



**EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL USO DE PAVIMENTO
ASFÁLTICO RECICLADO (RAP) EN VÍAS COLOMBIANAS**

ANGÉLICA ANDREA MÉNDEZ REVOLLO

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS
BOGOTÁ
2015 -I**

EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL USO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO (RAP) EN VÍAS COLOMBIANAS

TECHNICAL AND ECONOMIC EVALUATION OF THE USE OF RECYCLED ASPHALT PAVEMENT (RAP) IN COLOMBIAN ROUTES

Angélica Andrea Méndez Revollo
Ing. Civil, Investigador Colciencias Grupo Tratamiento de aguas
Universidad Militar Nueva Granada
Bogotá, Colombia.
u1100853@unimilitar.edu.co

RESUMEN

El uso de pavimentos asfálticos reciclados para la construcción y rehabilitación de carreteras es un tema que ha venido creciendo desde hace años, debido a la reutilización y potencialización de los materiales existentes que contribuye al medio ambiente por la disminución de explotación de canteras en búsqueda de nuevos agregados, sin embargo no existe una guía clara de esta técnica y por tanto es poco utilizada. Este trabajo busca establecer una perspectiva acerca del uso de pavimentos asfálticos reciclados a partir de estudios realizados, donde encontraron resultados óptimos en cuanto a propiedades mecánicas y dinámicas de las mezclas asfálticas recicladas. Los resultados mostraron que el reciclado en los casos donde ha sido utilizado ha traído un buen comportamiento y una reducción de costos considerable.

Palabras clave: Pavimento Asfáltico Reciclado, rehabilitación, economía.

ABSTRACT

The use of reclaimed asphalt pavement for construction and rehabilitation of roads is a theme that has been growing up for years, due to reuse and potentiation of existing materials that contributes to the environment by decreasing quarrying in search of new aggregates, however there is no clear guide to this technique and is therefore rarely used. This research focused to establish a perspective about the use of reclaimed asphalt pavement from studies carried out, where they found good results with respect to mechanical and dynamic properties of recycled asphalt mixtures. The results showed that recycled, where it has been used, has brought a good performance and significant cost reduction

Keywords: Reclaimed asphalt pavement, rehabilitation, economy.

INTRODUCCIÓN

El concepto de reciclado en carreteras es relativamente nuevo, sin embargo las técnicas de aprovechamiento de subproductos y reutilización de materiales para la construcción o mejoramiento de carreteras se conocen hace más de 50 años, los primeros datos sobre el uso del pavimento asfáltico reciclado (RAP) se remontan a 1915, sin embargo el desarrollo real del RAP se produjo desde mediados de la década de 1970 durante la crisis del petróleo [1]. Decenas de millones de toneladas de pavimentos asfáltico reciclado han sido utilizados para mezclas en caliente con los mismos rendimientos de una mezcla con materiales vírgenes. Altos ahorros se han logrado mediante su uso y ha venido recibiendo gran atención en los últimos 20 años presentando un mayor desarrollo en varios países para la construcción y rehabilitación de carreteras [2]. Estudios realizados en Europa y Estados Unidos han mostrado que más del 80% del material reciclado se reutiliza en la construcción de carreteras, sin embargo las normas solo permiten entre un 5% a un 50% de RAP en una mezcla de asfalto en caliente [1]. Por esta razón la rehabilitación por pavimentos flexibles reciclados ha tomado gran relevancia en los últimos años en varios países, debido a las ventajas que esta presenta en el uso energético, bajos costos y siendo amigable con el medio ambiente, convirtiéndose en una alternativa con gran aceptación mundial, por lo que es de gran importancia el estudio previo de los materiales reciclados y tener un conocimiento amplio en las técnicas utilizadas para este proceso de rehabilitación.

La técnica del reciclaje tiene un conjunto de ventajas, entre las que se encuentran la disponibilidad de material *in situ* reutilizando los materiales ya existentes, reduciendo así mismo el impacto ambiental en la explotación de canteras y la disposición de desechos, reducción de costos en materiales, y la posibilidad de corregir el contenido de asfalto y la gradación del agregado de una mezcla ya existente, generando una estructura de pavimento estable. [1-3] El reciclaje de pavimento flexible se divide principalmente en dos métodos los cuales son reciclaje en frío y reciclaje en caliente.

Por esta razón el Instituto Nacional de vías (INVIAS) ha considerado importante impulsar esta tecnología en el país, iniciando con la capacitación en las diferentes técnicas [4]; sin embargo es necesario realizar investigaciones debido a la diferencia de las propiedades mecánicas de los materiales, para así optimizar el proceso a nuestras condiciones, convirtiéndose en una técnica viable y económica para el mejoramiento y mantenimiento de las carreteras del país. Por otra parte en Colombia ya ha sido utilizada esta técnica como estrategia para mejorar las vías terciarias de Medellín, llegando actualmente casi a un 60% de vías arregladas por este método, con una reducción de costos de 20 a 30% y un considerable impacto positivo al medio ambiente [5].

En Colombia gran cantidad de carreteras presentan deterioros inminentes que han traído consigo un periodo de vida corto, varios factores han influido en esta situación como la mala calidad de materiales, insuficientes drenajes, procesos constructivos

inadecuados y estimaciones de tráfico poco confiables, lo que ha traído un alto costo para las reparaciones y mejoramiento de las vías ya existentes.

Bajo este contexto es necesario evaluar las distintas alternativas existentes para darle solución a este problema, convirtiéndose el reciclaje de pavimentos flexibles (RAP) en una solución llamativa por sus ventajas en costos, transporte y facilidad constructiva.

1. TÉCNICAS DE RECICLADO

Este tipo de métodos se basan en la reutilización de los materiales del pavimento defectuoso a los que se pueden añadir otros elementos como agentes rejuvenecedores, nueva mezcla bituminosa, entre otros. Estas técnicas se dividen en varios tipos diferentes, que se exponen a continuación:

1.1 Reciclado *in situ* en caliente: Se reutilizan los materiales de la estructura envejecida mediante un tratamiento a altas temperaturas en el lugar de la obra, se calienta mediante unos quemadores y este material se mezcla con agentes químicos rejuvenecedores y con nueva mezcla, que al final se extiende y compacta según el espesor requerido.

1.2 Reciclado *in situ* en frío con cemento: Procedimiento que se fundamenta en el fresado en frío de un cierto grosor del pavimento envejecido y el mezclado de este material con un conglomerante hidráulico como el cemento utilizado normalmente. El nuevo material se extiende y se compacta definiendo una sólida base para posteriores refuerzos.

1.3 Reciclado *in situ* en frío con emulsiones bituminosas: Esta técnica, reutiliza la totalidad de los materiales extraídos del pavimento envejecido. El procedimiento usual y básico consiste en el fresado en frío de cierto espesor del pavimento, este material se mezcla con una proporción determinada de emulsión y otros aditivos. El nuevo material se extiende y se compacta, seguido del curado de la capa reciclada y por último la extensión de una capa delgada de rodadura a base de mezcla caliente.

1.4 Reciclado en planta: Este procedimiento permite reciclar el conjunto o una cierta proporción de material envejecido mediante una central asfáltica adaptada. Al ser el porcentaje de material envejecido relativamente bajo, esta metodología permite corregir problemas graves de dosificación o calidad de los materiales.

2. RECICLADO EN FRIO

El reciclaje frío en Colombia se utiliza en pocas cantidades, un ejemplo del uso de esta técnica es generado en Medellín en donde [6] realizó un estudio fundamentado en el número estructural utilizado por el Método AASHTO que está dado por la Ecuación (1):

$$N_e = (E_s \times C_{sb}) + (E_b \times C_b) + (E_p \times C_p) \quad (1)$$

Donde:

- E_{sb} = Espesor de la subbase en pulgadas
- E_b = Espesor de la base en pulgadas
- E_p = Espesor del pavimento en pulgadas
- C_{sb} = Coeficiente estructural de la subbase
- C_b = Coeficiente estructural de la base
- C_p = Coeficiente estructural del pavimento

Para Medellín los coeficientes que recomienda Echeverría (2011) se presentan en la tabla 1:

Tabla 1. Coeficientes estructurales

CAPA	COEFICIENTE ESTRUCTURAL
Subbase	0.09
Base granular	0.12
Pavimento: Carpeta de rodadura	0.33
Pavimento: Agrietado y con parches	0.18

Fuente: Echeverría, 2011

A partir de estos valores se compara la estructura de un diseño tradicional con la alternativa de reciclaje ensayando la viga dos años después, con el cual se comprobó que el refuerzo era nulo en todas las vías con material reciclado, siendo cerca de 500.000m². Los resultados de la Viga de Benkelaman arrojaron valores del coeficiente del material reciclado de 0.31, muy similar a la de una carpeta de rodadura tradicional.

Los materiales obtenidos del reciclaje presentan un comportamiento dinámico normal, en donde los módulos dinámicos tienden a decrecer a medida que se disminuye la frecuencia de sollicitación de las cargas. El mejor comportamiento a fatiga se logra con bases en frío con aditivo RCA-10 como se observa en la figura 1.

La alternativa de reciclar y estabilizar con aditivo RCA-10 (0.06lt/m³) más crudo de castilla en un 1%, permite lograr un mejor comportamiento mecánico que cuando solo se utiliza aditivo o crudo de castilla, y un comportamiento similar en el que solo se utiliza el aditivo. El comportamiento dinámico de estos materiales permite establecer por la curva de fatiga, que cuando presenta menor pendiente presenta materiales con un mejor comportamiento a la fatiga. Por otra parte, la adición del crudo contrarresta la susceptibilidad térmica de las bases recicladas únicamente con aditivo lo que permite obtener un comportamiento mucho más estable. Una investigación llevada por la Universidad del Cauca comprobó que el aditivo RCA-10 incrementaba los maltenos al aplicarse a pavimentos envejecidos, validando el efecto de rejuvenecimiento nombrado anteriormente.

Con los resultados obtenidos se confirmó que el uso de bases recicladas con aditivos podía tratarse como mezclas asfálticas, indicando que el coeficiente adoptado de 0.28-

0.30 que en un principio era considerado muy alto, era un valor característico del uso de pavimento reciclado.

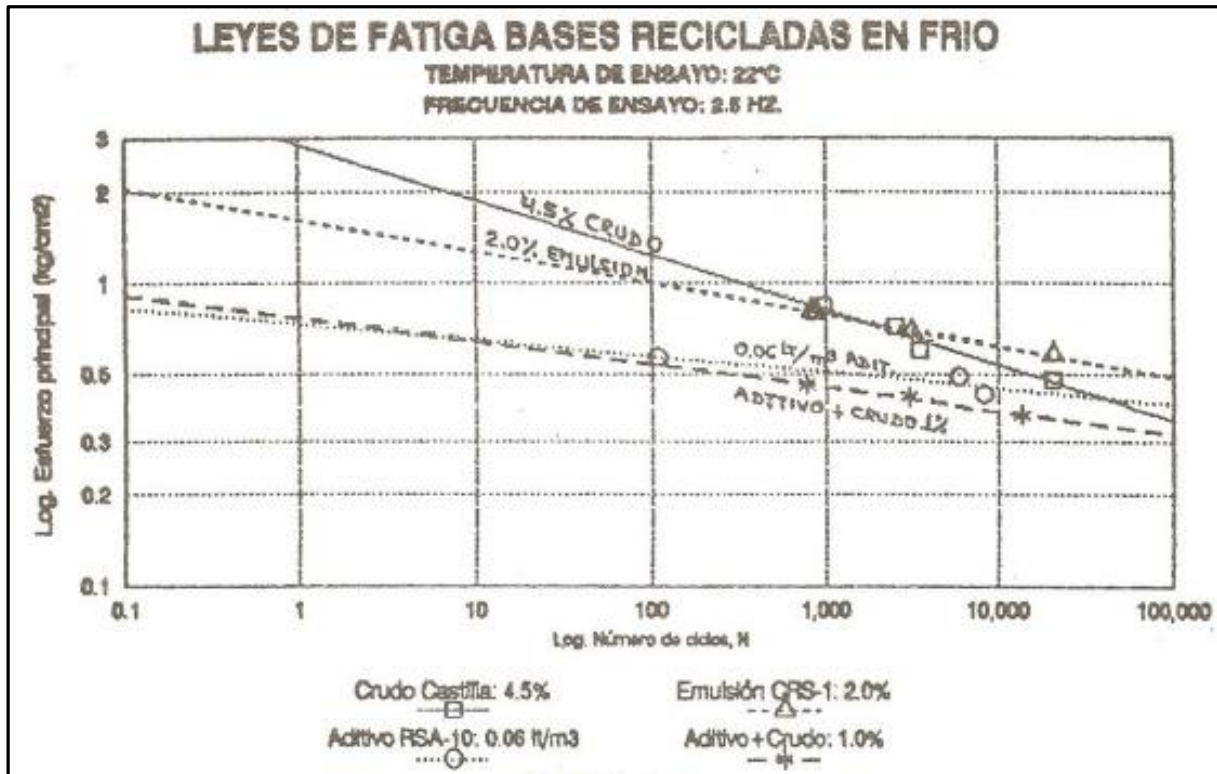


Fig 1. Leyes de fatiga de bases recicladas en frio
 Fuente: Echeverría, 2011

3. RECICLADO EN CALIENTE

En el reciclado en caliente, al concreto asfáltico recuperado se le agregan minerales, ligante asfáltico y plastificante, esto depende de la cantidad y calidad de la granulometría de la parte mineral del pavimento envejecido. Los agentes de reciclado tienen como objetivo restituir la consistencia y composición química del asfalto para satisfacer el contenido óptimo para la mezcla asfáltica reciclada. Los agentes rejuvenecedores se utilizan en las mezclas cuando el porcentaje de RAP es considerablemente alto o cuando el ligante ha experimentado un alto grado de envejecimiento. Según la ASTM los agentes rejuvenecedores para mezclas calientes se clasifican en los siguientes grupos que se muestran en la tabla 2. Junto con las características principales que debe tener los rejuvenecedores para procesos de reciclado [7].

Para la selección del agente rejuvenecedor deben establecerse varios parámetros tal que tenga las características de durabilidad y consistencia del ligante requeridas, y que cumplan con los requisitos de estabilidad y deformabilidad. La dosificación del rejuvenecedor dependerá de la cantidad de RAP y del grado de envejecimiento del asfalto [7].

Tabla 2. Clasificación de Agentes Rejuvenecedores para Mezclas en Caliente Norma ASTM D4552-87

ENSAYO	RA1	RA5	RA25	RA75	RA250	RA500
Viscosidad a 60 °C Cst	50-150	200-800	1000- 4000	5000- 10000	15000- 35000	40000-60000
Punto de llama C	218	218	218	218	218	218
Ensayo de Película delgada % cambio de peso	<3	<3	<3	<3	<3	<3
Relación de Viscosidad	<3	<3	<3	<3	<3	<3
Máximo Contenido de Parafinas %	25	25	25	25	25	25

Fuente: Ruiz y Sanabria, (s.f.)

Estudios realizados por Ruiz y Sanabria [7] evaluaron diferentes tipos de aceites de base Nafténica y aromática como agentes para reciclado en caliente, esto con el fin de comparar cuál de los aceites fabricados en Colombia brinda el mejor comportamiento para restituir las características reológicas del asfalto envejecido, para lo cual se escogieron 4 tipos de aceites, utilizados comúnmente en la industria del caucho y el rejuvenecedor suministrado por el Instituto Colombiano del petróleo (ICP); entre los cuales se clasificaron según su composición y su proveedor:

- Aceite de base Aromática-Icobandas
- Aceite de base Nafténica-Icobandas
- Aceite de base Nafténica-Shell-Talpa 20
- Aceite de base Nafténica-Shell-Talpa 50
- Aceite I.C.P

Los resultados de la clasificación de los rejuvenecedores se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Caracterización Rejuvenecedores (Aceites de base Aromática y Nafténica)

Tipos de Rejuvenecedores	Densidad Relativa (25°C/25°C)	% pérdida de peso en película delgada	Viscosidad SayboH Furo) a 60°C Aceite original SSF	Viscosidad Saybolt Furol a60°C	% Parafinas
Aceite Aromático – Icobandas	0,9580	1,451	76,50	89,50	0,177
Aceite Nafténico – Icobandas	0.9044	1,700	20,31	20,79	0,138
Aceite Nafténico - Shell -Taipa 20	0.9036	1,417	48,82	49,04	0,41
Aceite Nafténico - Shell -Talpa 50	0.8883	2,300	19,87	21.18	0,72
Aceite ICP	1.0971	14,080	26,30	193,50	0,146

Fuente: Ruiz y Sanabria, (s.f.)

Se escogió como ligante nuevo el asfalto de Barrancabermeja entre asfaltos Colombianos por sus características reológicas que son aptas para el reciclado en caliente, los ensayos realizados se observan en la tabla 4.

Tabla 4. Caracterización de Asfalto de Barrancabermeja

ENSAYO	RESULTADO
Densidad Relativa (25°C/25°C)	1.007
Viscosidad Saybolt Furol a 135°C	102 SSF
Viscosidad Capilar a 60°C Pérdida de peso en película delgada	937 Poises
Penetración 1/10 mm	0.959 % 97

Fuente: Ruiz y Sanabria, (s.f.)

Se utilizaron muestras de RAP que ya cumplieron su vida útil, las cuales se calentaron con el fin de disgregarlas manualmente, tratando de no alterar la granulometría. Posteriormente se realizó la caracterización del asfalto y de los agregados recuperados. A partir de los resultados de 4 muestras se descartaron los que presentaban viscosidades mayores a 150.000 poises que indican un grado alto de

envejecimiento y se escogió el RAP via Buga-Tulua para el diseño de la mezcla la cual utilizó un 40% de RAP, valor alto comparado al recomendado, buscando evaluar con mayor incidencia el uso de la cantidad del rejuvenecedor.

Con base en el porcentaje de asfalto presente en el RAP se encontraron las proporciones de la mezcla de ligantes por el Método del Instituto del Asfalto y por el Método de los Tanteos. Establecidas las proporciones por ambos métodos, se realizaron los diseños Marshall manteniendo constante para todos los porcentajes de ligante total la relación entre asfalto nuevo y rejuvenecedor, encontrado por el Método del Instituto Norteamericano del Asfalto para cada uno de los rejuvenecedores, no se realizaron diseños Marshall particulares para los resultados obtenidos en los tanteos porque las proporciones encontradas por el método de los tanteos coincidieron prácticamente con los hallados por el método INA.

En los diseños se combinaron los agregados vírgenes con los agregados del RAP de tal forma que se cumpliera con la curva granulométrica correspondiente al promedio de la especificación MOPT 1970 para concretos asfálticos de gradación cerrada con tamaño máximo igual al 3/4". En la tabla 5 se presentan las granulometrías del agregado RAP y la deducida por el agregado corrector de tal manera que la mezcla del agregado virgen, corrector y el Agregado del RAP sea la correspondiente a la del promedio de la especificación.

Tabla 5. Granulometría del RAP DEL K69+500 y del Agregado virgen para un 40% de RAP con respecto a la Mezcla Total

%PASA				
TAMIZ	ESPECIFICACION	PROMEDIO	GRANULOMETRIA RAP	GRANULOMETRIA AGREGADO CORRECTOR
1"			100	
3/4"	100	100	96,8	100
1/2"	85-100	92,5	82,4	98,7
#4	55-67	61	51	67,1
#10	40-54	47	38,2	52,4
#40	22-31	26,5	20,7	30,1
#80	12-20.	16	11,3	18,9
#200	4-8.	6	6,6	5,6

Fuente: Ruiz y Sanabria, (s.f.)

A las mezclas óptimas encontradas en los diseños Marshall, además de las pruebas tradicionales de estabilidad, flujo y análisis de vacíos se evaluó el comportamiento dinámico y la adherencia Ligante - Agregado utilizando la prueba de tracción indirecta. En la tabla 6 y 7 se observan las características de las mezclas óptimas y los resultados obtenidos de los ensayos.

Tabla 6. Características de las Mezclas Óptimas para los diferentes Rejuvenecedores

Rejuvenecedor	%Ligante	Composición del ligante			Estabilidad lbs	Flujo 1"1000	% Vacíos	% Resis. Tracción conservada
		Total en Mezcla Óptima	% Asfalto Viejo	% Asfalto nuevo				
ICP RAP-1	7.4	27.6	69.6	2.8	2025	14	4.2	97
TALPA 20	7.0	29.6	67.5	2.9	2800	13.7	4.7	90
TALPA 50	7.4	27.6	69.6	2.8	2040	14.3	4.1	94
ACEITE AROMÁTICO (Icobandas)	7.3	28.1	69.1	2.8	2050	14.2	4.2	>100
ACEITE NAFTENICO (icobandas)	7.0	29.6	67.5	2.8	2400	14.0	4.2	>100
SIN REJUVENECED OR	7.3	26.7	73.3		2570	13.5	3.8	89
ICP RAP No.4	7.5	28.3	63.1	8.6	2200	13	6.5	>100

Fuente: Ruiz y Sanabria, (s.f.)

Tabla 7. Resultados Caracterización Dinámica de las Mezclas Recicladas

REJUVENECEDOR	MÓDULOS DINÁMICOS			No. DE REPETICIONES CTo = 2.86 Kg/cm ²
	26.7°C	29.2°C	31.7°C	
I.C.P	11.800	9.300	5.500	360
TALPA 20	14.500	9.900	6.600	209
TALPA 50	9.200	5.800	4.500	147
Sin Rejuvenecedor	12.000	9.300	6.800	652

Aceite Aromático	14.200	10.200	7.500	386
Aceite Nafténico	10.100	7.900	5.100	312
ICP RAP No. 4	5.900	4.100	2650	48

Fuente: Ruiz y Sanabria, (s.f.)

A partir de las proporciones de ligantes óptimas encontrados de los diseños Marshall se hicieron análisis químicos para evaluar el grado de rejuvenecimiento de las mezclas asfálticas encontrando el % de maltenos y asfaltenos. Estos resultados se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. Estudio del Grado de Rejuvenecimiento de los Ligantes Recuperados de las Mezclas Recicladas

REJUVENECEDOR	% MALTENOS	% ASFALTENOS	VISCOSIDAD A 60° POISES
ICP	84.7	15.3	1750
TALPA-20	81.5	18.5	2600
TALPA-50	84.2	15.8	1550
Sin Rejuvenecedor	80.2	19.8	3700
Aceite Aromático (Icobandas)	80.5	17.2	1900
Aceite Nafténico (Icobandas)	83.2	16.8	1450

Fuente: Ruiz y Sanabria, (s.f.)

Teniendo como base las especificaciones del ASTM los aceites que satisfacen con las exigencias son el Aceite aromático Icobandas y el Shell talpa 20. De igual forma al analizar los resultados de los ensayos de las mezclas asfálticas de la tabla 4.7 las mezclas presentan un comportamiento satisfactorio y se destaca dentro de estas la muestra tratada con TALPA-20. En los resultados presentados en la tabla 4.10 se observa que los aceites rejuvenecedores si tienen efecto positivo en el comportamiento reológico del ligante resultante en las mezclas recicladas. El recuperado de la mezcla sin rejuvenecedor supero considerablemente el valor de la viscosidad esperada. Se observa a lo largo de este estudio que el ligante resultante de la mezcla asfalto viejo, asfalto nuevo y rejuvenecedor, alcanzan características adecuadas aunque inicialmente los aceites proporcionen una consistencia blanda permiten niveles de maltenos más elevados que garantizan la recuperación de la capacidad de ligante.

Por otro lado Ostos *et al.*, (2010) evaluó el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas del Instituto de Desarrollo Urbano con granulometría md20, asfaltos con penetración 60/70 y 80/100 y 100% de material granular de RAP [8]. En la figura 2 se observa la curva granulométrica md20 utilizada en la investigación.

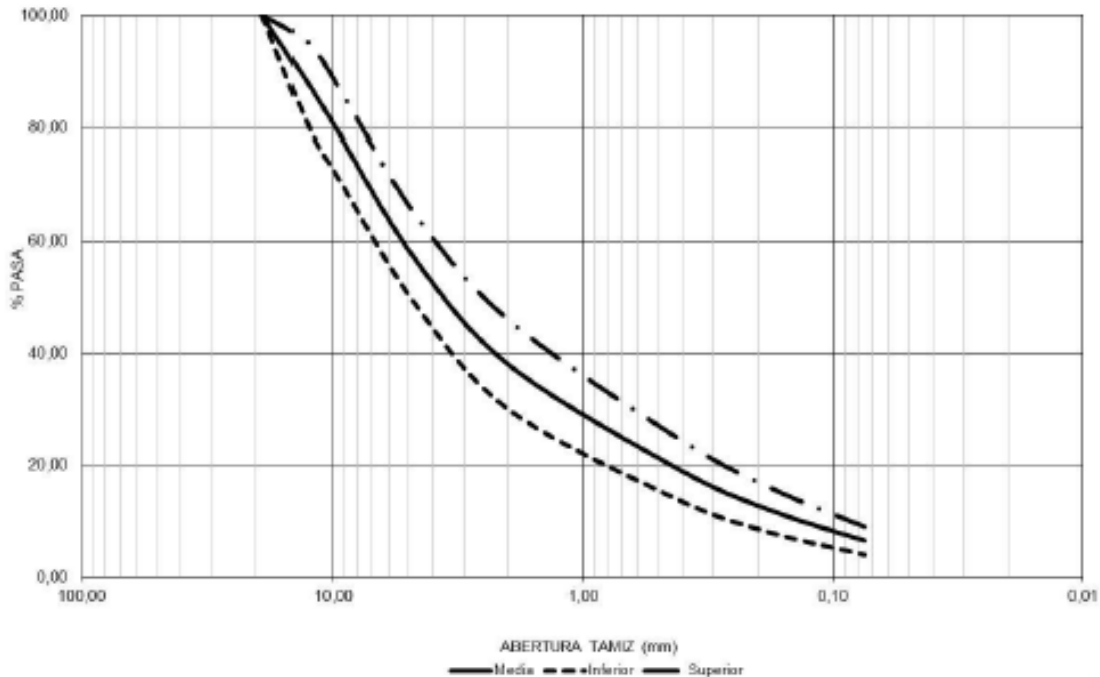


Fig 2. Curva granulométrica md20 del Instituto de Desarrollo Urbano
Fuente: Ostos *et al.*, (2011)

Según los ensayos Marshall, el asfalto óptimo para la mezcla fue de 3%. Se les realizó el ensayo a resistencia a tracción indirecta en estado seco y húmedo. Los resultados mostraron que la diferencia entre estados seco y húmedo no afectaba en gran medida la parte inicial de la gráfica, mantenían un pendiente constante por lo que su respuesta elástica es igual en ambas condiciones. Sin embargo la resistencia final presentaba un valor más elevado en estado seco.

En la figura 3 se observa los efectos de las resistencias en estado seco y húmedo con los dos asfaltos estudiados, se puede establecer que las mezclas con asfalto 60/70 presenta una mayor pendiente y por tanto una resistencia máxima que las mezclas con asfalto 80/100; también se observa que la diferencia entre estado seco y húmedo es muy bajo y en los dos casos se obtiene mejores comportamientos en estado seco con mayores resistencias.

También se estudiaron probetas envejecidas a 24 y 48 horas donde se obtuvieron curvas similares por lo que llevo a concluir que no ahí influencia en el envejecimiento y la resistencia de la mezcla como se observa en la figura 4.

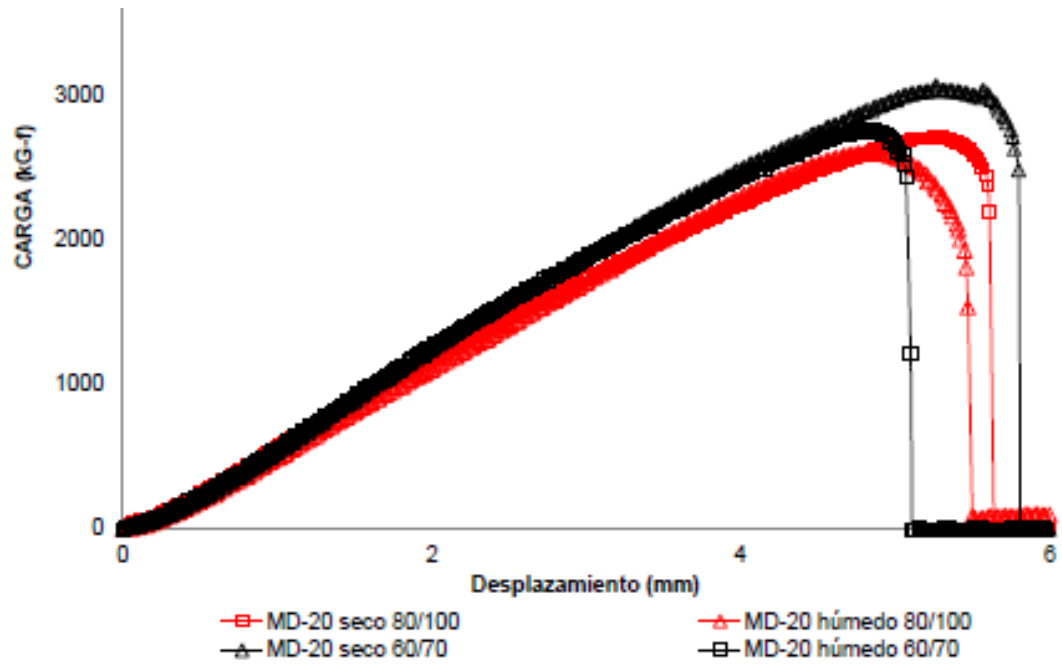


Fig 3. Curvas de fuerza vs desplazamiento para muestras con asfalto 60/70 y 80/100 ensayadas en estado seco y húmedo
Fuente: Ostos et al.,(2011)

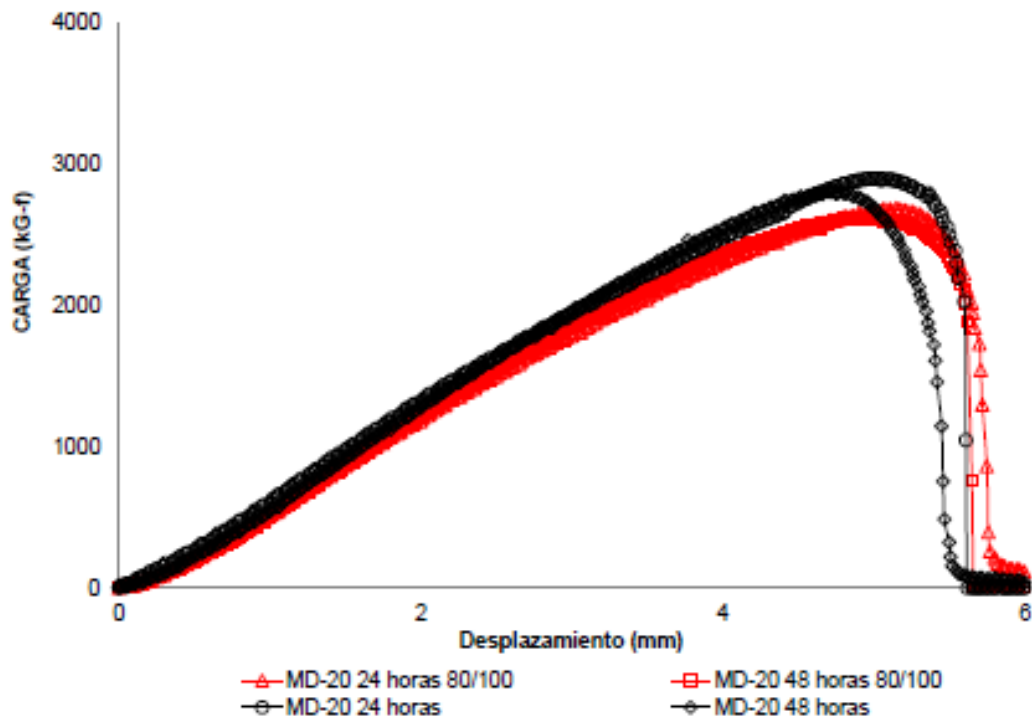


Fig 4. Curvas de fuerza vs desplazamiento para muestras con asfalto 60/70 y 80/100 y envejecidas
Fuente: Ostos et al., (2011)

Según los resultados obtenidos a lo largo de este estudio las mezclas con 100% de RAP presentan un comportamiento que cumple con las especificaciones siendo viable para ser utilizada en vías Colombianas.

4. EVALUACIÓN ECONÓMICA

La utilización del RAP en mezclas puede conducir a ahorros económicos debido a la menor utilización de materias primas y ahorro en costos de disposición final. Varios estudios realizados han demostrado que esta técnica genera una reducción de costos; por ejemplo [9] evaluaron el método de reciclado en frío para la rehabilitación de pavimentos de la ciudad de Cochabamba, mediante tres alternativas que se presentan a continuación en la tabla 9:

Tabla 9. Alternativas de Rehabilitación

Alternativas		
Convencionales		No convencional
1	2	3
Escarificado o remoción del pavimento existente, seguido de un recapado asfáltico	Saneamiento de la carpeta existente mediante el bacheo y curado de fisuras, seguido de un recapado asfáltico	Fresado y reciclado en frío de pavimentos asfálticos

Fuente: Severich y Valenzuela, (2010)

La metodología para el análisis se realizó mediante una matriz donde se interrelacionaron tres variables entre las cuales estaba plazo, costo y trabajabilidad obteniendo una mayor puntaje la tercera alternativa la cual tiene el menor plazo de ejecución, debido al menor tiempo de rehabilitación por lo que reduce la interrupción en las vías; desde el punto de vista ecológico minimiza la extracción de materiales debido al 100% de utilización de la vía existente; a partir de lo dicho esta alternativa presenta un menor costo. Siendo 36% más económica que la alternativa 1 y 9% menor que la alternativa 2.

Williams *et al.*, (2013) realizaron un estudio para valorar los costos y beneficios de la aplicación de mezclas asfálticas con diferentes contenidos de RAP, se realizó sobre información primaria obtenida de obras en ejecución y ejecutadas los últimos 5 años ubicadas en CABA y Gran Buenos Aires en donde emplearon RAP en porcentajes hasta del 20%. Los resultados mostraron ahorros económicos por el uso de RAP como se observa en la tabla 10; mostrando un porcentaje de ahorro de un 3.3% con 10% RAP y un 7.5% con 30% de RAP.

Tabla 10. Costos totales de Producción de mezclas asfálticas con 0%, 10% y 20% de RAP

Operación	0% RAP	10% RAP	20 % RAP
Fresado de concreto asfáltico (Varios e; Ancho 3m)	138	138	138
Transporte desde frente de obra a planta (Aprox. 30 Km)	38	38	38
Separación de RAP (2 Tamaños)	-	9	9
Elaboración de mezcla asfáltica	133	133	133
Materiales de mezcla asfáltica	405	366	327
Transporte de mezcla (Aprox. 30 Km)	57	57	57
Colocación de la mezcla	142,5	142,5	142,5
Costo Total de Producción [\$/Tn + IVA]	913,5	883,5	844,5

Fuente: William et al., (2013)

Estudios realizados por [6] en vías de Medellín evaluó los coeficientes para materiales reciclados y estabilizados con aditivos químicos desarrollados y producidos en Colombia, en ahorro de costos realizando una comparación entre dos alternativas para vías existentes una de ellas con uso de RAP. A continuación se muestra la comparación en costos de cada alternativa en la tabla 11 y 12:

Tabla 11. Alternativas de rehabilitación

Avenida 51 Entrada principal desde calle 57A hasta el parque calle 51. Itagüí			
Estructura existente	Espesor cm.	Coefficiente adoptado	Numero estructural
subbase de rio, sobretamaños	40.0	0.09	1.42
pavimento fallado	7.50	0.18	0.53
Solucion propuesta	Parcheo en 10 cm. en el 33% del area, base asfaltica en 7.5 cm.y sobrecarpeta de rodadura de 6.5 cm.		
Base asfaltica	7.50	0.28	0.83
Carpeta asfaltica	6.50	0.33	0.84
Numero estructural con refuerzo			3.62
Valor solucion propuesta sin imprevistos			\$ 96,000,000
Solucion alterna	Reciclar con crudo y aditivo RCA-10 en 27 cm.y colocar rodadura de 5.5 cm.Se recicló en 33 cm.y se retiraron 6.0 cm. para no subir niveles de la via, este material se utilizó en otras vías como base estabilizada.		
Fecha reciclaje	Mar-94		
subbase de rio, sobretamaños	14.0	0.09	0.50
reciclaje con crudo y RCA-10	27.00	0.28	2.98
Carpeta asfaltica	5.50	0.33	0.71
Numero estructural con reciclaje			4.19
Valor solucion ejecutada con reciclaje, incluye imprevistos			\$ 48,000,000

Fuente: Echeverría (2011)

Tabla 12. Alternativas de rehabilitación

Carrera 70 entre calle 9 y calle 30. Medellín			
Estructura existente	Espesor cm.	Coficiente adoptado	Numero estructural
subbase en arenilla	27.00	0.07	0.74
subbase de rio, sobretamaños	37.00	0.09	1.31
pavimento fallado	9.10	0.23	0.82
Solucion propuesta	Hacer parcheo en el 40% del area y reforzar con 15.1 cm. de rodadura		
Carpeta asfaltica	15.10	0.33	1.96
Numero estructural con refuerzo			4.84
Valor solucion propuesta sin imprevistos			\$ 309,000,000
Solucion alterna	Reciclar con crudo y aditivo RCA-10 en 25 cm. y colocar carpeta de rodadura de 6.4 cm.		
Fecha reciclaje	Jul-95		
subbase en arenilla	27.00	0.07	0.74
subbase de rio, sobretamaños	21.10	0.09	0.75
reciclaje con crudo y RCA-10	25.00	0.28	2.76
Carpeta asfaltica	6.40	0.33	0.83
Numero estructural con reciclaje			5.08
Valor solucion ejecutada con reciclaje, incluye imprevistos			\$ 162,000,000

Fuente: Echeverría (2011)

Las alternativas propuestas presentan casi un 50% en la reducción de costos por la alternativa de reciclado para la rehabilitación de las vías propuestas. De igual manera la capacidad del pavimento para soportar las solicitudes del tráfico evaluado por el cálculo del número estructural son valores más altos comparados con la alternativa tradicional.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los estudios realizados por entidades comparando el uso de pavimentos reciclados bajo diferentes parámetros de análisis, han mostrado resultados favorables independientemente de la técnica de reciclado. Sin embargo es importante hacer énfasis respecto al uso de escombros de pavimentos y pavimentos fresados de reciclado en frio, los cuales son materiales triturados de gran calidad y contenido de asfalto que puede ser recuperado con el uso de aditivos, que actualmente son utilizados como material de subbase o base granular para vías secundarias o terciarias con coeficientes estructurales de 0.12, perdiendo así la posibilidad de ser manejados como bases asfálticas con coeficientes estructurales de 0.24 o más, llevando a un desperdicio de recursos reutilizables que traerían un ahorro económico y una disminución en el impacto ambiental que trae la generación de nuevos materiales.

Entre los aceites plastificantes que se comercializan en Colombia para reciclado en caliente se encuentran algunos que cumplen las especificaciones de la ASTM para rejuvenecedores, en general los aceites que se emplearon en el estudio cumplieron con la expectativa básica de restituir al ligante resultante; la composición química y las

características reológicas que garantizan al producto resultante su capacidad ligante y la resistencia al envejecimiento. Sin embargo los aceites que cumplen con las especificaciones ASTM son los que afectan de manera más positiva el comportamiento de las mezclas, los cuales fueron el aceite aromático de Icobandas y Aceite Nafténico Shell Talpa 20.

Las mezclas recicladas fabricadas en el estudio según los ensayos de establecidos en nuestro país presentan un comportamiento satisfactorio, pero al profundizar en la caracterización mediante la determinación de módulos dinámicos y resistencia a la fatiga se detecta cierta deficiencia con respecto a las mezclas nuevas, claro está que esta evaluación hace referencia al estado inicial sin contemplar la susceptibilidad al envejecimiento.

Para la utilización de mezclas recicladas en caliente como las evaluadas se debe efectuar una exhaustiva caracterización que permita determinar los parámetros indispensables para modelar las alternativas estructurales de pavimento y encontrar una solución con mezcla reciclada donde se tengan en cuenta las debilidades y las fortalezas de estas.

Con las investigaciones desarrolladas se ha determinado que no hay plastificadores universales para los ligantes en un asfalto envejecido debido a la diferencia en la composición de los asfaltos que se usan para la preparación de la mezcla asfáltica, ya que cada uno presenta propiedades diferentes, el grado del envejecimiento y su mecanismo, los cuales dependen también de la composición de los agregados, la gravimetría, porosidad, cantidad del ligante, etc.

El comportamiento dinámico y a la fatiga de las bases recicladas en frío nombradas anteriormente con aditivo RAC-10, desde el punto de vista económico se ve reflejado en espesores menores que satisfacen la capacidad estructural del pavimento y una mayor vida útil. De igual manera se debe establecer una mejora en el tiempo de curado y protección de sello asfáltico, para evitar deterioro por presencia de agua.

Basado en los resultados el empleo de RAP en mezclas asfálticas pueden resultar en ahorros económicos apreciables, asociados a la disminución de los requerimientos de agregados. Cabe aclarar que si en el análisis costo beneficio se tienen en cuenta otros factores externos como los derivados del ahorro energético y el ahorro de recursos, los resultados son cada vez más positivos.

Para las técnicas de conservación posibles, debe hacerse un análisis de cada una de ellas teniendo en cuenta todos los condicionantes que las puedan afectar. Entre los cuales encontramos:

- **Coste.** Cada técnica tendrá un cierto coste que hay que tratar de minimizar. El coste se puede considerar en términos económicos, sociales y medioambientales.

- **Experiencia.** La empresa y los técnicos pueden tener experiencia con la técnica a ser utilizada, y de igual manera se debe tener un conocimiento amplio y acertado del material, condiciones y recursos que se tengan en cada caso.
- **Equipos disponibles.** La empresa debe tener disponibles los equipos humanos y materiales necesarios para poder utilizar una determinada técnica, y que sea acorde con la necesidad de la obra.
- **Tiempo requerido de ejecución.** El tiempo de entrega de la obra acabada puede ser determinante a la hora de elegir una técnica de conservación.

6. CONCLUSIONES

A partir de la revisión bibliográfica sobre las técnicas de reciclado en caliente y frío, a partir de los resultados obtenidos bajo diferentes variables de estudio las conclusiones generales de este artículo son las siguientes:

- Las técnicas de reciclado constituyen una alternativa viable para la rehabilitación de pavimentos, siendo necesario poner especial atención en el diseño y puesta en obra de las mezclas recicladas, con personas capacitadas y previo conocimiento de la actividad a realizar.
- La vida estimada de las diferentes tipologías de secciones rehabilitadas con mezclas recicladas, es superior a la que tendrían las secciones si se hubieran rehabilitado con un refuerzo convencional de acuerdo a la normativa vigente. No obstante, hay que tener muy en cuenta el espesor de las capas rehabilitadas, ya que las mezclas recicladas con buen comportamiento estructural pueden volverse críticas si el espesor no es suficiente. Por lo que se debe tener un control y estudio previo a las variables que podrían afectar.
- Cabe destacar que en la mayoría de los casos el reciclado ha sido la opción más económica, aun así la falta de información y de confiabilidad en el método hace que sea una práctica poco utilizada. Además de esto vale la pena destacar el ahorro de materiales, transporte, la reducción de almacenamiento de materiales en botaderos y la utilización racional de recursos naturales; haciendo del RAP una tecnología amigable con el medio ambiente.

REFERENCIAS

[1] Reyes-Ortiz, O., Berardinelli, E., Alvarez, a. E., Carvajal-Muñoz, J. S., & Fuentes, L. G. (2012). Evaluation of Hot Mix Asphalt Mixtures with Replacement of Aggregates by Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Material. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 53, 379–388.

[2] Decker, D. (s.f.). State-of-the-practice for use of recycled asphalt pavement (RAP) in hot-mix asphalt, 109–126. En <http://aftre.nssga.org/Symposium/1998-11.pdf> (noviembre del 2014)

[3] Rodrigues Mineros, C. E., & Rodriguez Molina, J. A. (2004). Evaluación y rehabilitación de pavimentos flexibles por el método del reciclaje. UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD.

[4] INVIAS. (2012). Reciclado del pavimento, una técnica viable y económica para las vías. En: (octubre del 2014).

[5] Elmundo.com. (2013). Reciclaje de pavimentos, un alivio para las vías terciarias. En: http://www.elmundo.com/portal/noticias/obras/reciclaje_de_pavimentos_un_alivio_para_las_vias_terciarias.php. (Noviembre del 2014)

[6] Echeverría., (2011). PONENCIA: Coeficientes estructurales para materiales reciclados y estabilizados con aditivos químicos desarrollados y producidos en Colombia. Especificaciones constructivas y ahorro en costos. En: XVIII Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos

[7] Ruiz J., y Sanabria L., (s.f.). Estudio de rejuvenecedores de asfaltos utilizados en reciclado de mezclas asfálticas en caliente. Facultad de Ingeniería, Universidad del Cauca. 24p.

[8] Ostos Ascencio J.L.; Duarte J.M. y Reyes Ortiz (2011). Comportamiento de mezclas asfálticas del Instituto de Desarrollo Urbano con adición de pavimento reciclado. Facultad de Ingeniería. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá.11p.

[9] Severich M.; Valenzuela Galindo R. A. (2010). Rehabilitación de pavimentos asfálticos de la ciudad de Cochabamba mediante el fresado y reciclado en frío. En: Journal Boliviano de Ciencias, v. 7, n. 21, pp.29-39.

[10] Williams E.; Filippertti M.B.; Larsen D.; Capra B.; Pendon M.; Couselo R. (2013) Proyecto de reciclado de pavimento: Costos pertinentes y beneficios. Centro Tecnológico de Desarrollo Regional. Facultad Regional San Rafael - Universidad Tecnológica Nacional. Los Reyunos, San Rafael, Mendoza, Argentina.