



## MEZCLAS ASFÁLTICAS CON INCORPORACIÓN DE NFU PARA UTILIZARSE EN CARPETAS ULTRADELGADAS

Daniela Bocanegra Martínez<sup>1</sup>, Leonardo Ambrosio Ochoa Ambriz<sup>2</sup>, Álvaro Gutiérrez Muñiz<sup>3</sup>, Raymundo Benítez López<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Quimi-Kao, El Salto, Jalisco, México, dbocanegra@kao.com

<sup>2</sup> Quimi-Kao, El Salto, Jalisco, México, lochoa@kao.com

<sup>3</sup> Quimi-Kao, El Salto, Jalisco, México, agutierrez@kao.com

<sup>4</sup> Quimi-Kao, El Salto, Jalisco, México, rbenitez@kao.com

### Resumen

Para prolongar el horizonte de vida de los pavimentos es indispensable proteger la capa de rodadura con tratamientos superficiales que mitiguen los diferentes deterioros a los que está expuesta la superficie del pavimento. Durante años se han utilizado técnicas que se enfocan en resolver problemas específicos de la carpeta asfáltica, sin embargo, se limitan a determinadas condiciones de diseño como clima, granulometrías o incluso maquinaria especial para su aplicación; estos inconvenientes se pretenden resolver con una tecnología que consiste en una capa de mezcla asfáltica ultradelgada que además incluye polvo de hule proveniente de neumáticos fuera de uso (NFU).

Para enfrentar los retos que conlleva la aplicación de una capa ultradelgada y las dificultades que presenta el manejo del hule en la modificación del cemento asfáltico, es necesario asegurar el buen manejo del asfalto ahulado por lo cual se proponen diferentes formulaciones de aditivos para conseguir disminuir la viscosidad, lo cual se verá reflejado en una reducción considerable de temperaturas de tendido y compactación, haciendo posible la aplicación en campo de capas ultradelgadas con espesores de 1.5 a 2.5 cm. Se llevaron a cabo estudios de viscosidad y separación en el asfalto, así como análisis reológicos, viscosidad en el mástico y, además, se realizaron ensayos de Cántabro, susceptibilidad a la humedad, profundidad de rodera y agrietamiento en mezclas asfálticas fabricadas en laboratorio para determinar el desempeño general de la tecnología que se propone.

Los resultados demuestran que las mezclas del tratamiento propuesto son más resistentes al agrietamiento y al desgranamiento comparado contra mezclas ahuladas convencionales (que no contienen aditivo). Por último, se logró comprobar que los resultados obtenidos en laboratorio pueden escalarse a condiciones de campo; se presenta la primera aplicación en Colombia de carpeta ultradelgada utilizando NFU.

**Palabras Clave:** tratamiento superficial, polvo de neumático, carpeta ultradelgada

### 1 Introducción

El concepto de tratamiento superficial como método de restauración de pavimentos no es un tema nuevo en la conservación de carreteras; de acuerdo con [1] y basados en los modelos tradicionales de conservación, la gestión de la red vial dependerá del uso efectivo del recurso económico destinado al mantenimiento, la correcta identificación de las fallas en el pavimento y la selección adecuada del tratamiento superficial.

Existen diferentes tratamientos que permiten restaurar ciertas características de la capa de rodadura que ha sido degradada por el paso vehicular y los efectos climáticos, además, durante años se han buscado materiales que eviten que estas degradaciones aparezcan tempranamente en la



superficie creando diversas tecnologías que suelen basarse en diseños especiales para condiciones específicas de clima o de agregados o incluso requieren de maquinaria especial para su aplicación.

Como alternativa adicional a los tratamientos existentes, se propone el uso de polvo de neumáticos fuera de uso (NFU) en una capa de mezcla asfáltica ultradelgada con el objetivo de retardar la aparición de fisuras en la superficie del pavimento.

Las mezclas y cementos asfálticos modificados con NFU han mostrado un incremento en la durabilidad al mejorar la resistencia a la rodera y agrietamiento [2], sin embargo, se ha experimentado que a causa de la alta viscosidad de las mezclas con polvo de neumático, las temperaturas de mezclado y compactación son significativamente más altas que las usadas para la fabricación de mezclas convencionales [3] por lo que utilizar NFU en una carpeta ultradelgada representa el reto a resolver, ya que por un lado el hule aumenta la viscosidad y hace difícil su manejo y, por otro lado, al colocar un espesor tan delgado de mezcla asfáltica, se enfría rápidamente antes de ser compactada por lo que, si se utilizara un cemento asfáltico convencional EKBÉ, un AC-20 o uno modificado con polímeros sería prácticamente imposible de compactar.

En busca de mitigar los problemas mencionados causados por el uso de NFU en la modificación de asfaltos, la nueva tecnología aquí presentada consiste en una mezcla asfáltica fabricada con un asfalto modificado con aditivos que le confieren un alto punto de reblandecimiento aunado a una baja viscosidad a temperaturas entre 120° C y 175° C, lo cual favorece la incorporación del polvo de NFU que se hace por medio de vía húmeda. Es una tecnología orientada a retardar el deterioro de los pavimentos al mejorar su desempeño y como consecuencia extender su vida útil, con la ventaja de facilidad de fabricación y aplicación de la mezcla y, además, se reducen los riesgos sanitarios y medioambientales que representa la acumulación de los NFU al utilizarlos como parte de un tratamiento superficial.

## 2 Objetivo

El objetivo general de la investigación es obtener una alternativa de tratamiento superficial incorporando polvo de NFU para la disminución de propagación de grietas en la superficie del pavimento. Para conseguirlo es necesario alcanzar los siguientes objetivos particulares:

- Definir una formulación adecuada de aditivos que permitan el manejo de la mezcla asfáltica y su compactación en campo para lograr espesores de 1.5 a 2.5 cm.
- Determinar el rango óptimo de temperaturas de mezclado y compactación para una capa ultradelgada con NFU.

## 3 Materiales y métodos

Las especificaciones más recientes para asfaltos modificados con NFU son escasas; en primer lugar, no limitan el porcentaje máximo de hule a utilizar en las mezclas, sin embargo, [4] sugieren el uso entre 4 y 22% para permitir un manejo conveniente del cemento asfáltico modificado. Las normativas se han enfocado principalmente en la medición de la viscosidad y separación, las cuales se ven afectadas directamente por el tamaño de partícula, forma y área superficial del polvo de NFU; la interacción entre el asfalto y el polvo de NFU causa que las partículas de este último se hinchen por la absorción de los componentes más ligeros del asfalto y como consecuencia genere un aumento en la viscosidad [5].

Tomando en cuenta lo anterior, se determinó la granulometría del polvo de NFU y posteriormente se modificó el cemento asfáltico por vía húmeda con 10% y 15% de NFU, utilizando además diferentes aditivos.



Se llevaron a cabo ensayos de viscosidad rotacional y separación para 7 formulaciones diferentes, con el propósito de seleccionar la formulación de aditivos adecuada con la cual se consigan bajas viscosidades y la mínima separación del polvo de NFU en el cemento asfáltico.

Si bien la viscosidad del cemento asfáltico es un parámetro importante para la selección del aglutinante, para determinar la viabilidad de uso e incluso para no comprometer la funcionalidad de los equipos en campo, las mediciones de viscosidad por sí solas carecen de suficiente precisión para describir completamente sus propiedades complejas, por ello, una vez elegida la mejor formulación de asfalto ahulado y aditivo, se realizaron ensayos de viscosidad en el mástico, basados en la metodología propuesta por [6]. El mástico es elaborado con la mezcla de asfalto y filler (material que pasa la malla 200 preferentemente tomado del agregado que se utilizará para el tratamiento), en una relación 1:1 se combinan los dos materiales a 160° C y enseguida se coloca en un molde de 25 mm de diámetro para medir su viscosidad en el reómetro de corte dinámico en un rango de 90° a 150° C.

Se fabricaron tres másticos, el primero con asfalto modificado con aditivo en una proporción que asegura una reducción de viscosidad significativa, adecuada para la aplicación de carpetas delgadas que tienen la particularidad de enfriarse rápidamente por el espesor tan pequeño que se maneja. Este primer mástico sirve como objetivo, por lo que las viscosidades evaluadas con asfalto ahulado deberán alcanzar la curva del mástico base.

El segundo mástico fue elaborado con asfalto-10% de NFU y la mejor formulación de aditivo seleccionada del primer análisis del cemento asfáltico, y por último, se realizó el ensayo de viscosidad en el mástico con asfalto-15% de NFU y la misma formulación de aditivo que el anterior; esto con el fin de elegir el porcentaje de NFU conveniente y cuyo comportamiento en el mástico se asemeja al de referencia.

Partiendo de la formulación que mejores resultados tuvo en las pruebas de separación y viscosidades (de asfalto y mástico), se diseñó la mezcla asfáltica buscando un alto contenido de cemento asfáltico, con el propósito de conseguir un aumento de vida útil de fatiga de la superficie.

Lo anterior se justifica ya que los esfuerzos de tensión que generan las grietas se concentran en el cemento asfáltico y al aumentar el contenido de este se da lugar a una película de asfalto más gruesa que cubre el agregado pétreo a la vez que se disminuyen los vacíos de aire en la mezcla, por lo que las grietas crecen lentamente.

Para el diseño se buscó una granulometría que permitiera incluir un alto porcentaje de asfalto, no obstante, es importante destacar que este contenido está limitado por algunos mecanismos de falla como es la rodera o la exudación de asfalto, de manera que se busca evitar estos deterioros y al mismo tiempo conseguir una macrotextura adecuada para un tránsito cómodo y seguro.

Las mezclas se fabricaron a 175° C y de acuerdo con las curvas de viscosidad del mástico generadas se determinó una temperatura de compactación mínima de 120° C, es decir, es posible tender una carpeta ultradelgada a la temperatura de mezclado y sabiendo que se perderá temperatura rápidamente, se permite compactar en un rango de 175° C (inmediatamente después del tendido) hasta 120° C.

Se utilizó compactación por amasado a 50 giros ya que la formulación de aditivo seleccionada permite una rápida densificación y al adicionar el polvo de NFU por medio de vía húmeda no afectará en los vacíos de aire después del proceso de compactación ya que el polvo de NFU pasa el proceso de digestión desde la modificación del asfalto.

Una vez elaboradas las mezclas de diseño, se fabricaron especímenes para evaluación de susceptibilidad al daño por humedad (TSR), deformación permanente en la rueda cargada de Hamburgo y probetas para el ensayo I-FIT para obtener las características de resistencia al agrietamiento. Estas pruebas se hicieron para tener un parámetro de referencia del desempeño de las mezclas, sin embargo, es importante destacar que son requerimientos solicitados generalmente para



mezclas asfálticas de alto desempeño de capas estructurales y no para tratamientos superficiales como es el propuesto en este trabajo. Además, se evaluó la resistencia al desgranamiento mediante el ensayo Cántabro, con el propósito de identificar la calidad del asfalto modificado con NFU, la capacidad de cohesión que le confiere a la mezcla que se traducirá en durabilidad de la carpeta.

Por último, se llevó a cabo la aplicación de carpeta ultradelgada utilizando polvo de NFU en un tramo con extensión de 350 m en un camino de dos carriles con agrietamiento severo, en la localidad de Tolú, en Colombia, resaltando que tras 11 meses de su colocación no ha mostrado reflexión de grietas y se encuentra en excelentes condiciones.

#### 4. Resultados

Esta sección incluye los resultados obtenidos en los ensayos a los que fueron sometidos los cementos asfálticos y las mezclas.

##### 4.1. Características del polvo de NFU

Para poder incorporar el polvo proveniente de neumáticos fuera de uso en el cemento asfáltico, se requiere de un procedimiento previo de trituración para que las partículas de hule sean suficientemente finas y se facilite la modificación del asfalto. Además, para el análisis reológico del asfalto ahulado es necesario tener un tamaño del grano menor a 0.5 mm (tamiz #30) para considerar que el polvo de NFU no afecta las mediciones en el reómetro de corte dinámico (DSR) si el ensayo se hace con platos paralelos. En la Tabla 1 se presenta la granulometría del hule que se utilizó en este trabajo y se observa que el tamaño máximo es el correspondiente al tamiz No. 30.

Tabla 1. Granulometría del polvo de NFU.

Designación del tamiz	No. 30 0.60 mm	No. 50 0.30 mm	No. 100 0.15 mm	No. 200 0.075 mm	Pasa 200
Porcentaje que pasa (%)	99.27	43.04	10.73	0.81	0.08

##### 4.2. Caracterización del cemento asfáltico modificado con NFU y aditivos

###### *Viscosidad rotacional*

La viscosidad es uno de los parámetros principales para el manejo de asfaltos modificados con NFU pues de ella depende un manejo adecuado del ligante sin comprometer el funcionamiento de los equipos (bombas, tanques, espreas, etc.). La matriz de experimentos presentada en la Tabla 2 muestra los resultados obtenidos del ensayo de viscosidad rotacional Brookfield; se observa que el tiempo de dispersión del grano de NFU es determinante para tener buenos resultados de viscosidad, ya que debe darse lugar al proceso de “digestión” del hule: las partículas de NFU absorben los componentes más ligeros del asfalto y se hinchan, además es importante el orden en que se añaden los aditivos y el polvo de NFU.

La combinación con 10% de NFU y la formulación de aditivo E, con un tiempo de agitación de 3 h y 30 min fue la composición con mejores valores de viscosidad, cumpliendo sobradamente con la especificación para México (máximo 3 Pa·s) y también holgadamente la especificación colombiana (entre 1.5 y 5 Pa·s).

###### *Separación*

La siguiente característica determinante para la selección de la mejor formulación de asfalto, NFU y aditivo, fue la separación. Si bien esta propiedad no es indispensable, es deseable que el grano de



NFU no se sedimenta a pesar de que generalmente en la modificación por vía húmeda se requiere de un sistema de agitación.

La Tabla 2 incluye los resultados de este ensayo y a partir de ellos fue posible corroborar que la mejor formulación contiene 10% de NFU y la formulación de aditivo E, al igual que en la práctica de viscosidad en el cemento asfáltico.

Tabla 2. Resultados del ensayo de viscosidad rotacional y separación de las diferentes formulaciones utilizando asfalto PG 64-22 como base.

Formulación de aditivo	% NFU	Viscosidad rotacional (Pa·s)		Separación del polvo de NFU (° C)
		135° C	175° C	
Formulación A	10% <sup>II</sup>	4.578	1.037	10.5
Formulación B	10% <sup>II</sup>	10.09	1.675	8
Formulación C	10% <sup>II</sup>	4.028	1.05	15
Formulación D	10% <sup>II</sup>	6.411	1.834	13
Formulación E	10% <sup>III</sup>	5.323	1.195	12
<b>Formulación E</b>	<b>10% <sup>II</sup></b>	<b>1.831</b>	<b>0.930</b>	<b>5</b>
Formulación E	15% <sup>II</sup>	7.052	1.351	8.5

<sup>I</sup>Todas las mediciones de viscosidad se realizaron con la aguja No. 27.

<sup>II</sup> La modificación se llevó a cabo añadiendo primero el aditivo en el asfalto y posteriormente agregando el polvo de NFU paulatinamente y manteniendo en agitación a una velocidad de 400 rpm, durante 3 h 30 min.

<sup>III</sup> 2 horas de agitación del polvo de NFU (250 rpm), posteriormente se añade el aditivo.

El paquete de aditivos con el que se obtuvieron los resultados esperados (Formulación E) se identifica químicamente como una ‘amido-amina’; en lo sucesivo el asfalto modificado con aditivo se referirá a la modificación con este producto junto con el porcentaje que sea seleccionado de NFU.

Además, se observó que la formulación de aditivo E, contribuye a que el hule se mantenga disperso en la matriz de asfalto, no obstante, es recomendable mantener la agitación constante para mejores resultados. No se debe prescindir de este último procedimiento pues se sabe que el polvo de NFU no se integra en el cemento asfáltico, sus partículas únicamente se esparcen en el aglutinante.

#### *Viscosidad en el mástico*

La medición de la viscosidad en el mástico es esencial en este estudio pues se tienen dos tareas que resolver:

1. Determinar la proporción más conveniente de NFU en la mezcla.
2. Establecer las temperaturas de tendido y compactación de la mezcla asfáltica para el tratamiento.

Si bien estos puntos suelen solucionarse utilizando las gráficas de viscosidad-temperatura del asfalto, no es una metodología válida para asfaltos modificados con hule. Es por lo anterior que se utilizó la viscosidad del mástico como ensayo para simular el fenómeno ocurrido en campo. En la gráfica de la Figura 1 se exponen las curvas de viscosidad elaboradas con a) asfalto modificado con aditivo (fórmula especial para tratamiento ultradelgado), b) asfalto modificado con la formulación de aditivo seleccionada a partir de los ensayos anteriores (formulación E) y 10% de NFU y c) asfalto modificado con la misma formulación de aditivo E seleccionada para el inciso anterior y 15% de NFU.

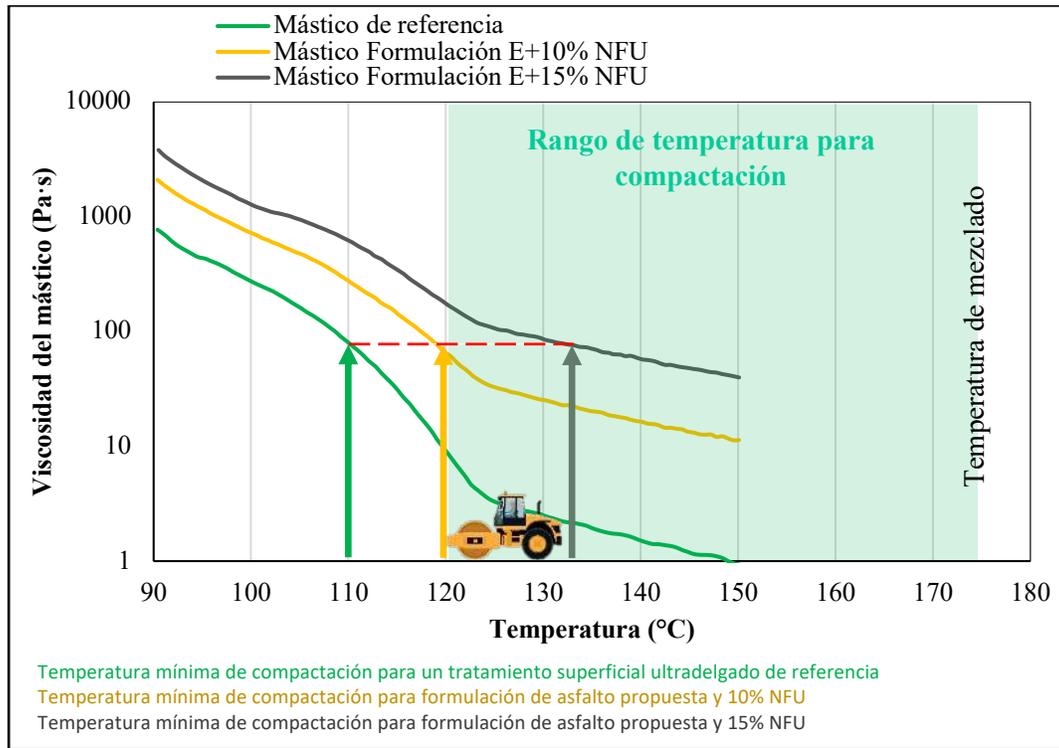


Figura 1. Curvas viscosidad vs temperatura del mástico.

La viscosidad adecuada es aquella que permita mezclar y compactar en condiciones de temperatura apropiadas para una carpeta ultradelgada.

De la gráfica anterior se deduce que la formulación que contiene 10% de NFU se acerca más a la fórmula para capa ultradelgada sin hule. Para esta última, se ha comprobado que puede alcanzar 110° C como mínimo de temperatura para su compactación, por lo que, si se reproduce el mismo comportamiento para una mezcla asfáltica con aditivo y 10% de NFU, es posible compactar una capa ultradelgada alcanzando una temperatura de hasta 120° C y alrededor de 135° C como mínimo para una mezcla que contenga 15% de polvo de neumático.

Dado que menor porcentaje de NFU da seguridad para que la mezcla sea más trabajable y una vez establecida la temperatura mínima de compactación, se determinó utilizar 10% de NFU en la modificación de asfalto más la formulación de aditivos que mejor viscosidad y valores de separación tuvo (Formulación E).

#### *Propiedades reológicas del asfalto modificado (aditivo + polvo de NFU)*

El asfalto utilizado en el tratamiento propuesto debe cumplir con ciertas características reológicas, sin embargo, los resultados deberán interpretarse con cuidado, es decir, realizar ensayos en el DSR utilizando polvo de neumático puede resultar ambiguo ya que es posible que no generar el espacio correcto en la muestra (gap) puede simular mediciones en un aglutinante parecido a un mástico, lo que generaría confusión en los resultados haciéndolos parecer siempre como un cemento asfáltico con capacidades muy resistentes, es por esta razón que deberán ser comprobados con el comportamiento de la mezcla asfáltica.

El paquete de aditivos químicos seleccionados para la formulación del cemento asfáltico, permiten alcanzar un alto valor en la relación de módulo de corte complejo sobre el Seno del ángulo de fase



( $G^*/\text{Sen}\delta$ ). En la Tabla 3 se presentan los valores obtenidos para la evaluación de grado de desempeño del cemento asfáltico modificado; en la primera parte se observa que el grado de desempeño de este asfalto es PG 82 y si nos enfocamos en que la base utilizada es un PG 64-22, es posible concluir que con la adición del NFU y aditivo se logra rigidizar haciendo que sea más resistente a la deformación permanente.

Una vez evaluada la condición original del asfalto modificado, se somete a un procedimiento de envejecimiento en RTFO (horno rotatorio de película delgada). En esta fase buscamos que no aumente demasiado el módulo pues esto significa endurecimiento del asfalto por oxidación, lo cual aumenta la propensión de fisuración. En la segunda parte de la tabla es posible observar que el grado reológico a alta temperatura no cambia, es decir, presenta un índice de envejecimiento muy bajo, característica que favorece en el desempeño del cemento asfáltico.

La última parte de la tabla presenta los resultados del ensayo a temperatura intermedia del asfalto modificado tras ser sometido a envejecimiento a largo plazo en PAV (vasija de envejecimiento a presión). Se puede notar que a 25° C el módulo de corte por el Seno del ángulo de fase se mantiene muy por debajo del valor mínimo de la especificación de Superpave, lo que demuestra que el asfalto es suficientemente dúctil y esta propiedad ayudará en el tratamiento a resistir el reflejo de grietas.

Tabla 3. Propiedades reológicas del asfalto modificado con la formulación propuesta.

<b>Condición Original</b>			<b>Condición RTFO</b>			
<i>Especificación: <math>G^*/\text{Sen}\delta</math> mín 1.0 kPa</i>			<i>Especificación: <math>G^*/\text{Sen}\delta</math> mín 2.2 kPa</i>			
Temperatura de ensayo (°C)	$G^*/\text{Sen}\delta$ (kPa)	$\delta$ (°)	Temperatura de ensayo (°C)	$G^*/\text{Sen}\delta$ (kPa)	$\delta$ (°)	
82	1.285	72.2	82	2.232	69.25	
88	0.81	73.77	88	1.35	71.17	
<i>Temperatura crítica de falla (°C):</i>		85.3	<i>Temperatura crítica de falla (°C):</i>		82.2	
<b>Condición PAV</b>			<b>BBR</b>			
<i>Especificación: <math>G^*\cdot\text{Sen}\delta</math> máx. 5000 kPa</i>			<i>Especificación: m-value mín. 0.300</i> <i>Especificación: S máx. 300 MPa</i>			
Temperatura de ensayo (°C)	$G^*\cdot\text{Sen}\delta$	$\delta$ (°)	Temperatura de ensayo (°C)	S (medido)	S (estimado)	m-value
25	1966.179	37.84	-12	70.5	70.6	0.301
22	2533.734	36.57		71.3	71.2	0.312
19	3224.545	35.33	-18	152	151	0.256
16	4061.184	34.13		139	139	0.269
13	5066.198	32.99	<i>Temperatura crítica de falla m (°C):</i>		-22.9	
<i>Temperatura crítica de falla (°C):</i>		13.2	<i>Temperatura crítica de falla S (°C):</i>		-34	

Para terminar la evaluación del grado de desempeño, se evaluó el grado inferior del asfalto modificado y en los resultados mostrados en la parte inferior de la Tabla 3 se refuerza la capacidad del cemento asfáltico para ayudar a solucionar problemas de fisuración, en este caso a bajas temperaturas. Se

confirma que la formulación del asfalto con 10% de NFU y aditivo E no afectará el comportamiento del tratamiento a baja temperatura como suele ocurrir en asfaltos modificados con polímero.

#### 4.3. Evaluación del desempeño de las mezclas

Para el diseño de mezcla, la estructura del agregado mineral se definió a partir del ajuste de la curva combinada de los pétreos dentro de los parámetros establecidos para mezclas Superpave. Los agregados utilizados son de naturaleza basáltica y producto de trituración que corresponden a sello (3/8") y arena triturada de cono. Los pétreos cumplen con todas las propiedades físicas y resistentes de los agregados para mezclas de alto desempeño y la distribución granulométrica de las mezclas fabricadas se presenta en la Figura 2.

Para el diseño de mezclas se determinó un contenido óptimo de asfalto de 7.5%, alcanzando un volumen de vacíos de aire de  $4\% \pm 0.5$  y utilizando una compactación por amasado de 50 giros ya que la formulación del cemento asfáltico utilizado permite una densificación muy rápida.

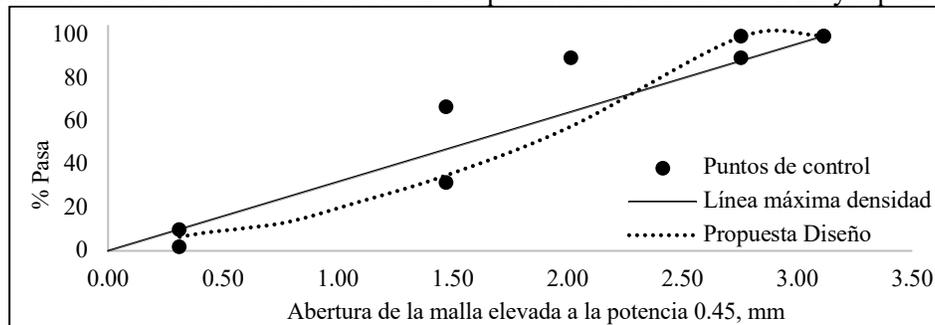


Figura 2. Distribución granulométrica de los agregados pétreos ajustada a los puntos de control para un tamaño nominal de 3/8".

Una vez fabricadas las mezclas de diseño, se evaluó la susceptibilidad al daño por humedad TSR (AASHTO T-283), la propensión a la deformación permanente y el fenómeno de agrietamiento para medir el desempeño de las mezclas analizadas. Si bien no son ensayos propios para la evaluación del comportamiento de un tratamiento superficial se decidió añadir esta serie de pruebas para corroborar la calidad de la mezcla comparada con una mezcla control que contiene NFU pero no la formulación de aditivos que se proponen para el tratamiento ultradelgado.

Para el parámetro de deformación permanente se utilizó la rueda cargada de Hamburgo (AASHTO T-324) y para el factor de agrietamiento se determinó el índice de flexibilidad (FI) a través del ensayo de energía de fractura semicircular SCB I-FIT (AASHTO TP-124). Para dichos análisis se fabricaron cuatro réplicas de geometrías distintas según el ensayo, todas con un porcentaje de vacíos de aire objetivo del  $7\% \pm 0.5$  y fueron ensayadas tras ser sometidas a un proceso de envejecimiento a corto plazo indicado de acuerdo con la absorción del agregado pétreo.

Se fijaron temperaturas de mezclado y compactación de  $175^{\circ} \text{C} \pm 5$  y  $120^{\circ} \text{C} \pm 5$  respectivamente para todas las mezclas.

En la Tabla 4 aparecen los resultados obtenidos del ensayo TSR, donde se destaca principalmente que la resistencia promedio de los especímenes acondicionados para las mezclas formuladas para el tratamiento superficial (con aditivos y NFU) no disminuye significativamente respecto a los valores obtenidos en las mezclas control (sin aditivos), por lo tanto, se considera que el tratamiento soportará el daño inducido por humedad y se comportará de manera similar a una mezcla ahulada en este aspecto.

Tabla 4. Resultados del ensayo a tracción indirecta de especímenes sometidos al daño por humedad.

<i>Mezcla Control 10% NFU sin aditivos</i>		<i>Tratamiento superficial con NFU y aditivo</i>	
Resistencia promedio del subconjunto acondicionado (kPa)	661.51	Resistencia promedio del subconjunto acondicionado (kPa)	589.43
Resistencia promedio del subconjunto no acondicionado (kPa)	1011.74	Resistencia promedio del subconjunto no acondicionado (kPa)	799.31
<b>(TSR) Relación de resistencia a la tensión indirecta (%)</b>	<b>65.38</b>	<b>(TSR) Relación de resistencia a la tensión indirecta (%)</b>	<b>73.74</b>

Para el análisis del desempeño mecánico, se obtuvo por un lado el valor promedio de la deformación generada en los especímenes de prueba una vez ejercido el peso de las ruedas, por otro lado, el potencial de agrietamiento representado por el índice de flexibilidad (FI).

En la gráfica de la Figura 3a) se contrasta la profundidad de rodera final de las mezclas analizadas, recalcando que a pesar de que la mezcla del tratamiento superficial propuesto se deformó más que la mezcla control, al ser un ensayo riguroso incluso para mezclas convencionales, el tratamiento consigue soportar las 20 000 pasadas, lo cual sería muy difícil soportar para un tratamiento superficial común. Respecto a la caracterización del fenómeno de agrietamiento, se presenta la curva típica del ensayo I-FIT, donde es posible comparar el efecto de resistencia al agrietamiento que presentan las mezclas y que es el parámetro esencial que se pretende resolver con el nuevo tratamiento superficial con NFU. En la Figura 3b) se destacan los parámetros más relevantes de las curvas carga-desplazamiento; en primer lugar, se tiene que la energía de fractura de la mezcla control es ligeramente mayor que la mezcla del nuevo tratamiento, sin embargo, al analizar otros aspectos del comportamiento ante la fractura es posible darse cuenta que la mezcla para el tratamiento superficial tiene un mejor índice de flexibilidad que la mezcla control que es ejemplo de aquellas que suelen utilizarse para capas estructurales. Además, la pendiente de la curva de la mezcla del tratamiento es menor que la de la mezcla control, lo cual indica de es un material más dúctil y que tiene mejor desempeño ante la propagación de grietas.

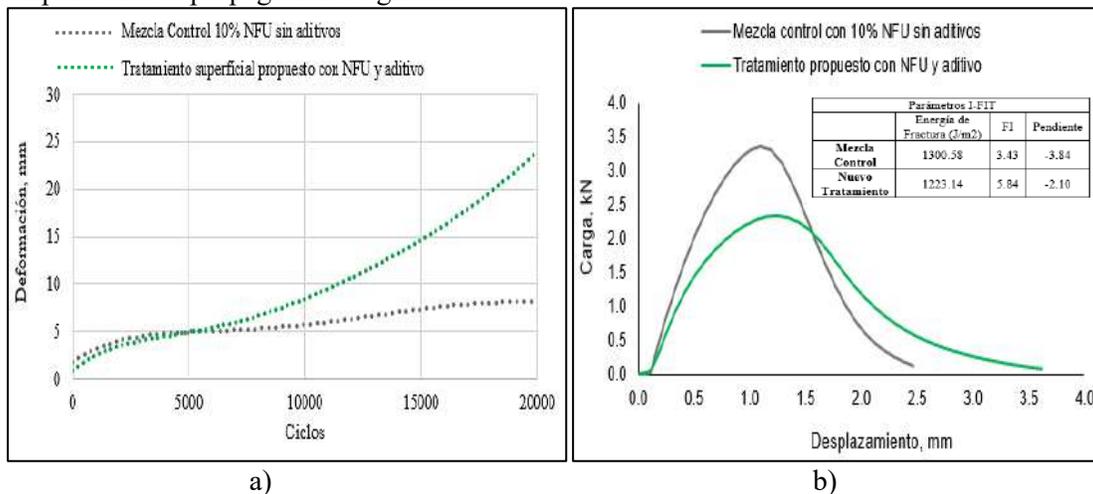


Figura 3. a) Profundidad de rodera de las mezclas analizadas. b) Curva Carga vs Desplazamiento representativa del ensayo I-FIT.

Para caracterizar las mezclas de acuerdo con el grado en que estas son capaces de resistir el desprendimiento o “stripping”, se tienen los siguientes resultados obtenidos del ensayo Cántabro (AASHTO TP-108). La Tabla 5 muestra la pérdida por desgranamiento de las mezclas, siendo la

mezcla del nuevo tratamiento la que alcanzó mejores resultados, resaltando que el promedio de la pérdida Cántabro de esta mezcla se encuentra muy por debajo de lo especificado para tratamientos superficiales usuales (máx. 15%).

Tabla 5. Pérdidas por desgranamiento en el ensayo Cántabro.

<i>ID</i>	<i>Peso inicial (g)</i>	<i>Peso final (g)</i>	<i>Pérdida Cántabro (%)</i>	
Mezcla Control 10% NFU sin aditivos	1110.3	1089.2	1.90	3.03%
	1118	1075.4	3.81	
	1118.5	1080.7	3.38	
Tratamiento propuesto con NFU y aditivo	1104.2	1090.4	1.25	1.69%
	1100.3	1081	1.75	
	1108.5	1085.7	2.06	

Por último, a nivel de laboratorio y como prueba preliminar de la apariencia de este nuevo tratamiento se fabricó un mosaico de 1 m x 0.5 m y de dos centímetros de espesor compactado colocado en un camino con tráfico pesado de medio a alto y con agrietamiento severo. En las imágenes de la Figura 4 se muestra la superficie antes y después del tratamiento (inmediatamente después de la colocación y después de un año y seis meses de su exposición).



Figura 4. Apariencia del tratamiento superficial con polvo de NFU.

- a) Superficie antes del tratamiento superficial. b) Mosaico de prueba de 2 cm de espesor.  
c) Tratamiento superficial 1 ½ año de exposición.

Se puede notar en las imágenes que la mezcla del tratamiento superficial tiene una buena macrotextura y es posible lograr mezclas con cualquier textura que se desee teniendo en cuenta el tamaño máximo del agregado pétreo disponible. Para utilizar polvo de NFU en un tratamiento superficial se recomienda una granulometría preferentemente gruesa y abierta para admitir mayor cantidad de asfalto, lo que a su vez beneficiará para retardar la propagación de fisuras. El mosaico no ha presentado reflejo de grietas después de un año y seis meses de su aplicación.

La prueba se escaló en un tramo de prueba en Colombia, en la localidad de Tolú en un camino de dos carriles concesionado con dimensiones de 350 m x 11.3 m x 2 cm, con alto nivel de tráfico pesado y que presentaba una condición de agrietamiento severo, razón por la que se decidió probar con una carpeta ultradelgada utilizando NFU. En la Figura 5 se observa el estado de la carretera antes de la aplicación y una vez colocado el tratamiento superficial.



Figura 5. Condiciones de la vía antes y después de la colocación de carpeta ultradelgada con incorporación de NFU y características de la mezcla.

El asfalto con la formulación de aditivo y 10% de NFU modificado en planta arrojó un valor de punto de reblandecimiento de 106° C y una viscosidad de 169.5 cP lo que contribuye a la buena trabajabilidad evidenciada en el proceso de aplicación. La vía en la cual se realizó la prueba contaba con gran cantidad de grietas por lo que se optó por sellarlas con el mismo tipo de asfalto utilizado para la mezcla. El tendido de la carpeta ultradelgada fue muy ágil debido al espesor tan pequeño; las temperaturas de mezclado y compactación fueron de 175° C y 130° C respectivamente.

Se tomaron muestras de la mezcla fabricada en planta para analizarla en laboratorio, de donde se obtuvieron datos muy satisfactorios teniendo un promedio de profundidad de rodera de 7.1 mm evaluado en la rueda cargada de Hamburgo y un índice de flexibilidad de 19.2. Estos resultados se muestran graficados en la Figura 6 en el diagrama de diseño balanceado donde se comprueba que la mezcla con polvo de neumático y la proporción adecuada de aditivo logra un comportamiento adecuado mitigando problemas tanto de rodera como de agrietamiento según se muestra en el diagrama de interacción al localizarse en el primer cuadrante como una mezcla “rígida y flexible”; además, se pudo notar que la mezcla para este tratamiento no presentó problemas de desprendimiento.

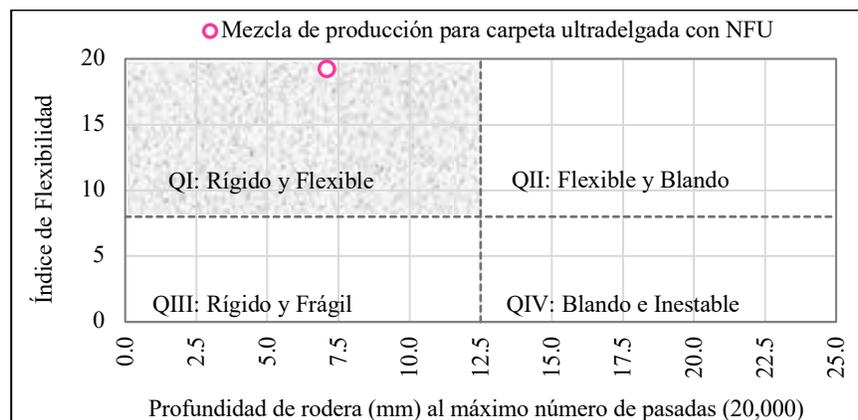


Figura 6. Diagrama de interacción del desempeño para mezcla de carpeta ultradelgada con NFU.



## 5. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en las diferentes etapas de esta investigación se tienen las siguientes conclusiones:

- La modificación de las propiedades reológicas en el cemento asfáltico es primordial para el tratamiento propuesto tales como el aumento del grado PG, el aumento del punto de ablandamiento y la reducción de la viscosidad a temperaturas mayores a 120° C para incrementar el tiempo hábil que se tiene para compactar una carpeta de bajo espesor, ya que al ser una capa tan delgada se enfría rápidamente.
- El polvo de NFU en mezclas asfálticas funcionará para absorber asfalto y de esta manera, hacer posible que las mezclas contengan mayor cantidad de aglutinante y esto a su vez beneficie en retardar la propagación de fisuras y aplazar el agrietamiento de la capa superficial del pavimento.
- De acuerdo con los resultados obtenidos, es posible afirmar que se consiguió diseñar un tratamiento superficial con NFU con mejores características resistentes incluso que una mezcla ahulada convencional. Se logró superar los problemas comunes que se tienen al fabricar una mezcla con NFU y compactar una capa con espesores tan pequeños con un material que suele tener una alta viscosidad. Adicionalmente se tienen ventajas ambientales correspondientes a la utilización de materiales reciclados (estos beneficios no fueron cuantificados en este estudio, sin embargo, la eliminación de neumáticos de desecho y su aplicación en este tipo de tratamientos representa un gran avance en pro de la sustentabilidad).
- A partir de los resultados obtenidos en esta investigación, se puede decir que la granulometría juega un papel muy importante para diversos aspectos del diseño de una mezcla y en especial del tratamiento superficial que se propone, por lo que se recomienda una granulometría discontinua o una abierta para que los vacíos se llenen con asfalto ahulado y no con finos, pero esto dependerá de las características del agregado mineral disponible. Además, para mejorar el índice de rugosidad y macrotextura de la capa superficial la mezcla deberá tener una granulometría más bien escalonada.
- Las ventajas del nuevo tratamiento propuesto permiten además que la aplicación sea sencilla, con la posibilidad de tender la mezcla asfáltica con cualquier tipo de máquina extendedora (finisher) y que la modificación del cemento asfáltico se pueda hacer en cualquier planta de mezcla en caliente.
- Este tratamiento superficial no se limita a un clima específico y es posible abrir al tráfico después de 30 minutos de su aplicación.

## 6. Referencias

- [1] Salomón, D. (2012). *Conservación de pavimentos: Conservando la inversión del patrimonio vial*. Perú: Construyendo caminos.
- [2] Kumar-Akisetty, C. K. (2008). *Evaluation of warm asphalt additives on performance properties of CRM binders and mixtures*. Tesis doctoral: Clemson University.
- [3] Amirkhanian, S. N. (2003). *Establishment of an Asphalt-Rubber Technology Service (ARTS)*. (págs. 557-588). Brasilia: Proceedings of the Asphalt Rubber 2003 Conference.
- [4] Bermejo-Muñoz, J.M., Gallego-Medina, J., y Saiz-Rodríguez, L. (2014). *Guía para la fabricación de betunes con polvo de neumático*. Madrid: Signus Ecovalor.
- [5] Dong, D., Huang, X., Li, X., y Zhang, L. (2012). *Swelling process of rubber in asphalt and its effect on the structure and properties of rubber and asphalt*. Construction and Building Materials. 29:316-322.
- [6] Gutiérrez-Muñiz, A. (2018). *Nuevo tratamiento superficial de rápida apertura al tránsito y fácil aplicación*. Fundación Asociación Española de la Carretera. Séptima edición.