



# Diseño de mezcla asfáltica con materiales de desecho

## Hot mix asphalt design with waste materials

Rafael Villegas<sup>1</sup>, Jose Aguiar<sup>1</sup>, Luis Loria<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Costa Rica, LanammeUCR, Ciudad de la investigación, San Pedro Montes de Oca, Costa Rica  
rafael.villegas@ucr.ac.cr, teléfono: + 50 6 25112741

### INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historial del  
artículo:

Recibido  
01-05-2017  
Aceptado  
15-01-2018  
Publicado  
28-02-2018

Palabras Clave:  
Asfalto modificado  
Reciclaje  
Materiales de  
desecho  
Análisis físico-  
químico

Article history:

Received  
01-05-2017  
Accepted  
15-01-2018  
Available  
28-02-2018

Keywords:  
Modified asphalt  
Asphalt mixture  
Recycling  
Waste materials  
Physicochemical  
analysis

### Resumen

Existe a nivel mundial una problemática cada vez más seria y radica en las grandes dificultades en la gestión de los residuos no biodegradables que provienen de la Industria.

Costa Rica posee el 5% de la biodiversidad del mundo, lo cual hace de esto una industria turística masiva y rentable para el país que hay que salvaguardar. Un método factible de tratar los materiales de desecho es el uso de los mismos en mezcla asfáltica. Como parte de esta investigación, bolsas de polietileno, polipropileno y bumper de coches se han evaluado como posibles modificadores de asfalto. El proceso de homogeneización de estos residuos dentro de la matriz de bitumen se evaluó por medio de Microscopía de Fuerza Atómica (AFM). Las propiedades de los modificantes se evaluaron mediante análisis físico-químico, y el desempeño del modificado se analizó por medio de deformación permanente y fatiga (DSR).

Para la mezcla asfáltica se realizaron ensayos de deformación permanente con el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA), se verificó la rigidez de la mezcla mediante el Módulo Resilente a la Tensión Indirecta y se estudió la resistencia al daño por humedad con base en la Resistencia Retenida a la Tensión Diametral. Se pudo determinar cuantitativamente que el material de desecho beneficia el comportamiento del asfalto, y de la mezcla asfáltica, principalmente aportando a la resistencia a la deformación permanente y al daño por humedad. El aporte en cuanto a fatiga no fue significativo. Sin embargo, el modificador no generó un efecto negativo en ninguno de los parámetros analizados.

### Abstract

Non-biodegradable waste management is a current problem affecting society in many ways. A reliable method to manage waste products is to incorporate them on an asphalt mixture. Therefore, this study proposes the use of polyethylene and polypropylene bags, as well as waste car bumpers, as asphalt additives. The homogeneity of the resulting asphalts was measured by means of Atomic Force Microscopy. Additionally, physicochemical analysis and rheological evaluation of modified binders, in terms of permanent deformation and fatigue resistance, were obtained. Mechanical properties of hot-asphalt mixture produced with the modified binders were tested by means of Asphalt Pavement Analyzer, Indirect Tensile Test and Tensile Stress Ratio. The results showed that the waste materials quantitatively improve the performance of the asphalt binder and the asphalt mixture. The additives increased the permanent deformation and moisture damage resistance of the binder. On the other hand, fatigue resistance was not significantly improved. However, the additives do not reduce the initial binder performance, according to the analyzed parameters. This study helps advancing the use of alternative materials for binder modification that might significantly improve the mechanical properties of asphalt mixtures.



## 1. Introducción.

El alto costo de los combustibles hacen que estos subproductos de la refinación del crudo sean los más apetecidos por dicha industria, esto incide directamente en que los procesos de refinación sean cada vez más eficientes, degradando la calidad de los asfaltos. Por tal motivo, se requiere del uso de asfaltos modificados y mezclas no convencionales, con el fin de desarrollar pavimentos idóneos con un mejor desempeño a la deformación permanente y a la fatiga.

La experiencia de la modificación del asfalto con materiales de desecho es poca, con excepción de ciertos polímeros reciclados y comerciales [1,2]. Estos últimos cuentan con estudios que dan soporte a mejoras específicas que se buscan en el asfalto. Por lo general, lo que se espera es un aumento en la resistencia a la deformación permanente, a la fatiga y/o al daño por humedad, además de reducir la susceptibilidad térmica [3].

El comportamiento de las mezclas asfálticas modificadas depende de las propiedades, composición y características del polímero a utilizar [4]. Por tanto, el objetivo principal de modificar el asfalto es mejorar las propiedades mecánicas bajo las condiciones de servicio a las que este estará sometido (temperatura, clima, zona geográfica y tipo de tráfico). De esta manera, se busca diseñar materiales resistentes a los esfuerzos de tensión, corte y a la deformación, generando que los mismos se desempeñen apropiadamente y presenten una mayor vida útil de servicio.

Considerando que la modificación de asfaltos es una práctica cada vez más común, es de interés identificar si la modificación puede ser realizada mediante el uso de materiales que pueden presentar un impacto ambiental severo debido a razones como contaminación o dificultad de desecho. Para el caso de Costa Rica, algunos candidatos son el bumper de automóviles, el polipropileno y polietileno para el empaque de banano. Es de resaltar que debido a las políticas país, cada vez más los desechos se vuelven en aliados para el aporte en la ciencia y tecnología, debido a una creciente preocupación de la

ciudadanía por analizar como reutilizarlos y reciclarlos [5]. Con esta investigación se pretende darles un mejor uso, para así evitar su degradación y reducir las emisiones de gases contaminantes.

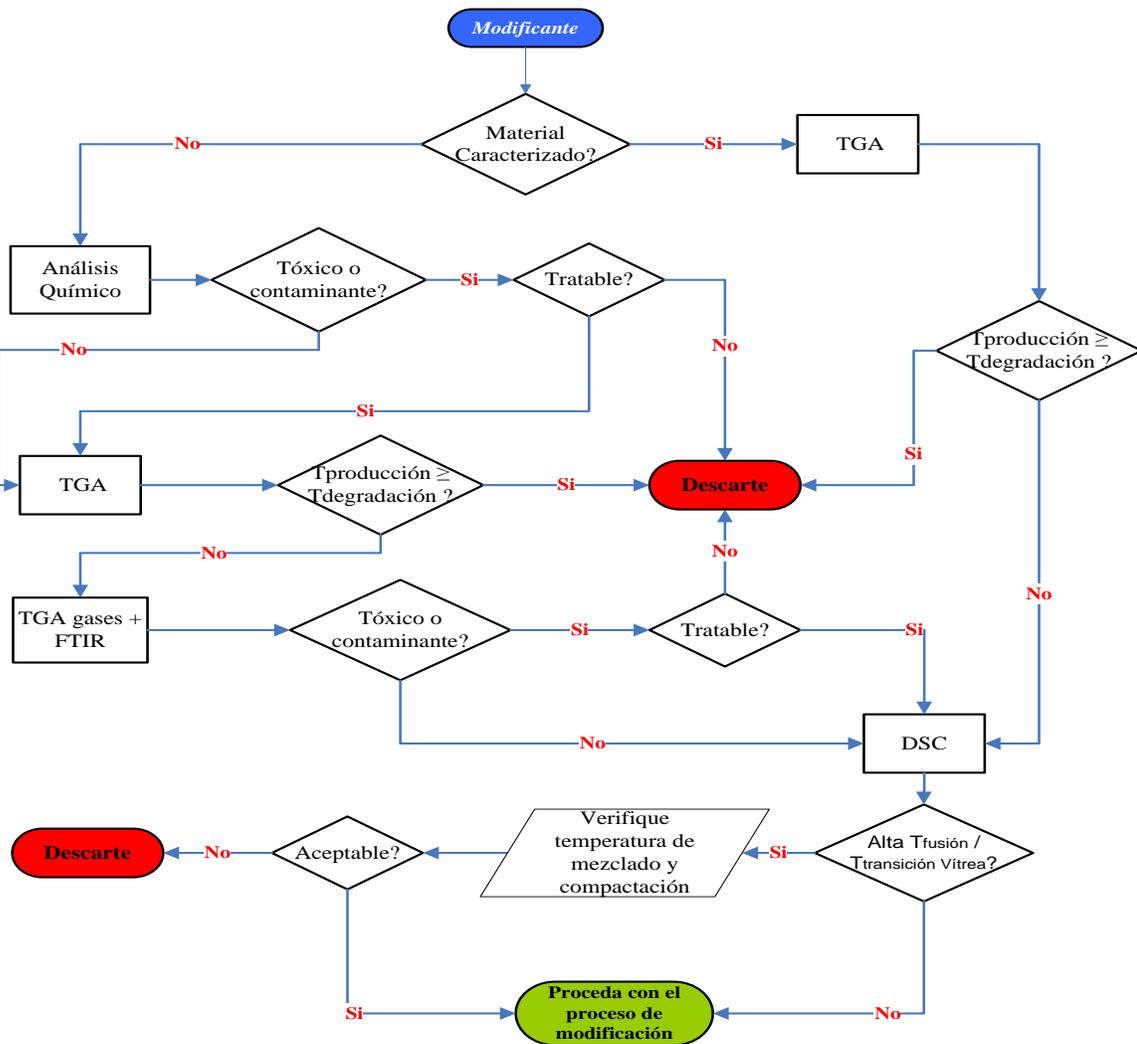
## 2. Metodología de análisis.

Es importante concebir este proyecto desde varias aristas, las cuales le brindan un alto grado de integralidad no sólo de desempeño en la obra, si no de diversos elementos asociados. En primer lugar el mejoramiento en las propiedades de la mezcla asfáltica. Por otro lado el impacto ambiental y social, el cual se ve plasmado no sólo por el manejo de los desechos a utilizar, sino también por la culturización de la población en la separación de dichos desechos para la construcción de la obra. Por último, el impacto económico que pudiera favorecer la economía del proyecto también es fundamental. La siguiente metodología se centra sobre el componente de viabilidad técnica del proyecto.

### 2.1 Análisis del modificante.

En todo proceso de modificación de asfaltos y mezclas asfálticas es de suma importancia el analizar el material a utilizar como modificante, máxime si este es un material de desecho. La pertinencia de analizar el material modificante radica en el control que se tiene del mismo en cuanto a composición química, homogeneidad, toxicidad, temperatura de degradación, temperatura de fusión o de otro tipo de transiciones. Este tipo de análisis se realizó bajo la metodología descrita en la **Figura 1**.

La importancia fundamental de la identificación de la naturaleza del polímero y de sus propiedades fisicoquímicas radica en que se tiene mejor control del proceso de modificación, se conoce su homogeneidad, se tiene certeza si es el producto ofrecido por el vendedor, además de corroborar la factibilidad de modificar el asfalto con este material. En la **Figura 2** se presenta el caso del polietileno a manera de ejemplo.



**Tproducción:** Temperatura a la cual se produce la mezcla asfáltica, **Tdegradación:** Temperatura a la cual el polímero se degrada, **T fusión:** Temperatura a la cual el polímero funde y es más fácil su incorporación al asfalto, **Ttransición vítrea:** Temperatura a la cual las propiedades mecánicas de un plástico / adhesivo cambian radicalmente debido a los movimientos internos de las cadenas poliméricas.

Figura 1. Metodología Integral de Incorporación de Modificantes en Matrices Asfálticas

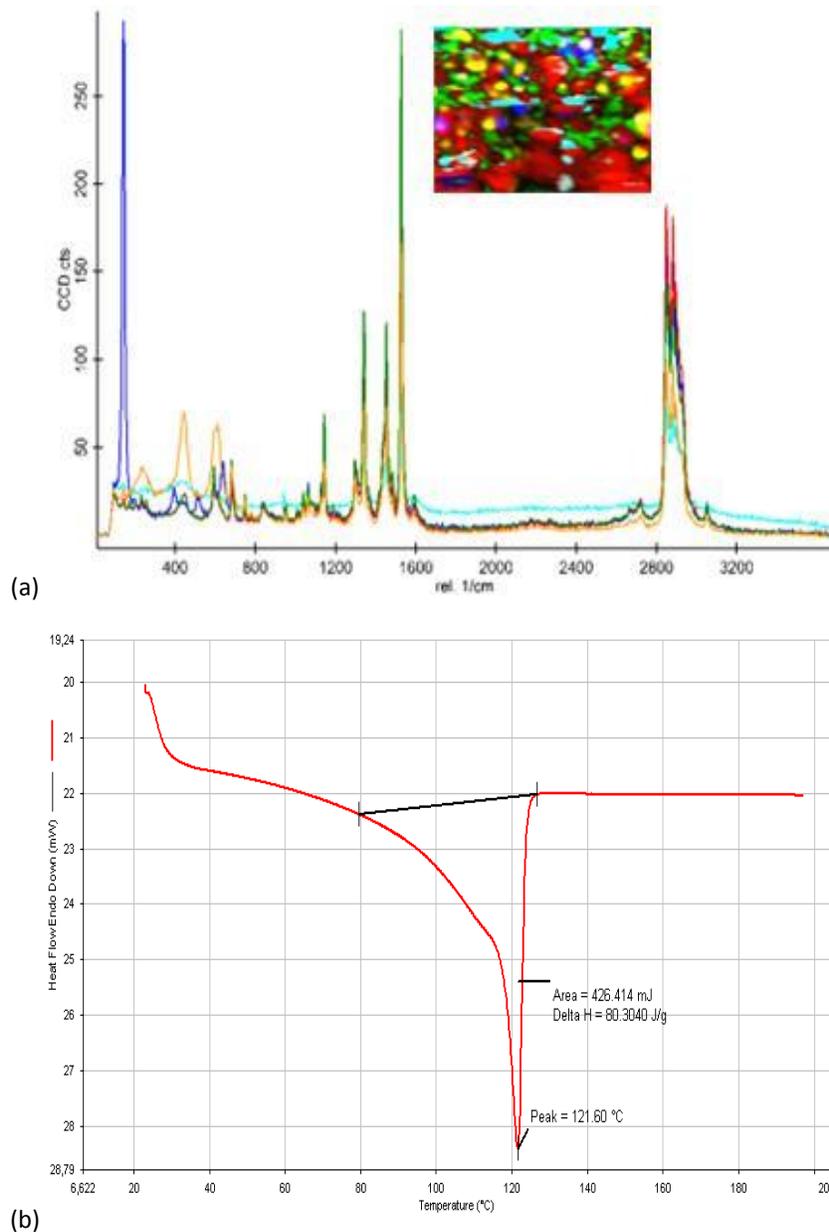


Figura 2. (a) Espectro Raman y (b) Análisis DSC.

El Análisis Raman de las bolsas plásticas muestra la composición química del material, en este caso el polietileno es de alta densidad, el cuadro de colores inscrito en el espectro (**Figura 2a**), por su diversidad de colores indica que el material analizado es heterogéneo, es decir presenta otros tipos de polímeros que no son polietileno de alta densidad o cabe la posibilidad de que exista una degradación de dicho material. En el caso del análisis de DSC, Calorimetría de Barrido Diferencial, (**Figura 2b**) se observa por la apertura del termograma en el intervalo de fusión

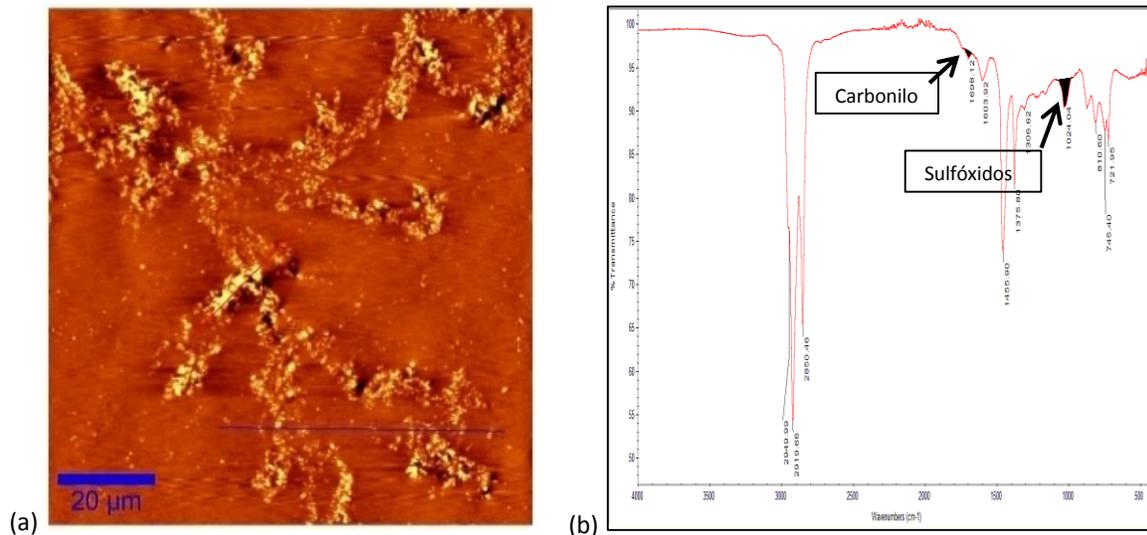
que el material es heterogéneo. Por otro lado se puede verificar que la temperatura de fusión de la muestra es de 121°C, dato importante a considerar en el proceso de modificación asfáltica y que es un parámetro de identificación de la muestra. En cuanto al Análisis de TGA (Análisis Termogravimétrico) se observa que la temperatura de degradación del polietileno es de aproximadamente 400°C, la cual está por encima del proceso de modificación y de la preparación de la mezcla asfáltica.

## 2.2 Análisis del Ligante Asfáltico.

Es importante optimizar el porcentaje de polímero a utilizar de acuerdo a las exigencias del proyecto de carretera, pues un porcentaje bajo de polímero eventualmente podría no alcanzar los parámetros deseados y un alto contenido del mismo podría elevar los costos de producción o causar un efecto nocivo en el producto final. Por otro lado unas condiciones extremas de tiempo y temperatura de modificación facilitan que el asfalto se envejezca u oxide, por eso resulta importante cerciorarse que estos procesos no sean favorecidos. Entre los análisis opcionales tenemos la Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) (**Figura 3a**) y el Análisis Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR) (**Figura 3b**). Estos ensayos se les denominan opcionales, pues gran cantidad de laboratorios de carreteras no los poseen. Estos análisis dan información de peso en el proceso de elección de asfaltos modificados, en el caso del FTIR (propiedades de

identificación de polímeros cambios en la composición química del asfalto, relacionados con fenómenos como oxidación). El AFM brinda información de la morfología, adherencia y el módulo del material.

La **Figura 3a** AFM del polietileno en la matriz asfáltica muestra la forma en que el material se incorpora, en donde se puede apreciar que su estructura dentro del asfalto es de tipo vascular. Por otro lado en el análisis de FTIR del asfalto en estado oxidado (**Figura 3b**) muestra los picos característicos de carbonilos y sulfóxidos propios de dicho proceso. El FTIR se puede determinar si el asfalto está sufriendo cambios de envejecimiento importantes durante la modificación por motivos de temperatura, tiempo de modificación y características propias de la composición química del asfalto. Lo que conlleva a buscar el uso de agentes que reduzcan las temperaturas de mezclado y compactación del material.



**Figura 3. (a)** Imagen AFM de polietileno en la matriz asfáltica, **(b)** Análisis FTIR asfalto oxidado.

## 3. Análisis del Asfalto Modificado. (Vía Seca)

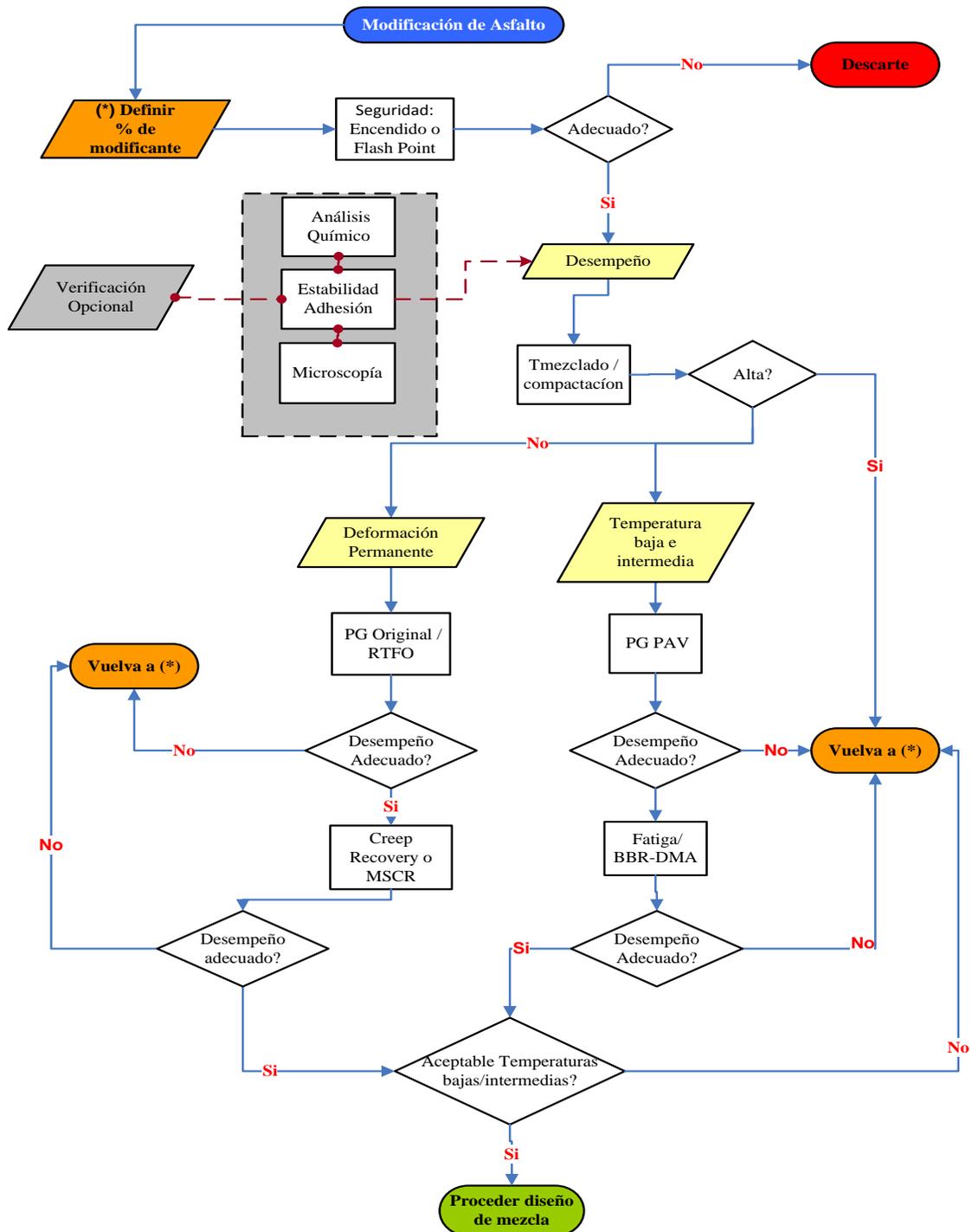
Para el método vía seca se presentan las siguientes recomendaciones:

1. Utilizar el menor tamaño de partícula del modificante como sea posible. Esto evitara complicaciones como heterogeneidad y segregaciones de dicho material en la matriz de la mezcla asfáltica.
2. Homogenizar el modificante con los agregados antes de la preparación de la mezcla asfáltica.

3. Establecer según el estudio del modificante la temperatura y el tiempo de mezclado.
4. Siempre realizar un diseño de mezcla y probar los valores del mismo con ensayos de laboratorio.

## 4. Análisis del Asfalto Modificado. (Vía Húmeda)

Es el método que brindó mejor desempeño tanto del asfalto como de la mezcla asfáltica. Al igual que al modificante, el asfalto modificado debe diseñarse y efectuarse al mismo tiempo un control de calidad. En la **Figura 4** se presenta la metodología sugerida para dicho fin.



RTFO: Rolling Thin-Film Oven, PAV: Pressure Aging Vessel, MSCR: Multiple Stress Creep Recovery, BBR: Bending Beam Rheometer y DMA: Dynamic mechanical analysis.

Figura 4. Metodología Integral de Incorporación de Modificantes en Matrices Asfálticas.

#### 4.1 Preparación de los materiales de desecho.

El bumper se debe triturar en un equipo especializado para reducir el tamaño de partícula. Como tamaño máximo de partícula se debe utilizar la malla N°16, tomando en consideración según la experiencia adquirida, pero es importante tener presente que entre menor sea el tamaño de partícula del modificante, mayor es la eficiencia en la incorporación del asfalto. El polipropileno utilizado corresponde a fibras finas por lo que no requiere de preparación adicional y el polietileno debe ser cortado en pedazos de un diámetro máximo de 4 cm de lado.

Los porcentajes de polímero utilizado se presentan con base en la relación masa/masa, por peso de asfalto. Considerando la trabajabilidad y apariencia del asfalto modificado, el contenido óptimo de los materiales de desecho para modificar un asfalto PG64-22 (AC-30) de uso común en Costa Rica fue de 2% para el bumper, 3% para el polietileno y 1.5% para el polipropileno.

##### 4.1.1 Ensayos de Reología para Asfalto.

La importancia de la reología en los asfaltos radica en el hecho de poder predecir el comportamiento de estos en servicio. Por otro lado es fundamental para el diseño de los ligantes según las especificaciones del proyecto basado en la carga vehicular, la frecuencia de la carga y la temperatura de la carpeta asfáltica. La **Tabla 1** muestra los resultados de los ensayos reológicos de los asfaltos modificados con los contenidos óptimos de material de desecho, cabe recalcar que la temperatura intermedia es medida directamente en el reómetro dinámico de cortante, con la geometría de 8mm [6,7]. Para las temperaturas bajas las mediciones fueron realizadas con el Reómetro de Viga a Flexión (BBR) [8,9].

**Tabla 1.** PG Alto e Intermedio y baja del Asfalto Original y Modificado.

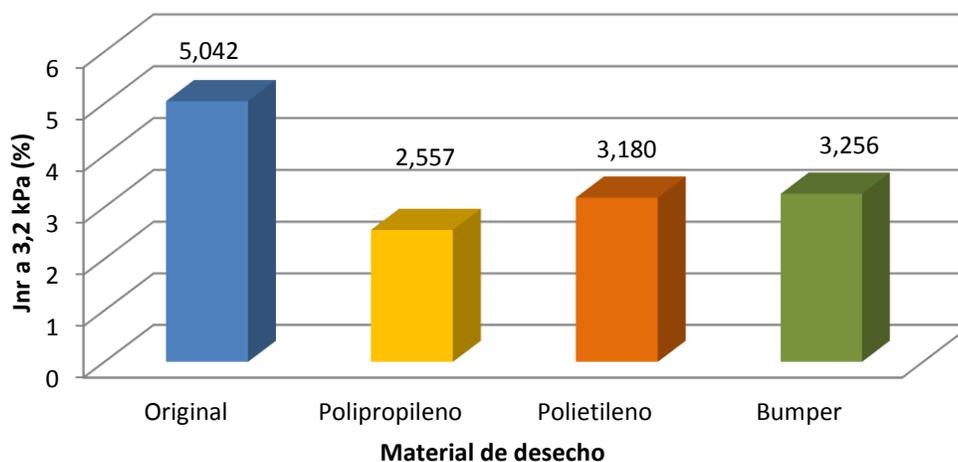
Asfalto	Temperatura alta (DSR)	Temperatura intermedia (DSR)	Temperatura baja (BBR)
Original	64	25	-22
1,5% Polipropileno	70	28	-22
3% Polietileno	70	25	-22
2,0% Bumper	76	25	-22

Como se puede observar el asfalto original cumple con la especificación únicamente para una temperatura de 64°C en el asfalto sin envejecer y envejecido en RTFO. Al ángulo de fase ( $\delta$ ) menor el  $G^*/\text{sen}\delta$  incrementa, es decir, existe aporte del componente elástico.

Como se observa en la **Tabla 1**, la temperatura intermedia que cumple con la especificación Superpave, para el asfalto original corresponde a 25°C. Para el asfalto modificado con bumper la temperatura intermedia es de 25°C y para el polipropileno 28°C.

##### 4.1.2 Resultados de Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) en el Asfalto.

La **Figura 5** muestra la relación entre la deformación no recuperable como función del tiempo y el esfuerzo aplicado ( $J_{nr}$ ), lo que hace esperar que entre más bajo sea el valor de  $J_{nr}$ , menor va a ser la deformación permanente al aplicar una carga. Por lo tanto, el polipropileno presenta mejores resultados en comparación con el asfalto original y los asfaltos modificados con polietileno y bumper.



**Figura 5.** Compliance de ligante asfáltico a 64 °C.

## 5. Verificación de Desempeño en Mezcla Asfáltica.

El aporte de los polímeros como agentes modificantes se cuantifica mediante ensayos de desempeño, el cual indica el comportamiento y propiedades de las mezclas asfálticas modificadas [3,10,11].

Para evaluar el efecto del modificante en la mezcla asfáltica, se escogió una mezcla densa fina con tamaño máximo nominal de 12.5 mm de uso típico en Costa Rica. La curva granulométrica se muestra en la **Tabla 2**.

**Tabla 2.** Curva Granulométrica del Agregado.

Tamiz (US)	Tamiz (mm)	%Pasando
3/4"	19,0	100,0
1/2"	12,5	95,4
3/8"	9,5	78,3
N° 4	4,75	43,3
N° 8	2,36	28,9
N° 16	1,18	20,0
N° 30	0,600	14,8
N° 50	0,300	10,9
N° 100	0,150	8,0
N° 200	0,075	5,8

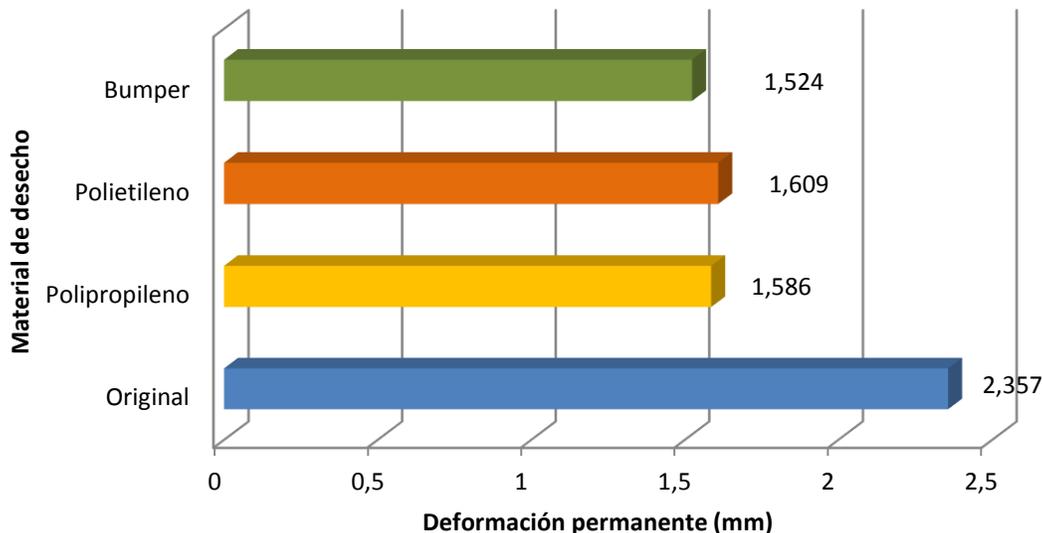
El contenido de asfalto fue diseñado para cada mezcla. Según los resultados obtenidos de la volumetría, el porcentaje de asfalto

óptimo para la mezcla con asfalto original es de un 7,49%, para el polipropileno es de un 7,41%, para el bumper es de un 7,09% y para el polietileno de un 6,6%,(se presenta una reducción en el contenido óptimo de asfalto al incluir el material de desecho). Cabe mencionar que al utilizar estos porcentajes se cumple con todos los requisitos volumétricos establecidos por Superpave, para carreteras de alto tránsito. Por otro lado, la densidad y gravedad específica para cada uno de los asfaltos modificados, en comparación con el asfalto original, son muy similares. Los ensayos de desempeño realizados y sus respectivos resultados se detallan a continuación:

### 5.1 Analizador de Pavimentos Asfálticos. (APA)

Determina la susceptibilidad a la deformación permanente de las mezclas asfálticas, además de distinguir cuál de ellas sufren una mayor deformación. Las muestras de mezcla asfáltica son sometidas a 8000 ciclos de carga bajo una presión, de 100 psi y una carga aplicada de 100 lb. Esto simula la fuerza del eje y la presión de la llanta, de un vehículo, ejercidas en un pavimento. Este ensayo se encuentra bajo la norma AASHTO TP 63.

En la **Figura 6** se puede observar la deformación permanente final para cada condición, con base en el resultado promedio para 6 especímenes de cada mezcla asfáltica.



**Figura 6.** Resultados APA para mezcla asfáltica modificada con material de desecho.

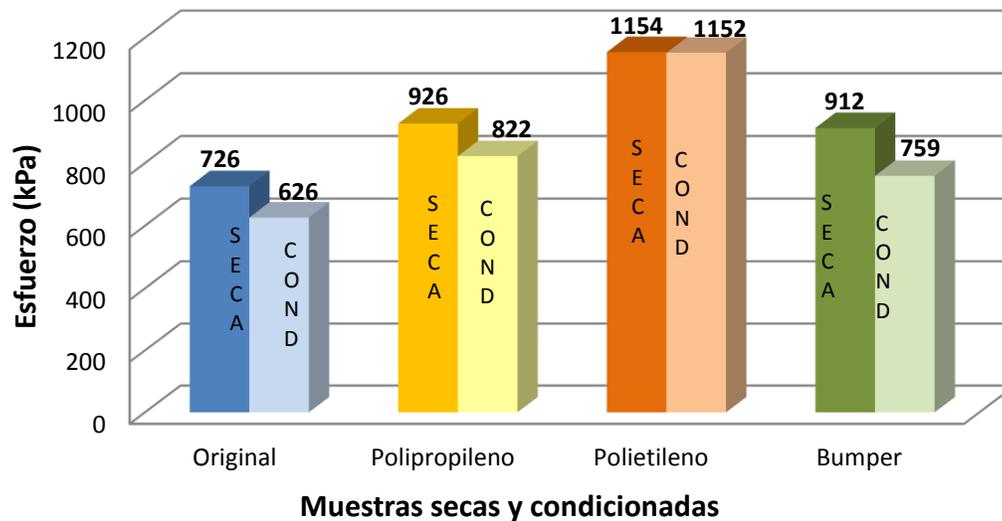
Visualmente, se puede apreciar una notable reducción en la deformación permanente en las mezclas asfálticas modificadas con respecto a la mezcla asfáltica de control. Es decir, la incorporación de los materiales de desecho al asfalto cumple la función de rigidizar la mezcla asfáltica y de esta manera aumentar la capacidad de respuesta de los especímenes modificados ante la carga aplicada en el ensayo y tiene concordancia con los parámetros reológicos anteriormente medidos al asfalto original como a los modificados.

Según los requisitos establecidos para mezclas asfálticas en Costa Rica [12], las tres mezclas anteriores se designan tipo C, puesto que la deformación plástica luego de 8000 ciclos de carga a 60 °C debe ser  $\leq 3,00$  mm, según lo indicado en la norma AASHTO T340. Por tanto las mezclas modificadas con materiales de desecho pueden ser consideradas para uso en capas de rodadura donde se puede presentar problemas de deformación permanente.

### 5.2 Resistencia Retenida a la Tensión Diametral.

Este ensayo se determina mediante la norma AASHTO T283, la cual indica la resistencia diametral de la mezcla asfáltica compactada tras estar sujeta a los efectos de la saturación con agua. Busca determinar el daño potencial por humedad en la mezcla asfáltica ya colocada y pretende predecir el desnudamiento a largo plazo de las mezclas asfálticas. Para el ensayo se dividen los especímenes en subgrupos secos (control) y acondicionados. Estos últimos se colocarán en un baño de agua a 60 °C durante 24 horas y el daño potencial por humedad se obtiene mediante la relación de resistencias entre el subgrupo de control y el subgrupo de acondicionados. Esta resistencia se determina mediante la falla a la tensión diametral de cada subgrupo.

En la **Figura 7** se detallan los resultados de la falla a la tensión diametral para especímenes secos y acondicionados de las diferentes mezclas.



**Figura 7.** Falla a la tensión diametral para mezcla asfáltica modificada con material de desecho.

Como se aprecia, los especímenes secos y acondicionados en estado modificado tienden a aumentar su capacidad de respuesta ante los esfuerzos aplicados en relación a los especímenes con asfalto original, debido a la incorporación de los agentes modificantes. Como es de esperarse, las tres mezclas asfálticas acondicionadas disminuyen su capacidad de resistencia a los esfuerzos de tensión, pues el agua está induciendo un deterioro a nivel de adhesión asfalto-agregado y posiblemente a nivel de cohesión interna del mastic asfáltico.

Según el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes [12], la resistencia a la tensión diametral a 25 °C en especímenes secos debe ser mayor o igual a 700 kPa, lo cual se cumple satisfactoriamente en las muestras. Otro parámetro requerido por la especificación es el porcentaje de la resistencia retenida a la tensión diametral, el cual debe ser mayor al 85%. La resistencia retenida busca garantizar que la mezcla asfáltica no se degrade considerablemente en presencia de humedad. La **Figura 8** presenta los resultados de resistencia retenida.

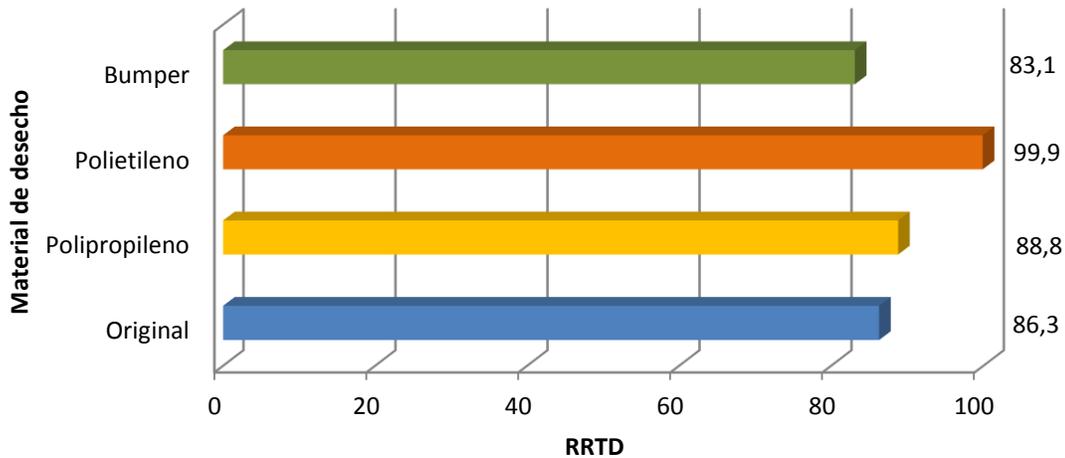


Figura 8. Resistencia retenida para mezcla modificada con material de desecho.

La mezcla asfáltica sin modificar y la modificada con polipropileno sobrepasan la especificación de resistencia retenida. Por su parte, la mezcla asfáltica con bumper, presenta un porcentaje de 83,1 %, encontrándose por debajo de la condición mencionada. Por lo tanto, el bumper está afectando el trabajo de adhesión asfalto-agregado de manera que la humectabilidad del agregado se ve reducida. Lo contrario ocurre con el polipropileno y el polietileno que demuestran un aumento en la resistencia al daño por humedad.

### 5.3 Módulo Resiliente a Tensión Diametral.

Este ensayo lo cubre la norma AASHTO TP 31 y determina los valores del módulo resiliente mediante la aplicación de cargas repetidas a tensión indirecta. Este parámetro es de gran utilidad a la hora de verificar la calidad y representación de la capacidad

de soporte de los materiales de fundación del pavimento, con el fin de diseñar, evaluar y caracterizar el estado de las capas de pavimento. La prueba se realiza en especímenes secos y acondicionados de la misma manera que el ensayo de tensión diametral. Las mezclas fueron aclimatadas a una temperatura de 25 °C y se sometieron a una carga haversiana (10% tiempo de carga y 90% tiempo de recuperación) con una frecuencia de carga de 10 Hz. Transcurrido el proceso, las mezclas fallan a tensión diametral.

Como se puede observar, en la **Figura 9** se corrobora el incremento en resistencia ante esfuerzos, dado el aumento del módulo resiliente del material modificado con respecto a la mezcla asfáltica con asfalto original.

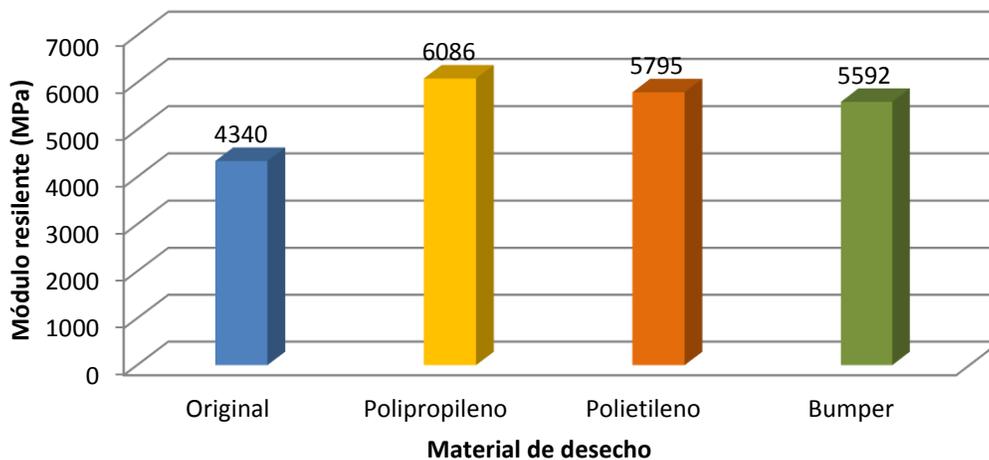


Figura 9. Módulo resiliente a 25 °C y 10 Hz para mezcla modificada con material de desecho.



## 6. Análisis de costos de modificación con polímeros.

En Costa Rica el costo por utilización de mezcla producida con asfalto modificado es aproximadamente \$20 USD / Tonelada mayor que la mezcla sin modificar [13]. Si se calcula una producción de 500 toneladas diarias, el incremento en los costos sería de \$10.000 USD por día. En el caso de que el material a utilizar no tenga ningún valor económico, el costo adicional está dado por concepto de molienda del mismo.

## 7. Conclusiones.

Desde el punto de vista de sostenibilidad el proyecto genera grandes influencias en diversas áreas de interés. En cuanto al área ecológica, el proyecto no sólo recicla los materiales involucrados en el proceso de modificación, si no también evita que estos materiales de desecho se depositen en lugares ecológicamente sensibles, como mantos acuíferos. Desde el punto de vista social, el proyecto promueve la recolección de desechos sólidos, utilizables en la modificación de asfaltos. Promueve la creación de centros de acopio y procesamiento de desechos como material modificante, lo cual brindaría fuentes de trabajo. En cuanto a lo económico, reduce el costo en obra, pues el costo de algunos polímeros comerciales es alto.

Por otro lado y de acuerdo al desempeño de estos materiales, todos estos estudios nos permiten realizar ingeniería de materiales en el asfalto puesto que teóricamente se puede llegar a modificar el mismo hasta alcanzar propiedades deseada. No obstante, para poder realizar dicha tarea, es fundamental conocer en detalle las características, el comportamiento del asfalto y sus modificantes para poder entonces producir los cambios en la estructura del modificante y poder cambiar sus propiedades según sean los requisitos de desempeño del proyecto.

Esta metodología permite evidenciar los cambios ocurridos en el asfalto modificado con el polímero y su interpretación clarifica la existencia de una mejora significativa en las propiedades requeridas del material.

Los análisis térmicos (TGA y DSC) ayudan a discernir el comportamiento de los polímeros durante su incorporación al asfalto, y proveen información de cuál será su desempeño en servicio.

El incremento en el grado PG desde el punto de vista de resistencia al ahuellamiento, elevó las posibilidades de uso del asfalto sin modificar, al de uno capaz de soportar tráfico pesado y altos volúmenes de tránsito.

La metodología de análisis utilizada va en función no solo de un mejor proceso productivo de los asfaltos modificados, si no que da una explicación exhaustiva a los parámetros reológicos obtenidos, los cuales permiten predecir cómo se comportará el asfalto modificado bajo sus distintas condiciones de servicio en campo. Este desarrollo empleado busca disminuir el uso de técnicas y ensayos empíricos con las cuales los asfaltos modificados se han caracterizado históricamente, tratando de cuantificar y evidenciar el comportamiento de los materiales de forma reproducible.

## 8. Referencias.

- [1] López, S, & Veloz, Y. (2013). "Análisis comparativo de mezclas asfálticas modificadas con polímeros SBR y SBS, con agregados provenientes de la cantera de Guayllabamba". Tesis para optar por el grado de Licenciatura. Sangolqui: Escuela Politécnica del Ejército.
- [2] Wulf Rodríguez, Fernando. "Análisis de pavimento asfáltico con polímero". Tesis para optar por el grado de Ingeniero Constructor. Valdivia, 2010.
- [3] Villegas, R.E., Loria, L.G., Aguiar, J.P., Leiva, F., Salazar, J., & Navas, A. "Uso de materiales de desecho como modificantes de asfalto en Costa Rica", 2012.
- [4] Cruz, L.M., & Porras, A. "El efecto de materiales de desecho en el comportamiento de la mezcla asfáltica". Tesis de Licenciatura. Universidad Fidélitas, San José, Costa Rica, 2015.
- [5] Aguiar-Moya, J.P., Villegas-Villegas, R.E., Loria-Salazar, L.G., Salazar-Delgado, J. "Use of Waste Products as Bitumen Modifiers in Costa Rica". EATA 2013 Conference Proceedings. Istanbul, Turkey, 2013.
- [6] Angelone, S, Martínez, F, & Osio, H. "Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas de Superpave". Lexington, KY, 1996.
- [7] Vargas de Morgado, M, & Osio, H. "Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de Superpave". Lexington, KY, 1998.
- [8] Asphalt Institute. "Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente". Lexington, KY, 2010.
- [9] Asphalt Institute. "The Asphalt Handbook, Seventh Edition". Lexington, KY, 2007.
- [10] Vázquez Ruiz, Idalit. "Ventajas y desventajas del uso de polímeros en los asfaltos". Tesis para optar por el grado de Licenciatura. Veracruz, 2010.



- [11] Avellán Cruz, Martha. "Asfaltos modificados con polímeros". Tesis para optar por el grado de Ingeniera Civil. Guatemala, 2007.
- [12] MOPT. "Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes, División 400: Pavimentos Asfálticos y Tratamientos Superficiales." Designación MOPT: CR-2010. San José, Costa Rica, 2010.
- [13] Base de datos costos de proyectos viales, Unidad Técnica de Auditoria para los contratos de Conservación Vial, año 2014.