



Efecto del contenido de solventes en la respuesta mecánica y la compactabilidad de mezclas asfálticas elaboradas con crudo pesado de pavimentación de Castilla

 Alex E. Alvarez-Lugo¹,  Evelyn Ovalles-Gómez² y  Oscar Reyes-Ortiz³

Recepción: 11-05-2020 | Aceptación: 22-07-2020 | En línea: 11-11-2020

MSC:62P30

doi:10.17230/ingciencia.16.32.3

Resumen

Los crudos pesados de pavimentación (CPPs) son asfaltos líquidos naturales compuestos por un alto contenido de cemento asfáltico y una porción de solventes. Estos materiales han sido empleados en Colombia desde los años 90s para mejorar vías de bajo volumen de tránsito. La existencia de solventes en los CPPs permite que éstos sean mezclados con los agregados en frío. Posteriormente, para garantizar su adecuado desempeño, estas mezclas asfálticas requieren de curado (i.e., proceso de pérdida parcial de solventes de los CPPs), previo a su compactación. No obstante, a la fecha no existe consenso sobre la pérdida de solventes a especificar en el proceso de curado de mezclas fabricadas con CPPs. Dada esta situación, el presente estudio evalúa el efecto del contenido parcial

¹ Universidad Industrial de Santander, alex.alvarez@uis.edu.co, Bucaramanga, Colombia.

² Universidad del Magdalena, eveovallesg@gmail.com, Santa Marta, Colombia.

³ Universidad Militar Nueva Granada, oscar.reyes@unimilitar.edu.co, Bogotá D.C., Colombia.

de solventes sobre la respuesta mecánica y la compactabilidad de mezclas asfálticas elaboradas con el CPP del campo de Castilla (CA); material de amplio uso en el oriente colombiano. El estudio incluyó la ejecución y análisis de ensayos de caracterización convencional de los materiales constitutivos de la mezcla, ensayos de energía superficial libre de másticos y agregado, diseño de mezclas, y caracterización de la respuesta mecánica y compactabilidad de mezclas asfálticas fabricadas con el CA y un asfalto de control. Los resultados permitieron identificar y cuantificar mejoras progresivas en la calidad de la adhesión de las interfases mástico-agregado y en la respuesta mecánica de la mezcla asfáltica en función de la reducción del contenido de solventes. Estos resultados sugieren la conveniencia de compactar las mezclas asfálticas fabricadas con el CA después de permitir la pérdida del 50 % de solventes extraíbles del CA vía destilación atmosférica a 360°C.

Palabras clave: Crudo pesado; mezclas asfálticas; solventes; energía superficial libre; vías de bajo volumen de tránsito.

Effect of the Solvents Content on the Mechanical Response and Compactability of Asphalt Mixtures Fabricated Using Castilla's Paving-Heavy Crude Oils

Abstract

The paving-heavy crude oils (PHCO) are natural cut-back asphalts composed by a high content of asphalt cement and a portion of solvents. These materials have been used in Colombia since the 90's to improve low volume traffic roads. The existence of solvents in the PHCO allows mixing it with the aggregates in cold conditions. Then, before compaction, these asphalt mixtures require a curing process (i.e., process of partial loss of solvents from the PHCO) to ensure its proper performance. However, at present there is no consensus on the loss of solvents to specify for the curing process of mixtures fabricated with PHCO. Given this situation, this study assesses the effect of the partial content of solvents on both the mechanical response and compactability of asphalt mixtures produced using PHCO from the Castilla's oil field (CA); a material extensively used in the East region of Colombia. The study included conducting and analyzing conventional characterization tests of the mixture constituent materials, surface free energy testing on both mastics and the aggregate, mix design, and characterization of both mechanical response and compactability of the mixtures fabricated using the CA and a control asphalt. Corresponding results led to identify and quantify a progressive improvement in both the adhesion quality of the mastic-aggregate interfaces and the mechanical response of the asphalt

mixture as a function of the reduction of the solvents. These results suggest the convenience of compacting the asphalt mixtures fabricated using the CA after allowing a loss of 50% of the solvents obtained from the CA via atmospheric distillation at 360°C.

Keywords: Heavy crude oil; asphalt mixtures; solvents; surface free energy; low-volume traffic roads.

1 Introducción

Colombia posee una extensa red de vías de bajo volumen de tránsito (VBVT), de cerca de 143.000 km; sin embargo, se calcula que el 94 % de la misma se encuentra “sin pavimentar” [1]. En consecuencia, el crecimiento económico de las zonas rurales del país se ha visto afectado: sin vías regionales en buen estado no es posible la adecuada movilización de la población, la articulación de los centros de producción agropecuaria con otros de mayor escala, y la presencia de los servicios del Estado (e.g., servicios públicos, seguridad, y educación) [2].

La escogencia de una técnica particular para la intervención de las VBVT puede ser un proceso complejo dadas las múltiples soluciones existentes [3]. Es recomendable seleccionar tecnologías que respondan a las realidades de las zonas a intervenir; ésto implica, entre otras acciones, considerar el uso de materiales locales [4]. En este sentido, Colombia cuenta con diversos campos petroleros que producen crudos pesados de pavimentación (CPPs). Los CPPs se pueden definir como asfaltos líquidos naturales con alto contenido de cemento asfáltico y limitado contenido de solventes (e.g., nafta y kerosene). Peña [5] asemeja los CPPs con los asfaltos líquidos; mientras los primeros se encuentran fluidificados por naturaleza, los segundos requieren de la adición de un fluidificante (e.g., keroseno) para su manejo.

Es posible identificar por lo menos dos aproximaciones en relación con el uso de los CPPs en actividades de pavimentación. La primera de éstas, se centró en la producción de cemento asfáltico—resultante de la doble destilación, atmosférica y al vacío, del CPP [6],[7]—para aplicaciones de pavimentación. El proceso de doble destilación es esquematizado en la Figura 1; se aprecia que luego de someter a destilación atmosférica un CPP (i.e., 0 % de solventes perdidos), éste perderá un X % de solventes,

transformándose así en un asfalto residual (AR). Si este AR es sometido a destilación al vacío, se perderá un porcentaje adicional de solventes y el producto resultante será un cemento asfáltico. Por ejemplo, la producción de cemento asfáltico derivado del CPP del campo de Castilla (CA) se consideró de interés en el pasado, dado que estudios previos [6],[7] concluyeron que era viable obtener un cemento asfáltico de penetración $60 - 70^{1/10}$ mm.

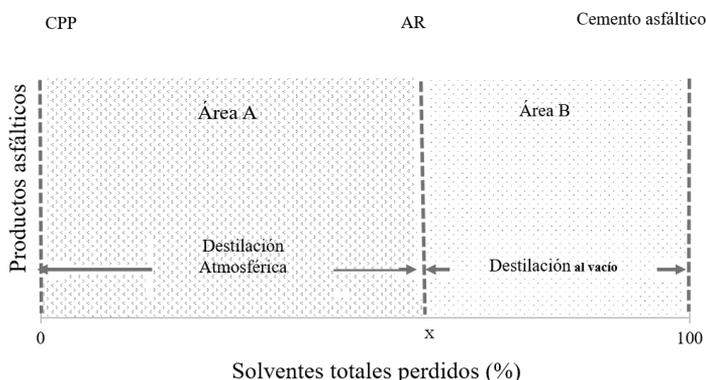


Figura 1: Solventes totales perdidos y productos asfálticos generados.

La segunda aproximación se ha centrado en la fabricación de mezclas asfálticas para VBVT, empleando como ligantes los CPPs; más específicamente, integrando en la mezcla asfáltica los productos asfálticos ubicados en el área A de la Figura 1 [5],[8],[9]. Sin embargo, el uso de CPPs en la producción de mezclas asfálticas es aún considerado como una técnica de tipo experimental; es decir, una técnica con limitadas referencias documentales y que no ha sido usada de forma masiva [3]. No obstante, el alto contenido de cemento asfáltico en los CPPs y la presencia natural de solventes en estos materiales, que permite su mezcla en frío con el agregado y la compactación de la mezcla asfáltica conformada (después del curado de la mezcla; i.e., proceso de pérdida parcial de solventes del crudo) han motivado el uso de CPPs para la producción de mezclas asfálticas.

De hecho, los CPPs han sido utilizados en Colombia desde los años 90s en aplicaciones de pavimentación [10],[11], siendo el CA uno de los más

estudiados y empleados en la construcción vial [5]; así mismo, estudios previos [5],[7],[8],[12], [13] incluyeron la caracterización de CPPs procedentes de los campos Carbonera, Gavan, Cedral, Rubiales, La Gloria, y San Fernando. En relación con el CA, empleado en este estudio, su contenido de solventes alcanza el 17 %, mientras que el 83 % restante corresponde a cemento asfáltico. El AR del CA contiene un 23,4 % de asfáltenos y un 76,6 % de máltenos [14]. Adicionalmente, para el CA se ha reportado [14] un peso específico de 0,978 y una densidad de 13.5° API; este CPP posee una alta viscosidad a temperatura ambiente, y en su condición original (i.e., sin pérdida de solventes) alcanza a los 61°C y 91°C, respectivamente, su punto de inflamación y combustión.

En relación con el diseño de mezclas asfálticas de pavimentación con CPPs, estudio previos [5],[9] han documentado la viabilidad de aplicar el “Método Marshall para el diseño de mezclas en frío utilizando asfaltos líquidos”, definido en el Manual de Mezclas en Frío del Instituto del Asfalto [15]. Esta metodología de diseño especifica una pérdida de solventes del 50 %, durante el proceso de curado de la mezcla asfáltica, previo a su compactación. En consonancia con este criterio, para el diseño y producción de mezclas asfálticas con CPPs, en campo y laboratorio, se ha adoptado comúnmente el mismo criterio de pérdida de solventes durante el curado (i.e., referido a los solventes extraíbles por destilación atmosférica a 360°C) [5],[9],[12] o una pérdida de solventes entre 25 y 50 % [11]. Con una pérdida de solventes del 50 % en los CPPs, ha sido posible la fabricación de mezclas asfálticas que cumplen los criterios de diseño [5],[9],[12] del Manual de Mezclas en Frío del Instituto del Asfalto [15]. De forma similar, en las aplicaciones de estabilización de bases granulares con CA se ha especificado una pérdida de solventes del 50 % previo a su compactación [16],[17].

No obstante, en la revisión de literatura llevada a cabo no se identificó la existencia de reportes sobre el efecto que tendría una pérdida de solventes menor al 50 % en la compactabilidad, la respuesta mecánica, y el desempeño de las mezclas asfálticas fabricadas con CPPs. La ausencia de criterios técnicos detallados se refleja en que, actualmente en campo algunas mezclas son compactadas sin permitir pérdida de solventes después de mezclar crudo y agregados, mientras que otras son compactadas una vez se pierde el 50 % de solventes extraíbles por destilación atmosférica a 360°C [5]. Lo anterior implica diferencias importantes en tiempos y costos de construcción, y en

tiempo para la puesta en servicio de la vía; adicionalmente, es de esperar que conlleve a diferencias en la composición del material asfáltico (Figura 1) con efectos sobre la adhesión del ligante con el agregado, y la respuesta mecánica y la durabilidad de las mezclas asfálticas. Dada esta disyuntiva, que genera dificultades en el control de construcción de mezclas asfálticas fabricadas con el CA, se requiere investigación adicional para generar criterios y recomendaciones técnicas al respecto.

2 Objetivo y metodología

El objetivo del presente estudio es cuantificar el efecto del contenido de solventes sobre la respuesta mecánica y la compactabilidad de mezclas asfálticas en frío elaboradas con el CA. Para lograr el objetivo de la investigación, se implementó la siguiente metodología:

- Cuantificación del contenido de solventes del CA, extraíbles mediante destilación atmosférica a 360°C.
- Ejecución de ensayos de caracterización convencional de los productos asfálticos (i.e., asfalto de control, CA en estado original, y CA con proporciones diferentes de pérdida de solventes), el llenante mineral, y el agregado empleado para fabricar las mezclas asfálticas evaluadas.
- Realización de ensayos de laboratorio para cuantificar las componentes de energía superficial libre (ESL) de productos asfálticos, másticos (i.e., mezcla de producto asfáltico y llenante mineral), y agregados.
- Cálculo de parámetros de energía—derivados de las componentes de ESL de productos asfálticos, másticos, y agregados—, tanto para las interfases agregado-producto asfáltico como agregado-mástico, con el objetivo de cuantificar la calidad de adhesión de estas interfases.
- Diseño de mezclas asfálticas empleando un asfalto de control y el CA, y posterior ejecución de ensayos de caracterización mecánica y de compactabilidad de mezclas asfálticas.

3 Materiales y métodos

3.1 Productos asfálticos, llenante mineral, y agregado

En la Tabla 1 se presentan los materiales asfálticos utilizados en el presente estudio, entre los que se incluye un asfalto de control (CR) (asfalto de penetración 60–70¹/₁₀ mm, producido en la refinería de Barrancabermeja) y el CA en cuatro condiciones diferentes de contenido de solventes. Este contenido corresponde a la proporción de solventes perdidos con respecto al contenido total de solventes extraído vía destilación atmosférica a 360°C; este último contenido—cuantificado para el CA según el método de ensayo INV-E 723-13 [18]—correspondió a 12,7 % por masa total del CA. En el presente documento, en todos los casos, la pérdida de solventes está referida al contenido de solventes antes indicado.

Tabla 1: Productos asfálticos evaluados.

Material asfáltico	Código
Asfalto de control	CR
CPP de Castilla, estado original, pérdida de solventes 0 %	CA 0 %
CPP de Castilla con pérdida de solventes del 25 %	CA 25 %
CPP de Castilla con pérdida de solventes del 50 %	CA 50 %
CPP de Castilla con pérdida de solventes del 100 %	CA 100 %

La caracterización de los productos asfálticos mencionados, incluyó la ejecución de ensayos de gravedad específica (INV-E 707-13), punto de ablandamiento (INV-E 712-13), ductilidad (INV-E 702-13), penetración (INV-E 706-13), índice de penetración (INV-E 724-13), viscosidad rotacional (INV-E 717-13)[18], y ESL. En la siguiente sección se discuten las definiciones y procedimientos empleados para la determinación de las componentes de ESL y de los parámetros de energía asociados.

La evaluación de calidad de adhesión incluyó los agregados indicados en la Tabla 2. Los másticos se fabricaron empleando los cinco materiales asfálticos (Tabla 1) y llenante mineral (i.e., material pasa tamiz No. 200) producto de la trituración del agregado CIE. Este llenante mineral se dosificó en las proporciones necesarias para obtener concentraciones volumétricas (VC) de 0.13, 0.23, y 0.31. Las VC fueron calculadas

empleando la Ecuación (1), en función de los volúmenes de llenante mineral, V_f , y material asfáltico, V_A . La producción de los másticos requirió la mezcla de materiales a la temperatura necesaria para alcanzar una viscosidad del ligante asfáltico de 170 cP y mezclado mecánico a 1000 rpm, por 15 minutos, sobre placa calentadora para garantizar temperatura constante.

Tabla 2: Agregados evaluados.

Material: código	Descripción geológica básica
Agregado 1: BCM	Grava, con predominio de arenisca y lodolita
Agregado 2: RIO	Grava, con predominio de anfíbolita
Agregado 3: RUT	Cuarzo-latita, latita y toba
Agregado 4: RIS	Grava, con predominio de basalto
Agregado 5: VILLA	Grava, con predominio de limolita, arenisca y basalto
Agregado 6: CIE	Caliza, con intrusiones de mármol y granodiorita

$$VC = \frac{V_f}{V_f + V_A} \quad (1)$$

3.2 Energía superficial libre (ESL)

Para un material dado, y bajo condiciones de vacío, la ESL se define como la energía requerida para generar una nueva unidad de superficie en dicho material. La teoría de Good-Van Oss-Chaudhury [19] identifica tres componentes que constituyen la ESL de cualquier material: monopolar ácida, Γ^+ , monopolar básica, Γ^- (estos dos términos determinan la componente polar Γ^{AB}), y la componente no polar, Γ^{LW} . A partir de las componentes de ESL de dos materiales es posible calcular diferentes parámetros de energía para evaluar la calidad de su adhesión.

En el presente estudio, las componentes de ESL fueron calculadas de conformidad con la teoría de Good-Van Oss-Chaudhury, mediante: (i) el método de placa Wilhelmy [20]—para los productos asfálticos y másticos—, y (ii) el equipo de adsorción universal—para los agregados—, de acuerdo con el método de ensayo validado por Bhasin y Little [21]. Los

parámetros de energía calculados, derivados a partir de las componentes de ESL, incluyeron: (i) trabajo de adhesión en seco, W_{AS}^{seco} , (ii) trabajo de adhesión en húmedo, $W_{WAS}^{húmedo}$, (iii) índice ER_1 [22], y (iv) índice EP_2 [23]. En la sección de análisis y resultados se discute el significado físico de estos parámetros de energía y su correlación con el desempeño de mezclas asfálticas, a continuación se presentan las ecuaciones para el cálculo correspondiente.

$$W_{AS}^{seco} = 2\sqrt{\Gamma_A^{LW}\Gamma_S^{LW}} + 2\sqrt{\Gamma_A^+\Gamma_S^-} + 2\sqrt{\Gamma_A^-\Gamma_S^+}, \quad (J/m^2) \quad (2)$$

$$W_{WAS}^{húmedo} = \gamma_{WA} + \gamma_{WS} - \gamma_{AS}, \quad (J/m^2) \quad (3)$$

$$ER_1 = \left| \frac{W_{AS}^{seco}}{W_{WAS}^{húmedo}} \right| \quad (4)$$

$$EP_2 = \left| \frac{W_{AS}^{seco}}{W_{AS}^{seco} - W_{WAS}^{húmedo}} \right| \quad (5)$$

La energía interfacial, γ_{ij} , (J/m^2), utilizada en el cálculo del trabajo de adhesión en húmedo—Ecuación (3)—se cuantificó mediante la Ecuación (6), a partir de las componentes de ESL del producto asfáltico, el agregado, y el agua.

$$\gamma_{ij} = \Gamma_i + \Gamma_j - 2\sqrt{\Gamma_i^{LW}\Gamma_j^{LW}} - 2\sqrt{\Gamma_i^+\Gamma_j^-} - 2\sqrt{\Gamma_i^-\Gamma_j^+} \quad (6)$$

3.3 Mezclas asfálticas: diseño, producción, y ensayos de caracterización mecánica y de compactabilidad

El diseño de la mezcla asfáltica con el CR (i.e., mezcla de control) siguió la normativa INV E 748-13 [18], que se basa en el método de diseño Marshall para mezclas en caliente, y las especificaciones INVIAS-Artículo 450 [18], para mezclas de granulometría continua con un nivel de tránsito 1 (i.e., tránsito bajo). La granulometría empleada corresponde a la curva media del huso granulométrico especificado para mezclas tipo MDC-19.

De otra parte, de conformidad con recomendaciones previas [5], para el diseño de la mezcla asfáltica con el CA se aplicó el “Método Marshall para el diseño de mezclas en frío utilizando asfaltos líquidos”, definido en el Manual de Mezclas en Frío del Instituto del Asfalto [15]. Adicionalmente, para efectos de este diseño se trabajó el crudo con una pérdida de solventes del 50 % (i.e., usando como ligante el CA 50 %). Con el propósito de cuantificar y comparar, a nivel de laboratorio, el efecto de producir mezclas con el CA tras permitir una pérdida de solventes menor a la convencionalmente especificada (i.e., 50 %), el presente estudio evaluó la respuesta mecánica y la compactabilidad de mezclas fabricadas tras una pérdida de solventes de 0 %, 25 %, y 50 %. Las mezclas fabricadas bajo estas condiciones se identifican en la Tabla 3 como CA 0 %, CA 25 %, y CA 50 %, respectivamente, mientras que las mezclas fabricadas con el CR siguen este mismo acrónimo. Todas las mezclas asfálticas evaluadas fueron producidas empleando el agregado CIE, incluyendo llenante mineral producto de la trituración de este agregado y en todos los casos se monitoreó la pérdida de masa de la mezcla en horno para controlar la pérdida de solventes.

Tabla 3: Mezclas asfálticas evaluadas.

Mezclas Asfálticas	Ensayo de caracterización mecánica			
	Estabilidad y Flujo Marshall	Estabilidad Marshall retenida	Resistencia a tracción indirecta	Resistencia retenida a tracción
CR	✓		✓	✓
CA 0 %	✓	✓	✓	✓
CA 25 %	✓	✓	✓	✓
CA 50 %	✓	✓	✓	✓

El análisis de mezclas asfálticas con CA 100 % se excluyó, dado que: (i) estudios previos demuestran que, en horno y bajo condiciones controladas de laboratorio, la pérdida del 100 % de los solventes implica largos periodo de tiempo [24] por lo que no se prevé que estas condiciones se puedan alcanzar en campo—con tiempos y costos de construcción viables—previa compactación de las mezclas, y (ii) la presencia de solventes a este nivel podría limitar la compactabilidad de la mezcla asfáltica.

Las probetas requeridas para los diseños de mezcla, así como aquellas

empleadas para completar la caracterización subsecuente sobre mezclas asfálticas, fueron compactadas según el método de ensayo Tex-241-F [25], en moldes de 101.6 mm de diámetro, a 63.5 ± 2.5 mm de altura, empleando el compactador giratorio Superpave (i.e., 75 giros, ángulo de giro $1,16^\circ$, y esfuerzo vertical 600 kPa).

En la Tabla 3 también se presentan los ensayos de caracterización mecánica realizados sobre las mezclas asfálticas evaluadas. El ensayo de estabilidad y flujo Marshall fue ejecutado siguiendo la norma de ensayo INV E 748-13 [18]. Para las mezclas fabricadas con productos asfálticos derivados del CA se calculó la estabilidad Marshall retenida (EMR), aplicando los lineamientos del Instituto del Asfalto [15]; la EMR se define como la relación de la estabilidad Marshall de probetas acondicionadas en agua—a 25°C por cuatro días—y la estabilidad Marshall de probetas evaluadas en “seco” (i.e., sin acondicionamiento). De igual forma, se ejecutó el ensayo de resistencia a tracción indirecta (RTI) sobre probetas en estado “seco” (i.e., sin acondicionamiento) y acondicionadas en agua (o húmedo)—a 60° durante 24 h—. Estos ensayos se realizaron aplicando la norma de ensayo INV E 725-13 [18]. Adicionalmente, con los resultados de RTI se calculó la resistencia retenida a tracción (RRT), definida como la relación de RTI de probetas acondicionadas en agua y RTI de probetas en estado “seco”.

Por último, se evaluó la compactabilidad de las mezclas asfálticas cuantificando el índice de Compactabilidad (IC). Este índice se define como el valor absoluto de la pendiente de compactación [26], obtenido de la curva de contenido de vacíos con aire versus el número de giros del compactador giratorio Superpave (i.e., energía necesaria para reducir estos vacíos).

4 Resultados y análisis

A continuación, se presentan los resultados de la caracterización convencional de los productos asfálticos y másticos, el análisis de los parámetros de energía calculados, y la evaluación de respuesta mecánica y compactabilidad de las mezclas asfálticas estudiadas.

4.1 Caracterización convencional de ligantes asfálticos

La discriminación del efecto que tiene el contenido de solventes en la consistencia de los materiales asfálticos CA 0%, CA 25%, CA 50%, y CA 100% no fue posible a partir del ensayo de penetración. Lo anterior se debió a que, al evaluar todos los materiales indicados, el penetrómetro utilizado durante la investigación alcanzó su tope máximo (i.e., 450 1/10 mm). Adicionalmente, la ejecución de los ensayos de ductilidad y punto de ablandamiento no fue viable bajo ningún contenido de solventes del CA, pues la baja consistencia de las muestras impidió su montaje en los respectivos equipos de prueba.

De otra parte, los resultados de penetración de los másticos generados con el CA 100% y el CR, se presentan en la Figura 2. La medición de penetración del mástico fabricado con el CA 0% no fue viable, pues ésta fue superior a 450 1/10 mm (tope máximo del penetrómetro). Por su parte, los altos valores de penetración registrados por el CA 100% están asociados a la presencia de los solventes que no pueden ser extraídos por destilación atmosférica a 360°C. De hecho, estudios previos [6], concluyeron que una vez el CA 100% pierde los solventes extraíbles por destilación al vacío, este material puede presentar respuestas cercanas a las de un asfalto de penetración 60-70 1/10 mm (i.e., similar al CR).

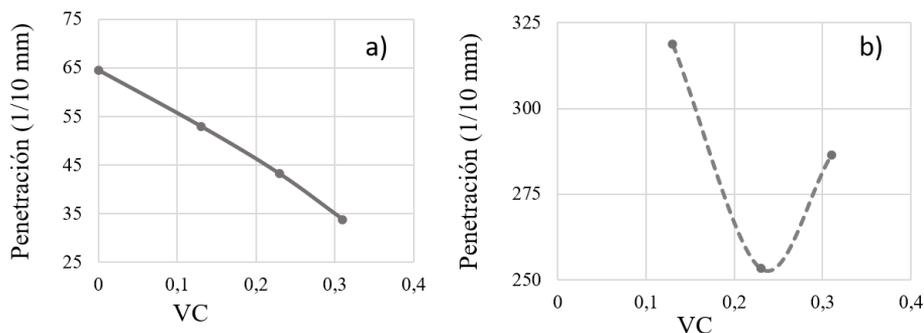


Figura 2: Penetración de másticos elaborados con (a) CR y (b) CA 100%.

La Figura 3 presenta las curvas de viscosidad-temperatura de cada uno de los productos asfálticos evaluados. Como es esperable desde el punto de vista teórico, los resultados obtenidos evidencian que a mayor presencia de

solventes la fluidez de los productos es mayor, lo cual permite disminuir sus temperaturas de manejo. De manera particular el CA 25 % y el CA 50 % reportan comportamientos similares; es posible que esta similitud en fluidez esté asociada a la composición química remanente en el CA 25 % y el CA 50 %, que conlleve a variaciones mínimas de viscosidad para temperaturas comprendidas entre 85 y 95°C. Así mismo, se observan variaciones en las temperaturas de mezclado (i.e., reportadas para un rango de viscosidad entre 150 y 190 cP) y compactación (i.e., rango de viscosidad entre 250 y 310 cP) cercanas a los 20°C por cada 25 puntos porcentuales de solventes perdidos.

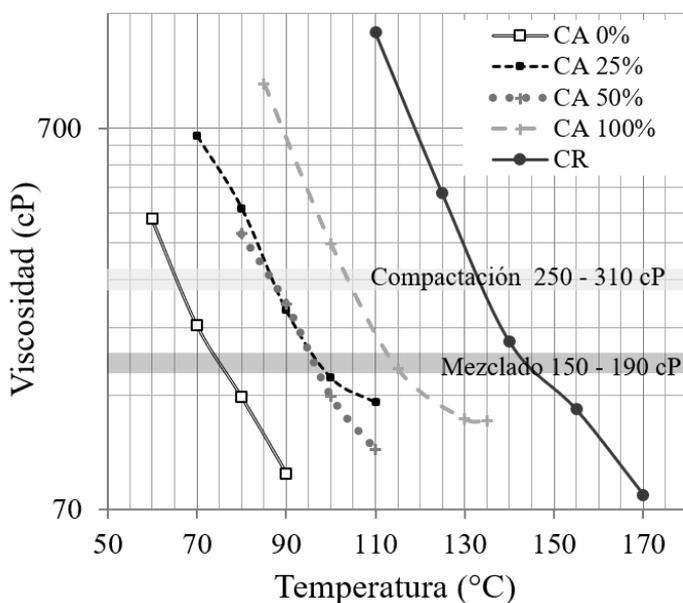


Figura 3: Curvas viscosidad-temperatura.

Partiendo de los datos reportados en la Figura 3, la Tabla 4 presenta las temperaturas de los procesos de mezclado, curado (para llevar a cabo el proceso controlado de pérdida de solventes en horno), y compactación adoptadas para la fabricación de las mezclas asfálticas evaluadas. Al contar con temperaturas de manejo inferiores a las requeridas por el CR, los

productos derivados del CA se pueden manipular de forma más fácil, segura, y económica en laboratorio y en campo.

Tabla 4: Temperaturas de mezclado, curado, y compactación de las mezclas.

Temperaturas (°C)	Mezcla asfáltica			
	CR	CA 0 %	CA 25 %	CA 50 %
Mezclado	145	75	75	75
Curado	155	–	98	98
Compactación	133	66	87	87

4.2 Parámetros de energía derivados de ESL

El trabajo de adhesión en seco es la cantidad de energía que se requiere para que en la interfase de un sistema—asfalto-agregado o mástico-agregado—se propague una grieta, creando así dos nuevas superficies de área unitaria [27]. De esta manera, altos valores de trabajo de adhesión en seco indican un sistema difícil de separar y por lo tanto con alta resistencia a la fractura (i.e., fatiga). Por su parte, el trabajo de adhesión en húmedo está asociado a la susceptibilidad de las interfases al daño por humedad. Valores negativos del trabajo de adhesión en húmedo indican que, en presencia del agua, el asfalto—o el mástico—será desprendido del agregado sin necesidad de adicionar energía al sistema. Así, menores valores absolutos del trabajo de adhesión en húmedo, indican una menor susceptibilidad al daño por humedad.

La Figura 4 presenta los valores de trabajo de adhesión en seco y húmedo alcanzados por cada uno de los productos asfálticos evaluados (i.e., $VC = 0$) y sus respectivos másticos con el agregado CIE. La baja viscosidad del CA 0% impidió realizar las mediciones de las componentes de ESL a las mismas temperaturas que el resto de los productos asfálticos evaluados (i.e., 25°C), por lo que fue necesario ejecutar los ensayos respectivos a 17°C. Estudios previos [28], demuestran que la ESL, y consecuentemente, el trabajo de adhesión en seco se incrementan linealmente al disminuir la temperatura, por lo que no es posible comparar los resultados del CA 0% y aquellos de los otros productos asfálticos evaluados.

No obstante, los resultados obtenidos para los productos asfálticos restantes sugieren que, a medida que el porcentaje de solventes perdidos aumenta, también lo hace la resistencia a la fractura (i.e., trabajo de adhesión en seco) y la resistencia al daño por humedad. En este sentido, aunque los datos presentados en la Figura 4 sugieren que el CA 100 % alcanza valores de desempeño similares a los obtenidos por el CR, tal como antes se discutió, no se considera viable especificar la pérdida del 100 % de los solventes para elaborar mezclas con el CA en campo.

Adicionalmente, los datos presentados en la Figura 4 permiten observar que para ciertas concentraciones volumétricas específicas de llenante mineral—identificables como VC óptimas—, los valores de trabajo de adhesión en seco son maximizados, mientras los valores de trabajo de adhesión en húmedo (en valor absoluto) son minimizados. Los resultados obtenidos al evaluar los productos asfálticos analizados con los seis agregados incluidos en este estudio (Tabla 2) sugieren que estas VC óptimas varían en función del producto asfáltico, pero para un producto asfáltico combinado con diversos agregados tiende a presentar un valor común; resultados que son coincidentes con los reportados en investigación previa basada en asfaltos de penetración y modificados con polímeros [8].

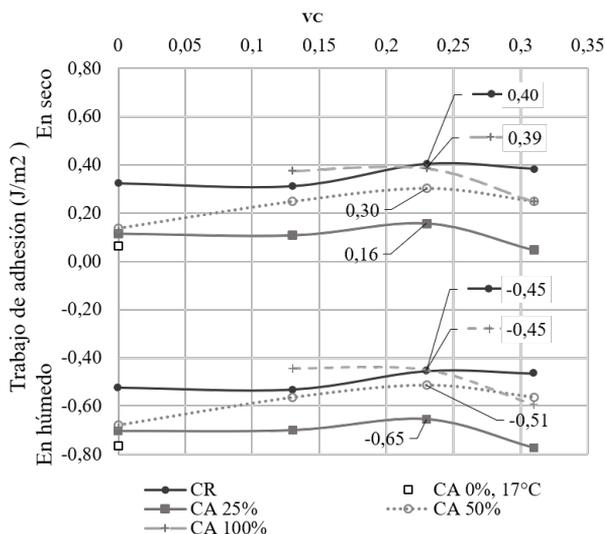


Figura 4: Trabajo de adhesión en húmedo y seco calculados con el agregado CIE.

Con base en lo anterior, la Figura 5 reporta los valores de trabajo de adhesión en seco y húmedo alcanzados por diferentes combinaciones mástico-agregado, indicando los valores de las VC óptimas por producto asfáltico (e.g., 0.22 para el CA 25 %). Las combinaciones mástico-agregado que incluyen CA 50 % reportan, con respecto a las combinaciones con CA 25 %, incrementos en los valores de trabajo de adhesión en seco que varían entre el 79 y 91 %, siendo el mayor porcentaje el reportado por el agregado CIE. Así mismo, en el trabajo de adhesión en húmedo, las cifras—en valor absoluto—de las combinaciones mástico-agregado que incluyen el CA 50 %, disminuyen entre el 21 y el 29 %, con respecto a las combinaciones que incluyen CA 25 %, siendo CIE el agregado que aporta el menor porcentaje reportado (i.e., 21 %). Por lo tanto, tal como se observa en la Figura 5, aunque las combinaciones que incluyen el agregado CIE presentan una alta resistencia a la fractura, a su vez son las combinaciones más susceptibles al daño por humedad, incluso si se utiliza el CR. Estos resultados, más allá de indicar la conveniencia de uso de un material sobre otro, señalan la necesidad de evaluar las bondades y limitaciones que poseen diferentes combinaciones de materiales.

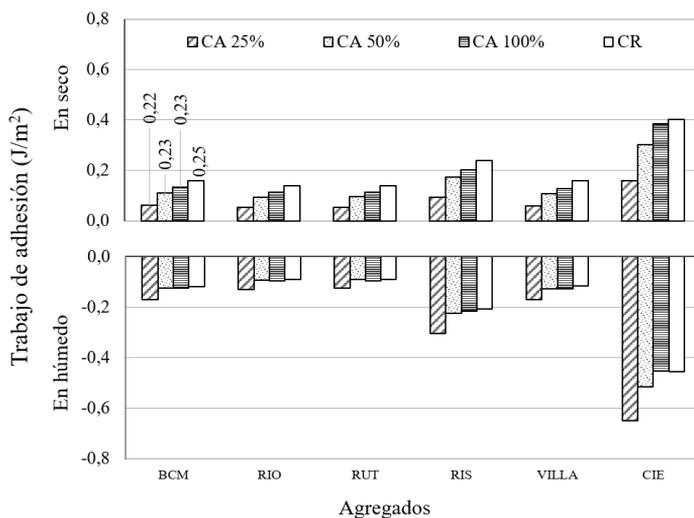


Figura 5: Valores óptimos de trabajo de adhesión en seco y húmedo para el CA con diferentes contenidos de solventes.

Los índices ER_1 y EP_2 (Figura 6) permiten evaluar la susceptibilidad al daño por humedad de las interfaces asfalto-agregado y mástico-agregado. El índice ER_1 fue propuesto por Bhasin [22] para identificar la resistencia al daño por humedad de mezclas asfálticas en caliente, clasificándolas en tres categorías: mezclas con baja, media, y alta resistencia al daño por humedad; cada categoría está relacionada con los rangos de valores del índice presentados en la Figura 6.

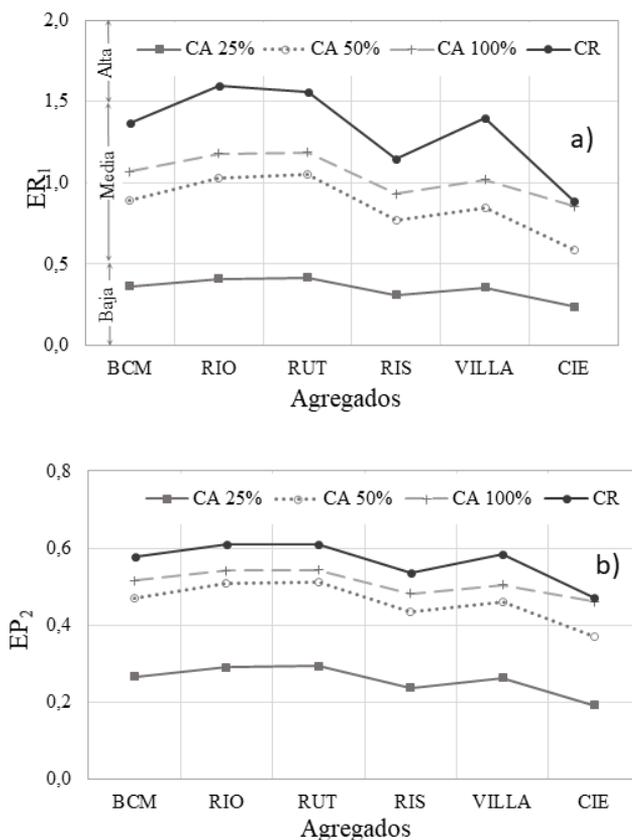


Figura 6: Valores del índice (a) ER_1 y (b) EP_2 .

Así, el CR, por ejemplo, presenta alta y media resistencia al daño por humedad, cuando se combina con los agregados RIO y RIS, respectivamente. Por su parte, altos valores del índice EP_2 señalan

interfases mástico-agregado poco susceptibles al daño por humedad en su microestructura. La evaluación conjunta de los índices ER_1 y EP_2 indica que la susceptibilidad al daño por humedad disminuye en la medida en que se incrementa el porcentaje de solventes perdidos. Por ejemplo, las combinaciones mástico-agregado que incluyen CA 50 % reportan, con respecto a las combinaciones que incorporan el CA 25 %, incrementos que varían entre el 138 y 153 %, para el índice ER_1 , y el 74 y 92 %, para el índice EP_2 . No obstante, dado que los índices ER_1 y EP_2 no fueron propuestos originalmente para evaluar mezclas elaboradas con CPPs, se recomienda desarrollar investigación futura que permita caracterizar con mayor confiabilidad la resistencia al daño por humedad de este tipo de productos basada en estos parámetros de energía.

4.3 Evaluación de la respuesta mecánica y compactabilidad de la mezcla asfáltica

El contenido óptimo de ligante asfáltico obtenido a partir de los diseños de mezcla realizados con el CR y el CA corresponde, respectivamente, a 5.3 y 5.9 %. Empleando estos contenidos de ligante asfáltico se fabricaron las probetas necesarias para evaluar aspectos de respuesta mecánica y de compactabilidad. La estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica se relaciona con la capacidad de mantener su forma bajo cargas repetidas del tránsito, evitando el desarrollo de ahuellamientos y ondulaciones. Los resultados obtenidos indican que la estabilidad Marshall se incrementa a medida que se pierden solventes. De hecho, los mayores valores de estabilidad Marshall fueron los alcanzados por la mezcla CA 50 %. En las pruebas en seco, la mezcla CA 50 % superó en un 16 % y 2 % los valores de estabilidad reportados para las mezclas CA 0 % y CA 25 %, respectivamente; mientras que, para las pruebas en húmedo, el incremento ascendió a un 60 %, con respecto a la mezcla CA 0 % y 47 % en relación con la mezcla CA 25 %. Sin embargo, es necesario indicar que todas las mezclas evaluadas cumplieron con las especificaciones adoptadas para la estabilidad y el flujo Marshall (i.e., lineamientos del Manual de Mezclas en Frío del Instituto del Asfalto [15]), presentados en la Tabla 5.

Tabla 5: Parámetros de diseño de mezclas en frío.

Parámetro	Especificación
Estabilidad a 25°C (N)	Mínimo 5000
Flujo (mm)	Entre 2 y 4
Estabilidad Marshall retenida (%)	Mínimo 75
Contenido de vacíos (%)	Entre 3 y 5
Vacíos en el agregado mineral (%)	Mínimo 15, para agregado con tamaño máximo nominal 19 mm

Fuente: Elaboración propia con base en los criterios del Instituto del Asfalto [15].

La Figura 7 presenta los valores de EMR y el contenido de vacíos promedio de las respectivas probetas ensayadas. La EMR es un indicador de la resistencia al daño por humedad de la mezcla asfáltica; según este parámetro, mayores valores de EMR se asocian con mayor resistencia al daño por humedad en la mezcla asfáltica.

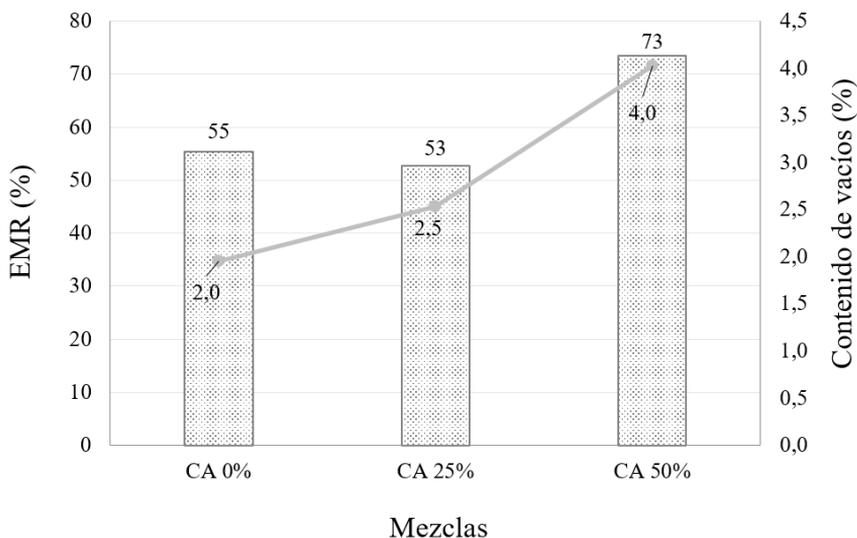


Figura 7: Estabilidad Marshall retenida y contenido de vacíos.

Los resultados obtenidos sugieren que la resistencia al daño por humedad aumenta con la pérdida de solventes en el CA. Aunque la mezcla CA 50% registra la mejor EMR de todas las mezclas evaluadas,

el valor reportado se encuentra dos puntos porcentuales por debajo del valor especificado (Tabla 5). Este resultado es atribuible tanto a las características del CA, como a las del llenante mineral y el agregado empleados (CIE). Teniendo en cuenta que los parámetros de energía sugieren que la combinación del agregado CIE y el CA presenta la mayor susceptibilidad al daño por humedad, entre las combinaciones de materiales evaluados, es esperable identificar otras combinaciones de materiales que conlleven a EMR admisibles en mezclas asfálticas fabricadas con el CA. Por su parte las mezclas CA 0 % y CA 25 % presentan, respectivamente, valores comparables de EMR, que resultan ser 33 y 37 % inferiores a los reportados para la mezcla CA 50 %.

El contenido de vacíos se encuentra relacionado con la durabilidad de la mezcla: un contenido de vacíos inferior al mínimo especificado puede provocar exudación del ligante asfáltico y un valor mayor al máximo especificado conlleva, entre otros, a que la mezcla sea permeable y susceptible al daño por humedad. A partir de los datos presentados en la Figura 7, se observa que el incremento en el porcentaje de solventes perdidos se asocia con mayores contenidos de vacíos; de hecho, en comparación con la mezcla CA 0 %, la mezcla CA 50 % reporta el doble de contenido de vacíos. Sin embargo, teniendo en cuenta los criterios establecidos por el Instituto del Asfalto [15], solo la mezcla CA 50 % se mantuvo dentro del rango de contenido de vacíos especificado.

En la Figura 8 se presentan las curvas fuerza-desplazamiento obtenidas en el ensayo de tracción indirecta. Se aprecia que la pérdida de solventes del 50 % conlleva a que las respectivas mezclas asfálticas desarrollen valores de carga a la falla más altos que las mezclas con pérdida de solventes del 0 %.

La Figura 9 relaciona los resultados de RTI, obtenidos tanto en seco (S) como en húmedo (H), y los valores de resistencia retenida a tensión RRT. La RRT se adoptó como un segundo indicador de resistencia al daño por humedad; de conformidad con lo establecido en las especificaciones INVIAS (Artículo 450) [18] para mezclas asfálticas en caliente, el valor mínimo especificado para la RRT es del 80 %. La pérdida de solventes favorece la obtención de altos valores de RRT y por lo tanto incrementa la resistencia al daño por humedad. De hecho, para la mezcla CA 50 % se reportó un valor de RRT superior al 80 %, superando en 21 y 36 puntos porcentuales los

resultados reportados para las mezclas CA 0 % y CA 25 %, respectivamente. Así mismo, aunque los resultados de RTI de las mezclas elaboradas con el CR presentan la variabilidad más alta (Figura 9), estas mezclas reportaron los mejores resultados tanto de RTI como de RRT.

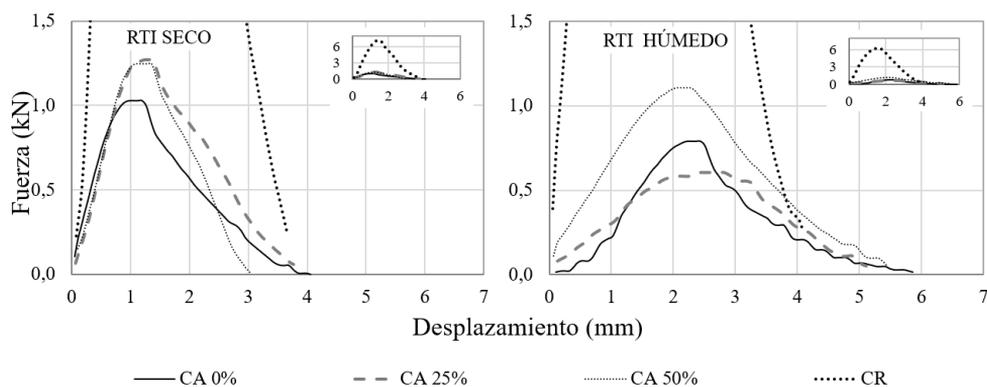


Figura 8: Curvas fuerza-desplazamiento obtenidas en el ensayo de resistencia a tracción indirecta.

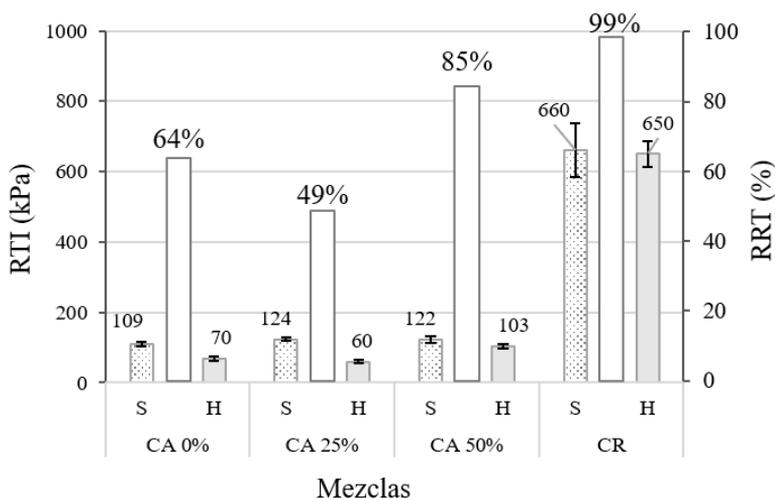


Figura 9: Resultados de RTI y RRT.

Los resultados de la evaluación mecánica presentados anteriormente demuestran que en el diseño y construcción de mezclas con CPPs se debe considerar el contenido de solventes presentes en la mezcla al iniciar el proceso de compactación. No obstante, también es necesario tener en cuenta la proporción de solventes que podrían perderse durante el periodo de servicio de la mezcla, con lo cual es esperable que la respuesta mecánica continúe evolucionando de forma positiva. La cuantificación de la tasa de pérdida de solventes y de la consecuente evolución de la respuesta mecánica de la mezcla aún es objeto de estudio. Lo anterior requerirá de futuras investigaciones, pues, aunque el “Método Marshall para el diseño de mezclas en frío utilizando asfaltos líquidos”, definido en el Manual de Mezclas en Frío del Instituto del Asfalto [15] es aplicable para elaboración de mezclas con CPPs [9], todavía es necesario avanzar en la definición de parámetros propios de evaluación de este tipo de mezclas.

Por último, la Figura 10a presenta las curvas de compactación promedio obtenidas con el fin de evaluar la compactabilidad de las mezclas. El índice de Compactabilidad (IC) promedio, acompañado de los valores de desviación estándar representados en las barras de error, se presenta en la Figura 10b. Un mayor valor del IC implica una mayor eficiencia en el proceso de compactación, es decir, una mayor reducción en el contenido de vacíos por cada giro aplicado por el compactador giratorio. El número de probetas utilizadas para el análisis de compactabilidad correspondió a 7 para la mezcla CA 0%, 8 para las mezclas CA 25%, y CA 50%, y 6 para la mezcla CR.

Al aplicar el método de mínima diferencia significativa (con un nivel de significancia de 0.05) se encontró que el único valor de IC que difiere de manera significativa, es el asociado con la mezcla CA 50%. Lo anterior indica que la compactabilidad de las mezclas fabricadas con productos derivados de CA 0% está relacionada con el contenido de solventes. Una mayor pérdida de solventes se asocia con un valor más alto de viscosidad, dificultando el acomodamiento de los agregados, y aumentando por consiguiente el contenido de vacíos con aire.

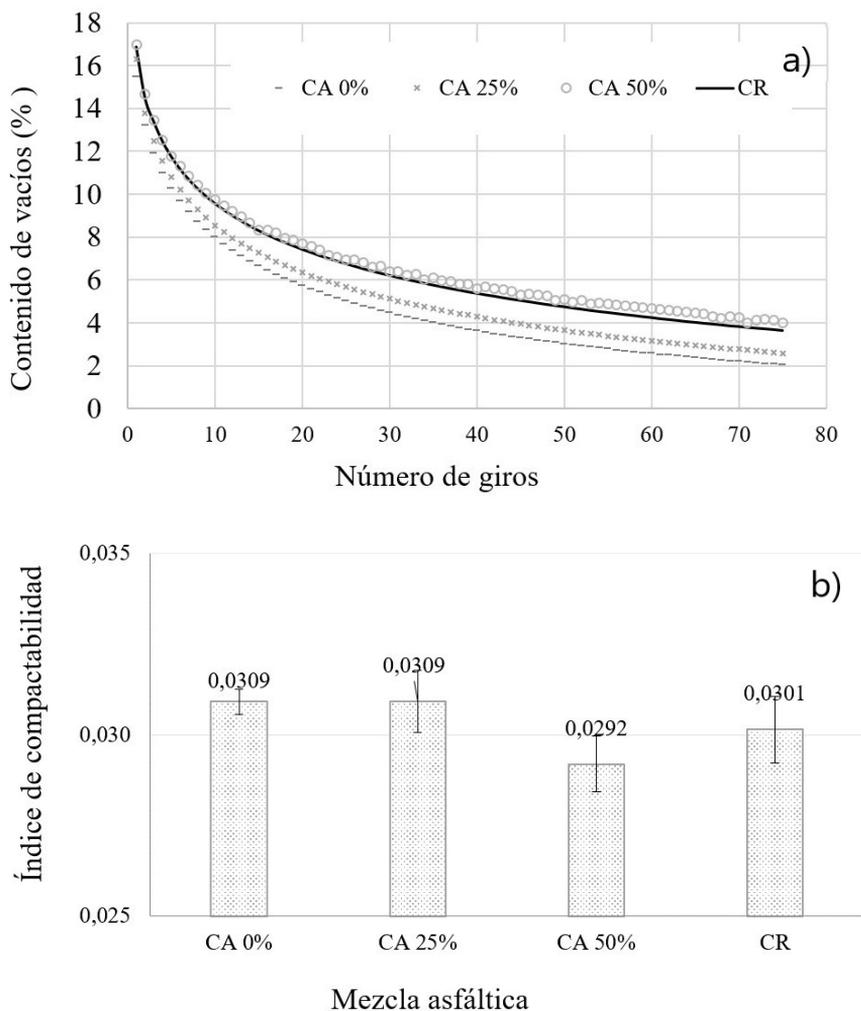


Figura 10: (a) Curvas de compactación obtenidas del compactador giratorio Superpave y (b) valores del índice de compactabilidad.

5 Conclusiones

El presente estudio cuantifica el efecto del contenido parcial de solventes—extraíbles mediante destilación atmosférica a 360°C—sobre la respuesta mecánica y la compactabilidad de mezclas asfálticas elaboradas

con el CPP del campo de Castilla (CA). A partir de los resultados y análisis del estudio, se presentan las siguientes conclusiones:

En primer lugar, la caracterización convencional de los productos asfálticos, la evaluación de calidad de adhesión basada en ESL, y la caracterización de respuesta mecánica y de compactabilidad de las mezclas asfálticas sustentan la conveniencia de compactar las mezclas asfálticas fabricadas con el CA después de permitir la pérdida del 50 % de solventes (i.e., solventes extraíbles por destilación atmosférica a 360°C). En estas condiciones, la mezcla asfáltica evaluada cumplió con los parámetros de diseño adoptados, excepto con la EMR. No obstante, esta respuesta ante daño por humedad es modificable al optar por agregados y llenantes minerales diferentes a los aquí empleados, con lo cual es esperable que otras mezclas diseñadas con el CA cumplan la especificación dada para la EMR.

En segundo lugar, la respuesta mecánica (i.e., estabilidad Marshall y RTI) mejora a medida que la pérdida de solventes se incrementa entre 0 y 50 %. En contraste, y de acuerdo con lo esperado a nivel teórico, un mayor contenido de solventes favorece el proceso de compactación.

En tercer lugar, la mezcla CA 25 % exhibió comportamientos particulares, alcanzando valores de RTI en seco superiores a los de la mezcla CA 50 %. Estos resultados podrían guardar relación con la composición química de los solventes presentes en la mezcla. Por lo anterior, es recomendable adelantar investigación futura para evaluar si una pérdida de solventes en el intervalo, sugerido, de 20 a 30 % podría especificarse (con beneficio sobre los procesos constructivos) como pérdida mínima admisible antes de compactar las mezclas asfálticas fabricadas con CA.

En cuarto lugar, si bien la cuantificación y caracterización de los solventes que una mezcla asfáltica fabricada con el CA puede perder una vez puesta en servicio excede el alcance del presente estudio, se expone la necesidad de realizar investigación futura al respecto, toda vez que se espera que los solventes evaporados post-compactación modifiquen el desempeño de la mezcla.

Por último, el método de diseño de mezcla (i.e., mezclas en frío utilizando asfaltos líquidos) adoptado en el estudio, demostró ser aplicable para la concepción de mezclas asfálticas con el CA. Sin embargo, es

recomendable la definición de especificaciones particulares para este tipo de mezclas. Bajo estas condiciones, la elaboración de mezclas asfálticas con CPPs se presenta como una posibilidad prometedora para el mejoramiento y desarrollo de VBVT en Colombia y en otros países que dispongan de este tipo de recursos asfálticos.

Agradecimientos

Los autores expresan un agradecimiento especial a la Universidad Militar Nueva Granada (proyecto de investigación IMP-ING-2931), al igual que a las Vicerrectorías de Investigación de la Universidad Industrial de Santander y de la Universidad del Magdalena por el apoyo brindado para la financiación del proyecto de investigación. Los autores agradecen además al Ing. Gary Van Leenden, por la ejecución parcial de ensayos de laboratorio en la Universidad del Magdalena. Finalmente, se extiende un agradecimiento a Ecopetrol por el suministro de las muestras de CA.

Referencias

- [1] C. A. Murillo, “Desafíos para el desarrollo de la red terciaria en el posconflicto,” *Revista de Ingeniería*, no. 45, pp. 32–38, 2017. <https://ojsrevistaing.uniandes.edu.co/ojs/index.php/revista/article/view/939> 57
- [2] Departamento Nacional de Planeación, *Documento CONPES 3857, Lineamientos de Política para la Gestión de la Red Terciaria*. Bogotá D.C.: DNP, 2016. 57
- [3] Corporación Andina de Fomento-CAF, *Soluciones e Innovaciones Tecnológicas de Mejoramiento de Vías de Bajo Tránsito*, 2010. <http://scioteca.caf.com/handle/123456789/401> 57, 58
- [4] S. Caro y B. Caicedo, “Tecnologías para Vías Terciarias: Perspectivas y Experiencias desde la Academia,” *Revista de Ingeniería*, no. 45, pp. 12–21, 2017. <https://ojsrevistaing.uniandes.edu.co/ojs/index.php/revista/article/view/936> 57
- [5] J. J. Peña, “Mezclas en Frío, Pavimentación con Crudos Pesados Aplicación del Crudo de Castilla,” 1999. 57, 58, 59, 64

- [6] A. Montejo, D. González y R. Tomás, “Aplicación del Crudo de Castilla (Colombia) en la Pavimentación Asfáltica,” *Revista Técnica de la Asociación Española de la Carretera*, no. 103, pp. 12–28, 1999. 57, 58, 66
- [7] L. Sanabria, G. Garzón, J. Maldonado y L. Carvajal, *Caracterización y Evaluación del Asfalto Producido con los Crudos Castilla y Gaván*. Cartagena de Indias: presentado en: Décimo Primer Simposio Colombiano Sobre Ingeniería de Pavimentos, 1997. 57, 58, 59
- [8] Alvarez Lugo Alex Eduardo, Ovalles Evelyn, Rodríguez Maria Camila, Rodríguez Andrés Felipe, Castillo Pablo Jhon, Rivas Julia Carolina, Reyes Ortíz Oscar y Rincón Morantes Jhon Fredy, “Calidad de Adhesión y Propiedades Reológicas de Asfaltos Residuales, no Modificados y Nano-Modificados, Obtenidos de Crudos Pesados de Pavimentación,” vol. 86, no. 209, pp. 357–366, 2019. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n209.73588> 58, 59, 69
- [9] A.E. Alvarez Lugo, Ovalles Evelyn, Leenden Gary, Martins Angela, Rivas Julia, Castillo Pablo, Rodríguez María, Rodríguez Andrés, Rodríguez Andrea y Reyes, Oscar, “Evaluación de mezclas asfálticas fabricadas con crudo pesado de pavimentación original y nano-modificado.” XX Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto-CILA, Guadalajara, 12 2019. 58, 59, 76
- [10] Peña J., Herrera B. y Navas R., *Evaluación de las Vías Secundarias Estabilizadas con Crudos Pesados*. Cartagena de Indias: presentado en Décimo Primer Simposio Colombiano Sobre Ingeniería de Pavimentos, 1997. 58
- [11] L. Sanabria-Grajales y J. Correa-Avello, “Mejoramiento de Vías Secundarias y Terciarias con Crudos Pesados,” *Asfaltos y Pavimentos*, vol. 14, pp. 13–18, 2006. 58, 59
- [12] Corasfaltos, *Proyecto de Investigación en Crudos Pesados y Asfaltos Naturales para la Construcción de Vías Secundarias y Terciarias, Documento de Transferencia de Tecnología*, Bucaramanga, 2004. <https://hdl.handle.net/11404/6007> 59
- [13] P. Morales, L. Carreño y J. Maldonado, *Caracterización por Análisis SARA y HPLC de la Fracción Maltenos de Crudos con Altos Porcentajes de Asfalto*. Cartagena de Indias: presentado en: Décimo Primer Simposio Colombiano Sobre Ingeniería de Pavimentos, 1997. 59
- [14] H. Rondón y F. Reyes, “Pavimentos, Materiales, Construcción y Diseño,” *Ecoe Ediciones*, pp. 69–78, 2015. 59

- [15] Asphalt Institute, *Asphalt Cold Mix Manual. Manual Series No. 14 (MS-14)*, 1989. 59, 64, 65, 72, 73, 76
- [16] Y. Chaves, N. Hernandez y C. M. Ricaurte, *Estudio Patológico en la Base Estabilizada con Crudo de Castilla del K0+230 al K2+330 de la Vía de Acceso a la Vereda la Argentina del Municipio de Villavicencio-Meta*. Villavicencio: Especialización patología de la construcción, Universidad Santo Tomás, 2018. 59
- [17] S. Mesa, N. H. Peñuela y V. M. Trejos, *Análisis de Lesiones a la Estabilización con Crudo de Castilla de la Vía que Conduce a la Vereda El Caney, en el Departamento del Meta*. Villavicencio: Especialización patología de la construcción, Universidad Santo Tomás, 2018. 59
- [18] INVIAS, *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Normas de Ensayo para Carreteras*, Bogotá D.C, 2013. 61, 63, 65, 74
- [19] C. Van Oss, *Interfacial Forces in Aqueous Media*. New York: Marcel Dekker Inc, 1994. 62
- [20] A. Hefer, A. Bhasin, and D. N. Little, “Bitumen Surface Energy Characterization Using a Contact Angle Approach,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 18, no. 6, pp. 759–767, 2006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:6\(759\)62](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:6(759)62)
- [21] A. Bhasin and D. N. Little, “Characterization of Aggregate Surface Energy Using the Universal Sorption Device,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 19, no. 8, pp. 634–641, 2007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:8\(634\)62](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:8(634)62)
- [22] A. Bhasin, E. Masad, D. Little, and R. Lytton, “Limits on Adhesive Bond Energy for Improved Resistance of Hot Mix Asphalt to Moisture Damage,” *Transportation Research Record*, vol. 1970, no. 1, pp. 2–13, 2006. <https://doi.org/10.1177/03611981061970001016371>
- [23] H. Gholam and N. Fereidoon, “Using Energy Parameters based on the Surface Free Energy Concept to Evaluate the Moisture Susceptibility of Hot Mix Asphalt,” *Road Mat. and Pav. Design*, no. 2, pp. 239–255, 2015. <https://doi.org/10.1080/14680629.2014.99004963>
- [24] A. E. Alvarez, E. Ovalles, M. C. Rodríguez, P. J. Castillo, A. F. Rodríguez y J. C. Rivas, “Comparación de Asfaltos Residuales del Crudo Pesado de Pavimentación de Castilla, Obtenidos Empleando Dos Métodos de Extracción de Solventes,” Medellín, 2018. 64

- [25] Texas Department of Transportation, “TxDoT designation: Tex-241-F: Test Procedure for Compacting Bituminous Specimens using the Superpave Gyratory Compactor (SGC),” Austin, TX, 2015. 65
- [26] E. Masad, E. Kassem, and A. Chowdhury, *Application of Imaging Technology to Improve the Laboratory and Field Compaction of HMA*. Texas Transportation Institute-Texas A&M University, College Station, TX Report No FHWA/TX-09/0-5261-1, 2009. 65
- [27] A. Bhasin, J. Howson, E. Masad, D. N. Little, and R. L. Lytton, “Effect of Modification Processes on Bond Energy of Asphalt Binders,” *in Transportation Research Board 86th Annual Meeting*, vol. 1998, no. 1, pp. 1–14, 2007. <https://doi.org/10.3141/1998-04> 68
- [28] L. Cong, Q. Wang, and L. Cao, “Rutting Resistance Ability related to Asphalt-Aggregate Bonding Based on Surface Energy Analysis,” *Geotechnical Special Publication GSP - ASCE, Pavement Materials, Structures, and Performance*, vol. 239, pp. 189–199, 2014. <https://doi.org/10.1061/9780784413418.020> 68