14A	Cs	15.06	30.02	11447	6.85	19.66	15.00	30.07	11284.5	6.01	19.65
11	28S-14H-14A	Cs	15.02	29.97	11372	6.60	19.70	15.10	29.95	11297.0	6.11	19.48
59	28S-14H-14A	Cs	15.00	30.03	11409	6.86	19.74	15.00	29.95	11319.5	5.98	19.80
61	28S-14H-14A	Cs	15.02	2995.00	11406	6.80	0.20	15.04	30.10	11316.0	5.79	19.63
80	7S-14A	Cs	14.99	29.93	11348.5	7.01	19.69	15.02	29.95	10799.5	2.21	19.53
89	7S-14A	Cs	15.00	30.00	11362	6.62	19.73	15.02	29.97	10815.0	2.20	19.54
95	7S-14A	Cs	15.00	30.00	11350	7.35	19.57	15.03	29.92	10864.0	2.50	19.58
96	7S-14A	Cs	15.00	30.00	11346	7.33	19.57	15.01	30.07	10872.0	2.50	19.55
97	14S-14A	Cs	14.96	30.00	11337.50	6.54	19.81	15.03	29.95	11338.0	2.11	20.51
99	14S-14A	Cs	15.01	30.00	11357.00	6.56	19.70	14.99	29.93	10821.0	2.19	19.67
111	14S-14A	Cs	15.00	29.93	11294.00	7.02	19.58	15.02	29.88	10875.0	1.95	19.77
113	28S-14A	Cs	15.03	30.07	11442.5	6.66	19.73	15.04	29.88	10907.0	1.99	19.76
41	28S-14A	Cs	15.00	30.03	11340.5	7.02	19.58	14.99	29.95	10714.0	1.92	19.50
63	28S-14A	Cs	15.02	30.03	11438	6.90	19.72	15.00	30.12	10910.0	2.20	19.69

Tabla A.4 Características de RAP-Base-5% cal hidratada

					Caracteri	sticas de las	muestras						
			(	Condiciones ir	niciales de los	s especimen	es	Condiciones finales de los especimenes					
Condicion	Prueba a ensayar	Especimen	w (%)	Peso (g)	d (cm)	h (cm)	γd (kN/m³)	w (%)	Peso (g)	d (cm)	h (cm)	γd (kN/m³)	
28s14a	Cs	1	7.39	11594	15.021	30.02	19.91	1.83	11500	15	30	20.9	
28s14a	Cs	2	7.36	11486.5	14.933	30.067	19.93	1.95	10934	15	30.033	19.82	
28s14a	Cs	3	7.41	11524.5	15.013	30.133	19.73	1.93	10986.5	14.998	30.1	19.88	
28s14a	Cs	4	6.92	11443.5	14.933	30.1	19.92	1.9	10912	14.997	30.133	19.74	
28s14a	Mr,Cs	5	7.5	11480	15	30	19.76	1.44	10931.5	14.988	30	19.97	
28s14a	Mr,Cs	6	7.56	11489	15	30	19.77	6.02	10969	14.988	29.967	19.2	
7s14h14a	Cs	7	6.81	11414	14.967	30.067	19.82	6.19	11369	15.044	30	19.78	
7s14h14a	Cs	8	6.96	11410	14.933	30.067	19.87	6.23	11409	14.999	30.1	19.83	
7s14h14a	Cs	10	7.14	11503.5	14.967	30.033	19.93	6.25	11399.5	15.042	30.067	19.7	
7s14h14a	Cs	11	7.01	11499	15.024	30.067	19.78	6.26	11483	15.014	30.067	19.92	
14s14a	Dp,Cs	15	7.04	11500	15.003	30.133	19.78	1.81	11008.5	15.013	30.133	19.89	
14s14a	Cs	16	6.91	11545	15.052	30.067	19.8	2.23	10945	14.993	30.067	19.78	
14s14a	Cs	17	7.01	11495	14.995	30	19.89	2.36	10986	14.964	29.867	20.05	
14s14a	Cs	18	6.98	11500	15.013	30.033	19.84	2.25	10.974	14.964	30.083	19.9	
14s14h14a	Cs	19	6.99	11478	15.006	30	19.84	6.22	11393	15.006	30.017	19.82	
14s14h14a	Cs	20	7.03	11503	15.007	30.033	19.85	6.31	11446	15.034	30.017	19.82	
7s14a	Mr,Cs	22	7.43	11534	14.999	30.067	19.82	2.68	11.098	15.013	30.05	19.93	
7s14a	Mr,Cs	23	6.88	11531	15.024	30.033	19.88	2.59	11086	15.006	30.05	19.95	
7s14a	Mr,Cs	24	7.05	11492	15.014	30.1	19.76	2.7	11022.5	14.8	30.017	21.27	
7s14a	Mr,Cs	25	7.44	11482	15.025	30	19.71	4.08	11022	14.999	30.133	19.51	
28s14h14a	Cs	26	6.96	11451	15.036	30.167	19.61	5.98	11356	14.974	30	19.9	
28s14h14a	Cs	27	7.13	11435	15	30	19.75	6.14	11363.5	14.987	29.983	19.86	
28s14h14a	Cs	28	7.08	11543	14.99	30.067	19.93	6.2	11462.5	15.01	30.033	19.92	
28s14h14a	Cs	29	7.35	11429	14.999	30.133	19.62	6.08	11352	15.012	30	19.77	
28a14h14a	Cs	37	7.39	11439	14.977	30.067	19.73	6.94	11383	15.008	30.067	19.63	
28a14h14a	Cs	38	7.27	11514	14.996	30.067	19.83	6.89	11512	15.031	30.117	19.77	
28a14h14a	Mr,Cs	39	7.48	11429	15	30	19.68	6.74	11403	15.02	30.05	19.68	

### Especímenes para módulo de resiliencia

#### Tabla A.5 Características de RAP-Base

				Condi	ciones	iniciales	3	Condiciones finales				
Muestra No.	Tipo de prueba	Característica	dprom , cm	hprom (cm)	Peso (g)	w (%)	γ <sub>d</sub> (kN/m³)	dprom, cm	hprom (cm)	Peso (g)	w (%)	γ <sub>d</sub> (kN/m³)
2	Mr	0A	14.99	29.92	11378	7.36	19.68	14.99	29.92	11378	7.36	19.68
7	Mr	0A	15.00	29.93	11413	7.51	19.69	15.00	29.93	11413	7.51	19.69

#### Tabla A.6 Característica de RAP-Base-1 % cal hidratada

Condiciones iniciales						Condiciones finales						
Muestra No.	Características	Ensaye	dprom (cm)	hprom (cm)	Peso (g)	w (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	dprom, cm	hprom (cm)	Peso (g)	w (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )
20	0A	Mr	14.993	30.033	11366	6.56	19.73	14.99	30.03	11365.5	6.81	19.69
14	28A-14H-14A	Mr	15.02	29.983	11342	6.76	19.62	15.05	29.93	11312	7.11	19.45
33	28A-14H-14A	Mr	14.98	30	11458	7.09	19.85	15.06	29.97	11461	7.06	19.68
35	14S-14H-14A	Mr	15.011	29.983	11432	7.28	19.70	15.03	29.98	11356	5.9	19.78

#### Tabla A.7 Características de RAP-Base-1 % cal hidratada-2.2 %Asfalto espumado

			Co	ondiciones in	iciales de lo	s especíme	nes	Condiciones finales de los especímenes					
Condicion	Ensaye	Especimen	W (%)	Peso (g)	d (cm)	h (cm)	Yd (kN/m3)	W (%)	Peso (g)	d (cm)	h (cm)	Yd (kN/m3	
0A	Mr	47	6.65	11001.0	15.02	29.97	19.04	6.59	11001.0	15.024	29.97	19.04	
0A	Mr	48	6.63	10998.0	15.02	29.93	19.06	6.56	10998.0	15.023	29.93	19.06	
28A-14H-14A	Mr	6	6.98	10996.0	14.95	29.93	19.19	4.39	10762.0	15.020	29.80	19.95	
14S-14A	Mr	63	7.34	11099.5	15.01	29.97	19.12	1.28	10545.5	15.010	29.88	19.32	
14S-14A	Mr	64	6.63	11006.5	15.03	29.93	19.05	1.25	10504.5	15.015	29.87	19.24	
14S-14A	Mr	65	7.28	10914.5	15.02	29.93	18.81	1.58	10423.5	14.994	29.88	19.08	
14S-14A	Mr	72	6.63	11088.0	15.00	29.97	19.26	2.03	10522.5	14.996	29.85	19.19	
28S-14A	Mr	37	7.04	11130.5	15.02	30.00	19.18	1.4	10598.0	15.013	30.02	18.40	
28S-14A	Mr	38	7.16	11005.0	14.99	30.00	19.03	***	10458.0	15.020	29.93	***	
14S-14H-14A	Mr	27	7.18	10986.0	15.00	29.97	18.99	3.81	10729.5	15.012	29.87	19.18	
14S-14H-14A	Mr	28	6.62	10902.0	15.03	29.97	18.85	4.08	10622.5	15.031	29.92	18.86	
14S-14H-14A	Mr	29	6.59	10841.5	14.99	29.97	18.86	2.05	10531.5	15.012	29.90	19.13	
28S-14H-14A	Mr	22	6.73	11007.0	14.98	29.97	19.14	3.25	10666.0	14.999	29.85	19.21	
28S-14H-14A	Mr	23	6.61	11016.5	14.99	29.97	19.16	2.76	10654.5	15.031	29.95	19.14	

#### Tabla A.8 Características de RAP-Base-5 % cal hidratada

	Caracteristicas de los especímenes												
			(	Condiciones ir	niciales de lo	s especimen	es	Condiciones finales de los especimenes					
Condicion	Prueba a ensayar	Especimen	w (%)	Peso (g)	d (cm)	h (cm)	γd (kN/m³)	w (%)	Peso (g)	d (cm)	h (cm)	γd (kN/m³)	
0d	Mr	13	7.49	11475	15	30.067	19.71	7.49	11475	15	30.067	19.71	
0d	Mr	14	7.3	11421	14.987	30	19.73	7.3	11421	14.987	30	19.73	
0d	Mr	21	6.92	11365	14.998	30	19.68	6.92	11365	14.998	30	19.68	
14s14a	Mr,Cs	36	7.16	11429	15.008	30.033	19.69	2.19	10918.5	14.996	30.033	19.76	
28s14a	Mr,Cs	5	7.5	11480	15	30	19.76	1.44	10931.5	14.988	30	19.97	
28s14a	Mr,Cs	6	7.56	11489	15	30	19.77	6.02	10969	14.988	29.967	19.2	
14s14h14a	Mr,Cs	33	7.38	11389	15.013	30.033	19.57	6.48	11317.5	14.977	30.033	19.71	
14s14h14a	Mr,Cs	34	7.24	11414	14.984	30.033	19.72	6.16	11360	15.012	29.95	19.8	
14s14h14a	Mr,Cs	35	7.25	11521	14.987	30.067	19.87	5.98	11464.5	15.016	30.05	19.94	
28s14h14a	Mr	30	6.97	11411	14.99	30	19.77	5.87	11326.5	14.999	30.017	19.79	
28s14h14a	Mr	31	7.1	11459	15.015	30.117	19.68	5.98	11389.5	15.015	30.067	19.8	
28s14h14a	Mr	32	7.42	11458	15.015	30.067	19.65	5.51	11408	15.015	30.083	19.91	
28a14h14a	Mr,Cs	39	7.48	11429	15	30	19.68	6.74	11403	15.02	30.05	19.68	





Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado-Galindo" San Fandila, Pedro Escobedo C.P. 76703 Querétaro, México Tel: +52 442 216 97 77 ext. 2610

publicaciones@imt.mx

http://www.imt.mx/