



Experiencias sobre el estudio de materiales alternativos para modificar asfaltos

Hugo Alexander Rondón Quintana¹

Luis Ángel Moreno Anselmi²

Daniella Rodríguez Urrego³

Jennifer Lee Marino⁴

RESUMEN

Por lo general, las obras de infraestructura realizadas por ingenieros civiles requieren de materiales naturales para la fabricación y construcción de elementos estructurales, lo cual genera un impacto negativo al medio ambiente. Concientes de lo anterior, muchos países en el mundo se encuentran sustituyendo materiales naturales por materiales productos de reciclaje de procesos industriales, de la construcción y la minería. Estos materiales (llamados alternativos en el presente artículo) también han sido utilizados para modificar las propiedades de otros. En Colombia algunos avances en esta área se han desarrollado pero aún es necesario realizar mayor investigación. En este artículo se presentan de manera resumida los resultados de estudios desarrollados por los Grupos de Investigación de Pavimentos y Materiales de Ingeniería y Topografía en el área de los asfaltos modificados. El objetivo de las investigaciones ha sido evaluar el cambio en las propiedades mecánicas que experimentan mezclas asfálticas modificadas con aditivos productos de desechos industriales. Como conclusión general de los estudios se reporta que la mayor parte de los materiales empleados para modificar las propiedades de los asfaltos y las mezclas asfálticas aumentan la resistencia mecánica de las mezclas y la tendencia de los asfaltos modificados es presentar menor susceptibilidad térmica, mayor resistencia a fluir y rigidez.

Palabras clave: Materiales alternativos, desechos industriales, asfaltos modificados.

LESSONS FROM THE STUDY OF ALTERNATIVE MATERIALS TO MODIFY ASPHALTS

ABSTRACT

Civil engineers generally use natural materials in order to manufacture and build structural

elements, which generates a negative environmental impact. Many countries in the world are replacing natural materials by materials obtained of recycling materials products of industrial processes, construction and mining. These materials (called alternatives in this report) have been used to modify the properties of others. In Colombia, some progresses in this area have been achieved but yet further investigation is needed. In this paper a summary of some studies developed in the area of modified asphalt is presented. The aim of these studies was to evaluate the change in mechanical properties undergoing modified asphalt mixtures with additives of industrial waste products. Most of the materials used to modify the properties of asphalts and asphalt mixtures showed an increase of the mechanical strength of mixtures and the tendency of the modified asphalt is generally to exhibit lesser thermal sensitivity, increased resistance to flow and stiffness.

Key words: Alternative materials, industrial waste, modified asphalt.

1. INTRODUCCIÓN

En el mundo la tecnología de los asfaltos modificados ha sido una técnica ampliamente utilizada para mejorar las características que presentan las mezclas asfálticas convencionales cuando experimentan niveles elevados de tránsito y gradientes de temperatura. Por lo general lo que se busca con este tipo de tecnología es mejorar algunas de las propiedades mecánicas y reológicas de los asfaltos y las mezclas asfálticas convencionales tales como la susceptibilidad térmica, la rigidez y la resistencia al envejecimiento, a las deformaciones plásticas y a la fatiga. Para modificar dichas propiedades, la tendencia actual es adicionar al asfalto (vía húmeda) o a la mezcla asfáltica (vía seca) aditivos poliméricos

¹ Profesor Asistente, Proyecto Curricular Ingeniería Topográfica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Grupo de Investigación: Topografía.

² Docente Investigador, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Católica de Colombia. Grupo de Investigación: pavimentos y Materiales de Ingeniería.

³ Auxiliar de Investigación, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Católica de Colombia. Grupo de Investigación: pavimentos y Materiales de Ingeniería.

⁴ Auxiliar de Investigación, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Católica de Colombia. Grupo de Investigación: pavimentos y Materiales de Ingeniería.

productos de desechos industriales con el fin de mitigar el impacto ambiental que éstos producen.

La mayor parte de las investigaciones realizadas en el área de los asfaltos modificados utilizan como agentes modificadores polímeros del tipo elastómero (p.e., [1-5]; estados del conocimiento sobre el tema pueden ser consultados en [6-8] y para el caso colombiano en [9]). Este tipo de aditivos al ser agregados al asfalto mejoran principalmente el comportamiento resiliente (recuperación elástica) de las mezclas cuando son solicitadas a ciclos de carga y descarga especialmente a altas temperaturas de servicio. En este estudio se propone modificar el cemento asfáltico con polímeros del tipo elastómero y plastómero, utilizando principalmente desechos provenientes de procesos industriales. En Bogotá D.C. diariamente se producen alrededor de 600 toneladas de basuras de las cuales el 10% aproximadamente son plásticos y el consumo per capita de estos materiales en Colombia es de 11.3 kg anuales[9]. Estos materiales al ser mezclados al asfalto pueden modificar las propiedades de mezclas asfálticas y así disminuir el impacto ambiental negativo que generan.

El artículo presenta los resultados experimentales de ensayar mezclas asfálticas modificadas con aditivos poliméricos (producto de desechos industriales a excepción del látex natural) del tipo elastómero como el látex reciclado, caucho de neumático de llanta molido y látex natural, y plastómeros como el policloruro de vinilo, polietileno de alta densidad y poliestireno (los cuales se denominan en el presente trabajo LR, CM, LN, PVC, PEAD y PS respectivamente). Adicionalmente se presentan los resultados de evaluar una mezcla asfáltica modificada con una asfáltita producto de extracción de minería. Para la evaluación de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas convencionales y modificadas se empleó el ensayo Marshall [10] (INV E-748) y en algunas investigaciones ensayos de caracterización dinámica como son el módulo dinámico y la resistencia a las deformaciones permanentes. Para el cemento asfáltico con y sin aditivo, se realizaron ensayos de caracterización de asfaltos como penetración, punto de ablandamiento, flotación y viscosidad.

2. CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE MEZCLAS DENSAS EN CALIENTE (MDC-2) EMPLEANDO UN DESECHO DE POLICLORURO DE VINILO (PVC)

En la presente investigación se buscó evaluar el cambio que experimentan las propiedades mecánicas de mezclas densas en caliente tipo MDC-2 (de acuerdo con las especificaciones del Instituto Nacional de Vías - INVIAS, [10]) bajo carga monotónica y dinámica, cuando se adiciona un desecho de policloruro de vinilo (PVC) al cemento asfáltico (CA) por vía húmeda (el desecho se mezcla con el CA a alta temperatura) y al agregado pétreo por vía seca (se reemplaza parte del *filler* mineral por el aditivo). El cemento asfáltico utilizado para la elaboración de las briquetas proviene de la planta de la Empresa Colombiana de Petróleos (ECOPETROL) en Barrancabermeja. El desecho de PVC proviene de la empresa Mexichem Resinas Colombia S.A. y presenta una densidad de 0.9 g/cm³ con partículas de coloración blanca que pasan el tamiz No. 200 en un ensayo de granulometría. La temperatura de mezclado del cemento asfáltico con el PVC estuvo entre 100-120°C y el tiempo de mezclado fue de 30 minutos. Las temperaturas de mezcla del CA modificado con el agregado pétreo y de compactación fueron obtenidas con base en los resultados del ensayo de viscosidad. Inicialmente la fase experimental se desarrolló para determinar el porcentaje óptimo de CA el cual fue de 6.5%. Sobre este porcentaje de CA fue adicionado 0.5, 1.0 y 1.5% de desecho de PVC por vía húmeda, y 2.0, 4.0 y 6.0% por vía seca con respecto a la masa total de la muestra. Adicionalmente se realizó el mismo estudio disminuyendo en 0.5% el porcentaje óptimo de CA.

Las Figuras 1-4 presentan la influencia del PVC sobre los valores de estabilidad y relación estabilidad – flujo (llamada por algunos investigadores como rigidez Marshall [10] - INV E-748, y puede ser entendida como una resistencia mecánica evaluada en el estado de falla de las mezclas, bajo carga monotónica en un ensayo de tracción indirecta) para las mezclas modificadas por vía húmeda (Figuras 1-2) y seca (Figuras 3-4). En comparación con la mezcla asfáltica convencional, las modificadas por vía húmeda con 6.0 y 6.5% de cemento

asfáltico presentan valores superiores de estabilidad y rigidez Marshall para cualquier porcentaje de PVC adicionado (ver Figuras 1 y 2 respectivamente). La estabilidad de las mezclas disminuye con el porcentaje de adición de PVC, mientras que la rigidez Marshall aumenta entre 0.5 y 1.0% de adición, y luego disminuye cuando se adiciona 1.5%. Los mayores valores de estabilidad de las mezclas modificadas se obtienen cuando se adiciona 0.5% y 1.0% de PVC al 6.0% y al 6.5% de CA respectivamente. En estos porcentajes de CA y PVC, el incremento de estabilidad alcanzado por las mezclas modificadas fue de 35.3% y 29.4%. Los mayores valores de rigidez Marshall de las mezclas modificadas se obtienen cuando se adiciona 1.0% de PVC al 6.0% y al 6.5% de CA. En estos porcentajes de CA y PVC, el incremento de rigidez Marshall alcanzado por las mezclas modificadas fue de 9.5% y 42.3% respectivamente.

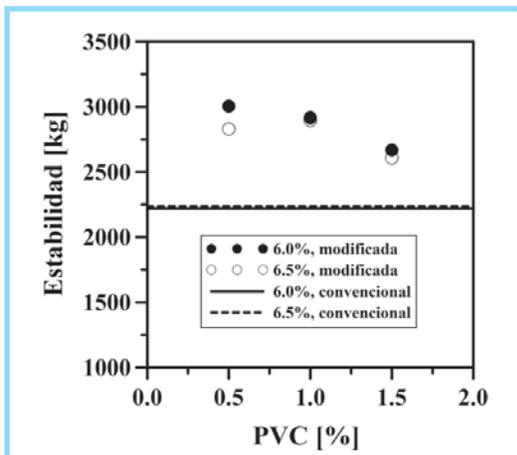


Figura 1. Estabilidad vs. porcentaje de PVC adicionado por vía húmeda.

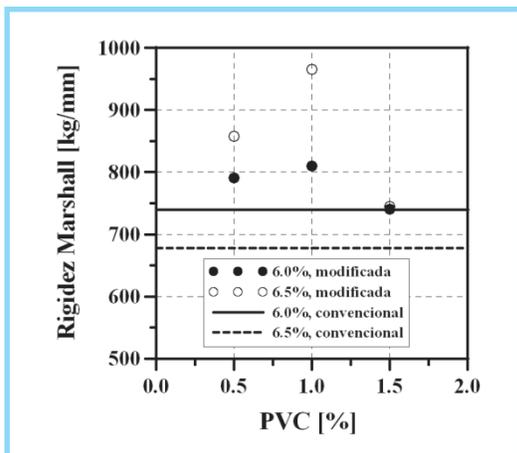


Figura 2. Rigidez Marshall vs. porcentaje de PVC adicionado por vía húmeda.

Cuando la modificación de las mezclas se realiza por vía seca, el aumento en la estabilidad se obtiene, en comparación con las mezclas convencionales, cuando (ver Figura 3):

- Se sustituye *filler* por PVC entre 2.0 y 4.0%, y se emplea 6.5% de CA.
- Se sustituye *filler* por PVC en un 4.0%, y se emplea 6.0% de CA.

El mayor valor de incremento en la estabilidad (8.8%) se obtiene cuando se sustituye un 2.0% de *filler* por PVC en la mezcla y se utiliza 6.5% de CA. La rigidez Marshall de las mezclas modificadas por vía seca es menor en comparación con las convencionales para cualquier porcentaje de CA y de *filler* sustituido por PVC (ver Figura 4).

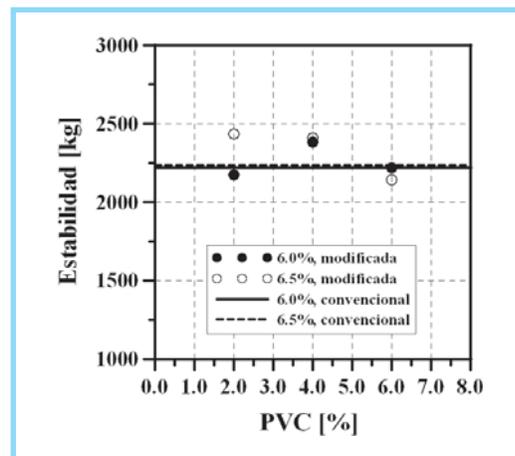


Figura 3. Estabilidad vs. porcentaje de PVC adicionado por vía seca.

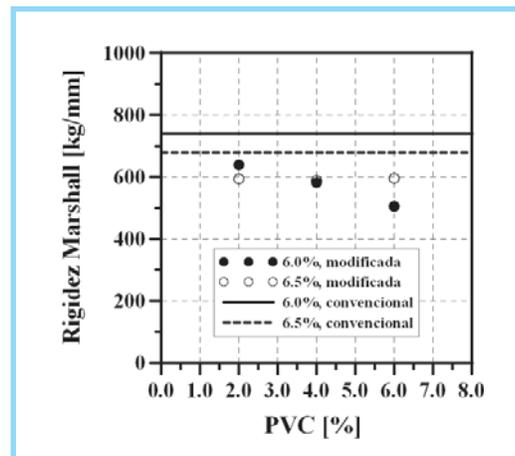


Figura 4. Rigidez Marshall vs. porcentaje de PVC adicionado por vía seca.

Con base en los datos presentados en las Figuras 1-4, se puede inferir que el mejor

comportamiento de las mezclas modificadas se obtiene cuando se adiciona por vía húmeda PVC entre 0.5 y 1.5% al 6.5% de asfalto. Resultados similares a este estudio para el caso del ensayo Marshall fueron presentados en [11], [12] y [13].

En las Figuras 5 -7 se observa la evolución del módulo dinámico con la frecuencia de carga y la temperatura. Los resultados presentados en las Figuras corresponden a mezclas fabricadas con 6.5% de CA (convencionales), 6.5% de CA y 1.0% de PVC (modificadas por vía húmeda) y 6.5% de CA y 2.0% de PVC (modificada por vía seca). En ellas se observa que el módulo incrementa cuando se modifica el asfalto por vía húmeda. El incremento varía dependiendo de la temperatura del ensayo:

- Para una temperatura de 10°C, el módulo incrementa entre 17 y 23% con respecto a la mezcla convencional (Figura 5).
- Para una temperatura de 20°C, el módulo incrementa entre 49 y 80% con respecto a la mezcla convencional (Figura 6).
- Para una temperatura de 30°C, el módulo de la mezcla modificada es entre 2.0 y 3.5 veces mayor que el alcanzado por la mezcla convencional (Figura 7).

Cuando la mezcla se modifica por vía seca y la temperatura del ensayo es de 10°C, se observa en la Figura 5 que el módulo disminuye alcanzando valores entre 79 y 90% del obtenido por las mezclas convencionales. Para el caso de temperaturas de ensayo de 20°C y 30°C (Figuras 6 y 7 respectivamente), el módulo de las mezclas modificadas por vía seca tienden a presentar valores similares pero ligeramente mayores a aquellos obtenidos por la mezcla convencional.

En la Figura 8 se observa que la resistencia a la deformación permanente de las mezclas modificadas por vía húmeda y seca es mayor que las convencionales. A pesar que las mezclas asfálticas modificadas por vía húmeda experimentan mayor rigidez Marshall y módulo dinámico que las modificadas por vía seca, la resistencia a la deformación permanente de ambas es similar.

En la Figura 9 se observa que el asfalto

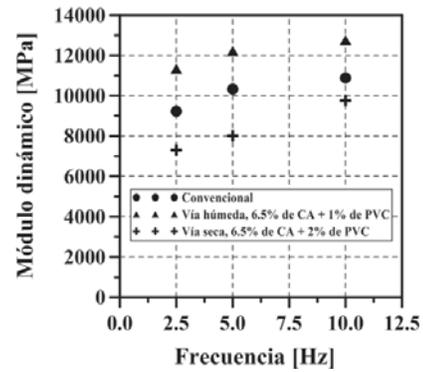


Figura 5. Evolución del módulo dinámico con la frecuencia de carga para 10°C.

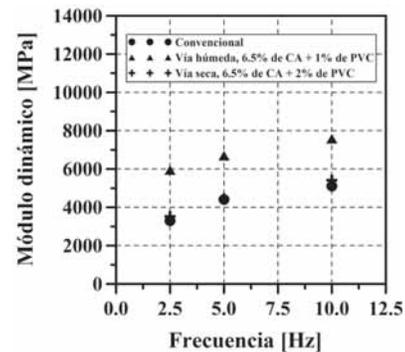


Figura 6. Evolución del módulo dinámico con la frecuencia de carga para 20°C.

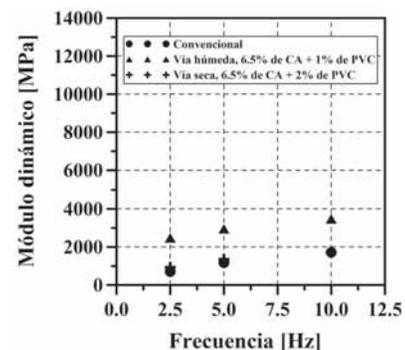


Figura 7. Evolución del módulo dinámico con la frecuencia de carga para 30°C.

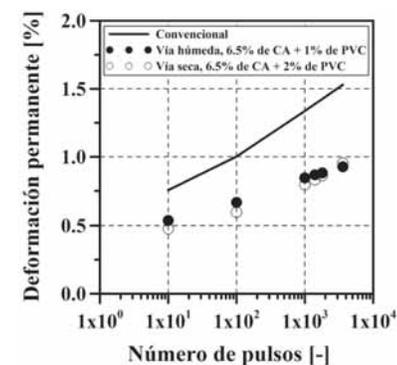


Figura 8. Evolución de la deformación permanente con el número de pulsos de carga.

modificado presenta una resistencia a la penetración superior con respecto al convencional para cualquier porcentaje de CA y PVC, y aumenta conforme se incrementa la adición de PVC al CA. La mayor resistencia a la penetración se obtiene cuando se adiciona PVC al 6.0% de CA. El punto de ablandamiento y la viscosidad incrementan cuando se adiciona por vía húmeda PVC al CA (Figuras 10 y 11 respectivamente). El incremento en la resistencia a la penetración, el punto de ablandamiento y la viscosidad de los asfaltos modificados con PVC permiten predecir menor ahuellamiento de las mezclas a altas temperaturas de servicio en comparación con las convencionales.

Una descripción más detallada de los resultados de la investigación puede ser consultada en [14].

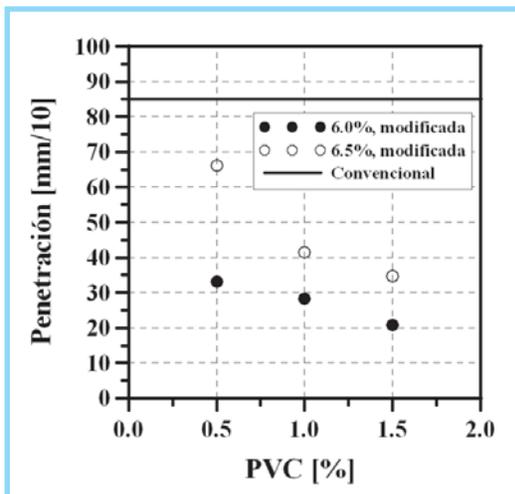


Figura 9. Evolución de la penetración con la adición de PVC al CA por vía húmeda.

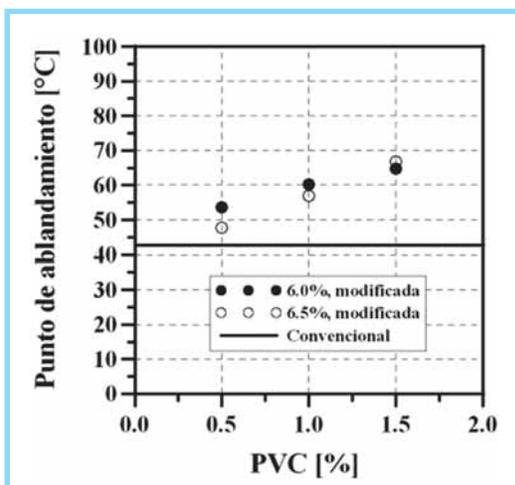


Figura 10. Evolución del punto de ablandamiento con la adición de PVC al CA por vía húmeda.

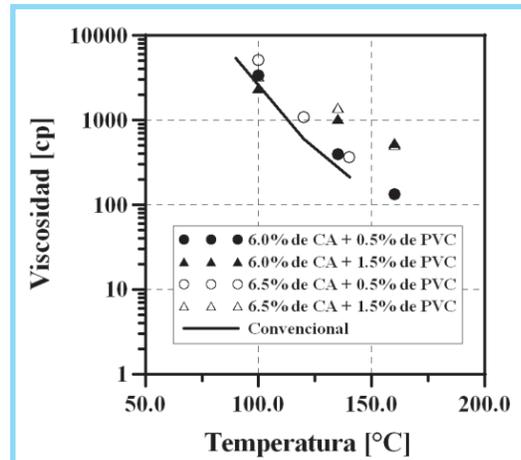


Figura 11. Evolución de la viscosidad con la temperatura para diferentes porcentajes de CA y PVC.

3. RESISTENCIA MECÁNICA EVALUADA EN EL ENSAYO MARSHALL DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA TIPO MDC-2 MODIFICADA CON ASFÁLTITA

La influencia que tiene adicionar asfáltita sobre una mezcla densa caliente (MDC-2, acorde con INVIAS [10]), cuando se modifica el cemento asfáltico (CA) por vía húmeda fue evaluada en [15]. Para tal fin realizaron ensayos Marshall. Las mezclas fueron fabricadas empleando CA 80-100 y CA 60-70 proveniente de las refinерías de ECOPEPETROL en Barrancabermeja y Apiay respectivamente. Inicialmente se determinó el porcentaje óptimo de CA el cual fue de 5.3% para el caso de las mezclas fabricadas con CA 80-100 y de 5.6% para aquellas fabricadas con CA 60-70. Sobre estos porcentajes de CA fue adicionado 0.5, 1.5, 2.5 y 3.5% de asfáltita por vía húmeda con respecto a la masa total de la muestra. La temperatura de mezclado del CA con la asfáltita fue entre 140 y 150°C, y el tiempo de mezclado de 45 minutos aproximadamente para porcentajes de adición de asfáltita de 0.5 y 1.5% y de una hora para porcentajes de 2.5 y 3.5%. Adicionalmente se realizó el mismo estudio aumentando y rebajando el porcentaje óptimo de asfalto en 0.3. La asfáltita presenta un peso específico de 1.10 g/cm³ y partículas de coloración negra brillante que pasan el tamiz No. 40.

En las Figuras 12a y b se observa que los valores de estabilidad y rigidez de las mezclas modificadas que emplean CA 80-100 son mayores, para cualquier porcentaje de CA y

asfáltita, en comparación con la mezcla convencional. Los valores de estabilidad aumentan cuando se incrementa el contenido de asfáltita entre 0.5 – 2.5% para contenidos de CA de 5.0, 5.3 y 5.6%. Para el caso de 3.5% de adición de asfáltita la estabilidad tiende a conservar su máximo valor y la tendencia es a disminuir. Los mayores valores de estabilidad y rigidez se obtienen cuando se adiciona la asfáltita al contenido óptimo de CA de 5.3%, seguido por las mezclas fabricadas con 5.0 y 5.6% de CA. La mayor rigidez de las mezclas (946.61 kg/mm) se obtiene cuando se adiciona 0.5% de asfáltita al 5.3% de CA. Esta rigidez es 3.84 veces mayor que la rigidez que alcanza la mezcla convencional. La evolución y los valores de flujo de las mezclas son similares para cualquier porcentaje de CA y asfáltita (ver Figura 12b).

Las mezclas modificadas que emplean CA 60-70 presentan un comportamiento similar a aquellas fabricadas con CA 80-100. En las Figuras 13a y b se observa que los valores de estabilidad y rigidez de las mezclas modificadas que emplean CA 60-70 son mayores, para cualquier porcentaje de CA y asfáltita, en comparación con la mezcla convencional. Los valores de estabilidad aumentan cuando se incrementa el contenido de asfáltita entre 0.5 – 2.5% para contenidos de CA de 5.3, 5.6 y 5.9%. Para el caso de 3.5% de adición de asfáltita la estabilidad tiende a conservar su máximo valor y la tendencia es a disminuir. Los mayores valores de rigidez se obtienen cuando se adiciona la asfáltita al contenido óptimo de CA de 5.6%. Para cualquier porcentaje de CA, los valores de rigidez incrementan cuando se adiciona la asfáltita en porcentajes de 0.5 a 1.5%, luego dicha rigidez se estabiliza en 2.5% de asfáltita para luego disminuir su valor cuando se adiciona 3.5% (ver Figura 13b).

Las mezclas asfálticas modificadas con asfáltita, experimentan un incremento notable de la rigidez en comparación con las mezclas convencionales (ver Figura 14b). Comportamientos similares han sido obtenidos modificando el cemento asfáltico con otros

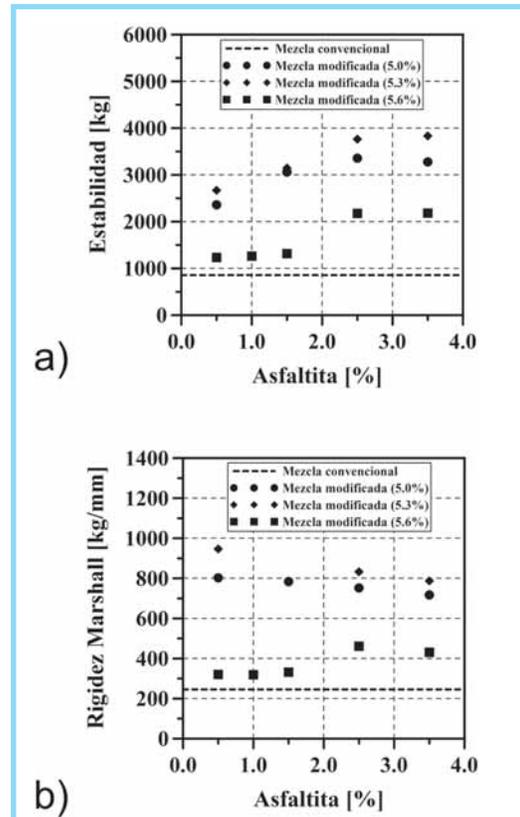


Figura 12. a) estabilidad y b) rigidez Marshall vs. porcentaje de asfáltita para mezclas modificadas MDC-2 con CA 80-100

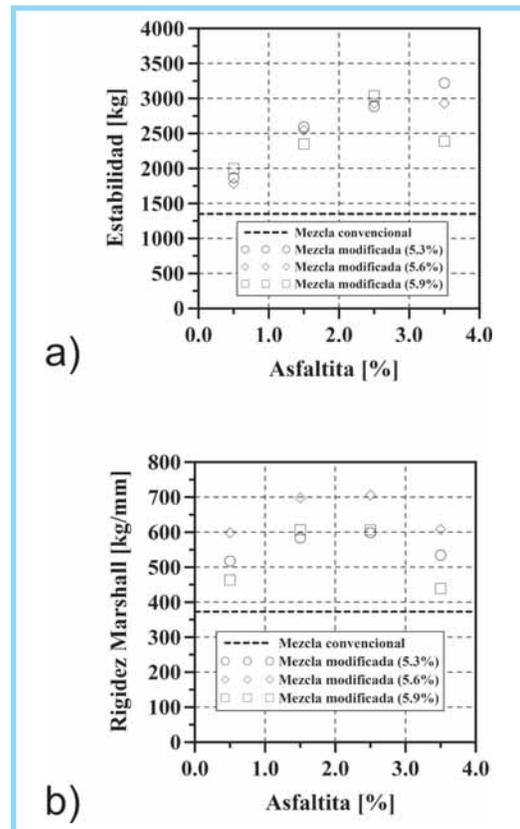


Figura 13. a) estabilidad y b) rigidez Marshall vs. porcentaje de asfáltita para mezclas modificadas MDC-2 con CA 60-70.

aditivos poliméricos del tipo plastómero [p.e., 11-13]. A pesar que el CA 80-100 es de mayor penetración y menor rigidez que el CA 60-70, es interesante observar en las Figuras 14a y b que los mayores valores de estabilidad y rigidez se obtienen cuando se modifican con asfáltita las mezclas que emplean CA 80-100. Lo anterior será objeto de investigaciones en un futuro, pero un comportamiento similar fue reportado por [16] cuando se modificaron mezclas asfálticas con desecho de policloruro de vinilo (PVC) empleando el mismo agregado pétreo y los mismos CA.

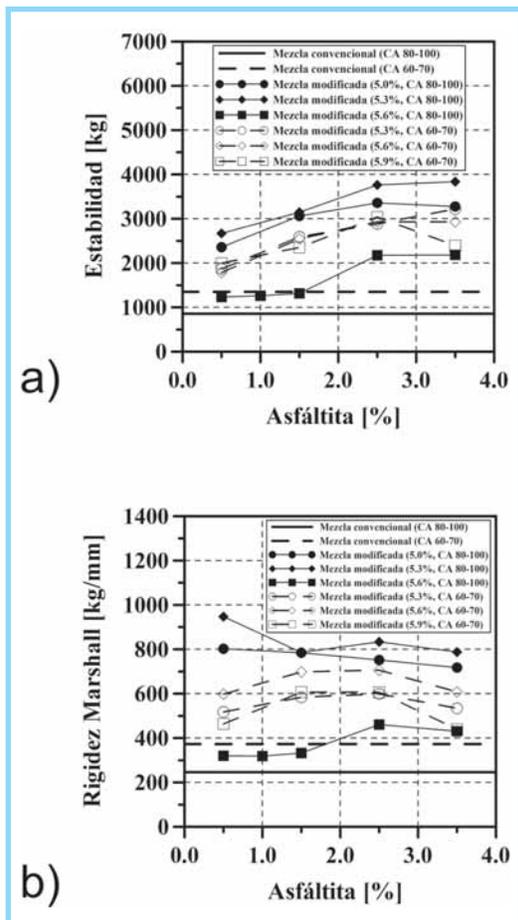


Figura 14. a) estabilidad y b) rigidez Marshall vs. porcentaje de asfáltita para mezclas modificadas MDC-2 empleando CA 80-100 y CA 60-70.

En las Figuras 15 a y b se presenta la evolución de la penetración con la temperatura para los asfaltos convencionales (CA 80-100 y CA 60-70) y modificados. Se observa de manera general que los asfaltos modificados son menos penetrables para cualquier porcentaje de CA y asfáltita en comparación con los convencionales. Cuando se adiciona asfáltita en porcentajes entre 2.5 y 3.5% al CA, el cemento asfáltico modificado se rigidiza a

tal punto que el grado de susceptibilidad térmica es muy pequeño, y en este rango de adición, la penetración en ambos tipos de asfalto es similar (ver Figura 15).

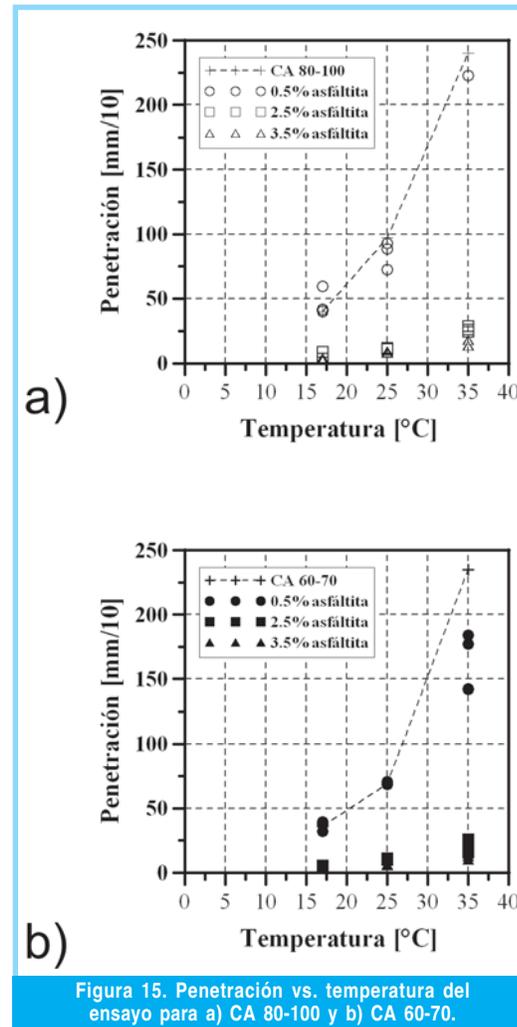


Figura 15. Penetración vs. temperatura del ensayo para a) CA 80-100 y b) CA 60-70.

4. MODIFICACIÓN DE MEZCLAS DENSAS EN CALIENTE (MDC-2) EMPLEANDO LÁTEX NATURAL (LN), CAUCHO MOLIDO (CM) Y DESECHO DE POLICLORURO DE VINILO (PVC)

Los estudios realizados en [17-19] evaluaron la influencia que tiene adicionar látex natural (LN), caucho molido (CM, proveniente de llanta de neumático reciclado) y desecho de policloruro de vinilo (PVC) sobre una mezcla densa caliente (MDC-2, acorde con INVIAS [10]), cuando se modifica el cemento asfáltico (CA) por vía húmeda. Para tal fin, realizaron ensayos Marshall. Las mezclas fueron fabricadas empleando CA 80-100 proveniente de la refinería de ECOPETROL en

Barrancabermeja. Inicialmente se determinó el porcentaje óptimo de CA el cual fue de 6.0%. Sobre este porcentaje de CA fue adicionado 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0% de LN, CM y PVC por vía húmeda con respecto a la masa total de la muestra. Adicionalmente se realizó el mismo estudio pero disminuyendo en 0.5% el porcentaje óptimo de CA. Las temperaturas y los tiempos de mezclado del CA con el aditivo fueron:

- Con el LN, 140 °C y 60 minutos.
- Con el CM, 120 °C y entre 15-45 minutos dependiendo de la cantidad de CM adicionado al CA.
- Con el PVC fue de 170 °C y entre 15-45 minutos dependiendo de la cantidad de PVC adicionado al CA.

Con los resultados obtenidos, se analizaron las curvas de estabilidad (Figura 16, 18 y 20) y relación estabilidad – flujo (rigidez Marshall, Figura 17, 19 y 21). Se observa en la Figuras 16, que las mezclas modificadas con LN presentan mayores valores de estabilidad con respecto a las mezclas convencionales para cualquier porcentaje de CA y LA. Adicionalmente, el incremento en la estabilidad y la rigidez Marshall es mayor cuando se adiciona LN al 5.5% de CA (ver Figuras 16-17). De los resultados se concluye que la mezcla asfáltica densa en caliente modificada con LN presenta mayor resistencia mecánica, evaluada en el ensayo Marshall, que las mezclas fabricadas con CA 80-100 sin modificar (mezcla convencional).

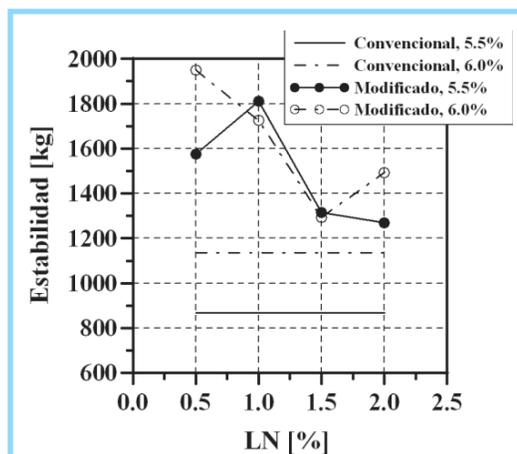


Figura 16. Variación de estabilidad bajo diferentes porcentajes de LN con 6.0% y 5.5% de CA.

En las Figuras 18 y 19 se observa que las mezclas modificadas con CM presentan mayores valores de estabilidad y rigidez Marshall con respecto a las mezclas convencionales cuando se

adiciona 0.5% de CM al CA. Los valores de estabilidad de las mezclas modificadas son mayores con respecto a la convencional cuando se emplea 5.5% de CA. Sin embargo cuando se emplea 6.0% de CA, las mezclas modificadas experimentan menor estabilidad que las convencionales cuando se adiciona más de 0.7% de CM. El comportamiento que experimentó el CM como aditivo al CA, no fue del todo favorable en los ensayos Marshall ya que los valores de rigidez y estabilidad de las mezclas modificadas son muy similares a aquellas obtenidas en la mezcla convencional. Adicionalmente los valores de flujo y vacíos con aire de las mezclas fueron superiores a 3.5 mm y 6.0% respectivamente (valores máximos exigido por INVIAS [10] para conformar mezclas para altos volúmenes de tránsito y capas de rodadura) cuando se adiciona un porcentaje de CM superior a 0.7% al 5.5% y 6.0% de CA [11].

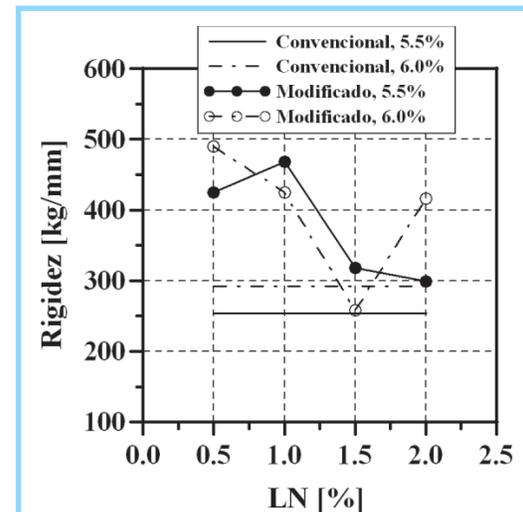


Figura 17. Variación de rigidez Marshall bajo diferentes porcentajes de LN con 6.0% y 5.5% de CA.

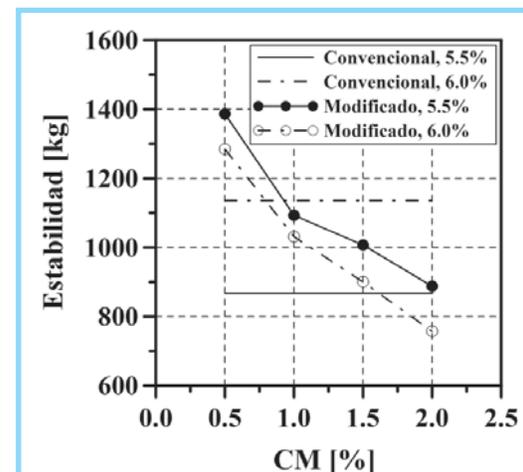


Figura 18. Variación de la estabilidad bajo diferentes porcentajes de CM con 6.0% y 5.5% de CA.

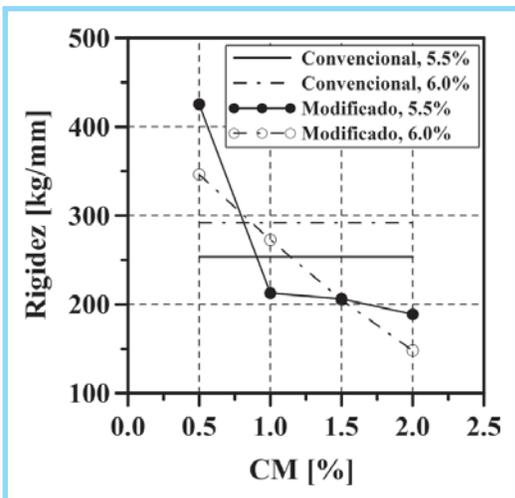


Figura 19. Variación de la rigidez bajo diferentes porcentajes de CM con 6.0% y 5.5% de CA.

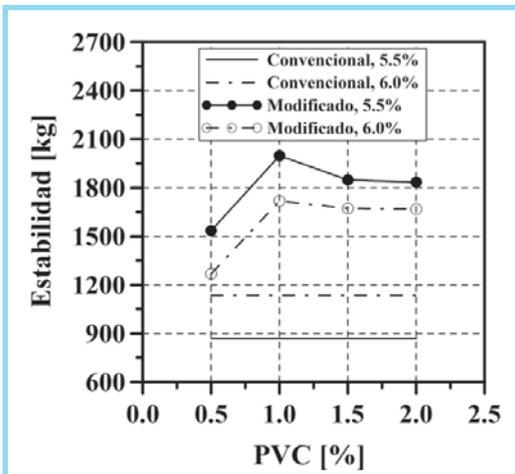


Figura 20. Variación de estabilidad bajo diferentes porcentajes de PVC con 6.0% y 5.5% de CA.

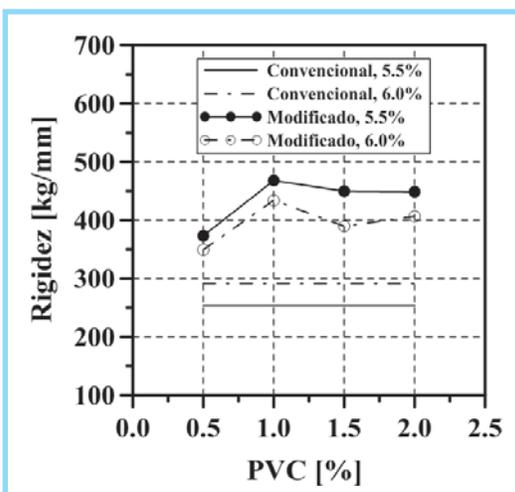


Figura 21. Variación de la rigidez bajo diferentes porcentajes de PVC con 6.0% y 5.5% de CA.

En las Figuras 20 y 21 se observa que las mezclas modificadas con PVC presentan mayores valores de estabilidad y rigidez

Tabla I. Penetración e índice de penetración - CA convencional y modificado

Asfalto	Penetración [1/10 mm]			Índice Penetración	Temperatura [°C]	
	15°C	25°C	35°C		Mezcla	Compact.
Convencional	26,67	88,33	214,0	-1,10	140	120
Asfalto - PVC	15,33	50,0	62,50	0,40	150	140
Asfalto - LN	42,0	107,0	209,0	0,50	150	130
Asfalto - CM	26,0	88,0	207,0	-1,10	150	140

Marshall con respecto a las mezclas convencionales para cualquier porcentaje de CA y PVC. Adicionalmente, el incremento en la estabilidad y la rigidez Marshall es mayor cuando se adiciona PVC al 5.5% de CA. Los mayores valores de resistencia mecánica evaluados en el ensayo Marshall se obtienen cuando se adiciona 1.0% de PVC al 5.5% de CA.

En las investigaciones se realizaron ensayos de penetración (medido a tres temperaturas diferentes), flotación, y punto de ablandamiento sobre el cemento asfáltico convencional (CA 80-100) y el modificado (ver Tablas 1-3). El contenido de CA y aditivo para los ensayos sobre los asfaltos modificados fue obtenido con base en el mejor comportamiento que experimentó la mezcla asfáltica y se describen a continuación:

- Asfalto - PVC: 5,5% de CA y 1,0% de PVC.
- Asfalto - LN: 6,0% de CA y 0,7 de LN.
- Asfalto - CM: 5,5% de CA y 0,7% de CM.

En la Tabla I se observa que el asfalto modificado con PVC muestra una resistencia mayor a la penetración que el asfalto convencional, mientras que con CM muestra un comportamiento similar ante la penetración. Con LN la tendencia del asfalto modificado es a perder resistencia a la penetración especialmente a bajas temperaturas.

En las Tablas II-III se presentan los resultados obtenidos de viscosidad y punto de ablandamiento respectivamente para el asfalto convencional y para el modificado. En la Tabla II se observa que los asfaltos modificados con PVC y LN aumentaron la viscosidad respecto al asfalto convencional y el asfalto-CM mostró una viscosidad ligeramente más baja. En la Tabla III se observa que los asfaltos modificados incrementaron el valor de la temperatura en el cual el material fluye. Las

Tabla II. Viscosidad asfalto convencional y modificado

Asfalto	Temperatura [°C]	Flotación [s]	Viscosidad [Poises]
Convencional	60	198	1241.50
	70	147	712.12
	80	102	245.02
Asfalto – PVC	60	387	3203.32
	70	269	1978.48
	80	173	982.00
Asfalto – LN	60	403	3364.00
	70	288	2175.70
	80	190	1158.67
Asfalto – CM	60	200	1262.26
	70	140	639.46
	80	80	16.66

Tabla III. Punto de ablandamiento asfalto convencional y modificado

Asfalto	Punto de ablandamiento [°C]	Tiempo [s]
Convencional	44.0	600
Asfalto – PVC	60.5	1020
Asfalto – LN	57.5	900
Asfalto – CM	48.3	720

tablas muestran que la susceptibilidad térmica (resistencia a fluir) del asfalto modificado disminuye con respecto al convencional y su rigidez (medido en términos de su consistencia en el ensayo de penetración) tiende a aumentar.

5. MODIFICACIÓN DE MEZCLAS DENSAS EN CALIENTE (MDC-1) EMPLEANDO DESECHO DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (PEAD) Y POLIESTIRENO (PS)

Los estudios [20-21] evaluaron la influencia que tiene adicionar un desecho de polietileno de alta densidad (PEAD) y de poliestireno (PS) sobre una mezcla densa caliente (MDC-1, acorde con INVIAS [10]), cuando se modifica el cemento asfáltico (CA) por vía húmeda. Para tal fin, realizaron ensayos Marshall. Las mezclas fueron fabricadas empleando CA 80-100 proveniente de la refinería de ECOPETROL en Barrancabermeja. Inicialmente se determinó el porcentaje óptimo de CA el cual fue de 6.5%. Sobre este porcentaje de CA fue adicionado 0.5, 1.0 y 1.5 % de PEAD y PS por vía húmeda con respecto a la masa total de la muestra. Adicionalmente se realizó el

mismo estudio mencionado con anterioridad pero disminuyendo en 0.5% el porcentaje óptimo de CA.

La temperatura de mezclado del CA con el PEAD y el PS fue de 160°C y el tiempo de mezclado de una hora. El PEAD estaba procesado en *pellets* (partículas redondeadas de igual tamaño y forma, de 425 mm aproximadamente, el cual era retenido en tamiz No. 40), presentaba coloración negra con algo de tonalidad azul oscura y su densidad fue de 0.92 g/cm³. El PS utilizado se encuentra en *pellets* retenidos en el tamiz No.40, presentaba una tonalidad blanca y su densidad fue de 1.05 g/cm³.

En las Figuras 22a-d se puede observar que el mejor comportamiento de la mezcla asfáltica modificada con PEAD se obtuvo cuando se utilizó 6.0% de cemento asfáltico (es decir, 0.5% por debajo del óptimo de asfalto). En este porcentaje además, la mezcla modificada presenta un mejor comportamiento frente a la convencional. En comparación con la mezcla asfáltica convencional, la modificada con 6.0% de cemento asfáltico:

- Presenta valores superiores de peso unitario cuando se adiciona entre 0.7 y 1.5% de PEAD (Figura 22d).
- Presenta valores ligeramente inferiores de estabilidad (E) para cualquier porcentaje de PEAD, pero cumplen con el valor exigido por la especificación INVIAS [10] (Figura 22a).
- Contrario a lo anterior, la mezcla modificada mejoró la resistencia a la deformación ya que el flujo (F) disminuyó entre 23.5 y 41% para el caso en el que se adicionaba entre 0.5 – 1.1% de PEAD permitiendo cumplir con los requisitos exigidos de flujo (Figura 22c). Esta reducción en el flujo produce un aumento de la rigidez (E/F , ver Figura 22b).

Con base en los datos presentados en las Figuras 22a-d se concluye que el mejor comportamiento se obtiene cuando se adiciona 0.75% de PEAD al 6.0% de asfalto.

El mejor comportamiento de la mezcla asfáltica modificada con PS también se obtuvo cuando se utilizó 6.0% de cemento asfáltico

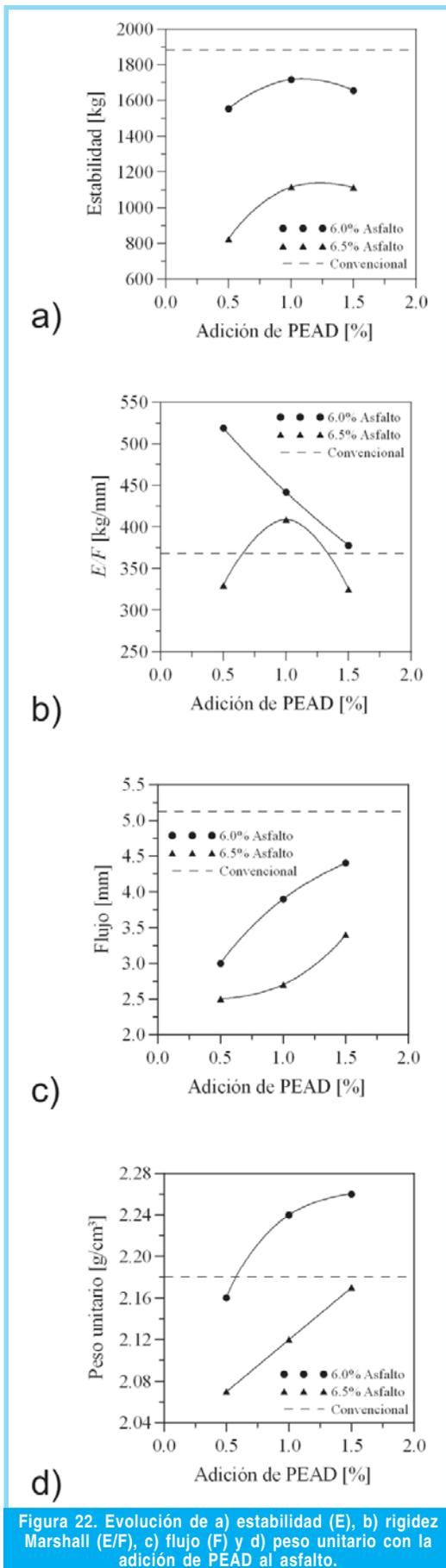


Figura 22. Evolución de a) estabilidad (E), b) rigidez Marshall (E/F), c) flujo (F) y d) peso unitario con la adición de PEAD al asfalto.

(Figuras 23a-d). En comparación con la mezcla asfáltica convencional, la modificada con 6.0% de cemento asfáltico:

- Presenta valores de peso unitario y rigidez mayores para cualquier porcentaje de aditivo. Para el caso de la estabilidad, se puede observar en la Figura 23a un aumento de este parámetro a partir del 1.0% de adición. La mayor estabilidad y rigidez se presenta en la mezcla cuando se adiciona 1.5% de PS (2979 kg y 604 kg/mm respectivamente). En este porcentaje de aditivo la estabilidad y la rigidez son 58.4% y 64.3% mayores respectivamente con respecto a la mezcla convencional.
- Mejora los valores de flujo para cualquier porcentaje de aditivo, pero aún así en ningún caso cumple con lo establecido por la norma INVIAS [10] según la cual el flujo debe estar entre 2 y 4 mm.

Con base en los datos presentados en las Figuras 23a-d se concluye que el mejor comportamiento se obtiene cuando se adiciona entre 0.5 y 0.9% de PS al 6.0% de asfalto.

En la Tabla 4, se observan los resultados de penetración, índice de penetración y temperatura de mezcla y compactación del asfalto convencional y modificado. Es importante tener presente que los asfaltos modificados se caracterizaron con los porcentajes óptimos obtenidos de CA y aditivo, los cuales son:

- Asfalto – PEAD: 6.0% de CA y 0.75 de PEAD.
- Asfalto – PS: 6.0% de CA y 0.7% de PS.

Los asfaltos modificados con PEAD presentan una resistencia mayor a la penetración que el asfalto convencional, mientras que con PS disminuye ligeramente (Tabla 4).

Del ensayo de flotación (Tabla 4) se puede concluir cualitativamente que los asfaltos

Tabla IV. Resultados obtenidos de caracterización

Ensayo	Unidad	Ensayo	Asfalto convencional	Asfalto PEAD	Asfalto - PS
Penetración(25°C, 100 g, 5 s)	0.1 mm	INV-E-706	83	14.5	91.0
Punto de ablandamiento anillo y bola	°C	INV-E-712	49	93	94
Ductilidad (25°C, 5 cm/min)	cm	INV- E-702	>100	>100	>100
Flotación 80°C	s	NLT-183/85	96	7993	7005

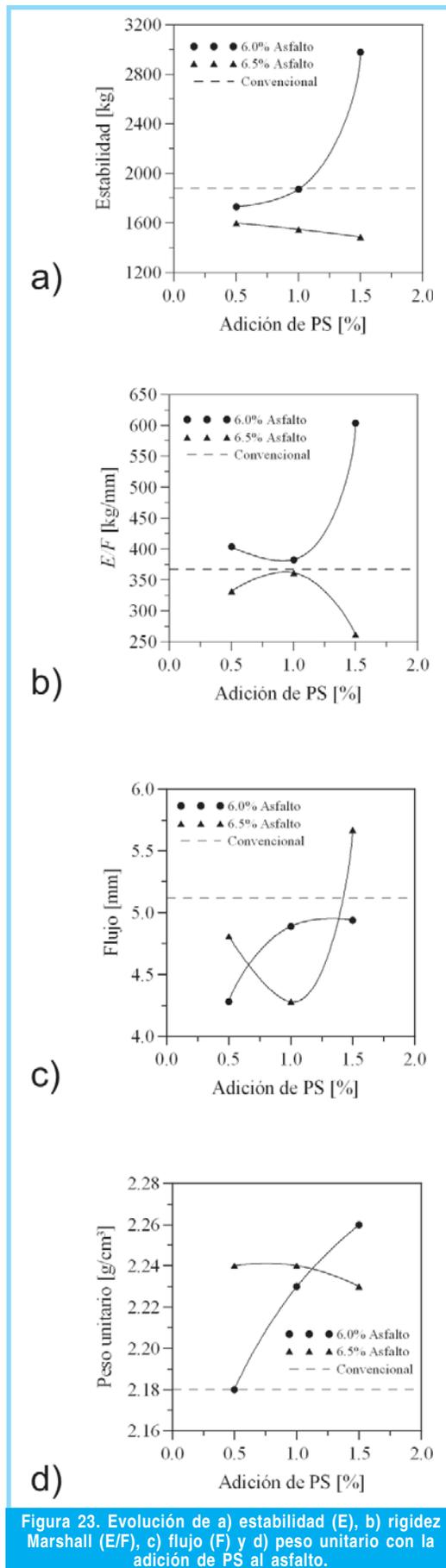


Figura 23. Evolución de a) estabilidad (E), b) rigidez Marshall (E/F), c) flujo (F) y d) peso unitario con la adición de PS al asfalto.

modificados presentan mayor viscosidad en comparación con el convencional y deben ser sometidos a mayores temperaturas para ablandarlos (incrementaron el valor de temperatura para el cual fluyen).

6. MODIFICACIÓN DE MEZCLAS DRENANTES (MD) EMPLEANDO UN DESECHO DE POLICLORURO DE VINILO (PVC)

En el estudio realizado en [22] se evaluó la influencia que tiene adicionar un desecho de policloruro de vinilo (PVC) sobre mezclas drenantes (MD), cuando se modifica el cemento asfáltico (CA) por vía húmeda (el desecho se mezcla con el CA a alta temperatura). Para tal fin, realizaron ensayos Cantabro [10] sobre muestras en estado seco y trans-inmersión. Las mezclas fueron fabricadas empleando CA 60-70 proveniente de la refinería de ECOPEPETROL en Apiay. Inicialmente la fase experimental se desarrolló para determinar el porcentaje óptimo de CA el cual fue de 4.2%. Sobre este porcentaje de CA fue adicionado 0.5, 1.0 y 1.5% de desecho de PVC por vía húmeda con respecto a la masa total de la muestra. La temperatura de mezclado del PVC con el CA fue de 180 °C. Adicionalmente se realizó el mismo estudio mencionado con anterioridad pero aumentando en 0.3% y rebajando en 0.5% el porcentaje óptimo de CA.

Los resultados de la investigación se presentan en las Figuras 24-25 para muestras ensayadas en estado seco y tras inmersión respectivamente. Se observa que al adicionar desecho de PVC, los valores de desgaste de las mezclas modificadas obtenidos en el ensayo Cantabro [10] son mayores con respecto a la mezcla convencional (aquella que no modifica las propiedades del CA original), y a medida que se aumenta el contenido de CA los valores disminuyen. Estos resultados muestran que el desecho de PVC disminuye la resistencia al desgaste de las MD cuando se adiciona por vía húmeda al CA. Sin embargo, los investigadores resaltan la necesidad de continuar las investigaciones utilizando menor contenido de PVC con respecto al CA, ya que tal vez los resultados presentados son producto de emplear una alta cantidad de PVC.

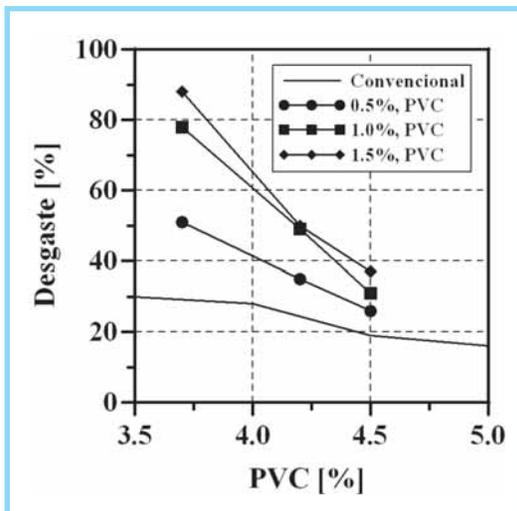


Figura 24. Variación del desgaste cantabro bajo diferentes porcentajes de CA y PVC con muestras en estado seco.

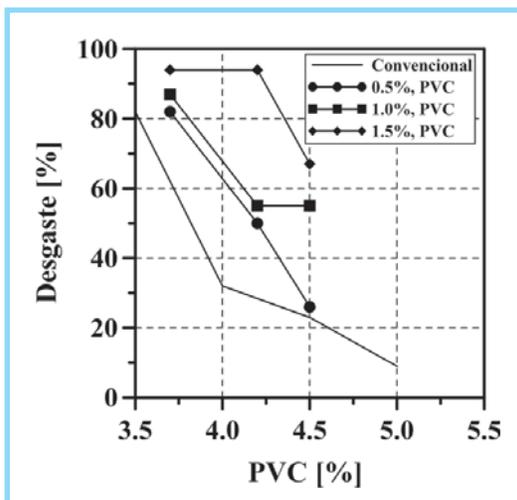


Figura 25. Variación del desgaste cantabro bajo diferentes porcentajes de CA y PVC con muestras ensayadas tras inmersión.

7. MODIFICACIÓN DE MEZCLAS DRENANTES (MD) EMPLEANDO LÁTEX RECICLADO (LR)

En [23] se evaluó la influencia que tiene adicionar látex reciclado (LR) sobre mezclas drenantes (MD), cuando se modifica el cemento asfáltico (CA) por vía húmeda. Para tal fin, se realizaron ensayos Cantabro sobre muestras en estado seco y trans-inmersión. Las mezclas fueron fabricadas empleando CA 80-100 proveniente de la refinería de ECOPETROL en Barrancabermeja. Se utilizó un porcentaje de 4.0% de CA para adicionar 0.5 y 1.0 % de látex reciclado por vía húmeda con respecto a la masa total de la muestra. La

Tabla V. Desgaste Cantabro mezclas ensayadas

LR [%]	Desgaste Cantabro seco [%]	Desgaste Cantabro Tras inmersión [%]
0.0	20.5	31.2
0.5	19.93	29.3
1.0	25.47	34.4

temperatura de mezclado del PVC con el CA fue de 160 °C.

En la Tabla V se presenta la evolución del desgaste Cantabro con el contenido de CA y LR de las muestras ensayadas en estado seco y tras inmersión respectivamente. Se observa en la tabla, que la mayor resistencia al desgaste de las mezclas se obtiene cuando se adiciona 0.5% de LR al 4.0% de CA.

8. CONCLUSIONES

La mezcla asfáltica modificada con desecho de PVC presenta mayor resistencia mecánica bajo carga monotónica, rigidez y resistencia a la deformación permanente que la convencional cuando la modificación se realiza por vía húmeda. En comparación con las mezclas convencionales, por vía seca, las mezclas modificadas presentan de manera general:

- Menor resistencia mecánica bajo carga monotónica (evaluada por medio de la rigidez Marshall).
- Menor módulo dinámico cuando la temperatura del ensayo es de 10°C.
- Ligeramente mayor módulo dinámico cuando el ensayo se realiza a 20°C y 30°C.
- Mayor resistencia a la deformación permanente.

La resistencia que tienen los asfaltos modificados con PVC a fluir es mayor con respecto al convencional. Los valores de penetración, punto de ablandamiento y viscosidad del asfalto modificado permiten predecir menor ahuellamiento a altas temperaturas de servicio. La mezcla asfáltica modificada a bajas temperaturas de servicio puede tener un comportamiento frágil, por lo tanto, inicialmente se recomienda su utilización en climas cálidos y realizar otras investigaciones para describir su comportamiento en clima frío.

En general, las mezclas asfálticas modificadas con asfáltita tienden a poseer un comportamiento rígido. A bajas temperaturas de servicio estas mezclas pueden tener un comportamiento frágil, llevando a pensar que tendrían un mejor desempeño en climas cálidos. Los valores de estabilidad y rigidez Marshall de las mezclas modificadas con CA 80-100 y CA 60-70 son mayores, para cualquier porcentaje de CA y asfáltita, en comparación con la mezcla convencional. Los mayores valores de estabilidad y rigidez se obtienen cuando se modifican con asfáltita las mezclas que emplean CA 80-100, a pesar que este tipo de asfalto presenta menor resistencia a la penetración y rigidez que el CA 60-70. Cuando se adicionan porcentajes de asfáltita entre 2.5 y 3.5% a los CA 80-100 y CA 60-70, ambos tipos de asfaltos experimentan valores similares en el ensayo de penetración.

La mezcla asfáltica modificada con LN aumenta el valor de estabilidad con respecto a la mezcla convencional, en el porcentaje óptimo de asfalto + aditivo establecido. El asfalto modificado con LN presenta menor resistencia a la penetración que el convencional, pero tiene al igual que el modificado con PVC, aproximadamente un valor de tres veces mayor la viscosidad. Además se debe tener en cuenta que el LN puede mejorar características de elasticidad en la mezcla, los cuales no fueron medidos en el presente trabajo. Se recomienda la utilización del LN en climas fríos.

Las características de la mezcla asfáltica modificada con CM son similares a la de la mezcla asfáltica convencional. Además el comportamiento del asfalto modificado con CM y el convencional es similar en cuanto a penetración, viscosidad y punto de ablandamiento. La diferencia podría estar en que el CM puede mejorarle al igual que el LN, características de elasticidad a la mezcla asfáltica por ser materiales poliméricos del tipo elastómero.

Las mezclas asfálticas modificadas con PEAD y PS de desecho presentan mejor comportamiento que la convencional especialmente en rigidez, resistencia a la deformación y peso unitario.

En general, la resistencia que tienen los asfaltos modificados a fluir es mayor con respecto al convencional.

Cuando se modifican las propiedades de mezclas drenantes (MD) empleando asfaltos modificados con PVC, la resistencia al desgaste medida en el ensayo Cantabro disminuye para cualquier porcentaje de CA y PVC. De manera similar, cuando se modifican MD con látex reciclado (LR), la resistencia al desgaste disminuye cuando se adiciona 1.0% de LR al CA y aumenta ligeramente cuando se agrega 0.5%.

Agregar aditivos poliméricos productos de desechos industriales como materiales alternativos para modificar o mejorar las propiedades de los asfaltos o las mezclas asfálticas contribuiría al ambiente reduciendo el impacto negativo que producen y podría llegar a generar cultura del desarrollo sostenible en el área de los pavimentos.

Las fases futuras del proyecto deben medir variables como envejecimiento a corto y largo plazo de los asfaltos, módulos dinámicos, resistencia a fatiga y ahuellamiento de mezclas asfálticas, y establecer un análisis de costos y beneficio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. L. McQuillen, H. B. Takallou, R. G. Hicks, and D. Esch. "Economic Analysis of Rubber-Modified Asphalt Mixes". *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 114, No. 3, 259-277, 1988.
- [2] J-S. Chen, M-C. Liao, and M-S. Shiah. "Asphalt modified by Styrene-Butadiene-Styrene triblock copolymer: morphology and model". *Journal of Material in Civil Engineering*, Vol. 14, Issue 3, 224-229, 2002.
- [3] Lee, S-J., Amirhanian, S-N., Shatanawi, K. and Thodesen, C. "Influence of compaction temperature on rubberized asphalt mixes and binders". *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 35, No. 9, 908-917. 2008.
- [4] F. Olivares, B. Schultz, M. Fernández and B. Moro. "Rubber-modified hot-mix asphalt pavement by dry process". *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 10, Issue 4, 277-288, 2009.
- [5] J. Stastna, L. Zanzotto and O. Vacin. "Damping of shear vibrations in asphalt modified with styrene-butadiene-styrene polymer". *Transportation research record, Annual Meeting of the Transportation Research Board*, No. 1728, 15-20, 2000.
- [6] A. T. Papagiannakis and T. J. Loughheed. "A review of crumb-rubber modified asphalt concrete technology". Research report for project T9902-09 Rubber-Asphalt Study, Washington State Transportation Commission and U. S. Department of Transportation, 1995.
- [7] A. R. Copeland, J. S. Youtcheff Jr and A. Shenoy. "Moisture Sensitivity of Modified Asphalt Binders: Factors Influencing Bond

- Strength. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Issue number 1998, 18-28, 2007.
- [8] Y. Yildirim. "Polymer modified asphalt binders. Construction and Building Materials". Vol. 21, Issue 1, 66-72, 2007.
- [9] H. A. Rondón, F. A. Reyes, A. S. Figueroa, E. Rodríguez, C. M. Real y T. A. Montealegre. "Mezclas asfálticas modificadas en Colombia". *Revista Infraestructura Vial*. No. 19, 12-21, 2008.
- [10] Instituto Nacional de Vías. *Especificaciones generales de Construcción de carreteras*. Bogotá D.C., 2007.
- [11] H. A. Rondón, O. Herrera, L. Caicedo, D. Díaz, A. Gutiérrez, C. Ladino y F. Díaz. "Estudio del comportamiento de mezclas densas en caliente elaboradas con asfaltos modificados con policloruro de vinilo, látex natural y caucho reciclado". *4tas Jornadas internacionales del asfalto*, Cartagena (Colombia), 2004.
- [12] H. A. Rondón y E. Rodríguez. "Evaluación del comportamiento de una mezcla asfáltica densa en caliente, tipo MDC-1, elaborada con asfalto modificado con desecho de policloruro de vinilo". *XV Simposio sobre Ingeniería de Pavimentos*. Pontificia Universidad Javeriana (Colombia), 2005.
- [13] H. A. Rondón y E. Rodríguez y L. A. Moreno. "Comportamiento de mezclas densas en caliente elaboradas con asfaltos modificados con desechos de policloruro de vinilo (PVC), polietileno de alta densidad (PEAD) y poliestireno (PS)". *Revista Ingenierías, Universidad de Medellín*, No. 11, 91-104, 2007.
- [14] B. E. Ojeda, B. A. Sánchez y L. K. Plata. "Caracterización dinámica de una mezcla densa en caliente modificada con desecho de policloruro de vinilo (PVC)". Tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Católica de Colombia, Bogotá D.C., 2008.
- [15] H. A. Rondón, M. H. Pinzón, F. A. Reyes, H. A. Vacca y L. A. Moreno. "Resistencia mecánica evaluada en el ensayo Marshall de una mezcla densa en caliente elaborada con asfaltos modificados con asfáltita". *Ciencia, Tecnología e Innovación*, Tomo 2, pp. 7-13, Bogotá D.C., 2008.
- [16] E. Toro, y M. A. Amortegui. "Influencia del tipo de asfalto en el comportamiento de un concreto asfáltico modificado con desecho de PVC". Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Católica de Colombia, Bogotá D.C., 79 pp., 2008.
- [17] F. A. Díaz y C. M. Ladino. "Comportamiento del asfalto agregando látex natural líquido como aditivo". Tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Católica de Colombia, Bogotá D.C., 2004.
- [18] A. P. Gutiérrez y D. M. Díaz. "Estudio del comportamiento del cemento asfáltico modificado con adición de caucho molido". Tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Católica de Colombia, Bogotá D.C., 2004.
- [19] L. R. Caicedo y O. A. Herrera. "Estudio del comportamiento de mezclas densa en caliente elaboradas con asfaltos modificados con desechos de policloruro de vinilo". Tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Católica de Colombia, Bogotá D.C., 2004.
- [20] A. A. Mojica, H. Hernández. "Estudio del comportamiento de mezclas densa en caliente tipo 1 (MDC-1) empleando asfaltos modificados con polietileno de desecho". Tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Católica de Colombia, Bogotá D.C., 2005.
- [21] A. Ayala. "Estudio del comportamiento de mezclas densas en caliente tipo 1 (MDC - 1) empleando asfaltos modificados con poliestireno de desecho". Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Católica de Colombia, Bogotá D.C., 71pp, 2006.
- [22] T. A. Montealegre, J. J. Salazar. "Estudio del comportamiento de mezclas asfálticas drenantes (MD) modificando el cemento asfáltico con desecho de policloruro de vinilo (PVC)". Tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Católica de Colombia, Bogotá D.C., 2005.
- [23] W. R. Girón. "Estudio del comportamiento del látex reciclado en las mezclas asfálticas drenantes". Tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Católica de Colombia, Bogotá D.C., 2004.

Hugo Alexander Rondón Quintana

Es Ingeniero Civil de la Universidad Francisco de Paula Santander de Cúcuta, Colombia. Obtuvo su título de Maestría en Ingeniería Civil en la Universidad de Los Andes de Bogotá D.C., Colombia. Obtuvo su doctorado en la Universidad de Los Andes de Bogotá D.C., Colombia. Actualmente se desempeña como profesor asistente en el Programa Curricular de Ingeniería Topográfica en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Bogotá D.C., Colombia, y pertenece como investigador al grupo Topovial donde realiza estudios sobre asfaltos. harondon@hotmail.com

Luís Ángel Moreno Anselmi

Es Ingeniero Civil de la Universidad Francisco de Paula Santander de Cúcuta, Colombia. Obtuvo su título de Maestría en Ingeniería Civil en la Universidad de Los Andes de Bogotá D.C., Colombia. Actualmente se desempeña como docente investigador en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Colombia de Bogotá D.C., Colombia, y pertenece como investigador al grupo de Pavimentos y Materiales de Ingeniería donde realiza estudios sobre asfaltos modificados. lamoreno@ucatolica.edu.co

Daniella Rodríguez Urrego

Es estudiante de ingeniería civil de la Universidad Católica de Colombia. Se ha desempeñado como auxiliar de investigación del grupo de Pavimentos y Materiales de Ingeniería de la Universidad Católica de Colombia desde el año 2006. droduiguez71@ucatolica.edu.co

Jennifer Lee Mariño

Es estudiante de ingeniería civil de la Universidad Católica de Colombia. Se ha desempeñado como auxiliar de investigación del grupo de Pavimentos y Materiales de Ingeniería de la Universidad Católica de Colombia desde el año 2006. jlee35@ucatolica.edu.co