



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

# EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA CENIZA DE CUESCO DE PALMA EN LA INTERFAZ ASFALTO-AGREGADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS DENSAS EN CALIENTE ELABORADAS CON MATERIAL LATERÍTICO: UN ENFOQUE EN LAS PROPIEDADES TERMODINÁMICAS

Leonel Cotes de la Hoz<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia, lcotes@unimagdalena.edu.co

## Resumen

La energía superficial libre (ESL) de un material se define como el trabajo requerido para crear una nueva unidad de área en el material, bajo condiciones específicas de vacío. La medición de la ESL en la interacción asfalto-agregado se considera una metodología confiable para evaluar la susceptibilidad al daño por humedad en mezclas asfálticas en caliente. Este estudio tiene como objetivo evaluar el efecto de la adición de ceniza de cuesco de palma africana (CCPA) en las interfaces asfalto-agregado, utilizando propiedades termodinámicas (i.e. ESL) y pruebas de resistencia mecánica (i.e. resistencia a la tracción indirecta) en una mezcla asfáltica densa en caliente fabricada con material laterítico. Se investigaron tres porcentajes de CCPA (0%, 50% y 100%) como reemplazo de la proporción de llenante mineral, con diferentes relaciones volumétricas de volumen de filler / volumen de asfalto ( $V_f/V_a$ ) (Con proporciones entre 0.15 y 0.85). Los resultados sugieren que la incorporación de CCPA como reemplazo del llenante mineral en un 50%, con una relación  $V_f/V_a$  de 0.71, potencia la resistencia a la fractura, la susceptibilidad al daño por humedad y la humectabilidad del asfalto. Esto indica que el tipo, origen, mineralogía, proporción y concentración volumétrica del llenante mineral tienen un impacto significativo en la resistencia al daño por humedad, la resistencia a la fractura y la fatiga de los sistemas de mastico-agregado en mezclas asfálticas. Contribuyendo con esto en la sostenibilidad en la fabricación de mezclas asfálticas en caliente y en la construcción de pavimentos flexibles, convirtiéndose así en una alternativa económica y eficiente para la solución de la problemática existente en materia vial.

**Palabras Clave:** Ceniza de cuesco de palma africana; material laterítico, energía superficial libre, susceptibilidad al daño por humedad.

## 1 Introducción

Los problemas en las mezclas asfálticas asociados a la interacción asfalto-agregado, la calidad de la adhesión, la susceptibilidad al daño por humedad y la calidad del recubrimiento del asfalto sobre el agregado, son características de gran importancia que a lo largo del tiempo se han estudiado, pero no de la manera adecuada por no ser tratadas por medio de propiedades fundamentales de los materiales [1].

En las prácticas convencionales (i.e. tamaño de partícula, la presencia de finos nocivos, y propiedades morfológicas), no pueden obtenerse resultados trascendentales que si pueden ser estudiados mediante la energía superficial libre-ESL [2]. Investigaciones recientes han utilizado la energía superficial libre (ESL) para cuantificar las características antes mencionadas. La ESL es una propiedad termodinámica fundamental de los materiales. Esta propiedad está estrechamente



**Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.**

relacionada con la resistencia a la fractura y recuperación de un material y con la capacidad de crear fuertes adhesiones con otros materiales [3].

El daño por humedad se define como la degradación de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas producto de la presencia de agua [4].

En mezclas asfálticas, el mastico tiene gran relevancia en el comportamiento de la mezcla. La adición de la carga mineral aumenta la viscosidad y la resistencia a la tracción del cemento asfáltico, lo que a su vez genera una mejor susceptibilidad térmica de la mezcla asfáltica [5].

La medición de la energía superficial libre en la interacción asfalto-agregado es considerado como una metodología confiable para la evaluación de la susceptibilidad al daño por humedad en mezclas asfáltica en caliente [6].

La susceptibilidad al daño por humedad en mezclas asfálticas es producto de diversos factores. En el 2007, Sengoz y Agar, señalaron los siguientes factores como determinantes como el tipo de agregado, tanto grueso como fino, su composición. Otro factor es el cemento asfáltico utilizado en la fabricación de las mezclas asfálticas y el proceso de refinación del mismo. Propiedades de las mezclas asfálticas como el nivel de vacío de aire y la permeabilidad de la mezcla, que están influenciados por el grado de compactación. El espesor de la película de asfalto también influye en las características de susceptibilidad a la humedad de la HMA, ya que afecta la durabilidad de la mezcla. Las condiciones ambientales y el tráfico afectan la cantidad de desprendimiento que ocurre en una mezcla particular [7].

Uno de los problemas asociados al desarrollo de infraestructura vial en zonas que carecen de materiales aptos para la construcción de carreteras son los elevados costos del transporte de materiales que cumplan con las especificaciones técnicas vigentes en las zonas de desarrollo de los proyectos. Por lo anterior, dentro de las alternativas que buscan dar solución a la problemática planteada, se puede buscar el uso de subproductos residuales como modificadores de las propiedades del material de pavimentación, y también la utilización de materiales granulares no convencionales locales disponibles en la zona de los proyectos.

Respecto al uso e inclusión de subproductos agroindustriales, la industria productora de mezclas asfálticas desde la década de los 70 incursionó en la incorporación de una gran variedad de materiales de desecho o subproductos industriales o agroindustriales en los pavimentos asfálticos [8]. La agroindustria, las industrias metálicas, y la minería son los principales generadores de estos residuos. Se ha investigado la utilización de los residuos agroindustriales en mezclas asfálticas densas en caliente (MDC), lo que ha planteado una serie de interrogantes respecto al efecto que su inclusión pueda tener en el comportamiento mecánico y la durabilidad de las mezclas asfálticas, así como sus beneficios desde en lo económico y ambiental [9].

En cuanto al uso de materiales granulares no convencionales disponibles en las zonas de los proyectos, los suelos lateríticos (o material laterítico) pueden constituir una alternativa factible. La laterita es un material natural altamente meteorizado formado por la concentración de óxidos hidratados de hierro o de aluminio. Estas concentraciones pueden deberse a depósitos residuales, por movimiento o transporte, precipitación y reacciones químicas diferentes [10]. La formación de los principales componentes minerales de laterita, los óxidos hidratados de hierro y aluminio, se limita principalmente a las zonas tropicales y subtropicales húmedas del mundo, incluyendo África, India, Sudeste de Asia, Australia, América Central y América del Sur [11].



## 2 Background

### 2.1 Energía Superficial Libre -ESL

Según Bhasin & Little, la ESL de un material puede definirse como el trabajo que se requiere para crear una nueva unidad de área en un material, bajo ciertas condiciones de vacío [12]. La teoría de Good-Van Oss-Chaudhury [13], basada en el origen de las fuerzas intermoleculares, la ESL puede descomponerse en tres componentes:

- Componente monopolar acídica,  $\Gamma^+$ ;
- Componente monopolar básica,  $\Gamma^-$  (estos dos términos determinan la componente polar  $\Gamma_{AB}$ );
- Componente no polar,  $\Gamma^{LW}$  (también denominada componente Lifshitz-van der Waals).

Basado en lo anterior, se puede calcular la ESL,  $\Gamma$ , de un material (e.g., cemento asfáltico o agregado) de la siguiente manera (ver ecuación 1):

$$\Gamma = \Gamma^{LW} + 2\sqrt{\Gamma^+\Gamma^-} = \Gamma^{LW} + \Gamma^{AB} \quad (1)$$

A partir de las componentes de ESL de dos materiales, cemento asfáltico y agregado, por ejemplo, es posible calcular el trabajo de adhesión ( $W_{AB}^{seco}$ ) entre dichos materiales (ver ecuación 2):

$$W_{AB}^{seco} = 2\sqrt{\Gamma_A^{LW} \Gamma_S^{LW}} + 2\sqrt{\Gamma_A^+ \Gamma_S^-} + 2\sqrt{\Gamma_A^- \Gamma_S^+} \quad (2)$$

En la ecuación 2, se representa la componente de ESL del cemento asfáltico (A) y (S), la del agregado. El trabajo de adhesión se define como la cantidad de energía que se debe suministrar a un sistema para propagar una grieta en su interfase y crear dos nuevas superficies de área unitaria [12].

Altos valores del trabajo de adhesión están asociados con mayor resistencia a la fractura (i.e., mayor cantidad de energía requerida para propagar una grieta en el material). Es importante mencionar que la ecuación 2, permite determinar el trabajo de adhesión en ausencia de agua en la interfase cemento asfáltico-agregado, pero debe ser modificada para incluir los efectos del agua en dicha interfase (i.e., tres materiales).

En la Tabla 1, se presentan los índices para la evaluación de la ESL y la definición de cada uno. Estos índices se basan en los cálculos de trabajo de adherencia en condición seca y húmeda y evalúan el efecto de la filler (carga mineral).

Tabla 1. Índices para la evaluación de la ESL y descripciones

Propiedad	Índices	Descripción
Resistencia a la fractura	Trabajo de adhesión en seco- Wadhesión Seco	El trabajo de adhesión en seco indica la resistencia a la fractura y la fatiga en las interfaces de los sistemas que se evalúan
	Efecto de la adición de carga- A1	El índice A1 cuantifica la proporción de cambio en el trabajo de adherencia, respecto al trabajo de adherencia del sistema de asfalto-agregado limpio, debido a la adición de la carga.



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

Propiedad	Índices	Descripción
Susceptibilidad daño de la humedad	Trabajo de adhesión en húmedo- Wadhesión húmedo	El trabajo de adhesión en seca indica la resistencia a la fractura y la fatiga en las interfaces de los sistemas que se evalúan en presencia de agua
	Susceptibilidad al daño por humedad-A2	Evalúa el efecto de relleno en la susceptibilidad a la humedad del sistema de agregado-asfalto mediante la cuantificación de la tasa de cambio en el trabajo de adhesión, respecto al trabajo de adherencia del sistema de agregado-asfalto limpio, debido a la adición de relleno.
	Índice de relación de energía (ER)	El índice de relación de energía (ER por sus siglas en inglés Energy Ratio), definido como la relación entre el trabajo de adhesión en estado seco y el trabajo de adhesión en estado húmedo
Capacidad de humectación del asfalto sobre el agregado	Coefficiente de extensión-SC	El coeficiente de extensión es una medida de la humectabilidad de un líquido (asfalto caliente) sobre un sólido (agregado).

Fuente: Adaptado de Cotes, 2018 [14]

## 2.2 Uso de residuos agroindustriales y su beneficio para la sostenibilidad en las obras de infraestructura

Son diversos los subproductos agroindustriales que actualmente se utilizan como estabilizantes o se incorporan en los materiales para la construcción de carreteras. En países como Turquía, Irán e Irak, se ha utilizado la ceniza de la cascarilla de arroz como modificador de las propiedades mecánicas de la MDC [15] [16] [17] [18], en India, se ha utilizado adicional a la ceniza de cascarilla de arroz, la ceniza de estanque de una central termoeléctrica como material alternativo [19]. Rusbintardjo et. al., evaluaron la modificación de las propiedades reológicas del cemento asfáltico y el rendimiento de la MDC con la inclusión del fruto de la palma de aceite en Malasia [20] [21].

En el 2016 en Indonesia, Huwae et. al., evaluaron la influencia de la ceniza de bagazo de caña de azúcar en la MDC. En cada una de estas incorporaciones se han obtenido resultados alentadores. En Colombia, se ha incorporado subproductos como la ceniza de la cascarilla de arroz, el rastrojo de maíz y el bagazo de la caña de azúcar para la generación de biomodificadores de cementos asfálticos [22].

Numerosos productos de desechos agroindustriales pueden analizarse como material potencial para modificar positivamente el cemento asfáltico para la producción de MDC. Uno de estos productos es la ceniza de cuesco de palma africana (CCPA). La CCPA está ampliamente disponible como un subproducto residuo de la industria aceitera de la palma africana, que actualmente constituye una de las industrias más grandes en zonas tropicales. La disposición final de la CCPA no es simple, lo que lleva a desafíos ambientales en las zonas donde se explota palma africana [23]. Además, investigaciones anteriores [21] [20], sugirieron que la adición de CCPA como relleno mineral (i.e. material que pasa por el tamiz N°200) puede mejorar las propiedades reológicas y algunos índices de respuesta de los aglutinantes de asfalto. Sin embargo, todavía se recomiendan investigaciones adicionales para evaluar la respuesta de las MDC fabricadas usando CCPA.

A nivel mundial, la producción total de aceite de palma supera los 75 millones de toneladas métricas anuales, con Indonesia y Malasia a la cabeza, seguidos por otros productores importantes



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

como Tailandia, Nigeria y Colombia. La demanda global sigue en aumento debido a la versatilidad del aceite de palma y su uso en diversas industrias.

La palma de aceite es una planta tropical propia de climas cálidos, esta planta se cultiva en lugares cuya altitud sea menor a 500 metros sobre el nivel del mar. Los mayores productores de palma africana a nivel mundial son Indonesia y Malasia, que juntos representan más del 85% de la producción global. Indonesia es el mayor productor mundial de aceite de palma, con una producción anual que supera los 40 millones de toneladas métricas. La palma de aceite es una de las principales exportaciones del país, siendo un pilar fundamental de su economía agrícola.

Malasia, es el segundo mayor productor de aceite de palma, con una producción anual de alrededor de 20 millones de toneladas métricas. Malasia ha desarrollado una infraestructura sólida y una cadena de suministro eficiente para la producción y exportación de aceite de palma.

Tailandia es el tercer mayor productor, con una producción aproximada de 2.5 millones de toneladas métricas anuales. Aunque su producción es menor comparada con Indonesia y Malasia, Tailandia ha visto un crecimiento constante en su industria de aceite de palma. Nigeria es uno de los principales productores en África, con una producción de aproximadamente 1 millón de toneladas métricas anuales. Nigeria tiene un gran potencial para expandir su producción debido a la vasta cantidad de tierra adecuada para el cultivo de palma.

En Colombia, existen 483.733 hectáreas sembradas de palma africana en cerca de 158 municipios de 21 departamentos del País. Actualmente, el cultivo de esta planta genera alrededor de 197.000 empleos [24]. En la Figura 1, se presenta la infografía del cultivo de palma africana en Colombia.

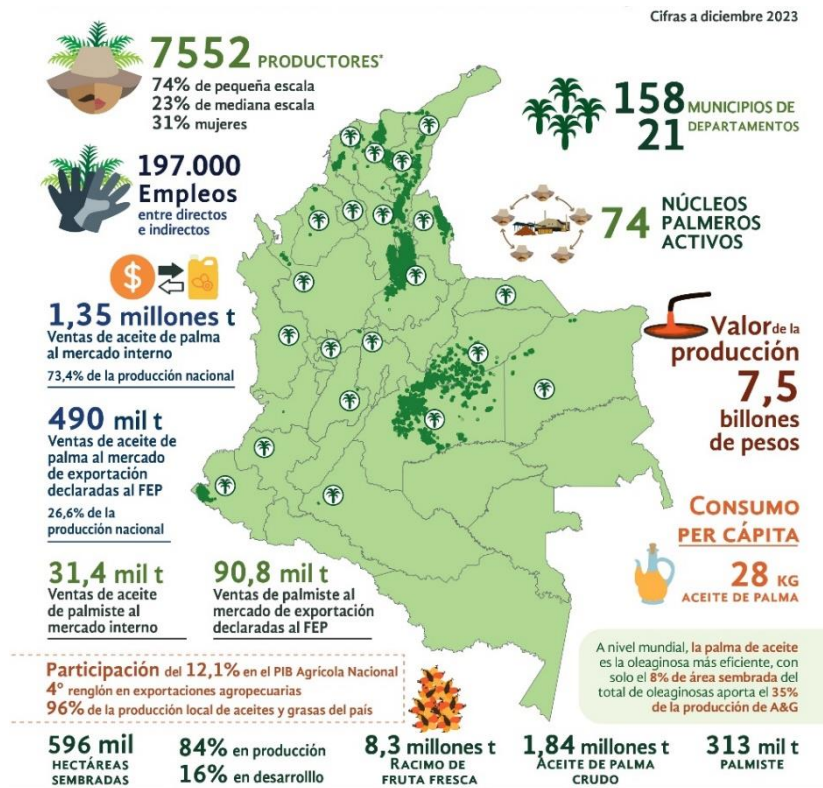


Figura 1. Infografía de la palma de aceite en Colombia [24]



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

En Colombia, se tiene cerca de 596 mil hectáreas sembradas con una producción cercana de 1.84 millones de toneladas de aceite de palma crudo. De la fabricación o procesamiento de los productos antes mencionados se obtiene una serie de desechos, entre estos el cuesco. El cuesco de la palma africana es un subproducto que se consigue de la extracción de la almendra del fruto de la palma africana y corresponde al endocarpio. En la Figura 2, se presenta las partes del fruto de la palma africana.

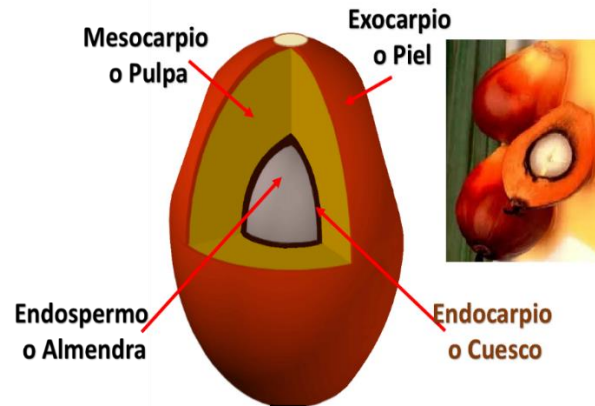


Figura 2. Esquema de la estructura del fruto de la palma africana [14]

El cuesco tiene una alta resistencia, es por este motivo que el desprendimiento del racimo de la palma africana se obtiene mediante el calentamiento en hornos y su pulverización mediante métodos industrializados. En la Figura 3, se muestra el cuesco de la palma africana. La ceniza se obtiene de la incineración del cuesco de la palma africana en grandes calderas o a través de muflas en laboratorio.



Figura 3. Cuesco de palma africana [14]

### 3 Materiales y métodos

#### 3.1 Materiales

##### 3.1.1 Cemento Asfáltico

El cemento asfáltico utilizado en esa investigación, es un asfalto virgen con penetración 60/70. En la Tabla 2, se presenta la caracterización del cemento asfáltico utilizado.



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

Tabla 2. Caracterización básica del cemento asfáltico utilizado

Ensayos	Unidad	Norma	Valor
Penetración (25°C, 100g, 5 s)	0.1 mm	INV-E-706	65
Punto de Ablandamiento	°C	INV-E-712	50
Índice de Penetración	--	INV-E-724	-1.1
Viscosidad Absoluta (60 °C)	P	INV-E-716	
INV-E-717	2040		
Ductilidad (25°C, 5 cm/min)	cm	INV-E-702	111

La selección de ese cemento asfáltico corresponde a las necesidades climáticas y de tráfico de la zona de estudio.

### 3.1.2 Material laterítico

Para esta investigación, se utilizó un agregado material laterítico o laterita proveniente del departamento del Vichada. Este agregado es conformado por costras ferruginosas producto de la degradación de la roca o suelo existentes en la zona de estudio. La laterita es un material natural altamente degradado formado por la concentración de los óxidos hidratados de hierro o de aluminio. Las concentraciones mencionadas pueden deberse a depósito residuales, por movimiento o transporte, precipitación y a diferentes reacciones químicas. En la Figura 4, se muestra el material laterítico.



Figura 4. Material laterítico

En la Tabla 3 se presenta la caracterización física del material laterítico utilizado.

Tabla 3. Caracterización física del material laterítico [23]

Ensayos	Unidad	Norma	Valor
Desgaste en la máquina de los Ángeles	%	INV-E-218	30.3
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval	%	INV-E-238	14.7
Índice de plasticidad, máximo	%	INV-E-125 INV-E-126	NP
Equivalente de Arena	%	INV-E-133	76
Valor de azul de metileno	mg/g	INV-E-235	0.5
Partículas planas y alargadas, relación 5:1	%	INV-E-240	8
Caras fracturadas	%	INV-E-227	73

Para la caracterización química del material laterítico, se realizaron ensayos de Difracción de Rayos-X (XRD, por sus siglas en inglés, X-ray Diffraction), Análisis de Rayos-X de Energía



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

Dispersiva (EDX, por sus siglas en inglés, Energy Dispersive X-ray Analysis) y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM, por sus siglas en inglés, Scanning Electron Microscopy). En la Figura 5, se presenta los resultados de EDX y SEM del material laterítico.

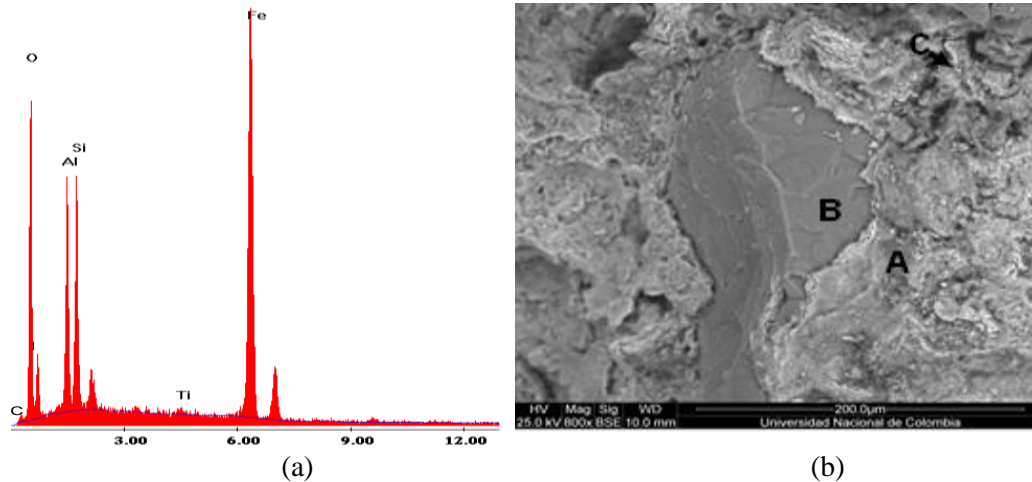


Figura 5. Resultado de EDX (a) y SEM (b) del material laterítico [20]

En la parte (a) de la Figura 5 se muestra los elementos presentes en esta muestra, estos son C, O, Al, Si, Ti y Fe. En esta muestra se identificó óxidos e hidróxidos de Al y Fe, común en este tipo de materiales. En la parte (b) de la Figura 5, se evidencia en el punto A la presencia de óxidos e hidróxidos de hierro (Fe) y aluminio (Al) agregando arcillas, en el punto B se observa cristales de cuarzo.

### 3.1.3 Ceniza de cuesco de palma africana-CCPA

El cuesco de la palma africana es un subproducto que se consigue de la extracción de la almendra del fruto de la palma africana y corresponde al endocarpio [25]. Este residuo posee problemas de disposición, generando problemas de tipo ambiental en las zonas donde se produce la palma africana [26]. En la Figura 6, se presenta el cuesco y la ceniza del cuesco de palma africana.



Figura 6. Cuesco de palma africana (a) y ceniza del cuesco de palma africana (b).





Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

La ceniza de cuesco de palma africana-CCPA se obtiene de la incineración del cuesco a temperaturas entre 500° y 700°C. El tamaño de grano de la CCPA utilizado corresponde al material que pasa el tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (N° 200).

En la Tabla 4, se presenta la caracterización física y química de la ceniza de cuesco de palma africana.

Tabla 4. Caracterización física y química de la ceniza de cuesco de palma africana [25]

Propiedades	Unidad	Valor
<b>Físicas</b>		
Finura	---	11.2
Gravedad Especifica	$\text{g/cm}^3$	2.15
<b>Químicas</b>		
Sílice, $\text{SiO}_2$	%	67.2
Alúmina, $\text{Al}_2\text{O}_3$	%	14.5
Óxido de Hierro, $\text{Fe}_2\text{O}_3$	%	1.8
Óxido de Titanio, $\text{TiO}_2$	%	7.2
Óxido de Potasio, $\text{K}_2\text{O}$	%	3.9
Magnesia, $\text{MgO}$	%	1.5
Óxido de Calcio, $\text{CaO}$	%	3.9
Pérdida por Ignición	%	21

### 3.2 Métodos

#### 3.2.1 Diseño de la mezcla asfáltica

Para el diseño de mezcla realizado, se estableció como granulometría de diseño la distribución media de la franja granulométrica MDC-10 (INVIAS, 2013). Con dicha granulometría se lograba incorporar la distribución de tamaños encontrada en el material natural, lo cual representa ventajas al no tener que incorporarse materiales complementarios. En la Figura 7, se presenta la franja granulométrica establecida para la investigación, así como la granulometría del material laterítico y la granulometría de diseño.

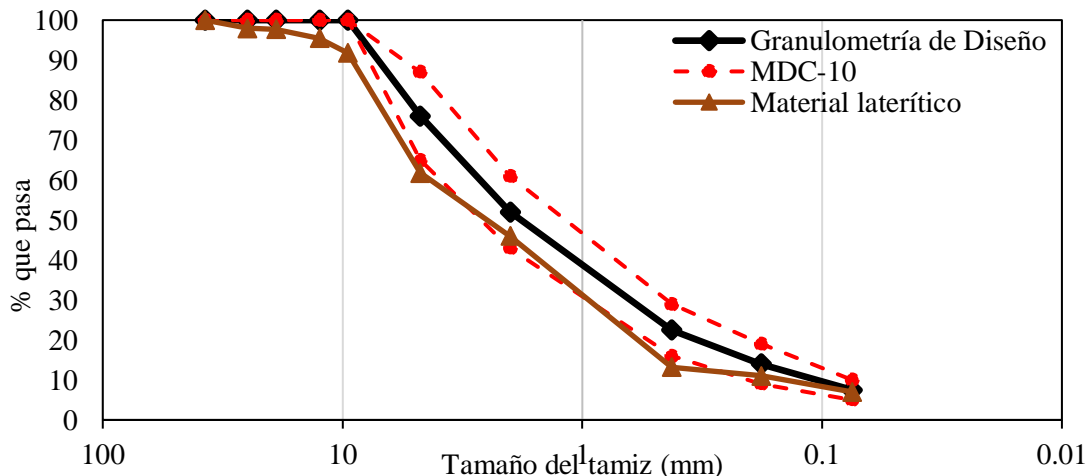


Figura 7. Franja granulométrica de diseño de la mezcla asfáltica densa en caliente



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

Para el diseño se utilizaron siete (7) contenidos de asfalto. Se incorporaron 4.0%, 4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0%, 6.5% y 7.0% para la mezcla ensayada. El porcentaje óptimo obtenido fue 4.80%. En la Tabla 5, se presentan las propiedades de la mezcla asfáltica evaluada para su porcentaje óptimo.

Tabla 5. Propiedades de la mezcla asfáltica elaborada con material laterítico con el porcentaje óptimo de asfalto del diseño Marshall

Características	Especificación		Valor
	Mínimo	Máximo	
Estabilidad (kN)	7.50	-	19.70
Flujo (mm)	2.00	4.00	3.95
Peso unitario (gr/cm <sup>3</sup> )	-	-	2.41
Vacíos en la Mezcla-Va	-	-	5.90
% Vacíos Agregados Minerales-VAM	16.00	-	16.70
Vacíos llenos de asfalto-VFA	65.00	78.00	63.00
Contenido de Asfalto Efectivo-Pbe	-	-	4.72
% de Asfalto Absorbido-Pba	-	-	2.91
Relación Estabilidad /Flujo (kN/mm)	3.00	5.00	4.99

En general, la mezcla cumple con cada uno de los requisitos establecidos en la Tabla 450-10 del Capítulo 4, Artículo 450 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del INVIAS en el año 2022.

Las relaciones del volumen de filler- volumen de asfalto obtenido con el diseño Marshall se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Relación Vf/Va obtenidos con el diseño Marshall

% CCPA	Gs	% Asfalto	Vf/Va
0	2.66		0.57
50	2.38	4.8	0.64
100	2.15		0.71

Los valores de Vf/Va presentados en la tabla obtenidos del diseño Marshall, servirán como punto de referencia para el análisis de la influencia de estas relaciones con las otras obtenidas de las pruebas mecánicas y por medio de la metodología de energía superficial libre.

### 3.2.2 Medición de las componentes de energía superficial libre en asfaltos y agregados

Para la medición de la energía superficial libre del asfalto y las combinaciones asfalto-filler utilizada en esta investigación, se empleó el método de placa de Wilhelmy-MPW. Este método permite establecer con base en el ángulo de contacto entre el cemento asfáltico y diversos líquidos de prueba, con componentes de ESL conocidas, las componentes de ESL del cemento asfáltico. En investigaciones previas, se presenta de manera detalla la descripción de la metodología [27] [3].

Para la medición de las componentes de ESL en el material laterítico, se utilizó la máquina de adsorción universal (USD, por sus siglas en inglés, Universal Sorption Device). Esta máquina permite determinar la isoterma de adsorción a temperatura constante de un gas de prueba (i.e., gas con componentes de ESL conocidas) sobre el agregado en estudio. Para esto se usan como mínimo tres gases de prueba y se conforma un sistema de ecuaciones independiente linealmente y su solución arroja las componentes de ESL del agregado. En investigaciones previas, se presenta de manera



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

detalla la descripción de la metodología para el cálculo de las componentes de ESL para el agregado [28] [29].

Basados en los cálculos de trabajo de adherencia en condición seca y húmeda, se evalúa el efecto de la carga mineral por medio índices utilizados en investigaciones previas [30], [31], [32], [33]:

a. Índices  $A_1$  y  $A_2$

En estos cálculos el subíndice A representa el asfalto limpio, y F representa el asfalto con filler (i.e. mastico) probados para determinar los componentes de ESL. Por lo tanto,  $W_{FS}^{dry}$  es el trabajo de adherencia en condiciones secas calculada en base a la ESL del mastico y un agregado,  $W_{AS}^{dry}$  es el trabajo de adherencia en condiciones secas calculada en base a la ESL del asfalto limpio y un agregado,  $W_{AS}^{wet}$  es el trabajo de adherencia en condiciones de humedad calculado en base a la ESL del asfalto limpio y un agregado, y  $W_{FS}^{wet}$  es el trabajo de adherencia en condiciones de humedad calculado en base a la ESL del mastico y un agregado.

Los valores positivos del índice  $A_1$  (ver ecuación 3) indican un efecto favorable de la adición de la carga en términos de la calidad de la adhesión para el sistema de mastico-agregado.

$$A_1 = \frac{W_{FS}^{dry} - W_{AS}^{dry}}{W_{AS}^{dry}} \times 100(\%) \quad (3)$$

El índice  $A_2$  (ver ecuación 4) evalúa el efecto de relleno en la susceptibilidad a la humedad del sistema de agregado-asfalto mediante la cuantificación de la proporción de cambio en el trabajo de adhesión, respecto al trabajo de adherencia del sistema de agregado asfáltico limpio, debido a la adición de la carga.

$$A_2 = \frac{|W_{AS}^{wet}| - |W_{FS}^{wet}|}{|W_{AS}^{wet}|} \times 100(\%) \quad (4)$$

Los valores positivos del índice  $A_2$  son indicativos del efecto positivo de la adición de la carga en el sistema, ya que su adición genera valores absolutos más bajos de trabajo de adhesión en estado húmedo, lo que implica un menor potencial termodinámico del agua para interrumpir la interfaz de asfalto-agregado.

b. El índice de relación de energía

El índice de relación de energía (ER por sus siglas en inglés Energy Ratio), definido como la relación entre el trabajo de adhesión en estado seco y el trabajo de adhesión en estado húmedo (ver ecuación 5), se utilizó para identificar combinaciones de materiales que producen sistemas con características de adhesión apropiadas y reducción de la susceptibilidad para desarrollar procesos de desunión en virtud de la presencia de agua.

$$ER = \frac{W_{AS}^{dry}}{W_{AS}^{wet}} \quad (5)$$

c. Coeficiente de extensión



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

El coeficiente de extensión (SC, por sus siglas en inglés Spreading Coefficient), una medida cuantitativa de la capacidad de humectación del asfalto (A) sobre el agregado (S), se calculó como se indica a continuación (ver ecuación 6):

$$SC = W_{AS}^{dry} - W_{AA} \quad (6)$$

Donde,  $W_{AA}$  es el trabajo de la cohesión del asfalto (o el mastico), que se calcula mediante la sustitución de dos veces en (Ec. 2) los componentes ESL del asfalto para una interfaz de asfalto-asfalto.

#### 4 Resultados y discusión

##### 4.1 Susceptibilidad al daño por humedad por medio de la resistencia a la tracción indirecta

Para evaluar el efecto de la humedad en el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas elaboradas con material laterítico y CCPA, se realizó el ensayo de susceptibilidad al daño por humedad por medio de la resistencia a la tracción indirecta de acuerdo a la norma INV 725-13.

Para esto, se crearon briquetas de acuerdo a la norma INV 748-13. Las probetas se dividieron en dos grupos, unas para fallarlas en seco, a 25°C (condición seca), y el otro grupo parcialmente saturadas acondicionadas en un baño de agua a 60°C durante 24 horas (condición húmeda). Luego se determinó la resistencia a la tracción indirecta-RTI de cada uno y se determinó el daño potencial por humedad mediante la relación de la RTI del grupo húmedo y el seco.

En la Figura 8, se presenta los resultados de RTI en estado seco para 0%CCPA, 50% CCPA y 100%CCPA, para relaciones Vf/Va desde 0.15 hasta 0.90.

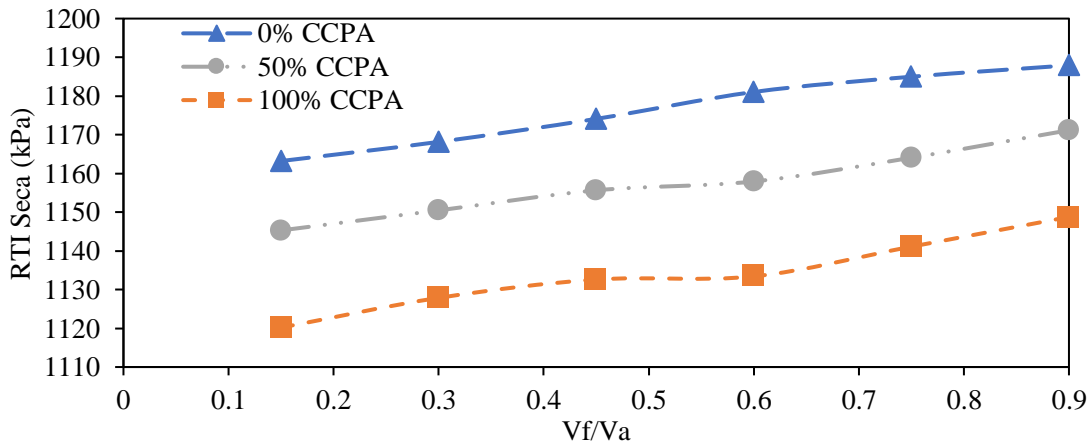


Figura 8. Variación de la resistencia a la tracción indirecta en condición seca con la modificación de la relación Vf/Va

En la figura anterior, se muestra el efecto de la CCPA en el comportamiento en estado seco evaluado en términos de RTI. Se tiene que para 0%CCPA se obtiene los mayores resultados, presentando valores mayores a las muestras elaboradas con 50% CCPA y 100% CCPA, de 0.4% y 1.4%, respectivamente. En la condición evaluada, la incidencia de la relación Vf/Va es cercana al 2.5%, tomando como referencia la relación más baja y la más alta utilizada, para los tres porcentajes de ceniza.



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

En la Figura 9, se presenta los resultados de RTI en estado húmedo para 0%CCPA, 50% CCPA y 100%CCPA, para relaciones Vf/Va desde 0.15 hasta 0.90.

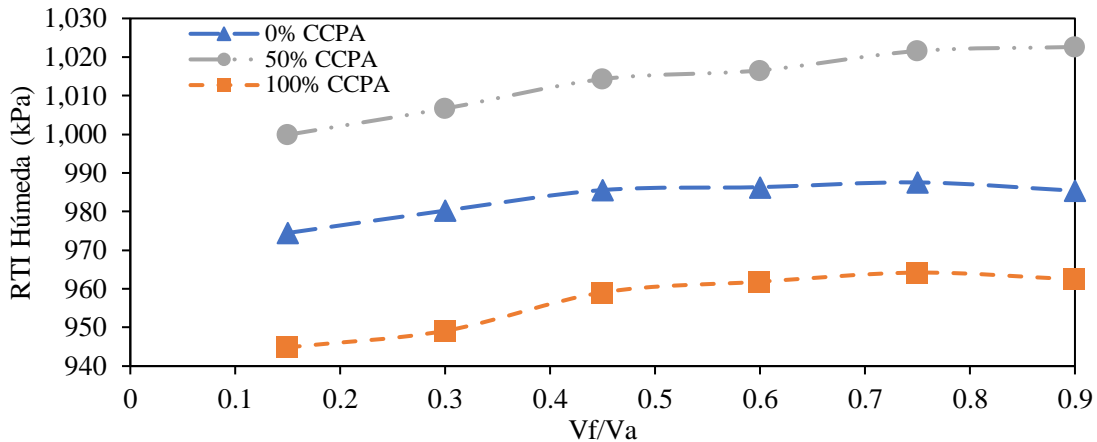


Figura 9. Variación de la resistencia a la tracción indirecta en condición húmeda con la modificación de la relación Vf/Va

Para las condiciones evaluadas, la mezclas con mejor comportamiento fue la que contiene el 50% CCPA. Para 50% CCPA se obtiene los mejores resultados, presentando valores mayores a las muestras elaboras con 0% CCPA y 100% CCPA, de 1.7% y 2.2%, respectivamente. En la condición evaluada, la incidencia de la relación Vf/Va es cercana al 2.2%, tomando como referencia la relación más baja y la más alta utilizada, para los tres porcentajes de ceniza.

En la Figura 10, se presenta los valores de resistencia conservada para 0%CCPA, 50% CCPA y 100%CCPA, para relaciones Vf/Va desde 0.15 hasta 0.90. Este valor corresponde al cociente de la RTI en húmedo sobre la RTI en estados seco.

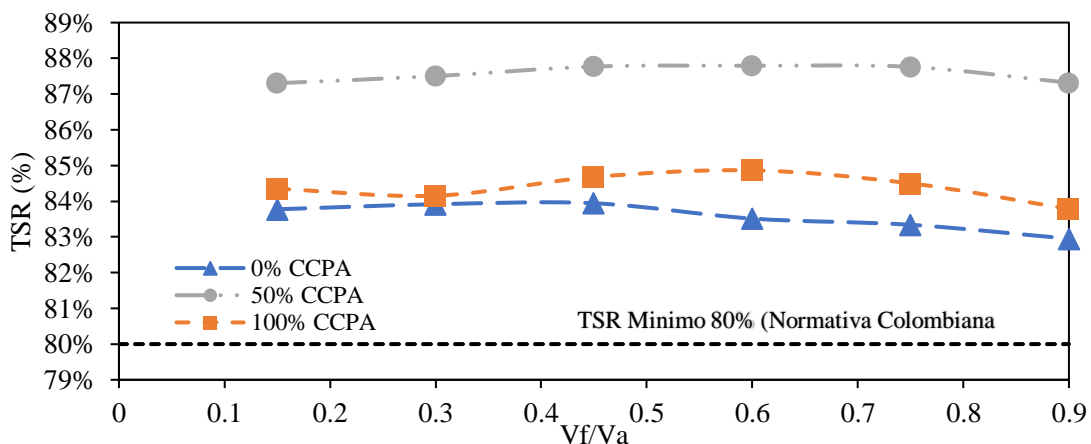


Figura 10. Variación de la resistencia conservada con la modificación de la relación Vf/Va

De lo anterior, se tiene que la resistencia conservada para los tres (3) porcentajes evaluados, cumplimiento del valor de la resistencia conservada establecida en la normativa (80%). Se evidencia que los mayores valores de resistencia conservada se obtienen con la adición de 50% de CCPA.



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

#### 4.2 Evaluación de interfaces asfalto (y mástico)-agregado por medio de propiedades termodinámicas

Considerando las mediciones de energía superficial libre del asfalto y las combinaciones asfalto-filler calculadas mediante el método de placa de Wilhelmy-MPW y las componentes de ESL en el material laterítico obtenidas mediante la máquina de adsorción universal (USD, por sus siglas en inglés, Universal Sorption Device), y basados en los cálculos de trabajo de adherencia en condición seca y húmeda, se determinaron los índices para la evaluación de la ESL.

En la Figura 11, se presenta los resultados del efecto de la adición de la carga en el trabajo de adhesión de los sistemas asfalto-agregados puede ser mejor evaluado en función de la A1, relacionados con el asfalto con 0% de CCPA (100% de filler de material laterítico), asfalto con 100% de CCPA, y asfalto con 50% de CCPA, para relaciones Vf/Va desde 0.15 hasta 0.90.

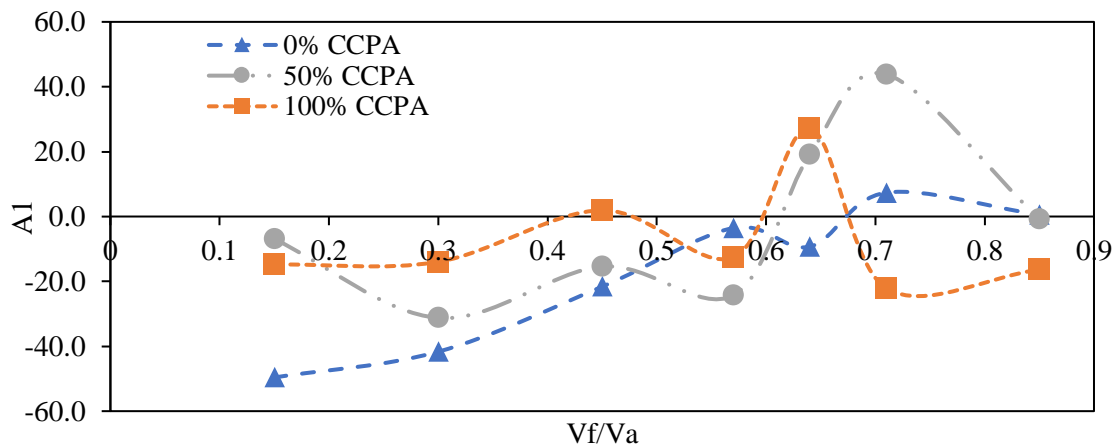


Figura 11. Índice A1 para el sistema asfalto-agregado adicionado con 0%, 50% y 100% de CCPA como filler con la modificación de la relación Vf/Va

Los valores positivos del índice A1 reflejan un efecto favorable de la adición de la carga en términos de la calidad de la adhesión para el sistema mastico, ya que el trabajo de adhesión es mayor para el sistema de mastico-agregado que para el sistema agregado-asfalto limpio evaluado. La magnitud coeficiente cuantifica la proporción de cambio en el trabajo de adherencia, respecto al trabajo de adherencia del sistema de asfalto-agregado limpio, debido a la adición de la carga.

Por lo tanto, los datos de las Figura 11, proporcionan evidencia acerca de la magnitud de la modificación, ya sea en sentido positivo o de una manera negativa, en los valores de trabajo de adherencia en condiciones secas inducida por la adición de la carga o filler en el asfalto evaluado.

Con las tres condiciones evaluadas, asfalto con 0% de CCPA (100% de filler de material laterítico), asfalto con 100% de CCPA, y asfalto con 50% de CCPA, se obtienen valores negativos del índice A1, lo que representa un efecto no favorable de las adiciones de los filler utilizados en los sistemas agregado-asfalto, lo que se traduce en una ineficiente calidad de la adhesión. La condición más crítica de los sistemas evaluados se presenta en la condición de asfalto asfalto con 0% de CCPA (100% de filler de material laterítico) donde se presenta solo un valor de Vf/Va con resultado positivo, y este solo alcanza un valor de A1 igual a 10, siendo este 76% menor que el índice A1, evaluado con la adición de 50% CCPA con el valor de Vf/Va de 0.71, donde se obtiene el mejor desempeño y un efecto favorable de la adición de la carga en términos de la calidad de la adhesión para el sistema mastico.



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

En la Figura 12, se presenta los resultados del efecto del relleno en la susceptibilidad a la humedad del sistema de agregado-asfalto mediante la cuantificación de la tasa de cambio en el trabajo de adhesión, mediante el índice A2. Se presentan los valores del índice A2, asfalto con 0% de CCPA (100% de filler de material laterítico), asfalto con 100% de CCPA, y asfalto con 50% de CCPA, respectivamente.

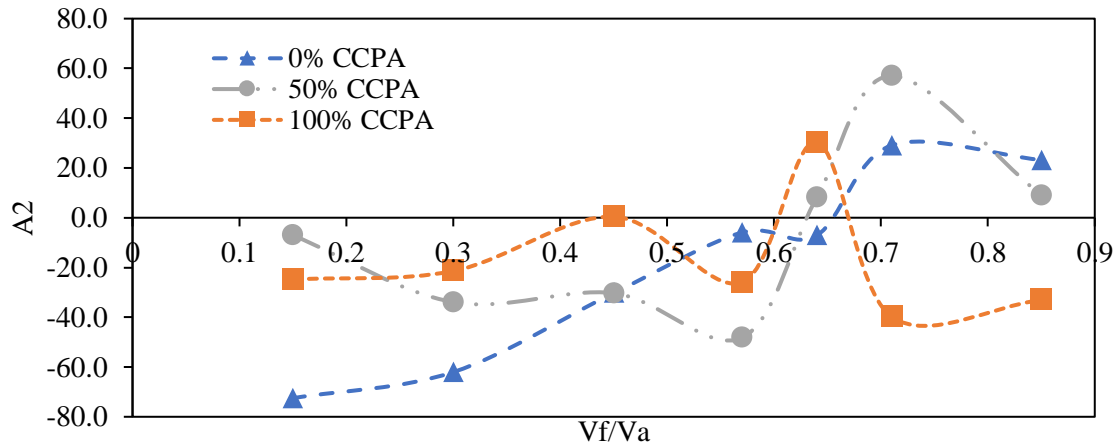


Figura 12. Índice A2 para el sistema asfalto-agregado adicionado con 0%, 50% y 100% de CCPA como filler con la modificación de la relación Vf/Va

Los valores positivos del índice A2 indican un efecto positivo de la adición de la carga en el sistema, ya que su adición genera valores absolutos más bajos de trabajo de adhesión en estado húmedo, lo que implica un menor potencial termodinámico para el agua para interrumpir la interfaz de asfalto-agregado.

Los resultados mostrados en las Figura 12 sugieren que la adición de filler afecta la susceptibilidad al daño por humedad de los sistemas mastico-agregados en proporciones variables para diferentes combinaciones de materiales.

Al igual que lo presentado en condiciones secas, los cambios presentados en condiciones húmedas sugieren que la adición de un tipo de relleno específico puede mejorar la resistencia a daños por humedad (e.g. 50% CCPA con el valor de Vf/Va de 0.71) y, en otros casos, aumentar la susceptibilidad a la humedad daño (e.g. 0% CCPA con el valor de Vf/Va de 0.15) de los sistemas de mastico-agregado.

En la Figura 13, se muestran los valores calculados de para el índice ER para las combinaciones de asfalto limpio, asfalto con 0% de CCPA (100% de filler de material laterítico), asfalto con 100% de CCPA, y asfalto con 50% de CCPA. El índice ER funciona eficientemente para identificar combinaciones de materiales que producen sistemas con características de alta adhesión y baja susceptibilidad a desarrollar procesos de desunión en virtud de la presencia de agua [2]. Bhasin et al., en 2014, establecieron ciertos valores límites para identificar combinaciones de asfalto-agregado susceptibles a daño por humedad. Dichos valores fueron establecidos mediante la comparación de los valores de estos parámetros con el rendimiento en campo observado para varias mezclas asfálticas densas en caliente (MDC) [34]. Establecieron 3 rangos de resistencia al daño por humedad, valores de superiores a 1.5 se relacionan con MDC con alta resistencia a la humedad, índices ER con valores entre 1.5 y 0.5 se relacionan con la resistencia media a daños por humedad. Mezclas con alta



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

susceptibilidad a daños por humedad están relacionadas con índice ER de valores inferiores a 0.5. Para el análisis del daño por humedad en los materiales y combinaciones evaluadas se utilizaron estos criterios.

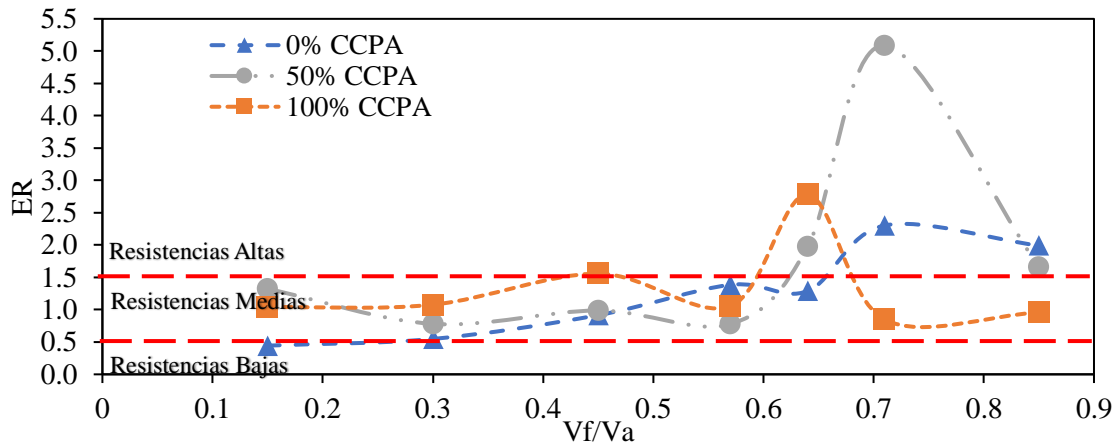


Figura 13. Índice ER para el sistema asfalto-agregado adicionado con 0%, 50% y 100% de CCPA como filler con la modificación de la relación Vf/Va

Los datos presentados en la Figura 13, son coincidentes con el análisis de los índices anteriores, y sugieren que la adición de carga modificada de la respuesta global de los sistemas agregados de asfalto en diferentes proporciones, dependiendo de la combinación particular, de agregado-asfalto-mástico.

Los resultados presentados en la Figura 13, permiten inducir que parte de las mezclas de materiales ensayadas presentan una resistencia media al daño por humedad. Sin embargo, combinaciones de 0% CCPA (100% de filler de material laterítico) con valores de Vf/Va de 0.15 y 0.30, se ubican en el rango de mezclas con alta susceptibilidad al daño por humedad (Resistencias bajas). Además, la adición de 50% CCPA con el valor de Cv de 0.71 presenta un valor del índice ER cercano a 5, lo que la ubica como una MDC con alta resistencia al daño por humedad (Resistencias altas).

En la Figura 14, se presenta los valores del coeficiente de extensión, con proporciones del asfalto con 0% de CCPA (100% de filler de material laterítico), asfalto con 100% de CCPA, y asfalto con 50% de CCPA como filler, respectivamente, así como las combinaciones de mástico-agregados.

El coeficiente de extensión es una medida de la humectabilidad de un líquido (asfalto caliente) sobre un sólido (agregado). Un alto valor del coeficiente de extensión implica una mejor capacidad del asfalto para cubrir el material granular, lo cual favorece un apropiado entramamiento mecánico del cemento asfáltico y el material granular.

Los datos presentados en las Figura 14 sugieren que la adición de material de carga puede modificar el asfalto humectabilidad, calculado en términos del coeficiente de extensión y, por lo tanto, cambiar la calidad del asfalto o de recubrimiento del mástico sobre el agregado. Se evidencia al igual que los índices anteriores, la adición de 50% CCPA con la Vf/Va de 0.71 presenta un mayor valor de coeficiente de expansión. Lo anterior, se relaciona con un bajo potencial de daño por humedad debido al mayor cubrimiento del asfalto al agregado y por ende una menor posibilidad que el agua se filtre en la interfase del sistema asfalto-agregado [35].





Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

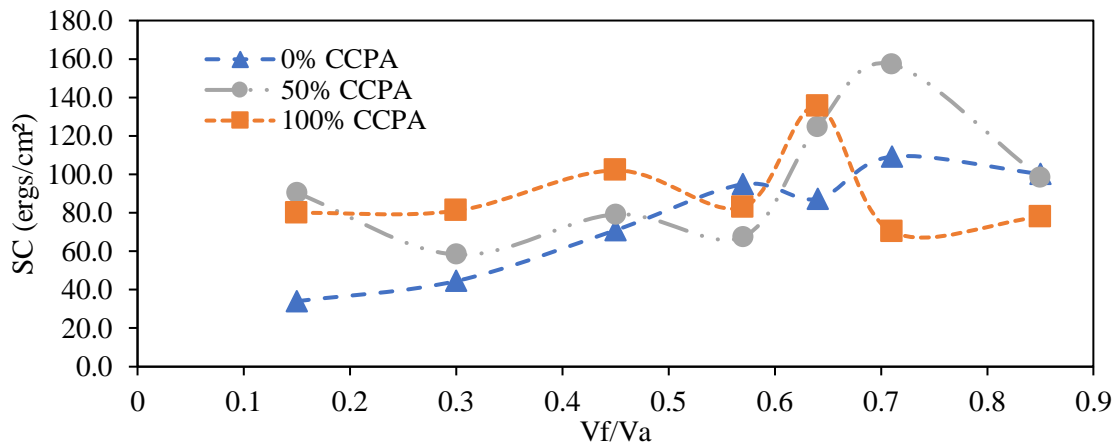


Figura 14. Coeficiente de Extensión (SC) para el sistema asfalto-agregado adicionado con 0%, 50% y 100% de CCPA como filler con la modificación de la relación Vf/Va

Mediante la aplicación de estas metodologías se pudo identificar una combinación de Vf/Va y CCPA que potencializa la resistencia a la fractura, la susceptibilidad al daño por humedad y la humectabilidad del asfalto. Con la adición de 50% CCPA y la Vf/Va de 0.71 en las condiciones evaluadas se obtiene el mejor comportamiento evaluado mediante propiedades termodinámicas, presentado valores hasta 233% mayores en términos de resistencia a la fractura, la susceptibilidad al daño por humedad y la humectabilidad del asfalto, con porcentajes de mejoramiento de 270% respecto a la combinación 50% CCPA y Vf/Va de 0.3, sin embargo, no con todas las combinaciones se presentan mejoramientos, también con la adición de 50% CCPA y 0.3 de Vf/Va se presentan disminuciones de resistencia a la fractura, la susceptibilidad al daño por humedad y la humectabilidad del asfalto cercanas al 64% respecto a la combinación 50% CCPA y Cv de 0.15. Lo anterior indica que las variaciones de Cv y %CCPA tiene un papel fundamental en el comportamiento de las mezclas asfálticas.

#### 4 Conclusiones

En presente investigación se evaluó el efecto de la adición de ceniza de cuesco de palma africana (CCPA) en las interfaces asfalto-agregado, utilizando propiedades termodinámicas (i.e. ESL) y pruebas de resistencia mecánica (i.e. resistencia a la tracción indirecta) en una mezcla asfáltica densa en caliente fabricada con material laterítico. Se investigaron tres porcentajes de CCPA (0%, 50% y 100%) como reemplazo de la proporción de llenante mineral, con diferentes relaciones volumétricas de volumen de filler / volumen de asfalto (Vf/Va) (Con proporciones entre 0.15 y 0.85).

Se utilizó empleando el método de placa Wilhelmy para la determinación de las componentes de ESL para cemento asfáltico y para la mezcla asfalto- filler (mástico). La medición de las componentes de ESL para el material laterítico (agregado) se realizó con la máquina de adsorción universal.

El cálculo de los parámetros de energía se realizó evaluando la resistencia a la fractura por medio del trabajo de adhesión en estado seco y el índice de A1, la susceptibilidad daño de la humedad mediante el trabajo de adhesión en estado húmedo, el índice de A2, y el índice de relación de energía ER, y la capacidad de humectación del asfalto sobre el agregado con el coeficiente de difusión-SC.

Para el material laterítico, los valores óptimos presentados, se obtuvieron con la adición de 50% CCPA y la relación Vf/Va de 0.71. Y los menores valores se presentaron con la combinación de 0%



**Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.**

de CCPA (100% de filler de material laterítico), como filler y la concentración volumétrica de 0.15. De acuerdo a lo anterior, se puede establecer que las combinaciones de materiales más convenientes pueden ser seleccionadas e incluidas como un criterio adicional para el diseño de mezclas asfálticas y así maximizar su rendimiento en términos de resistencia a la fractura y la susceptibilidad al daño por humedad.

También, mediante el análisis de las propiedades termodinámicas, se demuestra que el llenante mineral, así como su origen, mineralogía, proporción, concentración volumétrica, entre otros aspectos, pueden tener un efecto importante en el aumento o la reducción de la resistencia al daño por humedad, la resistencia a la fractura y la fatiga de los sistemas de mastico-agregado de mezclas asfálticas.

Para el ensayo de la relación de la resistencia a la tracción indirecta, se obtuvo que con 0%, 50% y 100% de CCPA, se cumple con el porcentaje de resistencia conservada establecida en la normativa (80%). Se tiene que los valores más altos de resistencia conservada fueron los obtenidos con 50% de CCPA. Esta relación provee un indicativo de la susceptibilidad al daño por humedad en las mezclas asfálticas, por lo cual se puede afirmar que las mezclas adicionadas con los porcentajes de CCPA mencionados son menos susceptibles al daño por humedad.

Con la inclusión de la CCPA en la mezcla asfáltica se evidencia un mejoramiento en el comportamiento mecánico. El comportamiento presentado por la mezcla asfáltica con la inclusión de la CCPA evidencia un mejoramiento comportamiento, mostrado el máximo mejoramiento con la adición de 50%. En cuanto a la temperatura, se presentan mayores porcentajes de mejoramiento con la inclusión de CCPA a mayores temperaturas. Los resultados presentados a altas temperaturas son de gran importancia dado que las condiciones climáticas presentes en la zona de estudio.

Considerando los resultados obtenidos, se viabiliza técnicamente la utilización ceniza de cuesco de palma africana como modificador de mezclas asfálticas en caliente fabricadas con material laterítico para ser utilizadas como material en vías del departamento del Vichada, Colombia. Contribuyendo con esto en la sostenibilidad en la fabricación de mezclas asfálticas en caliente y en la construcción de pavimentos flexibles, convirtiéndose en una alternativa económica y eficiente para la solución de la problemática existente en materia vial del Vichada, coadyuvando de manera paralela a fortalecer la economía, la competitividad, la integración regional y departamental, así como al mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes del departamento del Vichada. Además, se espera que a través de esta investigación se incentive a la utilización de subproductos agroindustriales y materiales locales en la construcción de vías en otros departamentos del país.

## **5 Agradecimientos**

El autor expresa su agradecimiento a la Profesora Carol Murillo de la Universidad Nacional de Colombia y al Profesor Alex Álvarez de la Universidad Industriales del Santander, por su orientación y apoyo en la dirección de la investigación. Igualmente, agradece el apoyo brindado por la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad del Magdalena.



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

## 6 Referencias

- [1] Alex Alvarez and Evelyn Ovalles, "Análisis de sistemas asfalto-agregado a partir de mediciones de energía superficial libre," *DYNA*, vol. 79, no. 175, pp. 11-119, 2012.
- [2] Alex E. Alvarez, Evelyn Ovalles, and Silvia Caro, "Assessment of the effect of mineral filler on asphalt-aggregate interfaces based on thermodynamic properties," *Construction and Building Materials*, vol. 28, no. 1, pp. 599-606, 2012.
- [3] Alex Alvarez and Silvia Caro, "Determinación de la energía superficial libre de cementos asfálticos colombianos," *REVISTA INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN*, vol. 29, no. 2, pp. 20-24, 2009.
- [4] Praveen Kumar and P. Anand, "Laboratory Study on Moisture Susceptibility of Dense Graded Mixes," *Journal of Transportation Engineering*, vol. 138, pp. 105-113, 2012.
- [5] Rodrigo Miró, Adriana H. Martínez, Félix E. Pérez-Jiménez, Ramon Botella, and Alex Alvarez, "Effect of filler nature and content on the bituminous mastic behaviour under cyclic loads," *Construction and Building Materials*, vol. 132, pp. 33-42, 2017.
- [6] Rouzbeh Ghabchi, Dharamveer Singh, and Musharraf Zaman, "Evaluation of moisture susceptibility of asphalt mixes containing RAP and different types of aggregates and asphalt binders using the surface free energy method," *Construction and Building Materials*, vol. 73, pp. 479-489, 2014.
- [7] Burak Sengoza and Emine Agar, "Effect of asphalt film thickness on the moisture sensitivity characteristics of hot-mix asphalt," *Building and Environment*, vol. 42, pp. 3621-3628, 2007.
- [8] NCHRP Synthesis 199, "Recycling and use of waste materials and by-products in highway construction," Washington, DC, 1994.
- [9] Prithvi S. Kandhal, "Waste materials in hot mix asphalt-An Overview," Auburn University, Alabama, NCAT Report No. 92-6 1992.
- [10] JH Charman, *Laterite in road pavements*. London, England: London Construction Industry Research and Information Association Special Publication, 1988.
- [11] Frank Netterberg, Review of Specifications for the Use of Laterite in Road Pavements, 2014.
- [12] A. Bhasin and D. N. Little, "Characterization of Aggregate Surface Energy Using the Universal Sorption Device," *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, pp. 634-641, 2007.
- [13] C. J. Van Oss, M. K. Chaudhury, and R. J. Good, "Interfacial Lifshitzvan der Waals and Polar Interactions in Macroscopic Systems," *Chemical Reviews*, pp. 927-941, 1988.
- [14] Leonel Cotes de la Hoz. (2018, Marzo) Evaluación de la influencia de la adición de ceniza del cuesco de palma africana en el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas fabricadas con material laterítico. Tesis. [Online]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/79624>
- [15] Sebnem Sargin, Mehmet Saltan, Nihat Morova, Sercan Serin, and Serdal Terzi, "Evaluation of rice husk ash as filler in hot mix asphalt concrete," *Construction and Building Materials*, no. 48, pp. 390-397, 2013.
- [16] David D.M. Huwae, L.R. Parera, and J. Tanijay, "Bagasse-Ash as Filler in HRS (Hot Rolled Sheet) Mixture," in *Asian Conference on Experimental Mechanics (ACEM)*, Jeju Island, 2016.
- [17] Mahyar Arabani and Seyed Amid Tahami, "Assessment of mechanical properties of rice husk ash modified asphalt mixture," *Construction and Building Materials*, no. 149, pp. 350-358, 2017.



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

- [18] Abbas Al-Hdabi, "Laboratory investigation on the properties of asphalt concrete mixture with Rice Husk Ash as filler," *Construction and Building Materials*, vol. 126, pp. 544-551, 2016.
- [19] Asitghosh, Raja Mistry, and Tapas Kumar Roy, "Utilization of rice husk ash/pond ash and jute fibre as alternative materials for stone mastic asphalt," in *ISERD International Conference*, Pune, 2017, pp. 8-11.
- [20] Gatot Rusbintardjo, Mohd Hainin, and Nur Yusoff, "Fundamental and rheological properties of oil palm fruit ash modified bitumen," *Construction and Building Materials*, vol. 49, 2013.
- [21] G Rusbintardjo, M Hainin, M Mubarak, and N Yusoff, "The Performance Characteristics of Stone Mastic Asphalt Mixtures Using Oil Palm Fruit Ash-Modified Bitumen," *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. VII, no. 4, pp. 227-236, 2014.
- [22] Silvia Caro, Natalia Vega, Johana Husserl, and Alex E. Alvarez, "Studying the impact of biomodifiers produced from agroindustrial wastes on asphalt binders," *Construction and Building Materials*, no. 126, pp. 369-380, 2016.
- [23] Leonel Cotes and Carol Murillo, "Evaluación del comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica con material laterítico," in *XX Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos*, Santa Marta, 2015.
- [24] Fedepalma. (2023, Diciembre) Fedepalma - La palma de aceite en Colombia. [Online]. <https://fedepalma.org/>
- [25] Leonel Cotes and Carol Murillo, "Estabilización de suelos arcillosos mediante la dosificación de la ceniza de cuesco de palma africana," in *15th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (PCSMGE XV)*, Buenos Aires, 2015, pp. 1678 - 1685.
- [26] Jorge Buzón, "Uso del Cuesco de la Palma Africana en la fabricación de Adoquines y Bloques de Mampostería," in *Seventh LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*, San Cristobal, 2009.
- [27] Arno W. Hefer, Amit Bhasin, and Dallas 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.
- [28] Amit Bhasin and Dallas 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.
- [29] Silvia Caro-Spínol and Alex E. Alvarez, "Evaluación de la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas empleando propiedades termodinámicas," *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, no. 58, pp. 95-104, 2011.
- [30] A Bhasin, J Howson, E Masad, DN Little, and RL Lytton, "Effect of modification processes on bond energy of asphalt binders," in *Transportation research board 86th annual meeting*, Washington, 2007, pp. 1-14.
- [31] A Bhasin, DN Little, KL Vasconcelos, and E Masad, "Use of surface free energy to identify moisture sensitivity of materials for asphalt mixes," in *Transportation research board 86th annual meeting*, Washington, 2007, pp. 1-15.
- [32] D Little and A. Bhasin, "Using surface energy measurements to select materials for asphalt pavement," National Cooperative Highway Research Program, Washington, 2006.



**Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.**

- [33] Alex E. Alvarez, Evelyn Ovalles, and Amy Epps Martin, "Comparison of asphalt rubber-aggregate and polymer modified asphalt-aggregate systems in terms of surface free energy and energy indices".
- [34] Amit Bhasin, Eyad Masad, Dallas Little, and Robert Lytton, "Limits on Adhesive Bond Energy for Improved Resistance of Hot-Mix Asphalt to Moisture Damage," vol. 1970, 2014.
- [35] A. Bhasin, D. N. Little, Vasconcelos, K. L., and E. Masad, "Surface free energy to identify moisture sensitivity of materials for asphalt mixes," 2007.