

Viabilidad de la implementación del asfalto caucho a partir de un diseño de mezcla de MPI en Procopal S.A.

Diez Trujillo, Juan Pablo^a, Vásquez Vásquez, Juan Simón^a

Sánchez, Marcos^b

^a Estudiantes de Ingeniería de Procesos, Universidad EAFIT, Medellín Colombia.

^b Profesor, Asesor del Proyecto de Grado, Gerente de Suelos y Pavimentos, Medellín, Colombia.

Resumen

Este artículo determina la viabilidad de la implementación de asfalto caucho en Colombia, concretamente en el departamento de Antioquia, a partir de un diseño de mezcla con gránulo de caucho reciclado (GCR) proporcionado por MPI para Procopal S. A. En este se realiza un seguimiento de los procesos de producción en esta última compañía, dedicada a la producción de materiales y pavimentación de vías.

Esta iniciativa surge de la necesidad de conocer las posibilidades, en términos de producción, economía y normatividad de producir mezclas asfálticas con asfalto caucho en Procopal S. A., para aportar a un estado de conocimiento sobre el tema, considerando que en Colombia no se ha popularizado el uso del asfalto caucho, debido a que los primeros ensayos en vías y carreteras son de reciente aparición. De igual manera, inciden factores técnicos y de mercado puesto que no existe una demanda significativa, ni un conocimiento claro de este tipo de mezcla que incentiven el uso a gran escala de este tipo de mezclas, pese a que su uso sea rentable en el largo plazo.

Como métodos se realizó, en primer lugar, un recorrido por el proceso productivo de la planta de Procopal S. A., encontrando que la viabilidad de producir asfalto caucho depende de la mejora en algunos segmentos del proceso, concretamente, transporte, almacenamiento y bombeo de asfalto con gránulos de caucho reciclado (GCR). En segundo lugar, se llevó a cabo un estudio económico enfocado en los costos de producción de la mezcla asfáltica modificada con GCR en comparación con los de la mezcla tradicional. Al respecto, se halló que, pese a que el asfalto caucho suele ser más costoso que el tradicional, si se siguen ciertos parámetros estructurales es posible reducir costos en un 19%. Finalmente, mediante un estudio Marshall, se determinó que Procopal S. A. cuenta con las condiciones técnicas para producir asfalto caucho, además de cumplir con los estándares exigidos por la norma Invías.

1. Introducción

La producción y aplicación de asfalto caucho ha tenido una buena respuesta especialmente en países industrializados [1] desde su desarrollo inicial por el ingeniero estadounidense Charles Mc Donald [2]. Dentro de las características de este material, se encuentra su adecuada disposición y reutilización a partir un gran número de llantas desechadas [2]; su resistencia a la deformación y fatiga en vías y carreteras [2, 3]; y su capacidad de recuperación [3]. Sumado a esto, el uso de asfalto caucho produce beneficios ecológicos y la depuración de contaminantes, considerando que la vida útil de los neumáticos fuera de uso (NFU), por su difícil degradación y compleja disposición, genera que haya dificultades en su procesamiento, puesto que no son desechos convencionales [4].

En Colombia, no se ha popularizado el uso del asfalto caucho, debido a que los primeros ensayos en vías y carreteras son de reciente aparición [5]. De igual manera, inciden factores técnicos y de mercado, puesto que no existe demanda ni conocimiento técnico que incentive el uso a gran escala de este tipo de mezclas, pese a que su uso sea rentable en el largo plazo. Al respecto, según la norma del Instituto Nacional de Vías (Invías), para un proyecto de construcción de carreteras solo el 10% del costo total de una mezcla asfáltica se puede destinar en asfalto caucho [5]. Además, los costos de producción a nivel industrial son altos [6], sobre todo si se considera la poca demanda existente.

En contexto, y según lo anterior, surge el interés y la necesidad de determinar la viabilidad de la implementación de asfalto caucho en Colombia, concretamente en el departamento de Antioquia, a partir de un diseño de mezcla con gránulo de caucho reciclado (GCR) mediante un seguimiento de los procesos de producción y económicos en empresas dedicadas a la fabricación de materiales y a la pavimentación de vías en Colombia. Con este fin, se recurre a compañías como MPI, especializada en el desarrollo tecnológico de asfalto con este tipo de materiales, y Procopal S.A., experta en su implementación, es decir, en la pavimentación con mezclas asfálticas.

Como aplicación práctica, el desarrollo de esta investigación aporta a un estado de conocimiento sobre el tema de la viabilidad de la implementación de asfalto caucho en Colombia, así como las condiciones de posibilidad de ser producida por empresas del mismo sector. Por otra parte, se darán a Procopal S.A. algunas pautas a seguir en el proceso de organización logística para la producción de este material, desde su explotación hasta su despacho para la obra, que muestre cada uno de los procesos de transformación.

La relevancia social de este trabajo reside principalmente en generar impacto ambiental, como apuesta a la reducción de la contaminación, en tanto un NFU se reciclaría para ser usado en mezclas, lo cual disminuiría la incineración del caucho. Asimismo, impacta sobre la salud, por cuanto no habría tanto vertimiento y acumulación de NFU en zonas al aire libre, lo que puede ocasionar enfermedades [7].

Como valor teórico, esta investigación aporta al campo de ingeniería de procesos. En este sentido, para el uso del NFU en la pavimentación de vías se debe considerar una mirada holística del proceso para garantizar la funcionalidad del diseño, haciendo un adecuado uso de conocimientos específicos en química, logística y manejo de operaciones, así como en sostenibilidad social, económica y ambiental.

Dentro de los estudios relacionados con la implementación de asfalto caucho, en Colombia no se cuenta con una vasta producción de investigaciones sobre este tema. Sin embargo, existe un estudio cuya problemática tiene su base en el cuidado del ambiente y la afectación que pueden generar los desechos de neumáticos que han perdido su vida útil. Los autores llevaron a cabo el método Marshall mediante un análisis comparativo de la mezcla convencional con una mezcla de asfalto caucho basada en la tecnología GAP-GRADE. Los resultados demostraron que el agregado de mezcla asfáltica permite obtener un pavimento con mejores respuestas a los cambios térmicos y aumenta la resistencia a la deformación, fatiga y al envejecimiento, lo que incrementa la vida útil del pavimento y disminuye costos de mantenimiento [3].

Con referencia a los estudios internacionales, los más destacados se han llevado a cabo en países asiáticos altamente industrializados, entre ellos, China, donde la experimentación en torno al asfalto caucho es muy avanzada [8-12]. Al respecto, la utilización de GCR con polietileno (plástico) de baja densidad [9-11],

como aditivos al agregado pétreo, surge como una mezcla de mucha utilidad en contextos de condiciones climatológicas muy elevadas, por cuanto ofrece un valor óptimo para una mejor resistencia contra el ahuellamiento [9]. En estas investigaciones suelen ser muy populares los métodos comparativos y el método Marshall [8-12].

Al comparar estas investigaciones con las intenciones de la presente, se llega a la conclusión de que el método Marshall es ideal por su popular uso [8, 12], porque da buenos resultados y contempla las variables efectivas necesarias para el desarrollo de los objetivos propuestos [13]. Sumado a esto, se encuentra también que los antecedentes reflejan avances muy significativos en el uso de asfalto caucho, especialmente, en países industrializados, lo cual hace que la presente investigación sea vista como un antecedente importante a nivel nacional y, por qué no, latinoamericano, si se considera que la implementación de este material es costosa [6] y de poca demanda.

2. Materiales y métodos

Esta fase metodológica se compone de los siguientes pasos: 1) viabilidad productiva y 2) de costos (comparativa) de la implementación de asfalto caucho en Procopal S.A.; 3) viabilidad técnica, a partir del método Marshall, diseñado por MPI para la elaboración de la mezcla asfáltica modificada con caucho en Procopal S.A. Finalmente, se verificó que la mezcla obtenida cumplía con los estándares establecidos por la norma Invías.

2.1. Viabilidad productiva en Procopal S.A.

Para la verificación del proceso productivo en la planta de Procopal S.A, se realizaron tres visitas de campo, haciendo un recorrido paso a paso de la producción de la mezcla asfáltica. Este proceso comenzó con la explotación minera para extraer el material crudo que luego es triturado para mezclarse con el bitumen asfáltico, finalizando como mezcla asfáltica en caliente, que es despachada en volquetas. Como instrumento se utilizó el diario de campo, en el cual se anotó fielmente el segmento del proceso analizado, las observaciones principales del segmento de proceso y si debe realizarse algún cambio en el mismo para la producción de mezcla asfáltica modificada con caucho. La Tabla I muestra las categorías de análisis para establecer las posibilidades de implementar la producción de asfalto caucho en Procopal S.A.:

Tabla I. Categorías de análisis del proceso productivo en Procopal S.A.

Categorías de producción	Proceso o material necesario	Nivel de viabilidad
Área de explotación minera.	a) Calidad del material extraído (conformación geológica).	Cumple/No cumple.
Etapas de trituración.	b) Capacidad de la maquinaria (trituradoras).	Cumple/No cumple.
Acopio de los materiales.	c) Almacenamiento de los agregados pétreos (arena y piedra).	Cumple/No cumple.
Producción de la mezcla.	d) Funcionamiento de la planta ASTEC (alimentación de los agregados pétreos; alimentación del asfalto y bombeo; proceso de mezclado, y la tolva de almacenamiento).	Cumple/No cumple.

Fuente: Elaboración propia.

2.2. Viabilidad económica

Para evaluar la viabilidad económica de la implementación de la nueva mezcla, se recurrió al análisis de precios unitarios (APU), con el que se realizaron estimaciones de los costos de producción para la mezcla asfáltica tradicional y para la mezcla modificada con caucho mediante un análisis comparativo, tomando como unidad de medida la tonelada de mezcla asfáltica producida.

Este análisis de viabilidad económica contó con documentación de la empresa Procopal S.A., en la que se reportan los costos de producción de la mezcla tradicional. La producción de asfalto caucho se analizó

comparativamente a la luz de estos costos de producción, tanto directos como indirectos, además de los costos de administración y ventas GAV. Algunos costos como los de tiempos de equipo o mano de obra no se pueden escalar linealmente, debido a que son variables. Respecto al recurso humano, se realizaron estimaciones relacionadas con la capacidad de producción, donde se tuvieron en cuenta factores como turnos de trabajo, producción anual y fluctuaciones en prestaciones sociales y salariales.

El análisis se realizó para la mezcla asfáltica tradicional MDC-2 y la mezcla asfáltica modificada con caucho. Posteriormente, se realizó una comparación entre estas para sacar conclusiones. La Tabla II expone los ítems que se consideraron para el análisis de la viabilidad económica.

Tabla II. Tipos de costos

Tipos de costos		Porcentaje
Costos de administración		11%
Costos de producción	Agregados pétreos	89%
	Asfalto	
	Gas natural	
	KW de energía	
	Mano de obra	
	Equipos y maquinaria	
	Laboratorio	
	Regalía	
Industria y Comercio		

Fuente: Elaboración propia.

2.3. Viabilidad técnica a partir de ensayos con el método Marshall

2.3.1. Caracterización de agregados

Para realizar el diseño de mezcla modificada con GCR se enviaron muestras de material pétreo desde Procopal S.A. a MPI. Allí se realizaron ensayos preliminares para el diseño de una mezcla asfáltica, como se mostrará en adelante. La Tabla III describe la cantidad de material pétreo, las características del tamaño y la cantidad para el diseño de la mezcla.

Tabla III. Materiales extraídos de la explotación minera en la planta de Procopal S.A, tomados directamente de la tolva de alimentación de la planta ASTEC

Descripción	Cantidad Enviada
Triturado de 3/4"	97 Kg
Triturado de 1"	104 Kg
Arena Triturada Seca	98 Kg
Triturado de 3/8"	40 Kg

Fuente: Elaboración propia.

Como siguiente paso, se procedió a determinar la gradación compuesta, buscando cumplir la norma INVIAS E-824-13 [14], que establece que la granulometría se debe reportar con base en los porcentajes de cada componente a partir del análisis granulométrico. En este caso, para una mezcla tipo M GCR-25 se obtuvo de MPI los siguientes resultados de la gradación compuesta para la elaboración de las probetas:

- 20% de triturado de 1".
- 25% de triturado de 3/4".
- 20% de triturado de 3/8".
- 35% de arena triturada seca.

La misma norma establece límites para la distribución de tamaños de los materiales pétreos. En este sentido, se comprueba que la gradación combinada de los agregados se encuentra dentro de los límites que la norma establece, como lo ilustra la Tabla IV:

Tabla IV. Distribución de tamaños de los materiales pétreos combinados y sus límites, determinados por la norma Inviás

TAMIZ	1"	¾"	½"	3/8"	No.4	No.8	No.30	No.50	No.200
Combinación	100	94,8	71,3	59,4	37,6	21,4	8,8	6,4	3,7
Límites Inviás									
M-GCR-25	100	90-100	65-85	50-70	30-45	16-28	6-16	4-12	2-6
Lím. Superior del Diseño	100	99	75	63	42	24	12	9	5,7
Lím. Inferior del Diseño	100	91	67	55	34	18	6	4	2,7

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, en el laboratorio se procedió a la caracterización físico-mecánica de los agregados. Para ello, se realizaron algunas pruebas, cuyos resultados se reflejan en la Tabla V:

Tabla V. Pruebas y resultados de la caracterización físico-mecánica

Característica	Valor	Norma Inviás
Dureza, Agregado grueso		
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, (%)	9,7	E-238
Desgaste en la máquina de los Ángeles, máximo (%) s		E-218
Capa de rodadura, 500 revoluciones	14	
Capa de rodadura, 100 revoluciones	2,7	
Resistencia mecánica por el método del 10% de finos, capa		E-224
Valor en seco, (kN)	260,4	
Relación húmedo/seco, (%)	80	
Durabilidad		
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, Agregados fino y grueso, (%)	6,57	E-220
Limpieza Agregado Grueso		
Impurezas en agregado grueso, (%)	0,48	E-237
Limpieza Gradación Combinada		
Índice de Plasticidad	NP	E-125/126
Equivalente de arena, (%)	57	E-133
Valor de azul de metileno	10	E-235
Geometría de las Partículas de Agregado Grueso		
Caras fracturadas % (1cara/ 2 caras) Retenido N°4	87/74	E-227
Partículas planas y alargadas, relación 5:1, (%).	1,3	E-240
Índice de Alargamiento (%)	19	E-230
Índice de Aplanamiento (%)	10,5	E-230
Geometría de las Partículas de Agregado Fino		
Angularidad de la fracción fina, método A, (%)	48	E-239
Limpieza Gradación Combinada		
Densidad Bulk del llenante mineral en kerosene , (g/cm3)	0,7	E-225
Vacios del llenante seco compactado (%)	45	E-229
Adhesividad		
Método Riedel Weber	4.0-9.0	E-774

Cubrimiento de los agregados con Material asfáltico en presencia del agua hirviendo (%)	100	E-757
---	-----	-------

Fuente: Elaboración propia.

Se determinaron los pesos específicos utilizando tres parámetros: peso en el aire de la muestra, peso en el aire de la muestra saturada con superficie seca y peso sumergido de la muestra saturada, como lo expone la Tabla VI. Estos se llevaron a cabo separadamente para el agregado grueso, el agregado fino y el llenante.

Tabla VI. Determinación de los parámetros A, B y C y cálculo del peso específico y la gravedad específica

Ensayo de peso específico de agregado grueso	
A=Peso en el Aire	1985,5
B=Peso en el aire de la muestra saturada	2000
C=Peso Sumergido de la muestra saturada	1278,4
Gravedad específica seca	2,752
Peso Específico Aparente	2,772
Peso Específico Nominal	2,808
Absorción (%)	0,70%
Ensayo de peso específico de agregado fino	
A=Peso en el Aire	491,9
B=Peso del matraz lleno de agua	7397
C=Peso del matraz con la muestra y lleno de agua	7712
D=Peso de la muestra saturada con superficie seca	500
Gravedad específica seca	2,669
Peso Específico Aparente	2,713
Peso Específico Nominal	2,792
Absorción (%)	1,60%
Ensayo de determinación de la gravedad específica de un suelo y del llenante mineral	
A=Peso seco del llenante	300
B=Peso del recipiente con agua	7397
C=Peso del recipiente con agua y llenante	7585
D=Gravedad específica seca	2,69
G. E. Agregados:	2,721

Fuente: Elaboración propia.

Paralelamente se realizó la caracterización del asfalto modificado con GCR (proveniente de MPI) y del grano de caucho reciclado obtenido de Mundo Limpio (empresa del grupo MPI), buscando cumplir con las especificaciones establecidas por el INVÍAS en el artículo 413-13 [14], donde se establecen las propiedades adecuadas para el GCR a utilizar en la producción de asfalto. En los Anexos 1 y 2 (véase Tabla XX), se exponen las fichas técnicas proporcionadas por el laboratorio de MPI y los valores máximos y mínimos estipulados por la norma. Estas fichas aportan una amplia información sobre las características físicas y químicas del asfalto con que se está trabajando. En la Tabla VII, se evidencia las características del grano de caucho reciclado y la manera en que se incorporó en el asfalto, además expone los parámetros que el Invías permite.

Tabla VII. Características del grano de caucho reciclado

Variable	Valor	Mínimo	Máximo
GCR en el Asfalto (%)	18	15	-
Humedad (%)	0,2	-	0,75
Gravedad Específica (g/g)	1,1	1,1	1,2
Contenido metales ferrosos (%)	0	-	0,01
Contenido de fibra (%)	0	-	0,5
Contenido de talco (%)	0	-	4
Contenido de otros elementos extraños	0	-	0,25

Fuente: Elaboración propia.

Además de las características de pureza, se presenta la distribución de tamaños de los granos de caucho, como lo ilustra la Tabla VIII:

Tabla VIII. Distribución de tamaños del GCR

Distribución Granulométrica del GCR					
TAMIZ	No. 10	No. 16	No. 30	No. 50	No. 200
Gradación-Tipo- B	100	65 – 100	20 – 100	0 – 45	0–5

Fuente: Elaboración propia.

Según la reología del ligante, las temperaturas fijadas para diseño y verificación en laboratorio se presentan a continuación en la Tabla IX:

Tabla IX. Temperaturas del trabajo de la mezcla en el laboratorio

Variable	Valor	Mínimo	Máximo
Temperatura de áridos (°C)	175	170	180
Temperatura de asfalto (°C)	175	170	180
Temperatura de compactación (°C)	160	157	163

Fuente: Elaboración propia.

2.3.2. Determinación de la fórmula de trabajo

Para determinar la fórmula de trabajo, se utilizó preliminarmente el método Marshall de mezclas asfálticas en caliente. El valor óptimo de asfalto corresponde a aquel que dé lugar a un volumen de vacíos con aire Va, en un rango del 3% al 5%. Posteriormente, se seleccionaron tres contenidos de asfalto que se ubican en este rango y se fabrican probetas de mezcla para realizar pruebas de resistencia al ahuellamiento y definir el intervalo óptimo de asfalto para la mezcla; sobre este óptimo se realizaron pruebas de verificación de diseño (módulos dinámicos, resistencia a la humedad y fatiga).

A continuación, se determinaron los valores máximos y mínimos de asfalto en la mezcla, como se muestra en la Tabla X:

Tabla X. Contenido óptimo de asfalto y características de control del diseño Marshall

Asfalto (%)	Estabilidad(N)	Gravedad Especifica BULK	VAM ¹ (%)	VA ² (%)	VFA ³ (%)	Flujo (mm)	Relacion Filler/Llenante efectivo
6,6	10.108	2,371	18,6	5	74	4,1	0,6
7,4	10.135	2,386	18,9	3,2	83	4,7	0,6

Fuente: Elaboración propia.

2.3.3. Definición de óptimo de ligante mediante resistencia a la deformación plástica en pista

Como está establecido en norma INVIAS I.N.V. E-756-13, se sometió una probeta al paso alternativo de una rueda en condiciones determinadas de presión y temperatura, midiendo periódicamente la deformación permitida, procedimiento aplicable a las mezclas asfálticas producidas en caliente y destinadas a trabajar en condiciones rigurosas de tránsito y clima; para este caso específico, se operó con las condiciones expuestas en la Tabla XI.

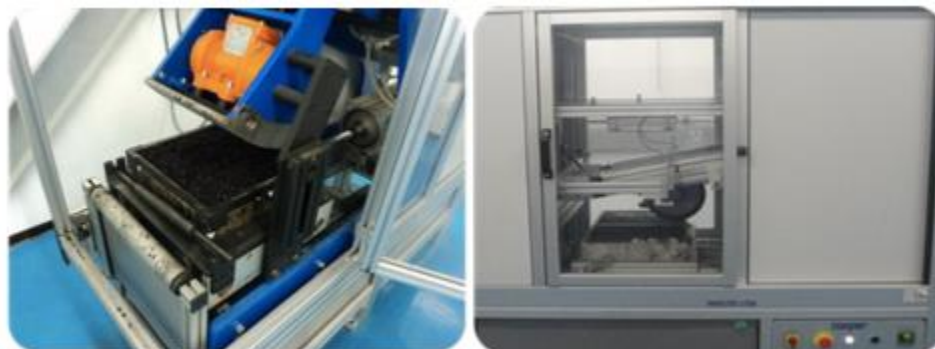
Tabla XI. Condiciones de operación del equipo

Parámetro	Valor
Carga Ejercida sobre la Probeta:	900 KN/m ²
Frecuencia:	21 ciclos/min
Número de Pistas:	Dos (2)
Ancho de Llanta:	5 cm
Tamaño del Molde:	30 cm x 30 cm x 5 cm 30,5 cm
Distancia del Empotramiento a la Llanta. Distancia del Empotramiento a la Pesa:	84,3 cm

Fuente: Elaboración propia.

La compactación de las muestras se realiza con un compactador de rodillo estándar (Roller Compactor) que simula la compactación de la mezcla en campo. El equipo funciona de forma neumática y permite variar la presión de compactación y el número de ciclos de compactación mediante un controlador digital (Programmer Logic Controller, PLC) para lograr las densidades y los vacíos totales en la mezcla deseados. También cuenta con un sistema de vibración que mejora el acomodamiento de las partículas y la compactación. Su principal función es elaborar las probetas para fallarlas en el equipo de deformación plástica (Wheel Tracker). La Figura I lo ilustra así:

Figura I. Equipo roller compactor y wheel tracker



Fuente: Elaboración propia.

¹ Vacíos en Agregados Minerales.

² Vacíos Aire.

³ Vacíos llenos con asfalto.

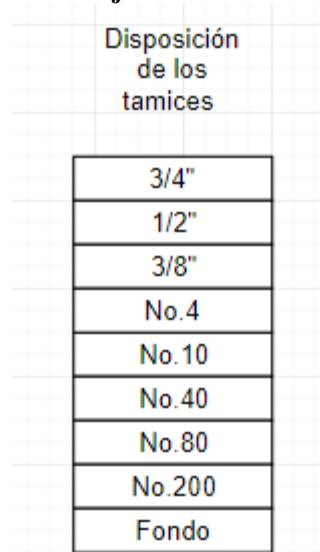
Los resultados del paso a paso de estos ensayos se encuentran en la Tabla XX de Anexos.

2.3.4. Validación del diseño Marshall

2.3.4.1. Selección de los agregados

Una vez obtenidos los diseños de mezcla elaborados por MPI, se procedió a la verificación del diseño Marshall [15] en las instalaciones de Procopal S.A.; se dio inicio al proceso tomando una muestra de agregado pétreo nominal de $\frac{3}{4}$ " y arena mezclada (su porcentaje de humedad no supera el 7%). El agregado de $\frac{3}{4}$ " debe ser lavado para eliminar impurezas. Posteriormente, los agregados pétreos se llevaron a secar durante 16 horas en un horno de convección a 110°C, luego se hace un arreglo de tamices con tamaños de malla, que van desde $\frac{3}{4}$ " hasta malla 200, como indica el siguiente diagrama (Figura II).

Figura II. Montaje de tamices en la zaranda



Fuente: Elaboración propia.

Como siguiente paso, se prepara la gradación específica de los agregados pétreos, según el diseño, y se calcula el porcentaje de asfalto para cumplir con la cantidad óptima sugerida en el diseño realizado por MPI. Una vez lista la gradación, se precalentaron los agregados y el asfalto caucho hasta 170°C para evitar choques térmicos en el proceso de mezclado; y se finaliza este paso homogenizando correctamente la mezcla de agregados pétreos y asfalto.

En el siguiente paso se separó la mezcla en dos porciones, la primera destinada a la mufla de incineración para verificar el contenido de asfalto, y la segunda para la elaboración de las probetas de los demás ensayos de la metodología Marshall.

2.3.4.2. Elaboración de probetas

La elaboración de probetas se realizó en el laboratorio de Procopal S.A. con ayuda del personal técnico. Se utilizaron moldes de acero inoxidable de 64 mm de altura con 101,7 mm de diámetro equivalente a 1250 gramos de muestra aproximadamente. En el momento del vertimiento, se garantizó que la temperatura de la muestra fuera de 160°C para cumplir lo estipulado en el diseño de mezcla de MPI (véase Tabla IX). Posteriormente, se lleva el molde al martillo de compactación programado para realizar 74 ciclos por cada cara del molde, esto con el fin de generar un porcentaje de vacíos de la mezcla compactada óptimo.

2.3.4.3. Medición de fluencia y estabilidad Marshall

Finalmente, para la determinación de estabilidad y fluencia, en el diseño Marshall se someten las probetas a una prueba, que consiste dejarlas sumergidas durante 30 minutos a 60 °C y luego ubicarlas en la prensa multiensayos para obtener los resultados.

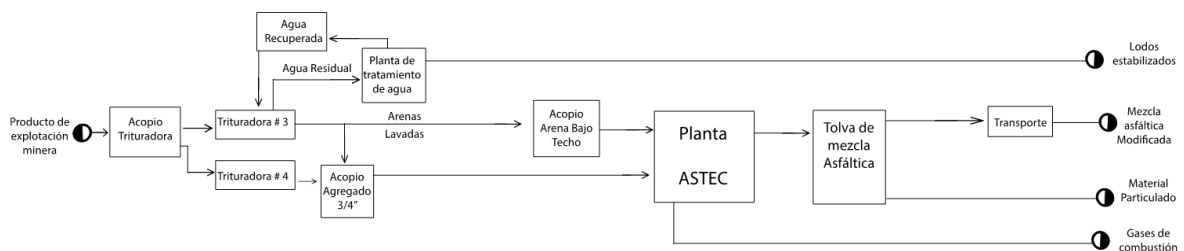
3. Resultados y análisis

Una vez finalizado el proceso de visitas y verificación de las plantas, los estudios comparativos de viabilidad económica y replicación de los ensayos Marshall, se procede a recopilar y analizar la información recopilada de los resultados obtenidos

3.1. Verificación del proceso productivo

Para asegurarse de que Procopal S.A. se encuentra en capacidad industrial de implementar la producción de una mezcla asfáltica modificada con GCR se analizan cada una de las partes del proceso productivo en detalle para garantizar que todas las variables que se involucran en la producción estén alineadas y cumplan con los requerimientos de la nueva mezcla. El recorrido se realiza como se muestra la Figura III:

Figura III. Diagrama de bloques del proceso productivo de Procopal S.A.



Fuente: Elaboración propia.

3.1.1. Explotación minera

En este segmento del proceso productivo, se recorrió el área de explotación minera correspondiente al registro minero de cantera RMC-22011. Esta comprende un área de 334.670 m², equivalentes a 33,46 Ha, conformadas sobre la llanura aluvial del río Aburrá en el municipio de Girardota. El diseño minero que actualmente se lleva corresponde a la explotación de los aluviones por medio de un banco único a cielo abierto, de donde se extraen los agregados pétreos, como son gravas y arenas en estratos que en profundidad poseen espesores de hasta 30 metros de profundidad. En la Figura IV, se observa el área actualmente en explotación, cuyo destino es la planta de beneficio de Procopal, ubicada en un área aldeaña al título minero.

Figura IV. Vista aérea de distribución de la planta Procopal S. A.



Fuente: Google Earth.

El banco conformado, actualmente en explotación, presenta taludes 1H:2V hasta una profundidad de 30 metros, tal como se viene realizando actualmente. En la Figura V, se observa el banco actual en explotación.

Figura V. Banco de explotación



Fuente: Elaboración propia.

La formación geológica sobre la que se conforma el título minero en explotación es la de aluviones recientes del río Aburrá, conformada por cantos de gravas y arenas gruesas, que presentan profundidades hasta de 30 metros y superiores, y conforman una llanura aluvial cuasi plana, que muestra la estratificación horizontal de los materiales depositados por el río.

Los materiales recuperados del banco en explotación el 4 de agosto de 2017 presentan las características físicas relacionadas con las normas INV E-227, 237, 125 y 126, 224, 218 y 219, y 238, y cumplen con la norma para materiales como agregados.

De acuerdo a la guía minero ambiental de explotación del Ministerio de Minas y Energía y el Ministerio de Medio Ambiente en 2001 [16], el método de explotación, según el punto 5.2.1., consiste en la minería de cajón o descubiertas, aplicable principalmente a yacimientos sedimentarios, de capas con bajos buzamientos, bajas relaciones de descapote, en las que se permite el manejo de uno o dos bancos, uno superior de estéril (dependiendo de su espesor) y el otro que comprende el espesor del cuerpo mineral. Su característica principal está en el aprovechamiento de la excavación como vertedero del material estéril removido en el primer ciclo [16].

Características:

- Buzamiento menor a 10° de inclinación o casi horizontales.
- Grandes reservas.
- Rocas blandas de cobertera.
- Baja relación de descapote.
- Pocas capas y potentes.
- Uno o dos bancos.
- Posibilidades de implementación de tecnología de gran capacidad.

Las actividades unitarias propias de la operación minera que se vienen realizando al interior del título minero en la explotación a cielo abierto son:

Preparación: es el descubrimiento del yacimiento o cuerpo mineral, mediante la remoción de la capa o cobertura vegetal o estéril. En la explotación del título se realiza con Bulldozer y/o excavadora de orugas.

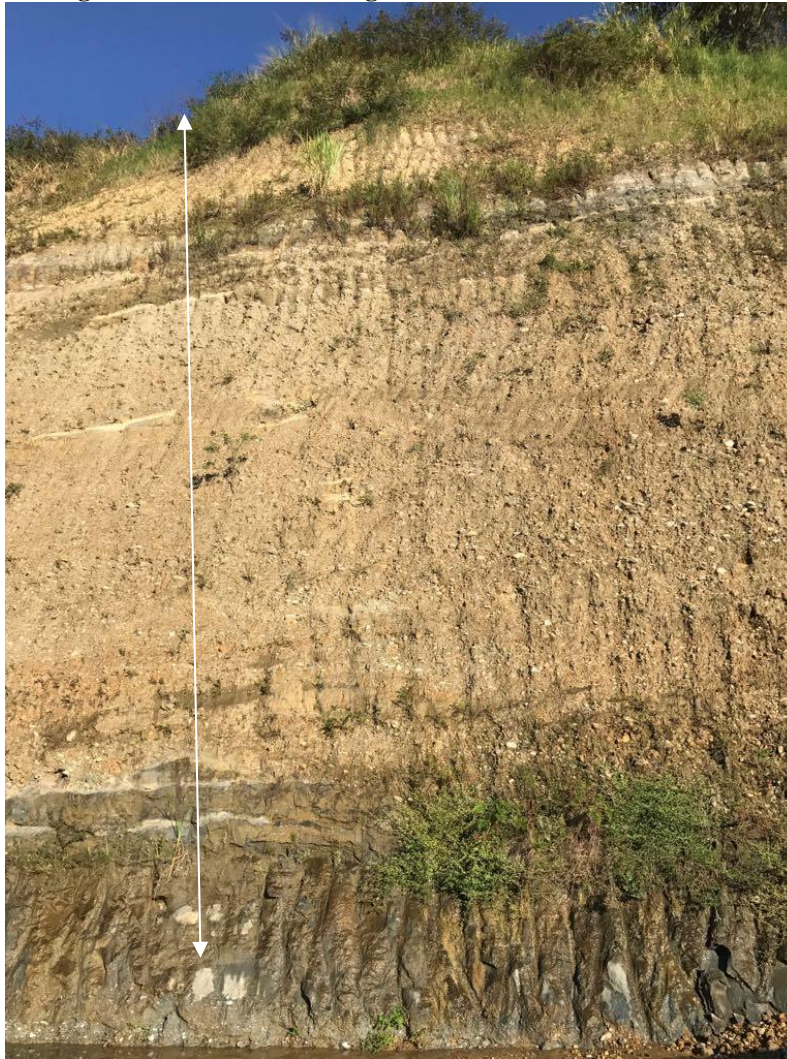
Arranque: consiste en la fragmentación del macizo rocoso a un tamaño que pueda ser manipulado por el sistema definido de cargue y transporte planeado. El arranque es la remoción del estéril y la extracción del mineral de interés. Estas operaciones en la extracción del estéril como de los aluviales se pueden realizar en forma directa, mecánica por medio de retroexcavadora. En la extracción del cuerpo mineralizado se debe evitar la contaminación del material de interés con el estéril.

Cargue: una vez realizado el arranque del material, se procede a la operación de cargue del mineral o estéril al sistema de transporte definido.

Con respecto al transporte, el sistema de explotación será discontinuo, aplicando el arranque del aluvión por medio de equipo mecánico y afectando niveles freáticos al interior del *pit* en explotación. Estos niveles se harán descender mediante motobomba, la cual evacuará las aguas freáticas a un drenaje, para, posteriormente, ser utilizadas en el beneficio de los materiales en el lavado de arenas. Las aguas vuelven al *pit* minero para decantar los sólidos suspendidos que se generan durante el lavado del material. Una vez y por quietamiento, las aguas se depuran en piscinas y vuelven a ser bombeadas para ser conducidas a la planta de beneficio, y así sucesivamente.

Esta columna estratigráfica se asume como homogénea para toda el área del aluvial dentro del área otorgada por el Registro Minero de Cantera RMC-22011, a efecto de cuantificar las reservas aprovechables del material aluvial. A nivel de su resistencia al corte, los materiales detríticos como los aluviales son depósitos de valles alojados en las terrazas de los ríos (del río Aburrá, en este caso), que se encuentran poco cohesionados, por lo que las labores de arranque se pueden efectuar solo con equipo mecánico. Para este tipo de explotación, se suele llevar hasta un solo banco. Como se puede apreciar, la Figura VI ilustra la conformación del estrato aluvial:

Figura VI. Columna estratigráfica del aluvión del río Aburrá



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la clasificación oficial de minerales para la República de Colombia, el mineral que se encuentra al interior del Registro Minero de Cantera RMC-22011 se ubica dentro de la división 15⁴, tal como se observa en la Tabla XII:

Tabla XII. Clasificación oficial de minerales, estructura detallada y correspondencia en aluviones

Grupo	Clase	Subclase	Título	Unidades
DIVISIÓN 15	n/a	n/a	ROCA O PIEDRA, ARENA Y ARCILLA.	n/a
153	n/a	n/a	Areniscas, conglomerados, arenas, cantos, gravas, recebo, roca o piedra partida o triturada, betún y asfalto naturales.	n/a
n/a	1531		Arenas y gravas naturales y silíceas.	n/a
n/a		15311	Arenas y gravas naturales.	m ³
n/a		1531103	Gravas naturales.	m ³
n/a		1531104	Recebo.	m ³

Fuente: Elaboración propia.

⁴ ROCA O PIEDRA, ARENA Y ARCILLA, GRUPO 153 Areniscas, conglomerados, arenas, cantos, gravas, recebo, roca o piedra partida o triturada, betún y asfalto naturales, CLASE 1531, SUBCLASE 15311, arenas y gravas naturales.

A continuación, se reportan en la Tabla XIII los resultados de la caracterización de materiales para su uso en mezcla asfáltica en la planta de producción de Procopal S. A. en Girardota, realizados por Evaltec S. A.

Tabla XIII. Análisis mineralógico del agregado combinado

Composición mineralógica	
Método.	Difracción de rayos X (DRX).
Muestra.	Material combinado para producción de mezclas asfálticas.
Resultado.	Calcium Aluminum Silicate (Anorthite $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$) = 57% .
	Sodium Hydroxide Hydrate ($\text{NaOH}(\text{H}_2\text{O})_4$) = 26% Silicon Oxide (Quartz SiO_2) = 9% .
	Magnesium Aluminum Silicate Hydrate Vermiculite $\text{Mg}_{3.41}\text{Si}_{2.86}\text{Al}_{1.14}\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_{3.72}$ = 8% .

Fuente: Elaboración propia.

Los estudios petrográficos del material extraído en Girardota fueron realizados por Geoensayos en Medellín y sus resultados se muestran a continuación en la Tabla XIV:

Tabla XIV. Análisis petrográfico del agregado combinado

Ensayo	Método	Material	Resultados	
Descripción Microscópica.	Sección delgada.	Material combinado para producción de mezclas asfálticas.	MINERALES.	3% de Cuarzo 2,5% de Hornblenda 0,5% de Plagioclasa
			FRAGMENTOS LÍTICOS.	25,8% Volcánico 10% Plutónico 38,3% Sedimentario 15,4% Metamórficos 4,5% Caliza

Fuente: Elaboración propia.

En contexto, y según lo anterior, se encuentra que la fuente de donde se extrae el material es adecuada para la producción de la mezcla asfáltica modificada con GCR, puesto que, debido a su composición mineralógica, cumple con las necesidades que la norma Invías exige y que la mezcla necesita.

Continuando con el recorrido por el proceso de explotación se revisa la maquinaria con que se extrae y transporta el material, tal como se muestra en el registro fotográfico (Figura VII), El uso de las retroexcavadoras Caterpillar y las volquetas Volvo Dumper es apto para la producción de la mezcla asfáltica modificada, porque cumple con las necesidades que esta etapa del proceso requiere.

Figura VII. Maquinaria de extracción y transporte de material crudo



Fuente: Elaboración propia.

3.1.2. Trituración del material

El proceso de trituración del material se realiza con la ayuda de una trituradora de mandíbula, como se muestra en la Figura VIII.

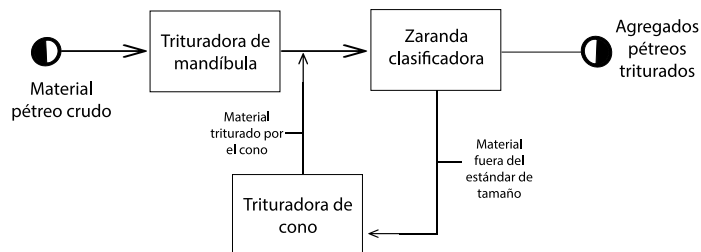
Figura VIII. Equipo de trituración de material



Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, el material triturado pasa por una zaranda clasificadora que impide el paso de partículas que no cumplan con el tamaño especificado para la producción y las lleva a una trituradora de cono que garantiza la disminución de tamaño del material y el cumplimiento de las especificaciones necesarias para el proceso. Luego, a la salida del cono el material, las partículas pasan nuevamente por la zaranda clasificadora para asegurar el tamaño nominal de la producción y se almacenan en pilas para su posterior disposición, como se explica en la Figura IX.

Figura IX. Diagrama de proceso de trituración



Fuente: Elaboración propia.

En contexto con el estudio de la composición del material con que se elaborará la mezcla asfáltica modificada con GCR, se encuentra que los equipos de trituración son aptos para su producción, considerando que, tal y como se dice en el apartado anterior, su naturaleza es igual a la de los materiales con que se produce la mezcla tradicional.

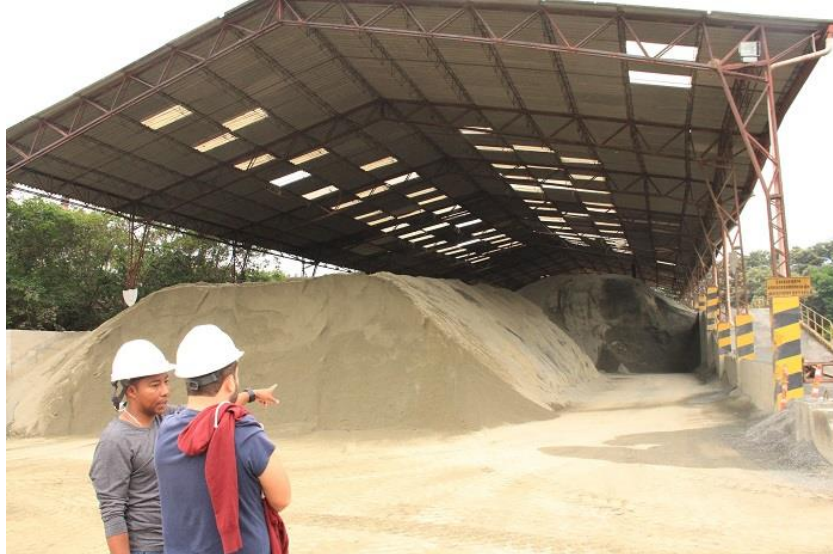
3.1.3. Acopio del material

Esta sección es de gran importancia en el proceso productivo, puesto que es necesario garantizar que a la salida del proceso de trituración y antes de ingresar en el proceso de mezcla, los agregados pétreos y arenas conserven sus características de gradación y humedad. Sin embargo, al almacenar estos materiales a la intemperie, se dificulta sobremanera garantizar las características anteriormente mencionadas. Por lo tanto, se hace necesario el uso de ramadas o acopios bajo techo, donde se pueda mantener estable la humedad del material.

La construcción de estas ramadas y su mantenimiento representa un aumento en los costos de producción; por lo anterior, Procopal S.A. determina que solo las arenas se almacenan bajo techo, ya que debido a su mayor área superficial tienden a incrementar más rápidamente su humedad, mientras que el material triturado, por ser de mayor tamaño, es menos propenso a este incremento. Desde que se adoptaron estas decisiones, se encuentra que en días de lluvias el material triturado y la humedad promedio de las arenas son de 2,4% y 8% respectivamente. Por su parte, en días secos es de 1,8% para los materiales triturados y 6% para las arenas.

El proceso anterior se ilustra en la Figura X:

Figura X. Acopio de material



Fuente: Elaboración propia.

El control de los niveles de humedad y de gradación tiene efectos económicos y técnicos, pues si no se mantienen los niveles de humedad recomendados en los acopios de material, se incrementarán los costos de producción, debido a un significativo aumento en el consumo de gas de la planta térmica de la empresa, porque necesitará más energía para llevar los materiales a las temperaturas adecuadas para la mezcla con el asfalto. Por otra parte, adoptar la decisión de almacenar los materiales triturados a la intemperie, implica que por las lluvias o por el mismo peso del material se genere algún tipo de segregación. Por ende, es importante que los materiales apilados al aire libre sean homogenizados por el operador del cargador antes de ser llevados a la tolva de alimentación de la planta productora de mezcla asfáltica, como se muestra en la Figura XI:

Figura XI. Cargador de alimentación, planta de asfalto



Fuente: Elaboración propia.

3.1.4. Producción de la mezcla asfáltica

Esta sección del proceso productivo es la etapa donde se unen los productos de la extracción minera y la trituración de Procopal S.A. con los asfaltos normalizados, provenientes de MPI. Esta etapa demanda algunos retos logísticos, puesto que el proveedor de los asfaltos (MPI) tiene su planta de producción en Barrancabermeja, lo que implica que este material se encuentra en promedio a ocho horas de distancia de las instalaciones de Procopal S.A. Por lo cual, esta última dispone de un sistema de almacenamiento de asfalto en caliente, compuesto por cinco tanques, cuatro de ellos con capacidad de 35 toneladas y uno con capacidad de 24 para un almacenamiento total de 166 toneladas de asfalto. Al ser almacenado en caliente, los tanques cuentan con un sistema de tuberías que transportan aceite térmico en el interior de los tanques para evitar que se solidifique el asfalto. La Figura XII lo muestra así:

Figura XII. Detalle del sistema de calentamiento del asfalto



Fuente: Elaboración propia.

Al utilizar los tanques de almacenamiento de asfalto normalizado para almacenar asfalto caucho, se encuentra que algunas partículas de caucho comienzan a depositarse sobre el sistema de calentamiento y el fondo del tanque, formando costras que afectan notablemente la transferencia de calor e impiden continuar con el proceso productivo de la mezcla asfáltica, como se aprecia en la Figura XIII:

Figura XIII. Aglomeración de partículas de asfalto caucho en tubos de calentamiento



Fuente: Elaboración propia.

Al notar este inconveniente, se consulta con el proveedor de asfaltos, en busca de una solución para el problema, y se visita las instalaciones en las que se produce el asfalto modificado para tener un mejor entendimiento del problema. Allí se encontró que el proveedor cuenta con carrotanques (Figura XIV) especialmente diseñados para la conservación de este tipo de mezclas y equipados con un generador eléctrico que alimenta un sistema de calentamiento y un agitador mecánico que garantizan la conservación de las propiedades de la mezcla.

Figura XIV. Carrotanque para transporte de asfalto caucho



Fuente. Elaboración propia.

Posteriormente, se realizaron ensayos en la planta de Procopal S.A con la mezcla modificada, siendo transportada en el carrotanque diseñado para dicho propósito. Al comenzar el proceso de bombeo del asfalto a

la planta ASTEC, se encontró que después de 30 minutos de bombeo de asfalto comenzó a perder eficiencia; después de 45 minutos el bombeo se detuvo abruptamente taponamiento en el caracol de succión con asfalto. En consecuencia, una vez más se recurrió al fabricante, quien ofreció como solución al problema un sistema *SKID* (Figura XV) para la inyección de asfalto caucho. Este consiste en un sistema de bombeo e inyección que funciona con su propio generador eléctrico y cuenta con un sistema de intercambiadores de calor que mantienen la temperatura del asfalto al interior de las bombas, mitigando el efecto de las pérdidas térmicas a través de las líneas, evitando el taponamiento de la bomba que puede producir daños mayores a la planta.

Figura XV. Skid para la inyección y transferencia de asfalto caucho



Fuente: Elaboración propia.

De lo anterior, se deduce que Procopal S.A. se encuentra en capacidad de producir mezcla asfáltica modificada con GCR utilizando su proceso habitual de extracción y trituración de agregados. Sin embargo, al momento de la producción de mezcla asfáltica modificada, deberá contar con los equipos que MPI provee a sus clientes para el transporte y bombeo del material, que se adapten a las especificidades del asfalto modificado con GCR. La Tabla XV expone como síntesis la viabilidad del proceso de producción de asfalto caucho en Procopal S. A.:

Tabla XV. Nivel de viabilidad del proceso productivo en Procopal S.A.

Categorías de producción	Nivel de viabilidad
Área de explotación minera.	Cumple. El estudio mineralógico corrobora que el material extraído cumple con la norma Invías.
Etapas de trituración.	Cumple. El material pétreo para el procesamiento de asfalto caucho es igual al de la mezcla tradicional. Por tanto, no hay que hacer ninguna modificación en esta etapa.
Acopio de los materiales.	Cumple. Si se acoplan las arenas bajo techo, se garantiza la no segregación del material pétreo.
Producción de la mezcla.	No cumple. Por un lado, el tanque de almacenamiento necesita ser agitado; y por el otro, la bomba necesita ser calentada. En consecuencia, es necesario recurrir a MPI, que cuenta con la logística y equipos necesarios para la solución de estos inconvenientes.

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Viabilidad económica de la producción de mezcla asfáltica modificada con GCR

A continuación, se realiza un análisis de los costos de producción de la mezcla modificada con GCR y se compara con la mezcla tradicional (MDC-2). Se encontró que el costo por tonelada de la mezcla modificada con GCR producida en la planta de Procopal S.A es de \$280.000 (venta a externos) y la mezcla tradicional (MDC-2) cuesta \$195.000 (venta a externos).

El detalle del análisis se encuentra consignado en las Tablas XVI y XVII:

Tabla XVI. Análisis de costos mezcla asfáltica tradicional

Análisis de precios para mezcla asfáltica MDC-2				
Descripción	Unidades	Cantidad	Valor UND	Valor Total \$
Costo de material en alimentador planta	Kg	948	26,00	24648,00
Costo asfalto aditivado	Kg	52	1350,00	70200,00
Costo combustible gas	M3/Ton.	10	1000,00	10000,00
Costo lubricantes	\$/Ton.	-	-	100,00
Valor energía	Kw/Ton.	4	350,00	1400,00
Costo mano de obra	\$/Ton.	-	-	1900,00
Costo equipo	\$/Ton.	-	-	3600,00
Costo de mantenimiento de equipo	\$/Ton.	-	-	1000,00
Costo laboratorio	\$/Ton.	-	-	1000,00
Valor regalías	\$/Ton.	-	-	25,00
Industria y comercio	\$/Ton.	-	-	1260,00
Costo producción por tonelada	\$/Ton.	-	-	115133,00
Gastos administrativos	\$/Ton.	-	11%	12664,63
Valor por tonelada en obra	\$/Ton.	-	-	128000,00
Precio de venta a externos	\$/Ton.	-	-	195.000,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla XVII. Análisis de costos mezcla asfáltica modificada con GCR

Análisis de precios para mezcla asfáltica modificada con GCR				
Descripción	Unidades	Cantidad	Valor UND	Valor Total \$
Costo de material en alimentador planta	Kg	928	31,00	28768,00
Costo asfalto aditivado	Kg	72	1750,00	126000,00
Costo combustible gas	M3/Ton.	11	1000,00	11000,00
Costo lubricantes	\$/Ton.	-	-	100,00
Valor energía	Kw/Ton.	4	350,00	1400,00
Costo mano de obra	\$/Ton.	-	-	3000,00
Costo equipo	\$/Ton.	-	-	3600,00
Costo de mantenimiento de equipo	\$/Ton.	-	-	2150,00
Costo laboratorio	\$/Ton.	-	-	1000,00
Valor regalías	\$/Ton.	-	-	25,00

Industria y comercio	\$/Ton.	-	-	1470,00
Costo producción por tonelada	\$/Ton.	-	-	178513,00
Gastos administrativos	\$/Ton.	-	11%	19636,43
Valor total	\$/Ton.	-	-	198000,00
Precio de venta a externos	\$/Ton.	-	-	280.000,00

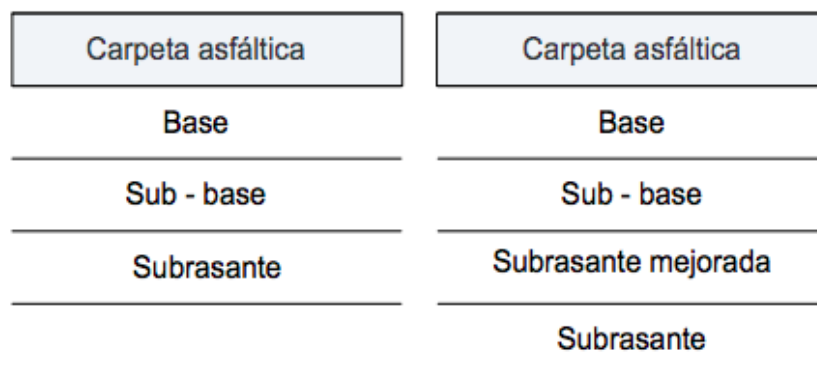
Fuente: Elaboración propia.

Se observa que el costo por tonelada de la mezcla modificada con GCR es mayor que la mezcla tradicional. Sin embargo, no se puede llegar a conclusiones solo con los costos reportados anteriormente.

En este sentido, la clave para hacer viable económicamente el uso de asfalto caucho es el diseño estructural del pavimento. Al respecto, tal y como lo afirma Vidal, citado por Metaute y Casas [17], el pavimento es una estructura constituida por varias capas sobre una subrasante firme, cuyo fin es repartir uniformemente los esfuerzos. Dentro de los tipos de pavimentos existentes, se encuentran los flexibles, rígidos y articulados [17]. La Figura XVI muestra un perfil de la manera en que se constituyen los diferentes pavimentos:

Figura XVI: Capas constitutivas de un pavimento

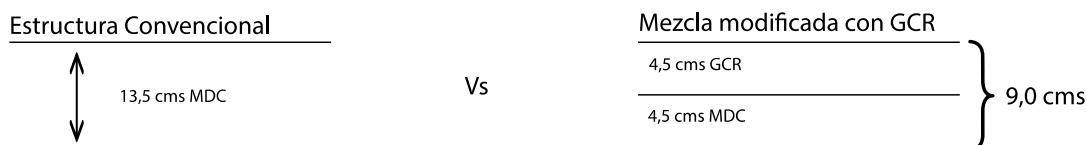
PAVIMENTO FLEXIBLE

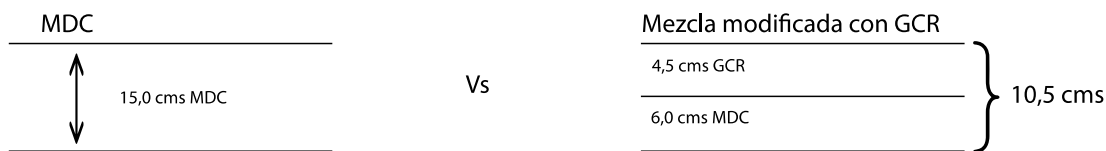


Fuente: Metaute y Casas [17].

Según lo anterior, se encuentra que la carpeta asfáltica o de rodadura es la sección más expuesta de una carretera y su espesor es variable, según las necesidades de tránsito de la vía. No obstante, esta variable es determinada por el diseño estructural de la estructura y corresponde a los ingenieros y diseñadores especificar su valor. Además, se encuentra en varios estudios estructurales e instructivos del uso mezclas asfálticas modificadas con GCR realizados por MPI que el espesor de la carpeta de rodadura de una carretera puede reducirse notablemente debido a las ventajas estructurales que el uso de la mezcla modificada trae, como se muestra en la Figura XVII.

Figura XVII. Comparativo de espesores de la carpeta de rodadura





Fuente: Elaboración propia.

Con base en lo anterior, se realiza una proyección comparativa de costos por kilómetro de vía construida asumiendo un ancho de calzada de 6 metros, correspondiente al promedio de las vías secundarias, y espesores de 13,5 cms. para la mezcla tradicional. Por su parte, la estructura modificada con GCR se compone de dos mezclas: una con GCR (4,5 cms.) y otra con MDC (4,5 cms.), como se muestra en la figura anterior. Los resultados se reportan en la siguiente Tabla XVIII:

Tabla XVIII. Comparativo de costos por kilómetro construido

Tipo de mezcla	Precio \$/Ton	Densidad Compactada Ton/ m ³	Cantidad de mezcla Necesaria m ³	Costo unitario de la Mezcla.	Costo Total de la mezcla	% Diferencia en costo
Mezcla MDC-2	\$195.000	2,4	810	\$379.080.000	\$379.080.000	18,803
Mezcla Modificada con GCR	\$280.000	2,4	270	\$181.440.000	\$ 307.800.000	
	\$195.000	2,4	270	\$126.360.000		

Fuente: Elaboración propia.

Como puede notarse, es notable la reducción en costos por kilómetro de mezcla modificada con GCR producida por Procopal S. A. Según el comparativo de costos realizado previamente, se encontró que, debido a las ventajas estructurales que presenta el asfalto caucho y los parámetros estructurales de cómo debe ser aplicado, se evidencia una disminución en los costos de la mezcla de alrededor de un 19%, lo cual hace viable económicamente el uso de esta mezcla para Procopal S.A.

3.3. Replicación de ensayo Marshall

En este apartado se realiza la producción de mezcla modificada con GCR en el laboratorio de Procopal S. A. Para ello, se llevan a cabo dos ensayos, que consisten en la fabricación de dos probetas, siguiendo las pautas de MPI en el diseño para realizar una evaluación a la luz de la metodología Marshall, buscando cumplir con cada una de las normas que el Invías establece para la producción de este tipo de mezclas. A continuación, se muestran los resultados obtenidos de los ensayos, comparados con los de MPI. La Tabla XIX lo describe así:

Tabla XIX. Resultados comparativos metodología Marshall

PROPIEDAD EVALUADA	Diseño MPI	Ensayo en Procopal S.A.	Criterio para Asfalto-Caucho	Norma Invías
COMPACTACIÓN (GOLPES/CARA)	75	75	75	E-748
ASFALTO ÓPTIMO (%)	7,0	6,9	6,0 – 9,0	
ESTABILIDAD (N)	10450	10130	≥ 8250	
FLUJO (mm)	4,4	3,7	2,5 – 5,5	
RELACION ESTABILIDAD/FLUJO ((kN)/mm)	2,34	2,74	Reportar	
G. ESPECÍFICA (BULK)	2380	2355	Reportar	E-733

VACÍOS AGREGADO MINERAL (%)	18,6	19,3	≥ 14	E-799
VACÍOS CON AIRE (%)	3,9	3,3	3,0-5,0	
VACÍOS LLENOS DE ASFALTO (%)	78,7	83,1	Reportar	

Fuente: Elaboración propia.

De los datos expuestos anteriormente, se observa que la experimentación realizada en el laboratorio de Procopal S.A. está dentro de los rangos legales que las normas Invías establecen, demostrando así que es posible para esta compañía producir una mezcla asfáltica modificada con GCR que cumpla con los estándares técnicos que la norma colombiana exige y que sea fiel al diseño de mezcla elaborado por MPI. A continuación, se muestra el detalle de las pruebas realizadas en Procopal S.A.

Figura XVIII. Metodología Marshall en Procopal S. A.



Fuente: Elaboración propia.

4. Conclusiones

Los materiales producto de la extracción minera de Procopal S.A. son aptos según su composición mineralógica para la producción de mezclas asfálticas modificadas con GCR.

Los procesos de extracción, transporte y trituración de materiales pétreos en Procopal S.A. pueden realizarse de manera habitual, puesto que las materias primas para la elaboración de mezclas modificadas con GCR provienen del mismo título minero de donde se extraen materiales para la mezcla tradicional.

El acopio de arenas para la producción de mezcla asfáltica modificada con GCR, debe darse bajo techo para evitar aumentos significativos en la humedad. Asimismo, el material pétreo triturado puede acopiarse a la intemperie, siempre y cuando se garantice la no segregación del mismo.

El costo de producción de mezcla asfáltica modificada con GCR incrementa en un 45% respecto al costo de producción de la mezcla tradicional MDC-2. No obstante, aun cuando el costo por tonelada de la mezcla asfáltica modificada con GCR es más alto, se encuentra que, siguiendo los parámetros estructurales de MPI para el uso de esta mezcla, es posible reducir en un 18% los costos totales de la mezcla, al compararse con los costos de una mezcla asfáltica tradicional MDC-2.

Los ensayos de la metodología Marshall llevados a cabo en Procopal S.A., según la formulación hecha por MPI, que sugiere que debe usarse un 7% de asfalto modificado con GCR, arrojaron resultados que permiten asegurar que Procopal S.A. se encuentra en la capacidad de producir mezcla asfáltica modificada con GCR. De igual manera, estos resultados de las pruebas de laboratorio evidencian que el asfalto modificado con GCR producido por Procopal S. A. cumple con los parámetros establecidos por el Invías para la producción de este tipo de mezclas.

A pesar de que es viable la producción de mezcla asfáltica modificada con GCR en Procopal S.A., esta depende de los equipos especializados para el transporte, almacenamiento y bombeo de asfalto, que pueden ser proporcionados por MPI.

5. Tabla de Anexos o Apéndices

Tabla XX. Documentos adicionales incluidos con el proyecto de grado

Nombre	Desarrollo (propio/terceros)	Tipo de Archivo	Enlace google drive (https://goo.gl/)
Anexo 1. Reporte de calidad asfalto modificado con grano de caucho reciclado.	Terceros (MPI).	Imagen.	https://goo.gl/KaYLBi
Anexo 2. Evaluación del grado de desempeño PG del asfalto utilizado.	Terceros (MPI).	Imagen.	https://goo.gl/hiyzcz

Referencias

- [1] P. E. Park, “Charles McDonald Father of Asphalt Rubber”, Oct. 2011.
- [2] S. Wang, D. Cheng and F. Xiao, “Recent developments in the application of chemical approaches to rubberized asphalt”, *Construction and Building Materials*, vol. 131, pp. 101-113, 2017.
- [3] A. Ramírez, I. Landino & J. P. Rojas, “Diseño de mezcla asfáltica con asfalto caucho tecnología GAP GRADED para la ciudad de Bogotá”, Tesis de Especialización, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, D. C., 2014.
- [4] A. López & A. Valencia, “Implementación de mezcla asfáltica mediante el uso de asfalto modificado con granos de caucho reciclado de llantas usadas”, Tesis de Especialización, Facultad de Ingeniería, Universidad de Medellín, Medellín, 2015.
- [5] L. Gómez. “Comienza era de vías que se harán con llantas usadas”, *El Tiempo*, Bogotá, 18-Ene-2016.
- [6] G. R. Morris. “True Cost Effectiveness of Asphalt Rubber Paving Systems”, *ASTM International*, 1993.
- [7] C. Arribas, “Los neumáticos fuera de uso”, *El Ecologista*, no. 87, dic. 2015.
- [8] P. S. Walandari and D. Tjandra, “Use of crumb rubber as an additive in asphalt concrete mixture”, *Procedia Engineering*, vol. 171, pp. 1384-1389, 2017.
- [9] I. M. Khan, S. Kabir, M. A. Alhussain and F. F. Almansoor, “Asphalt Design using Recycled Plastic and Crumb-rubber Waste for Sustainable Pavement Construction”, *Procedia Engineering*, vol. 145, 1557-1564, 2016.
- [10] F. Zhang and C. Hu, “The research for crumb rubber/waste plastic compound modified asphalt”, *J Therm Anal Calorim*, vol. 124, pp. 729-741, 2016.
- [11] D. Ge, K. Yan, Z. You and H. Xu, “Modification mechanism of asphalt binder with waste tire rubber and recycled polyethylene”, *Construction and Building Materials*, vol. 126, pp. 66-76, 2016.
- [12] M. Tuncan, A. Tuncan and M. Cetin, “The use of waste materials in asphalt concrete mixtures”, *Waste Manage Res*, vol. 21, 83-92, 2003.
- [13] P. Garnica, H. Delgado & C. D. Sandoval, “Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas”. México: Publicación Técnica No 271, 2005.
- [14] Instituto Nacional de Vías, “Especificaciones generales de construcción de carreteras [en línea]. Artículo 400 – 07: Disposiciones generales para la ejecución de riegos de imprimación, liga y curado, tratamientos

superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas asfálticas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos”. Bogotá D.C.: El Instituto, 2007.

[15] L. R. Vásquez, Perfil y propiedades. “Método Marshall para el Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente”. Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 2015.

[16] Ministerio de Minas y Energía – Ministerio del Medio Ambiente, “Guía minero ambiental de explotación”. Bogotá D. C.: Ministerio de Minas y Energía – Ministerio del Medio Ambiente, s. f.

[17] D. Metaute & D. Casas, “Desarrollo de una mezcla asfáltica utilizando residuos plásticos”, Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería, Universidad Eafit, Medellín, 2009.